

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Instituto de Recursos Naturais – IRN

Projeto Final de Graduação da Engenharia
Hídrica

Aluno: Renato Braga Zanca

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças
Braga da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Helcio Francisco Villa
Nova

Itajubá, 21 de Outubro de 2013

RENATO BRAGA ZANCA

Modelagem e simulação computacional de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando CFD

Trabalho de Diploma apresentado ao Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva.

Co-Orientador: Prof. Dr. Helcio Francisco Villa Nova.

Itajubá
2013

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Renato Donizeti Zanca e Carmen Sylvia Testa Braga Zanca e a minha irmã Mariana Braga Zanca, pelo incentivo e apoio aos estudos. Aos meus professores da Engenharia Hídrica e aos amigos da República Alambique.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Helcio Francisco Villa Nova pela colaboração para realização deste trabalho, pois sem sua ajuda, ele não seria possível.

Ao prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva pela disposição, paciência e orientação para realização deste trabalho.

Aos meus amigos Thiago, da Engenharia Mecânica e Ulysses, da Engenharia de Produção pela ajuda concedida neste trabalho.

Aos meu pais que sempre acreditaram e contribuíram na minha formação acadêmica e pessoal.

A minha namorada Nathalia, pela paciência e incentivo.

Aos meu amigos da República Alambique, Dirbs, Dodo, Batata, Piranhão, Pancada, Guizon, Adriano, Guizin, Pedro, Ganso, Preto, Galisteu, Trank, Biruzin, Brunão, Kit Net, Estrela, Dimmy, Josselin e Gorfo, pelo incentivo e pela amizade de muitos anos.

RESUMO

ZANCA, R. B. **Modelagem e simulação computacional de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando CFD**. Itajubá, Monografia (Graduação). Universidade Federal de Itajubá, 2013. 80p

Tecnologias de simulação computacional, como o software utilizado neste projeto, é a forma mais eficaz de se estudar o comportamento de um fluido, pois nos permite analisar resultados pontualmente, permitindo a correlação e melhoria do projeto, antes mesmo da construção de um protótipo. O presente trabalho busca além de validar, através de um estudo de um modelo de irrigação por gotejamento, o comportamento hidráulico do fluido dentro do gotejador quando comparado ao protótipo de um fabricante, também realizar um estudo mais aprofundado do software para uma análise de um sistema bifásico para que se visualize o processo de formação de gotas através de um regime transiente. Através da dinâmica computacional dos fluidos os resultados para gradiente de velocidades e pressão puderam ser analisados e estudados e dessa maneira puderam ser comparados com os valores fornecidos pelo fabricante. Os resultados obtidos ao final deste trabalho foram considerados significativos e coerentes, e, também, pode-se observar a formação da gota através do sistema bifásico através de animações em 2D e 3D.

Palavra chave: irrigação, gotejador, dinâmica dos fluidos (CFD) CFX v.13, sistema bifásico, regime transiente.

ABSTRACT

ZANCA, R.B. **Computer modeling and simulation of a drip irrigation system using CFD**. Itajubá, Monograph (Graduation). Federal University of Itajubá, 2013. 80p.

Computer simulation technologies, such as the software used in this project, is the most effective way to study a fluid behavior, as it allows to analyze on time results, allowing for correlation and improvement project, even before building a prototype. This study aims to validate, through a study of a drip irrigation model, the hydraulic behavior of the fluid inside the dripper when compared to the manufacturer prototype, also perform a further study of the software for a biphasic system analysis to provide a droplet process view formation by an unsteady-state. Through computational fluid dynamics, results for the velocity and pressure gradient could be studied and analyzed, and could be compared to the values provided by the manufacturer. The results obtained at the end of this study were considered significant and consistent, and also can be observed through 2D and 3D animation, a drop formation by a biphasic system.

Keywords: irrigation, drip emitter, computational fluid dynamics (CFD) CFX v13, biphasic system, unsteady-state.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissor por gotejamento in-line e os modelos sólidos em 3D	14
Figura 2 - Condições de contorno para análises em CFD	15
Figura 3 - Simulação das saídas para o design original	16
Figura 4 - Fluxograma básico do desenvolvimento do trabalho	17
Figura 5 - Geometria do Gotejador (arestas)	23
Figura 6 - Medidas da Geometria do Gotejador	23
Figura 7 - Medidas da Geometria do Gotejador	24
Figura 8 - Geometria Gotejador (superfícies)	24
Figura 9 - Geometria gotejador (caminho hidráulico)	25
Figura 10 - Informações da malha gerada	26
Figura 11 - Malha gerada do sólido	26
Figura 12 - Malha gerada detalhada com nomenclatura de entradas de água	27
Figura 13 - Malha detalhada do caminho hidráulico	27
Figura 14 - Regiões que exigem uma malha mais refinada	28
Figura 15 - CFX Pré (Tubulação do Gotejador)	29
Figura 16 - CFX Pré (Condições de contorno da tubulação do gotejador)	30
Figura 17 - CFX Pré (Entrada de água no gotejador)	30
Figura 18 - CFX Pré (condições de contorno para entrada de água)	31
Figura 19 - CFX Pré (saída de água da tubulação do gotejador)	31
Figura 20 - CFX Pré (condições de contorno "saída de água da tubulação")	32
Figura 21 - CFX Pré (saída de água do gotejador)	32
Figura 22 - CFX Pré (condição de contorno saída de água do gotejador)	33
Figura 23 - Modelo do gotejador utilizado como parâmetro	34
Figura 24 - Gráfico do erro residual pelo número de iterações	38
Figura 25 - Plano 1 (eixo XZ)	41
Figura 26 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 1.	42
Figura 27 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 1	43
Figura 28 - Vetores de velocidade ao longo do plano 1	44
Figura 29 - Vetores de velocidade no plano 1 com zoom na entrada	44
Figura 30 - Plano 2 (eixo YZ)	45
Figura 31 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 2	46
Figura 32 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 2	47
Figura 33 - Vetor velocidade no plano 2	48
Figura 34 - Vetor velocidade plano 2 com zoom nas saídas do gotejador	48
Figura 35 - Plano 3 (eixo XY) inserido na passagem de água	49
Figura 36 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 3	50
Figura 37 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 3	50
Figura 38 - Plano 4 (eixo XY) inserido na saída do gotejador	51
Figura 39 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 4	51
Figura 40 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 4	52
Figura 41 - Velocidade do fluxo no plano 4	53
Figura 42 - Gotejador reduzido com saída ampliada	54
Figura 43 - Condição de contorno 1 (entrada gotejador)	55
Figura 44 - Condição de contorno 2 (parede lateral da saída do gotejador)	55

Figura 45 - Condição de contorno 3 (parede superior da saída do gotejador)	56
Figura 46 - Condição de contorno 4 (parede inferior da saída do gotejador)	56
Figura 47 - Definição do fluido 1 (água)	57
Figura 48 - Definição do fluido 2 (ar a 25°C)	57
Figura 49 - Coeficiente de tensão superficial da água	58
Figura 50 - Fração água/ar para domínio 1	58
Figura 51 - Condições de contorno para o domínio 2 (parede lateral)	59
Figura 52 - solver realizado com 100 iterações	60
Figura 53 - Resultado com 100 iterações importado para o CFX-Post	61
Figura 54 - Velocidade e Pressão analisadas no processo com 400 iterações	62
Figura 55 - Plano criado no eixo XY na saída do gotejador	63
Figura 56 - CFX-Post com 400 iterações	63
Figura 57 - Velocidade do fluxo de água no plano XY (saída do gotejador)	64
Figura 58 - Condição de contorno para regime transiente	66
Figura 59 - Região de contorno com porcentagem de água para plano YZ	67
Figura 60 - animação passo a passo em 2D	68
Figura 61 - reprodução passo a passo da simulação para regime transiente	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos projetos de irrigação pelo método e dimensão da área irrigada	11
Tabela 2 - Expoentes x segundo a categoria do gotejador	35

LISTA DE SIMBOLOS

m – metros.

cm – centímetros.

mm – milímetros.

m/s – metros por segundo.

m² – metros quadrados.

m²/s – metros quadrados por segundo.

m/s² – metros por segundo ao quadrado.

m³/s – metros cúbicos por segundo.

L/s – litros por segundo.

Pa – Pascal.

mca – metro de coluna d'água.

atm – atmosfera.

°C – graus Celsius.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Hidráulica Experimental	5
3.2	Equações Representantes da Dinâmica dos Fluidos	6
3.3	Irrigação no Contexto dos Recursos Hídricos	9
3.4	Crescimento da Irrigação Localizada	10
3.5	Vantagens do Sistema de Irrigação Localizada	11
3.6	Desvantagens do Sistema de Irrigação Localizada	12
3.7	Simulação Computacional Aplicado a Sistemas de Irrigação	13
4	METODOLOGIA	17
5	MODELAGEM NUMERICA	19
5.1	Descrição do CFD	19
5.2	Descrição do Modelo do Gotejador	22
5.3	Descrição da Geometria do Gotejador	23
5.4	Descrição da Malha	25
5.6	Descrição das Condições de Contorno	28
5.7	Descrição das Condições de Cálculo	35
6	CÁLCULOS E RESULTADOS	39
6.1	CFD	39
6.1.1	Modelo Completo do Gotejador	41
6.1.2	Modelo Reduzido do Gotejador	54
6.1.3	Modelo Reduzido do Gotejador com Regime Transiente	66
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é uma técnica que se confunde com a evolução dos povos. Grandes civilizações se desenvolveram em função do sucesso da agricultura irrigada. Com o aumento da demanda de água e utilização inadequada dos recursos hídricos pelas atividades humanas, é crescente a busca por métodos mais eficientes, que reduzam os desperdícios e mantenham a qualidade e a produtividade das culturas. (BERNARDO et al., 2002).

Irrigação ainda pode ser definida como um fornecimento de água por meios artificiais sendo necessário durante o crescimento das plantas em produções agrícolas, quando não encontramos água de chuva natural suficiente para demanda. (Iskan et al., 2007).

Desta forma, a irrigação por gotejamento tem ganhado espaço, principalmente nos últimos 15 anos. Este sistema aplica água em apenas parte da área, reduzindo, assim, a superfície do solo que fica molhada, exposta às perdas por evaporação. Com isso, a eficiência de aplicação é bem maior e o consumo de água menor. A irrigação localizada é usada, em geral, sob a forma de sistema fixo, ou seja, o sistema é constituído de tantas linhas laterais quantas forem necessárias para suprir toda a área, isto é, não há movimentação das linhas laterais. Porém, somente determinado número de linhas laterais deve funcionar por vez, a fim de minimizar a capacidade do cabeçal de controle. (BERNARDO et al., 2002).

Vários tipos de gotejadores têm sido utilizados para sistemas de irrigação localizada. Um dos gotejadores mais utilizados é o do tipo "in line", o qual é um componente chave do sistema de irrigação localizada. (Wang et al. 2006, Wei et al. 2006a,b, Zhao et al. 2009). Tipicamente, materiais de polietileno com alta ou baixa densidade são utilizados para produção de gotejadores. No sistema, o fluido (geralmente água) é liberado pelos emissores com uma energia muito baixa, de maneira que o água escorre muito lentamente sobre o solo. (Palau-Salvador et al. 2004). Para baixas taxas de descargas e alta uniformidade irrigada, a grande parte dos emissores comercializados adota o sistema de caminho hidráulico por labirinto com uma seção de fluxo muito baixa (normalmente menor que 1mm^2) (Wei et al. 2008).

Assim, de acordo com a estrutura do emissor, a necessidade de determinar a relação entre fluxo de água e ponto ótimo de pressão nas linhas laterais é muito importante (Zhao et al. 2009).

Atualmente, computadores e softwares, os quais são utilizados para desenvolvimento de produtos, estão obtendo espaço nos projetos de equipamentos agrícolas. Na área de design de produtos, algumas dessas aplicações são modelos sólidos em 3D e métodos de simulação numérica. Projetistas podem simular e determinar parâmetros ótimos de seus projetos computacionalmente utilizando aplicações de engenharia. Este procedimento pode ser muito útil para evitar a perda de tempo e diminuir os custos de design do produto e desenvolvimento de processos. Além disso, tecnologia de rápida prototipagem e fabricação (RP&F) tem sido utilizada para avaliar rapidamente projetos de produtos desde a década de 90. RP&F pode transformar um conceito de design em um modelo de produto automaticamente, rapidamente e com precisão e as partes funcionais podem ser fabricadas diretamente utilizando a tecnologia de RP&F (Wei et al. 2003a).

Esta tecnologia também pode ser utilizada para o desenvolvimento de processos de gotejadores para sistemas de irrigação localizada (Wei et al. 2004).

Segundo Warsi² (1993 apud Jantim Neto, 2007), a fluidodinâmica computacional começou a assumir um papel mais proeminente em meados dos anos de 1970. Vários métodos contribuíram para consolidar o CFD nas indústrias, especialmente no campo da aeronáutica. Tais métodos consistiam na solução de equações de Euler, Navier-Stokes e problemas aerodinâmicos.

Wendt et. al (1995) A metodologia CFD utiliza um esquema numérico baseado no Método dos Volumes Finitos, que consiste na discretização do domínio em inúmeros volumes de controle, sobre os quais serão realizados balanços de massa, quantidade de movimento e energia a partir da solução de equações diferenciais parciais, para a predição quantitativa das características hidráulicas dos escoamentos.

Os princípios básicos da modelagem matemática de escoamentos de fluidos podem ser expressos em termos das equações matemáticas, no qual a maioria das suas formas gerais são usualmente equações diferenciais parciais. Existem alguns programas de fluidodinâmica computacional (CFD) que podem

auxiliar as simulações. Dentre estes softwares de pode-se destacar alguns disponíveis no mercado.

Os modelos computacionais são importantes ferramentas para simulação de processos hidráulicos em tubulações forçadas, pois conseguem avaliar diversas situações de escoamento diante das mais variadas condições de contorno.

Existem várias ferramentas computacionais que utilizam o CFD, como ANSYS CFX, FLUENT, STAR-CD, FLOW-3D, entre outras.

A importância da simulação computacional reside no fato de haver dificuldades ao reproduzir fenômenos em certos experimentos laboratoriais. Nesse sentido, nem sempre é possível simular em laboratório físico fenômenos que envolvem escoamentos em projetos ou em protótipos, cujas escalas passam a ser fator limitante. Outra vantagem da simulação computacional é permitir a visualização tridimensional do escoamento, facilitando o conhecimento pleno das características do movimento do fluido. A ferramenta de CFD contribui com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos e produtos. A aplicação de dinâmica de fluidos computacional (CFD) no setor agrícola está se tornando cada vez mais importante. Ao longo dos anos, a versatilidade, precisão e eficiência de uso oferecida pelo CFD levou à sua maior aceitação pela comunidade de engenharia agrícola.

2 OBJETIVO

Simular o comportamento hidráulico de um sistema de irrigação por gotejamento.

Neste trabalho buscar-se-á modelar o escoamento interno nos canais do gotejador para a formação de gotas.

A modelagem a ser empregada baseia-se na discretização por volumes finitos das equações de Navier-Stokes nos diversos regimes possíveis encontrados em gotejadores.

Para este trabalho buscar-se-á obter resultados adimensionalizados que permitam a exploração para diversos tamanhos e dimensões dos gotejadores.

Esta análise será feita empregando-se um software comercial de dinâmica dos fluidos computacional (ANSYS 13.0), disponível na universidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão serão discutidos os principais tópicos relacionados ao tema do trabalho, desde a base teórica de hidráulica, mecânica dos fluidos e considerações sobre irrigação, até mesmo uma base teórica computacional através do CFD desenvolvendo simulações para uma agilidade nos resultados do trabalho.

3.1 *Hidráulica Experimental*

A importância da Hidráulica Experimental é dada na citação de Leonardo da Vinci, apresentado no livro de Hidráulica básica de Rodrigo de Melo Porto (2004):

“Se trata de água, verifique primeiro a experiência, depois a teoria”.

Vasconcelos (2007) retrata em seu trabalho a importância de obter medições, em estudos experimentais, mais acuradas e com o devido grau de precisão requerido pelo estudo. Por esse motivo, eliminar os erros sistemáticos que se dão através das limitações do equipamento ou incoerência no momento das medições, é de extrema importância sendo assim os experimentos devem ser realizados com extrema atenção para que a ocorrência desses erros seja reduzida.

Os estudos em modelos de estruturas e máquinas hidráulicas, os chamados protótipos, fornecem subsídios a um projeto, permitindo uma observação visual do escoamento e a obtenção de alguns dados numéricos, como, aferição de vertedores, profundidades de escoamentos, distribuições de velocidades, esforços em comportas, rendimentos e vazões de bombas e turbinas, distribuições de pressões e perdas (Streeter, 1982). Streeter também comenta sobre a importância da semelhança dinâmica entre modelo e protótipo, para obter dados quantitativos precisos, que requer semelhança geométrica e igualdade das pressões dinâmicas em pontos considerados correspondentes entre o modelo e o protótipo. Para haver semelhança dinâmica completa, os números de Mach, Reynolds, Froude e Weber devem assumir os mesmos valores tanto no modelo como no protótipo. A observância rigorosa destas

condições é geralmente impossível, exceto em escala 1:1; em muitas situações, somente dois parâmetros são da mesma ordem de grandeza.

O Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) de Furnas reproduz em escala reduzida as condições naturais dos locais das usinas hidrelétricas e simula o funcionamento das estruturas hidráulicas, objetivando o aumento da eficiência, economia e segurança (FURNAS, 2007).

Arruda (2004) estudou o efeito do controle de vazões em sistemas de aquecimento solar de água em instalações com grande número de coletores. Utilizando um modelo, ele testou experimentalmente e concluiu que os resultados apresentaram uma significativa melhora na eficiência.

Souza (2006) estudou experimentalmente o transporte de sedimentos em reservatórios, verificando através de uma armadilha de sedimentos construída em laboratório, as taxas de sedimentação e sua distribuição não-uniforme em reservatórios. Ele concluiu que é proporcionado diferentes configurações de vazão nos canais afluentes, descarga de sedimento e abertura do vertedor através de pesquisas de transporte de sedimentos e assoreamento de reservatórios auxiliada pela armadilha.

3.2 Equações representantes da dinâmica dos fluidos

Segundo Maliska (2004), a simulação numérica resolve problemas complexos com condições de contorno gerais, definidos em geometrias também complexas e apresentam resultados com uma rapidez muito grande.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (1995) a solução numérica de problemas envolvendo escoamento de fluidos se baseia nas equações fundamentais da dinâmica dos fluidos:

- Conservação da massa;
- Conservação da quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton);
- Conservação da energia (Primeira Lei da Termodinâmica).

De acordo com Hirsch¹ (1994 apud Jantim Neto, 2007), esses modelos de equacionamento são conhecidos como "Equações de Navier-Stokes",

apresentados a seguir, partindo-se da aplicação da Segunda Lei de Newton a um elemento infinitesimal de volume de um fluido real, obtêm-se as forças de tensão normal, forças de tensão tangencial e as forças de campo. A somatória dessas forças nas direções x, y e z é dada pela Equação 3.1:

$$\sum \vec{F} = m(V_x \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}) \quad (\text{Equação 3.1})$$

Utilizando os operadores do cálculo vetorial, é possível decompor a Equação vetorial 3.1 em três equações na forma diferencial, uma para cada direção coordenada:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho B_x = \rho(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial t}) \quad (\text{Equação 3.2})$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho B_y = \rho(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_y}{\partial t}) \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho B_z = \rho(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial t}) \quad (\text{Equação 3.4})$$

Em que a razão da tensão normal aplicada ao elemento infinitesimal de volume é:

$$Ft_{normal} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx dy dz \quad (\text{Equação 3.5})$$

E a componente das forças em razão da tensão tangencial é:

$$Ft_{tan\ gencial} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dx dy dz \quad (\text{Equação 3.6})$$

¹HIRSCH, C. Numerical Computation of Internal and External Flows. vol. 2. Editora Johon Wiley & Sons Ltda. England, 1994. 691 p.

$$F_{t_{\text{tan}_{\text{gencial}}}} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dx dy dz \quad (\text{Equação 3.7})$$

E a componente da força total em razão da ação do campo no elemento de volume é:

$$F_{\text{campo}} = \rho B_x dx dy dz \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde B_x é a componente do campo considerado na direção x de um plano de coordenadas em três dimensões e ρ a massa específica do fluido em estudo. Após manipulação algébrica, obtém-se a forma final da equação de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{\vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = \rho B \cdot \vec{e}_B - \vec{\nabla} p + \frac{\mu}{3} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} \quad (\text{Equação 3.9})$$

A Equação 3.9 é uma expressão geral para a descrição do movimento dos fluidos. Para representar os escoamentos incompressíveis, a Equação 3.9 pode ser restringida com o auxílio da equação da continuidade, o que conduz à Equação 3.10.

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = \rho B \cdot \vec{e}_B - \vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} \quad (\text{Equação 3.10})$$

As equações de Navier Stokes são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos. São equações a derivadas parciais que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão.

Segundo Warsi² (1993 apud Jantim Neto, 2007), as equações de conservação da massa (3.11), conservação do movimento (3.12) e da conservação da energia (3.13), denominadas "Equações de Euler", são:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (\text{Equação 3.11})$$

²WARSI, Z.U.A. Fluid Dynamics. Theoretical and Computational Approaches. CRC Press. Florida, 1993.683 p.

$$\rho \left[\frac{\partial \mu}{\partial \tau} + \nabla \left(\frac{1}{2} |\mu|^2 \right) + \omega \chi \mu \right] = \rho (-\nabla x) - \nabla p \quad (\text{Equação 3.12})$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{2} |\mu|^2 + e + \frac{p}{\rho} + \chi \right] = \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad (\text{Equação 3.13})$$

Os métodos do CFD estão preocupados com a solução de equações de movimento do fluido, bem como com a interação do fluido com órgãos sólidos. As equações de movimento de um fluido não viscoso (equações de Euler) e do fluido viscoso (equações de Navier-Stokes), as equações governantes (Blazek, 2001).

3.3 Irrigação no Contexto dos Recursos Hídricos

Essencial à vida, a água, recurso finito de valor inestimável, é um elemento necessário a diversas atividades humanas, como geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, navegação, recreação, turismo, aquicultura, piscicultura, pesca, assimilação e condução de esgoto, etc, tendo sua disponibilidade diminuída, gradativamente nos últimos tempos, devido ao crescimento populacional, à expansão das fronteiras agrícolas e à degradação do meio ambiente (Lima et al, 1999).

A previsão para o ano de 2000, segundo Christofidis (2000a), mostrava a agricultura como responsável pela maior parcela do uso consumptivo de água no mundo com 70%, seguido pelo setor industrial com 22% e pelo consumo urbano com 8% do total consumido. Em relação ao Brasil, a divisão setorial do consumo consumptivo ficaria da seguinte forma: agrícola (61,2%), urbano (20,8%) e industrial (18%).

A agricultura irrigada é a principal responsável pelo consumo consumptivo da água dentro do setor agrícola, porém é uma técnica eficaz no aumento da produção de alimentos (Lima et al, 1999). Atualmente, estima-se que 55% da água destinada à irrigação perde-se antes de atingir a zona radicular das culturas, devido às baixas eficiências na condução (15%), distribuição (15%) e aplicação (25%) dos sistemas. Portanto, é aconselhado que se dê preferência por sistemas pressurizados de irrigação que utilizem a água de forma mais eficiente, como a irrigação localizada (gotejamento e microaspersão) e pivô central.

3.4 *Crescimento da Irrigação Localizada*

Irrigação localizada, segundo Rodrigo López et al. (1997), pode ser definida como a aplicação de água no solo em uma região restrita do volume radicular da cultura, sendo caracterizada por:

a) Não molhar, em geral, a totalidade do solo, aplicado a água sobre ou sob a superfície do solo;

b) Utilizar pequenas vazões com baixas pressões;

c) Aplicar a água próximo às plantas através de um número variado de pontos de emissão;

d) Ao reduzir o volume de solo molhado e, portanto, sua capacidade de Armazenamento de água, a irrigação é realizada com uma frequência necessária para manter um alto conteúdo de água no solo (irrigação de alta frequência).

A irrigação localizada foi o método com maior crescimento na área irrigada no Brasil entre os períodos de 1996 a 2001, passando de 4,24% para 7,89% (Christofidis, 2002b). Existe uma tendência deste crescimento perdurar, em função dos conflitos entre os diferentes usuários de água, da preocupação ambiental e da cobrança pelo uso da água prevista na Lei das Águas (Lei 9.433 de janeiro de 1997) (Lima et al, 1999), e da maior facilidade de crédito para aquisição de equipamentos e de licenciamento ambiental pelos órgãos competentes.

De acordo com Bonganha (2001), para os projetos já instalados, a legislação define um prazo máximo de dois anos para a regularização junto ao órgão ambiental. Para empreendimentos novos, o órgão licenciador expedirá a licença prévia (LP), licença de instalação (LI) e licença de operação (LO), sendo classificados em categorias (A, B e C) de acordo com a dimensão e o método de irrigação utilizado, conforme a Tabela 1, priorizando os projetos que incorporem equipamentos e métodos mais eficientes, sendo a classificação decrescente em ordem de prioridade de instalação e de facilidade de licenciamento.

Tabela 1 - Classificação dos projetos de irrigação pelo método e dimensão da área irrigada

Método de irrigação	Área (ha)				
	Até 50	50-100	100-500	500-1000	Acima de 1000
Aspersão	A	A	B	C	C
Localizada	A	A	A	B	C
Superficial	A	B	B	C	C

Fonte: Bonganha(2001).

Neste caso, a irrigação localizada leva vantagem em relação aos outros métodos devido à maior eficiência de aplicação de água (variando de 75% a 95% contra 45% a 75% da irrigação por superfície, 60% a 90% da aspersão e 40% a 70% da irrigação por elevação do nível do lençol freático) e à menor demanda energética por operar em baixa pressão (1,0 a 3,5 Kgf cm²) (Christofidis, 2002b).

3.5 *Vantagens do Sistema de Irrigação Localizada*

As principais vantagens e desvantagens do sistema de irrigação localizada, segundo Daker (1983), Bernardo (1995), Vermeiren & Jobling (1997) e Bucks e Davis (1986) são:

- Maior eficiência do uso da água: permite melhor controle da lâmina aplicada, diminui as perdas por evaporação, por percolação ou por escoamento superficial, não irriga entre as linhas de plantio e não provoca perdas por deriva e por interferência do irrigante.
- Maior produtividade: para culturas que respondem à maior umidade no solo, pois a alta frequência de irrigação é inerente do método.
- Maior eficiência na adubação: permite a fertirrigação e, em razão concentrar o sistema radicular da cultura junto ao bulbo molhado, facilita a aplicação do adubo por cobertura.
- Melhor uso da disponibilidade de água, devido a uma porção restrita do volume do solo ser irrigada, diminuindo a área evaporada, as perdas por escoamento superficial e por percolação profunda, além de não irrigar ervas daninhas e permitir maior eficiência da irrigação; não é afetada pelo vento, pelo tipo de solo e pela interferência do irrigante.

- Redução do perigo da salinidade nas plantas, já que o turno de rega é, em geral, reduzido e o conteúdo de água dentro do bulbo úmido é sempre elevado, mantendo a concentração de sais na periferia do bulbo, afastada da região em que se concentram as raízes das plantas.
- Limitação no crescimento de ervas daninha, pois somente uma parte da superfície do solo é molhada.
- Menor requerimento de energia, acarretando em menores custos com bombeamento de água, devido a baixas pressões de funcionamento do sistema de irrigação localizada.
- Automação: pode-se, por meio de sensores de umidade de solo, medidores de volume e de tempo, iniciar ou finalizar um turno de irrigação automaticamente.

3.6 Desvantagens do Sistema de Irrigação Localizada

- Requerimentos constantes de manutenção. O entupimento-parcial ou total dos emissores representa o mais sério problema encontrado na irrigação localizada, principalmente no gotejamento. O entupimento afeta a uniformidade de aplicação de águas e fertilizantes, aumenta os custos de manutenção e resulta em perdas significativas na produção da cultura, se não for detectado em tempo hábil. Outro problema que pode ocorrer é devido a danos causados por pessoas, animais ou máquinas que transitam pela área.
- Salinização. Se não forem adotadas medidas corretas de manejo de solo e água, os sais acumulados na superfície e na periferia do bulbo úmido podem ser transportados para a zona radicular das plantas com uma chave leve, causando sérios prejuízos às culturas.

- Crescimento restrito das raízes da planta. Como a irrigação localizada fornece água a uma porção concentrada do volume total do solo, o crescimento de raízes fica limitado a esse volume de solo próximo ao emissor ou ao longo da linha lateral. Dessa forma, a estabilidade da planta no solo pode ficar prejudicada e ocorrer queda da planta em locais com incidência de ventos fortes.
- Alto custo inicial do sistema, já que o método requer a compra de toda a rede de tubulações e emissores, além dos equipamentos para filtragem, automação e bombeamento.
- Controle atmosféricos: a irrigação localizada não permite proteger as culturas do frio e das geadas;

3.7 Simulação Computacional Aplicado a Sistemas de Irrigação

Utilizando protótipos e simulação de escoamentos em equipamentos de irrigação, um estudo foi feito envolvendo emissores de gotejamento, na Turquia e Reino Unido.

Segundo H. Kursat Celik, Davut Karayel, Nuri Caglayan, Allan E.W. Rennie & Ibrahim Akinci (2011), nesse estudo um modelo em 3D obtido através de um exemplo de um emissor de irrigação em agriculturas foi criado e o comportamento do fluxo foi simulado em canais em forma de labirinto. Baseado no design original a geometria do canal foi modificada e o emissor refabricado. O comportamento do fluxo é então investigado novamente baseado no novo formato da geometria do canal em forma de labirinto. A pressão ótima no duto foi validada experimentalmente tanto pelo design original como pelo design modificado.

Computadores e softwares de hoje em dia que são utilizados para desenvolvimento de produtos, estão sendo empregados para design de equipamentos agrícolas. Designers podem simular e determinar ótimos parâmetros através do computador com complementos de aplicação de engenharia. Esta pesquisa que foi feita, pode ser muito útil para evitar perda de tempo e diminuir o custo do design dos produtos e desenvolver o processo.

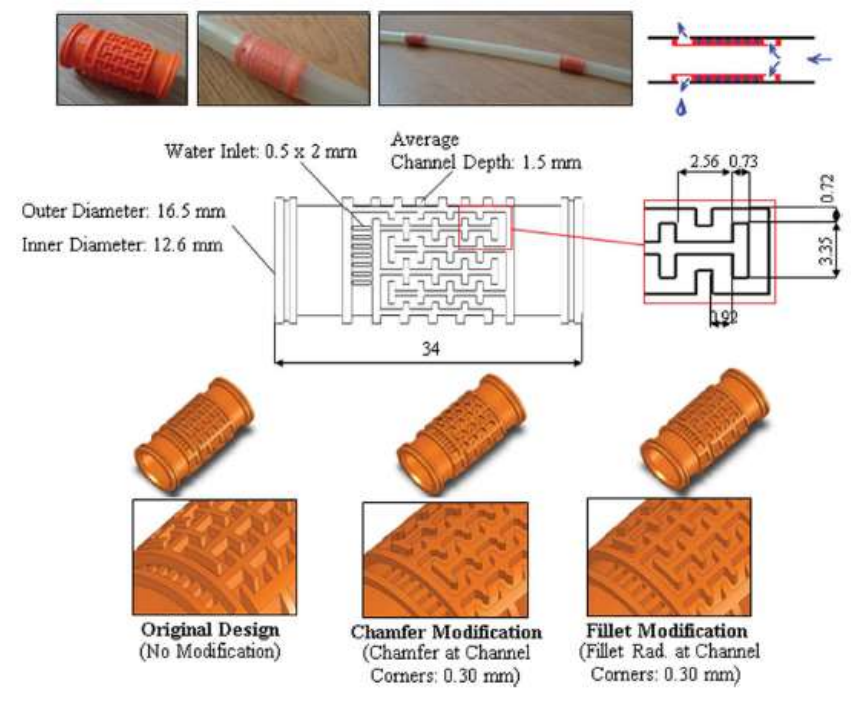


Figura 1 - Emissor por gotejamento in-line e os modelos sólidos em 3D

Fonte: Segundo H. Kursat Celik, Davut Karayel, Nuri Caglayan, Allan E.W. Rennie & Ibrahim Akinci (2011)

O software Solidworks Flow Simulation foi utilizado para simular o comportamento do escoamento dentro dos canais do emissor e do duto. Um emissor foi inserido ao tubo e condições de contorno foram definidas para permitir uma taxa de 2 l/h de escoamento nos orifícios dos gotejadores. Valores para pressão e temperatura durante a irrigação por gotejamento foram insignificantes; desta maneira o fluido nos emissores por gotejamento é incompressível. Condições de contorno idênticas foram definidas para todas as três análises dos emissores. Nestas análises, a água foi atribuída como o fluido a ser escoado e viscoso, escoamento incompressível foi assumido para temperatura ambiente de 20°C. A força gravitacional foi considerada para a simulação e a rugosidade foi considerada 0.01mm para a parede do modelo. A função de malha padrão com opções avançadas de refinamento de canal foram aplicadas neste software para estruturas celulares de domínio do fluido. Para a maioria dos escoamentos, é difícil ter uma boa estimativa em relação a turbulência, então é recomendado utilizar os parâmetros padrões do Solidworks Flow Simulation. Turbulência de intensidade 2% e comprimento de turbulência de 0.185mm foram aceitos como parâmetros padrões no software. Todo o cálculo inclui o emissor e o tubo com um volume retangular de 434x18x16.5 mm.

Fluxo de volume de entrada de 2 l/h e pressão ambiental de 101.325kPa foram definidos para a saída no orifício do emissor, o qual tem diâmetro de 2mm.

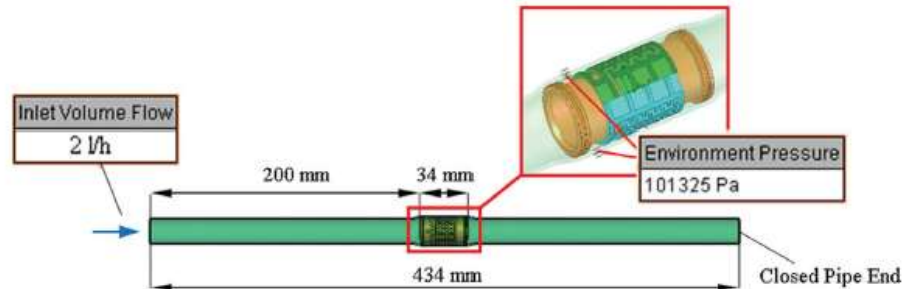


Figura 2 - Condições de contorno para análises em CFD

Fonte: Segundo H. Kursat Celik, Davut Karayel, Nuri Caglayan, Allan E.W. Rennie & Ibrahim Akinci (2011)

De acordo com os resultados da simulação, o efeito da estrutura em forma de labirinto dos emissores sobre a pressão e velocidade é clara. A distribuição de pressão obtida das simulações para os três designs do emissor por gotejamento, mostra que existe uma diferença de pressão em cada um dos três canais de emissão por gotejamento. A geometria dos cantos do canal em forma de labirinto é a principal razão para a perda hidráulica de energia.

Neste artigo, foi chegada a conclusão que a utilização de tecnologias em protótipos para modificar o design e produzir variantes físicas tem provado ser um sucesso, métodos de baixo custo de verificação nas mudanças do design com todas as características geométricas sendo reproduzidas sem problemas significativos. Além disso, os modelos tiveram um desempenho adequado nos experimentos físicos realizados.

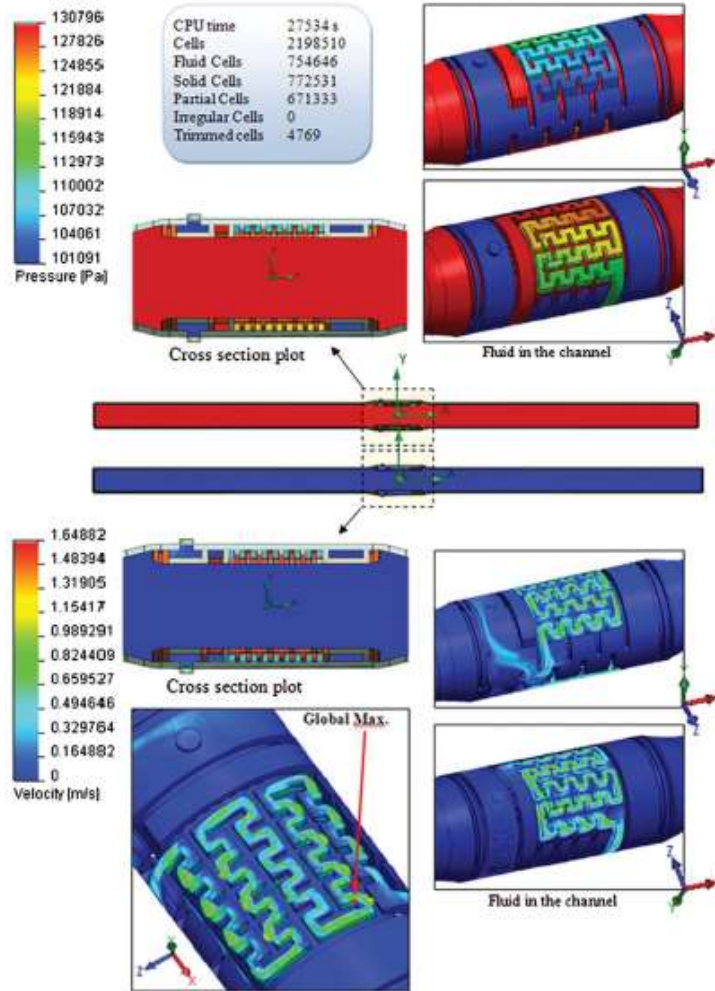


Figura 3 - Simulação das saídas para o design original

Fonte: Segundo H. Kursat Celik, Davut Karayel, Nuri Caglayan, Allan E.W. Rennie & Ibrahim Akinci (2011)

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado e descrito todo o processo desenvolvido no trabalho, bem como os detalhes utilizados para modelagem do problema, utilizando a dinâmica computacional dos fluidos (CFD).

A figura 4 representa um fluxograma com a sequência desenvolvida durante o trabalho, desde etapas teóricas iniciais até a confecção dos resultados finais.

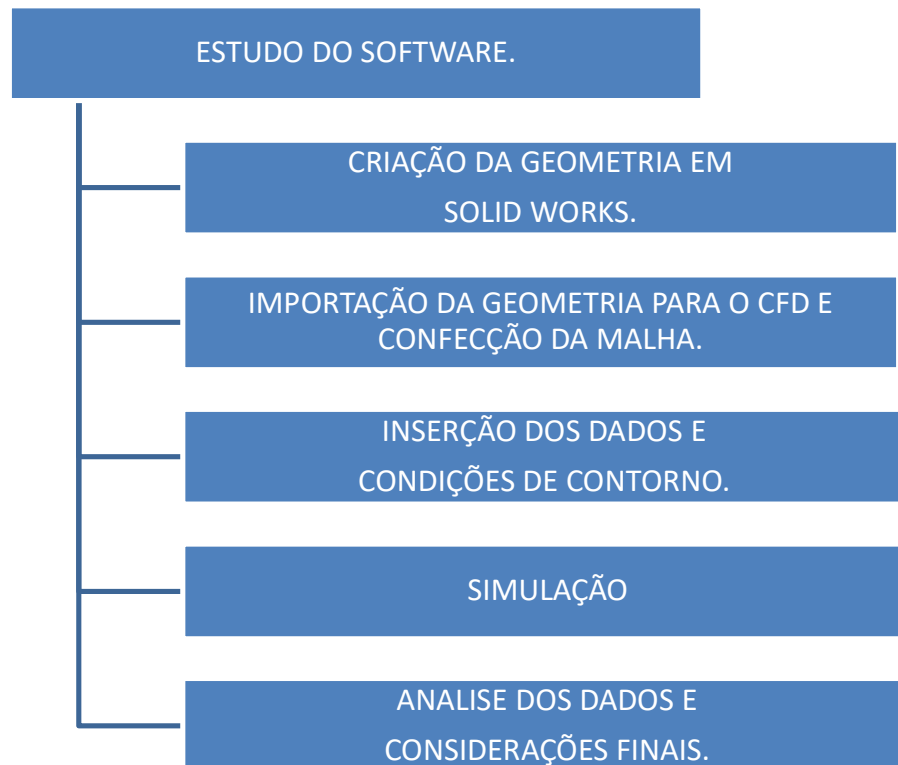


Figura 4 - Fluxograma básico do desenvolvimento do trabalho

De acordo com o fluxograma, as etapas a serem seguidas são descritas abaixo sucintamente:

1. Estudo do Software: Na fase inicial do trabalho, requer um aprofundamento teórico no aprofundamento da ferramenta (já que a mesma sequer é mencionada durante a graduação dos alunos de

engenharia hídrica), para que os resultados obtidos possam ser analisados e interpretados de maneira correta.

2. Criação da geometria em Solid Works: A geometria do produto a ser estudado foi feita em Solid Works, pois este nos oferece uma maior flexibilidade para desenhar e por ser mais simples do que quando feitas no próprio software CFD.
3. Importação da geometria para o CFD e criação da malha: Este mesmo software nos proporciona a opção de importação de geometria do Solid Works, assim como de vários outros softwares. Esta etapa é uma etapa de pré-processamento do software, que recria o espaço físico real no meio virtual, definindo-se também as características diretamente responsáveis pelos cálculos pertinentes ao trabalho, ou seja, a influência da malha;
4. Inserção de dados e condições de contorno: Etapa já incluída ao processamento pelo software, onde são definidas condições de escoamento, para assim os resultados finais serem validados.
5. Simulação: É a etapa mais importante do trabalho, onde é recriado o escoamento em ambiente virtual, sendo calculadas todas as grandezas pertinentes ao escoamento em cada nó da malha criada;
6. Análise dos dados e considerações finais: Os dados obtidos serão utilizados para caracterizar o escoamento em diferentes condições de contorno, de maneira que variáveis físicas são alteradas resultando em diferentes conclusões. Através de gráficos obtidos ao final das simulações, estes são interpretados de maneira que é possível explicar todas as singularidades do escoamento.

5 MODELAGEM NUMERICA

5.1 *Descrição do CFD*

Segundo Wendt (1995), os princípios básicos da modelagem numérica de escoamentos de fluidos podem ser expressos os termos das equações matemáticas, no qual a maioria das suas formas gerais são usualmente equações diferenciais parciais. Dinâmica dos Fluidos Computacional é, em parte, a arte de substituir as equações diferenciais parciais que governam o escoamento de fluido com números, e avançar esses números no espaço e tempo para obter uma descrição numérica final do completo campo de escoamento de interesse. Isto não é uma definição completa do CFD, há mais problemas os quais permitem a imediata solução do campo de escoamento sem avançar no espaço e tempo, e há algumas aplicações que envolvem equações integrais em vez de equações diferenciais parciais. Em algum evento todos esses problemas envolvem a manipulação e a solução dos números.

Segundo Hamill (1996), uma compreensão incompleta do fluxo em bombas industriais pode resultar em projetos ruins ou em operação ineficiente, enquanto que para melhorar o desempenho requer um nível de compreensão completa do projeto que está além do âmbito de estudos experimentais. Ao simular o fluxo ao longo de uma bomba, o CFD apresenta uma imagem completa do seu funcionamento. Com esta informação, os engenheiros podem identificar áreas onde há recirculação, descolamento do escoamento ou onde irá ocorrer cavitação e, mais importante ainda, estabelecer as suas causas. Esse conhecimento pode então ser usado para direcionar as melhorias no projeto ou estratégias operacionais, que podem por sua vez, serem testadas com o modelo CFD antes de serem implementadas. Desta forma, o projeto pode ser otimizado para dar redução do consumo de energia, menor perda de carga, a minimização da erosão da lâmina, componente de vida útil prolongada e maior flexibilidade do sistema.

Devido aos avanços nos métodos de solução numérica e na tecnologia computacional, casos geometricamente complexos, como aqueles que são frequentemente encontradas em máquinas de fluxo, podem ser tratados. Além disso, uma grande escala de simulações de escoamento pode ser realizada

dentro de poucas horas nos supercomputadores de hoje, mesmo constituídos por redes de dezenas de milhões de células (Blazek, 2001). Esta ferramenta numérica pode ser usada para levar experimentos numéricos a ajudar no estudo das características fundamentais do escoamento.

Triesch e Bohnet (2000) utilizaram a simulação fluida dinâmica para estudar o escoamento de gás através de tubos e difusores, verificando a interação gás-sólido e analisando a velocidade das partículas e sua concentração. Utilizando o programa Fluent, obtiveram bons resultados entre as medidas realizadas experimentalmente e os resultados da simulação.

Modenesi et al (2004) estudaram a dispersão de poluente em rios, analisando a viabilidade de criação de um modelo para minimizar os impactos ambientais. Utilizaram a ferramenta CFD para analisar o modelo tridimensional do rio. O modelo computacional forneceu detalhes importantes sobre a dispersão das partículas, podendo prever o comportamento do poluente ao longo do rio.

Davis e Stewart (2002), estudaram modelos de fluidodinâmica computacional para aplicação no desempenho das válvulas de controle, utilizadas em indústrias. O objetivo da modelagem foi determinar um valor para o coeficiente de vazão da válvula que promovesse o melhor desempenho dessa estrutura. Foram testados modelos experimentais e numéricos a fim de realizar uma comparação. Os autores concluíram que no estudo numérico apresentado, ficou comprovada a grande utilidade da CFD para a análise relativamente complexa em 3-D no estudo de fluxos e desenvolvimento de válvulas de controle.

Nautiyal, et. al. (2010) utilizaram a metodologia CFD para estudar o comportamento de bombas centrifugas operando de modo reversível, como turbinas, pois este método é visto como uma forma alternativa e com boa aplicação em esquemas de micro-potenciais. Segundo os autores, bombas funcionando como turbinas é uma das melhores alternativa para suprir a demanda de energia elétrica em áreas isoladas.

Inoue (2005) menciona que o custo por um programa de CFD é alto, mas não chega a ser maior que o custo de modelo experimental (mão de obra, construção do modelo). Além dessa vantagem há outras relacionadas à capacidade de modelagem:

- Redução substancial no tempo e custo de novos projetos;
- Realização de estudos cujos modelos experimentais são difíceis ou impossíveis de serem realizados;
- Resultados com alto nível de detalhamento e em grandes quantidades sem custo adicional.

Arantes (2007) estudou o escoamento em vertedouros em degraus através da simulação fluido dinâmica e comparou com os resultados obtidos experimentalmente por diversos autores. Simulou algumas configurações geométricas e hidráulicas, analisando e comparando a dissipação de energia, distribuição da velocidade, distribuição da concentração de ar, perfis de pressão do degrau, atrito e um estudo de cavitação. Foi obtida uma boa comparação entre os resultados, podendo assim, validar o seu modelo e sugerir propostas de melhora do desempenho desta estrutura hidráulica.

Segundo Arantes (2007), a utilização da ferramenta CFD pode ser utilizada em projetos de obras hidráulicas para caracterizar o escoamento e para otimizar as características necessárias para a condição de projeto e do planejamento do ensaio em modelo reduzido.

Tomás Norton, Da-Wen Sun, Jim Grant, Richard Fallon e Vincent Dodd (2006), utilizaram a modelagem computacional (CFD) no design de sistemas de ventilação para produções agrícolas. O atual estado simulado em CFD para uma estufa foi definido para apresentar um padrão maior do que os apresentados para alojamentos de animais, devido à incorporação de rotinas definidas pelo usuário que simulam respostas de culturas biológicas em função das condições ambientais locais.

Em criação de animais, o controle do fluxo de ar é necessário para remover umidade e alguns gases, e também para promover abrigo contra baixas temperaturas, chuva e radiação extremas. Isto torna o conhecimento dos princípios que regula a distribuição de variáveis climáticas interiores necessário ao idealizar sistemas de produção ou otimizar o seu desempenho.

5.2 *Descrição do modelo do gotejador*

Segundo H. Pimentel (1994), o gotejamento é um método de irrigação de alta frequência, no qual a água é aplicada em gotas, diretamente sobre a zona radicular da planta, sem necessidade de molhar toda a superfície do terreno. O suprimento de pequenas vazões às zonas radiculares é alcançado mediante dispositivos denominados gotejadores ou emissores, localizados juntos aos pés das plantas.

O abastecimento d'água para os gotejadores se efetua através de um sistema fixo de irrigação pressurizada, composto por uma rede de distribuição, uma estação de bombeamento e um dispositivo de filtragem e controle da água aduzida. Os gotejadores são instalados unidos a linhas de tubulações laterais flexíveis, estendidas sobre o terreno, paralelamente às fileiras das plantas. As linhas laterais, por sua vez, são conectadas às tubulações finais ou terminais da rede de distribuição, que também são conhecidas como tubulações de derivação.

A aplicação de pequenas vazões diretamente sobre a zona radicular da planta faz com que a irrigação por gotejamento possua algumas características peculiares, no que diz respeito à relação entre a água, o solo e a planta.

Os gotejadores podem ser do tipo “on line”, que são os gotejadores acoplados à tubulação de polietileno após perfuração da mesma, o que facilita o posicionamento do emissor sob a copa da planta.

Além disso, existem gotejadores denominados “in line”, que já vêm inseridos na tubulação de polietileno, o que possibilita a formação de uma faixa molhada. Qualquer que seja o tipo, eles podem ser normais ou autorreguláveis (ou autocompensantes: gotejadores cuja vazão varia muito pouco se a pressão variar).

Neste trabalho será utilizado o modelo “in-line”.

5.3 Descrição da geometria do gotejador

A geometria do gotejador em questão para simulação foi optada a partir de um modelo de um fabricante. Todas as características geométricas do modelo escolhido foram reproduzidas para o software Solid Works.

A unidade de medida utilizada para o desenho foi em milímetros.

Desta maneira a geometria foi importada para o CFD.

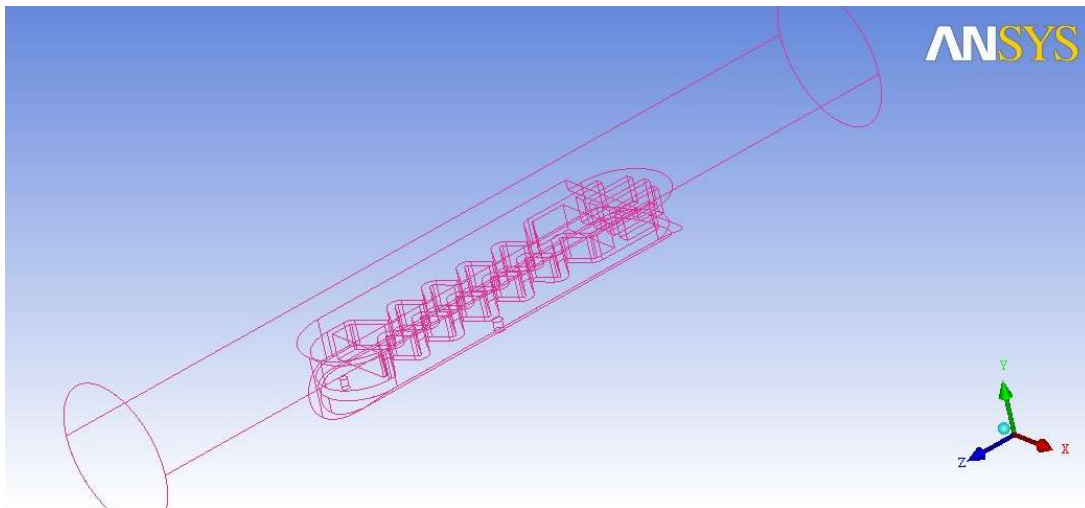


Figura 5 - Geometria do Gotejador (arestas)

Os intervalos (em milímetros) como: diâmetro da tubulação, orifícios para entrada de água no gotejador, curvas do caminho hidráulico, orifício de passagem de água para reservatório e orifício de saída do gotejador estão representados na Figura 6 e 7.

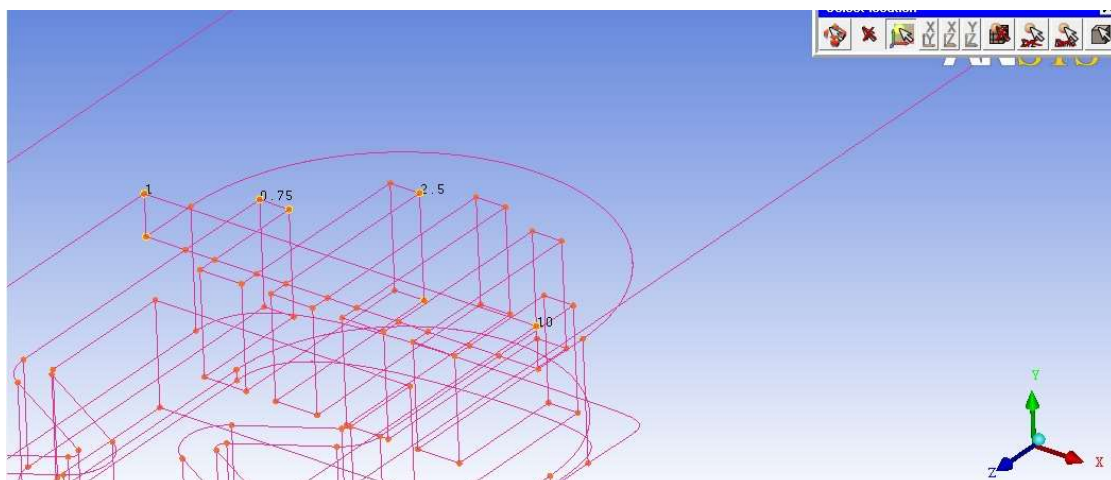


Figura 6 - Medidas da Geometria do Gotejador

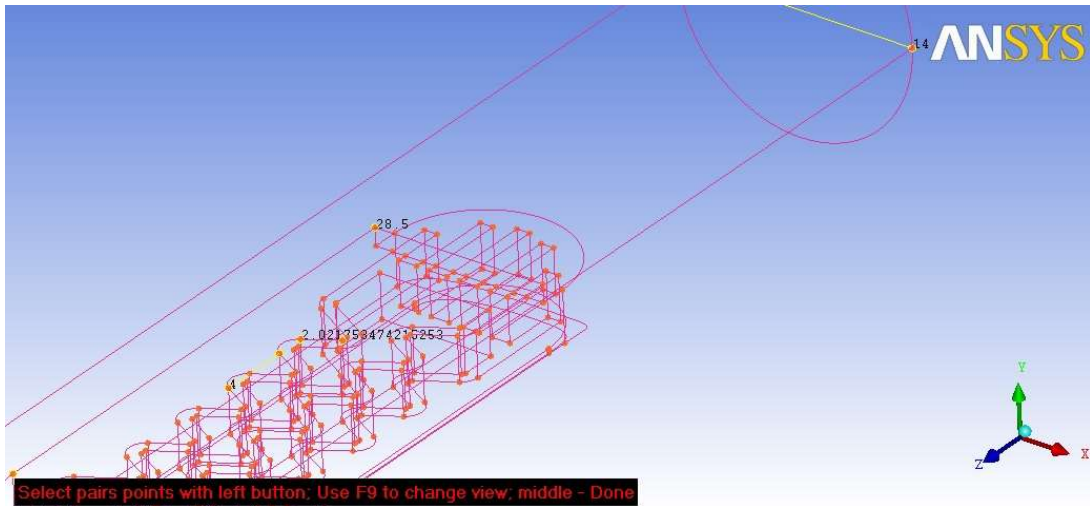


Figura 7 - Medidas da Geometria do Gotejador

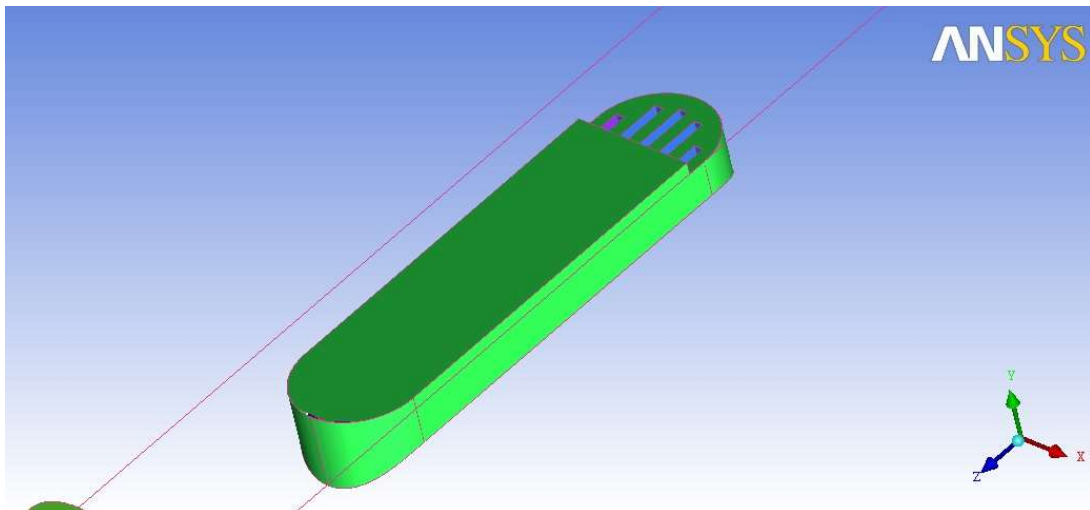


Figura 8 - Geometria Gotejador (superficies)

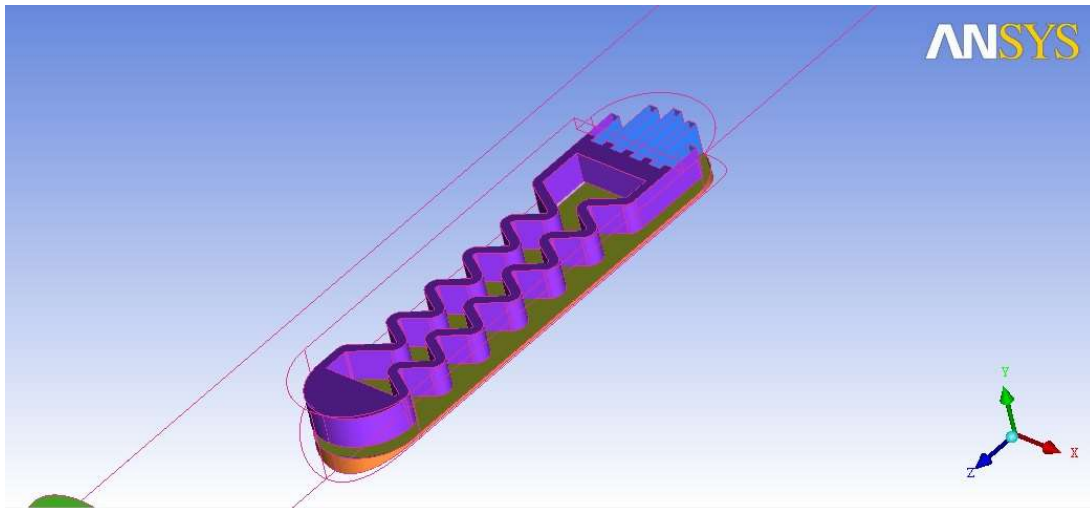


Figura 9 - Geometria gotejador (caminho hidráulico)

5.4 Descrição da Malha

Em métodos numéricos para obter soluções aproximadas de equações diferenciais, tais como o método de elementos finitos e o método de volumes finitos, o domínio do qual estas equações foram definidas é discretizado em subdomínios simples denominados elementos. O conjunto gerado pela união destes elementos, os quais compartilham apenas nós e arestas (e faces, em 3D) com elementos adjacentes, é a representação discreta do domínio contínuo conhecida como malha, diretamente relacionada com a qualidade das soluções. Geralmente, qualquer esquema de solução obtém resultados satisfatórios quando aplicado a malhas de boa qualidade. Entretanto, a utilização de uma malha de má qualidade, mesmo com esquemas de solução precisos, compromete a validação das soluções, Batista (2005).

Usualmente, as malhas são classificadas em três grupos principais: estruturadas, não estruturadas e híbridas. Contudo, não há unanimidade a respeito de uma definição associada a cada grupo. Um modo comum de diferenciá-los é quando é quanto a topologia da vizinhança dos elementos. Com este, malhas estruturadas são caracterizadas por seus nós internos não possuírem número constante de elementos adjacentes, malhas não estruturadas possuem nós internos com número de elementos adjacentes variável e as malhas híbridas, resultado de combinações entre as duas anteriores, não possuem características bem definidas, Batista (2005).

Após a construção do gotejador, o mesmo é importado ao MESH para a criação da malha. Para isso, é necessária a criação de regiões do fluido, regiões sólidas e superfícies com seus respectivos nomes. Estas superfícies com nomenclaturas específicas são importantes para a próxima etapa da simulação.

Para gerar a malha, inicialmente deve-se configurar a mesma, realizando a setagem de número de elementos da malha da superfície de interesse. Quanto mais refinada, melhores os resultados, porém o esforço computacional será maior.

O total de elementos criados, assim como a visualização da malha, são demonstrados nas figuras 10, 11, 12, 13 e 14.

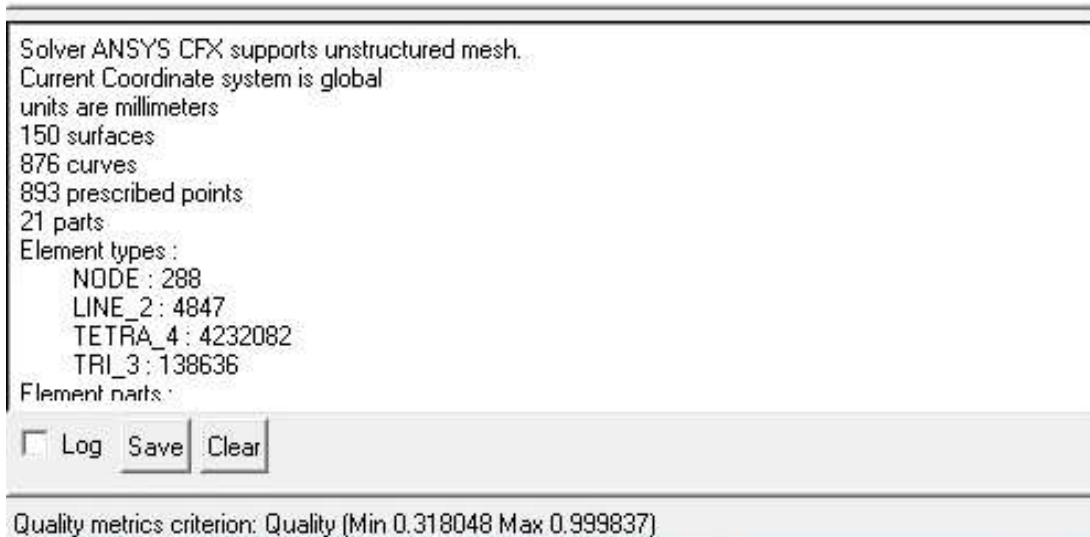


Figura 10 - Informações da malha gerada

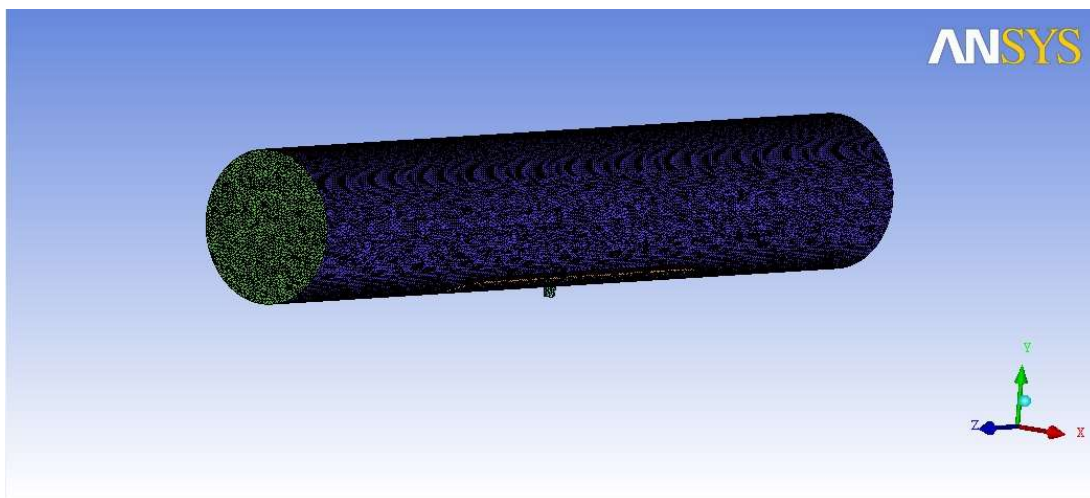


Figura 11 - Malha gerada do sólido

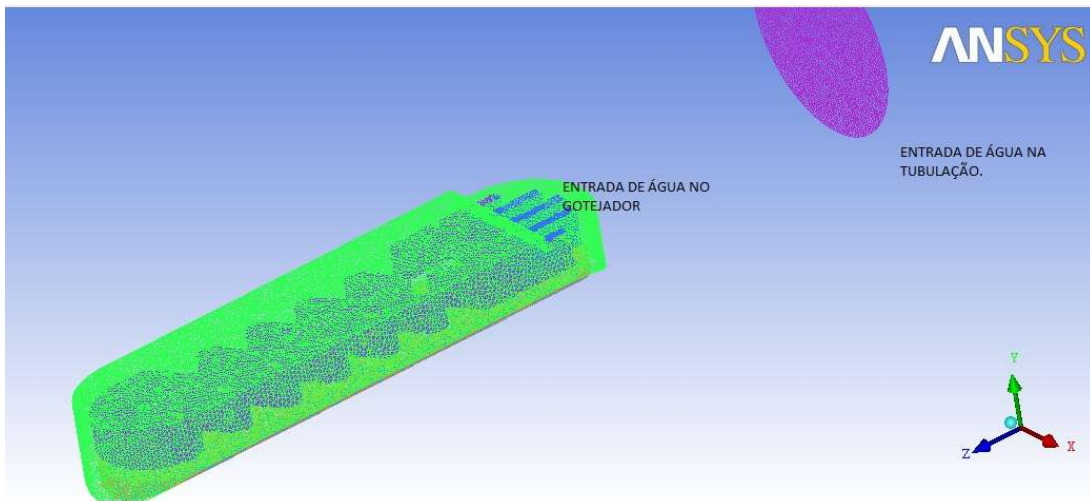


Figura 12 - Malha gerada detalhada com nomenclatura de entradas de água

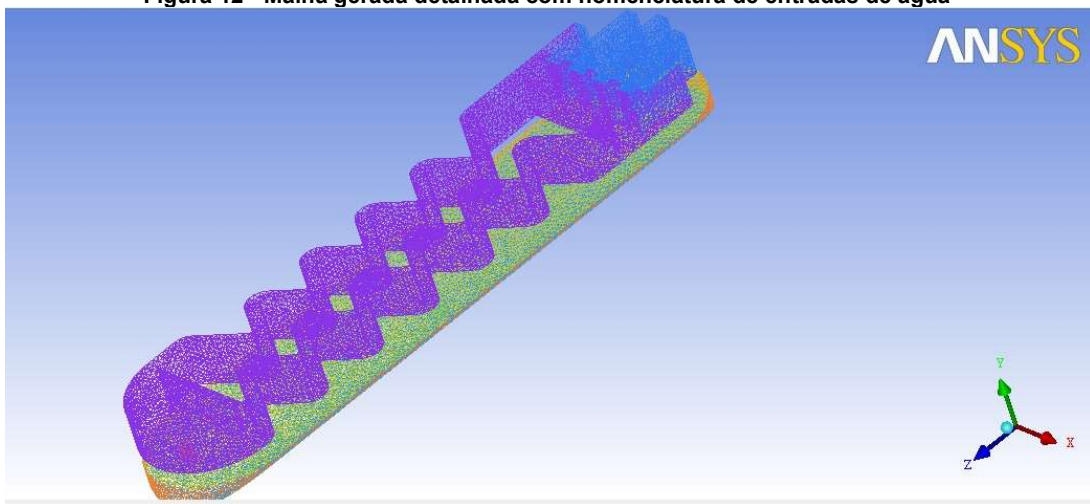


Figura 13 - Malha detalhada do caminho hidráulico

É importante que as regiões de maior interesse devam apresentar uma malha mais refinada, de modo a apresentar uma maior precisão nas mudanças no escoamento. As partes que apresentam mudanças de velocidade devem ser melhor estudadas, já que nessas regiões é que se deseja estudar os fenômenos de campo de pressões, perfil de velocidades, etc. No gotejador estudado essa região de maior interesse são as passagens de água de um nível para outro (entrada de água no gotejador, entrada de água no reservatório inferior, saída de água do gotejador). Na figura 14 estão representadas essas regiões de maior interesse.

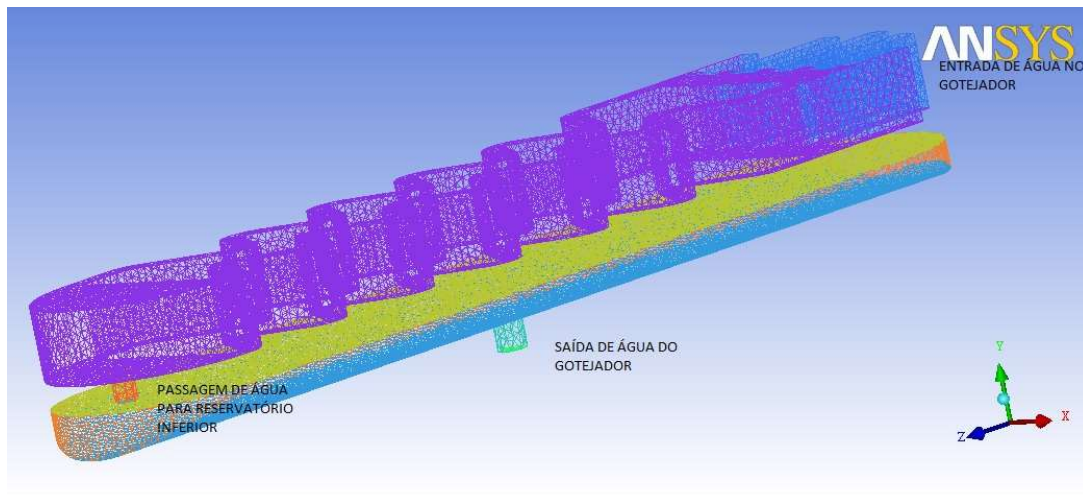


Figura 14 - Regiões que exigem uma malha mais refinada

5.6 Descrição das condições de contorno

Segundo Maliska (2004), as condições de contorno são valores, funções ou expressões iniciais que são impostas em determinados locais do domínio de cálculo, tais como entrada ou saída do escoamento, onde se conhecem por medições ou deduções matemáticas esses valores iniciais.

Através das condições de contorno, o CFD aplica em cada um dos volumes a discretização das equações de conservação e transporta os valores obtidos para o próximo volume. Esse processo é repetido até chegar ao último volume na outra extremidade do modelo e obter a convergência.

Quando se refere ao método dos volumes finitos para a solução de problemas de escoamento, a literatura considera, quase em sua totalidade, escoamentos incompressíveis, fazendo uso dos métodos de acoplamento pressão-velocidade. Para escoamentos compressíveis, onde a massa específica varia significativamente com a pressão, a relação entre a massa específica, pressão e temperatura, dada pela equação de estado, devem ser satisfeitas. Para escoamentos compressíveis internos, em bocais e tubos, por exemplo, as condições de contorno são especificadas de acordo com a natureza do escoamento na entrada e na saída. (Versteeg e Malalasekera et al).

Dependendo do propósito a ser estudado, os tipos de condições de contorno apresentam diferentes definições. Dentre esses tipos, pode-se encontrar:

- Condições de contorno para fluidos:
 - Entrada (inlet): Fluido escoar somente para dentro do domínio;
 - Saída (outlet): Fluido escoar somente para fora do domínio;
 - Aberto (opening): Fluido pode escoar para fora ou para dentro do domínio, simultaneamente;
 - Parede (wall): Contorno impenetrável pelo escoamento;
 - Plano de Simetria (symmetry plane): plano de simetria tanto geométrica como de escoamento.
- Condições de contorno para sólidos:
 - Parede (wall);
 - Plano de simetria (symmetry plane).
- Interface sólido-fluido
- Interface sólido-sólido.

No seguinte trabalho utilizou-se o seguinte esquema:

tubo do gotejador: Representa a tubulação por onde a água percorre.

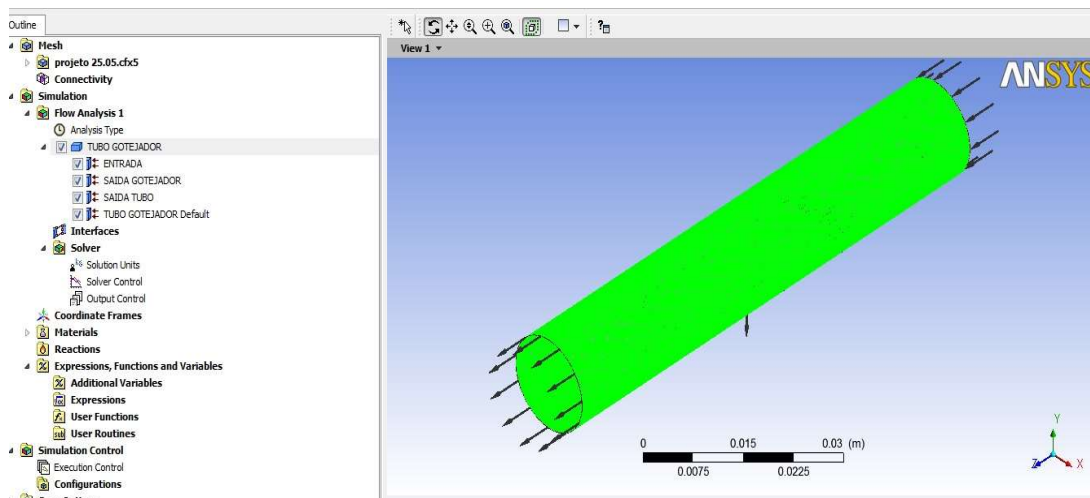


Figura 15 - CFX Pré (Tubulação do Gotejador)

Para o domínio “Tubo Gotejador” a condição “wall” foi aplicada.

As condições de contorno para massa e momento foram definidas como “sem parede deslizante”. Já as condições para a parede do gotejador foi definida como “parede lisa”.

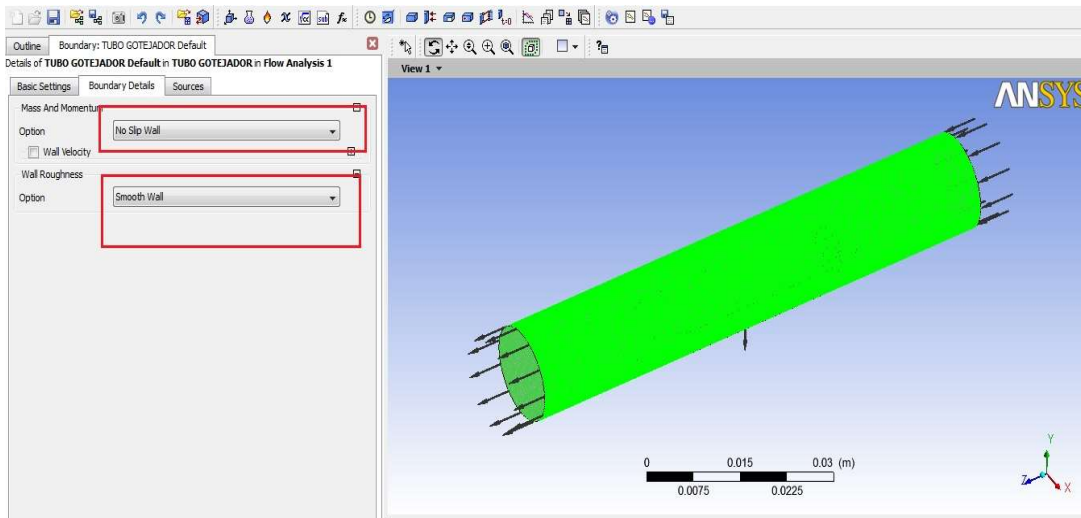


Figura 16 - CFX Pré (Condições de contorno da tubulação do gotejador)

Entrada: Representa a entrada de água no gotejador.

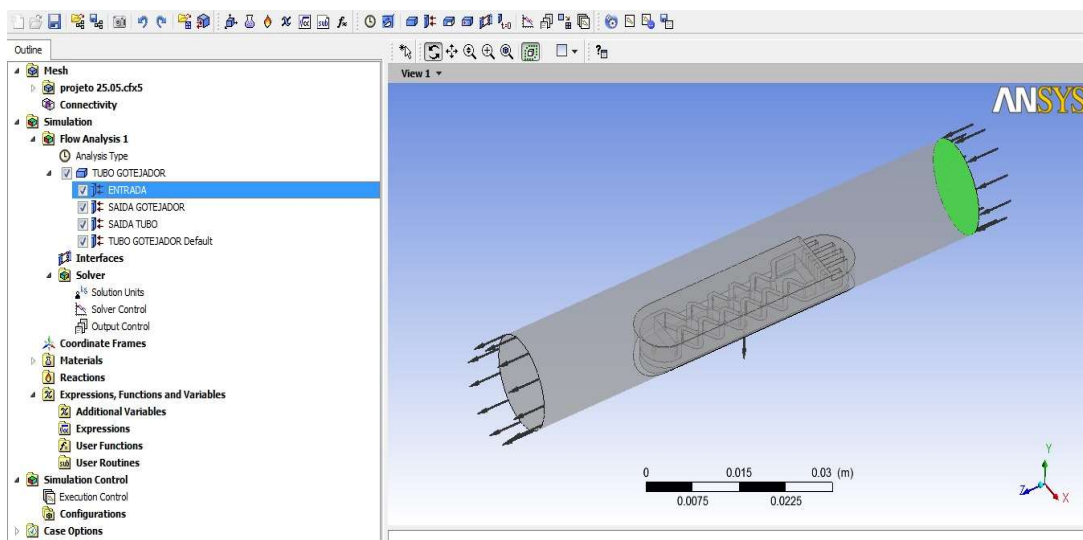


Figura 17 - CFX Pré (Entrada de água no gotejador)

Para o domínio “Entrada” a condição “Inlet” foi aplicada.

As condições de contorno aplicadas foram:

- “taxa de fluxo de massa”: 0,3076 kg/s;

- Turbulência média (com intensidade de 5%).

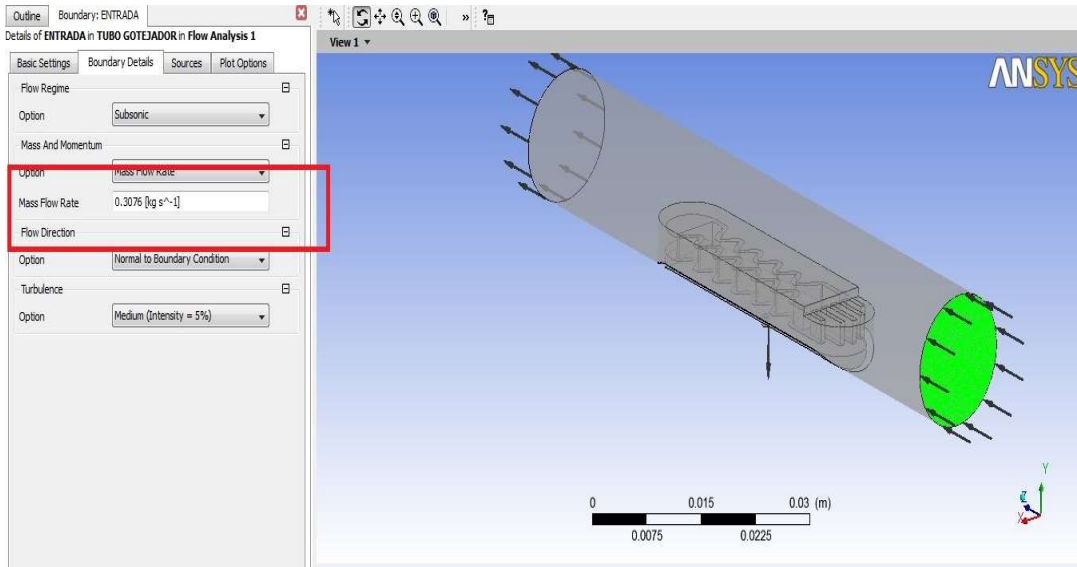


Figura 18 - CFX Pré (condições de contorno para entrada de água)

Saída Tubo: Representa a saída de água da tubulação.

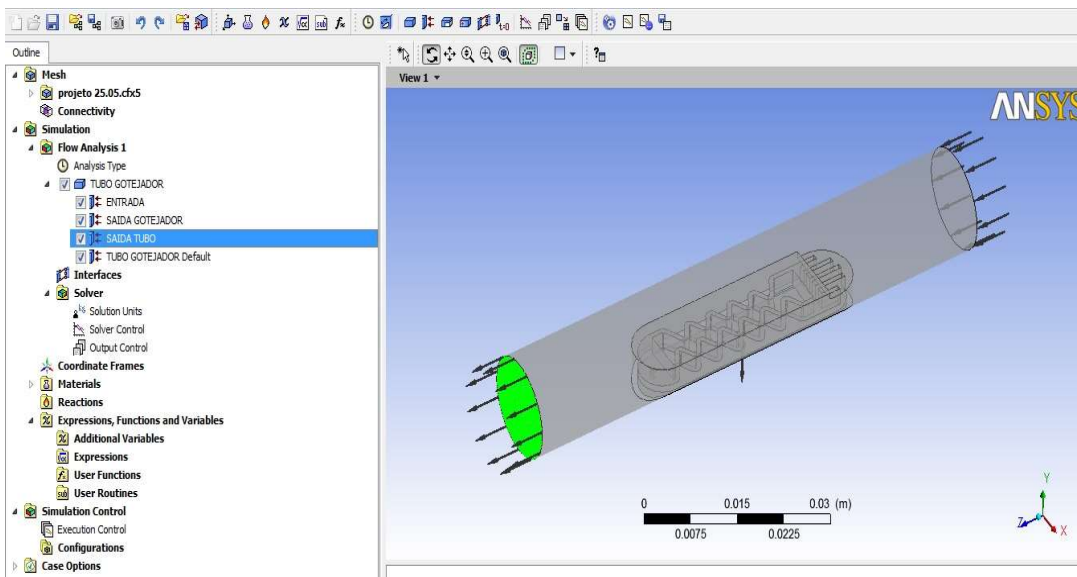


Figura 19 - CFX Pré (saída de água da tubulação do gotejador)

Para o domínio “Saída Tubo” a condição “Outlet” foi aplicada.

As condições de contorno aplicadas foram:

- “taxa de fluxo de massa”: 0,3062 kg/s

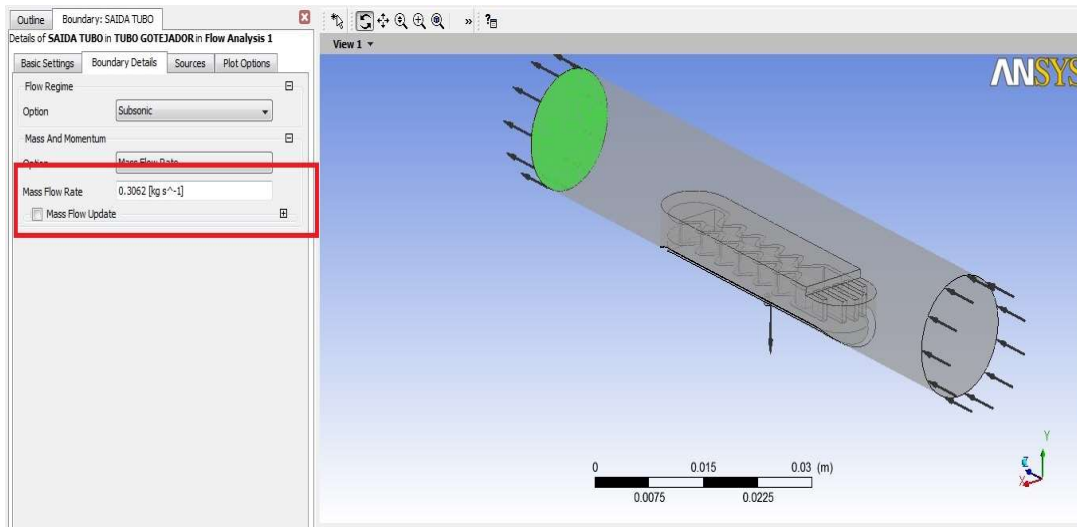


Figura 20 - CFX Pré (condições de contorno “saída de água da tubulação”)

Saída Gotejador: representa a saída de água no final do sistema. A quantidade de água que será despejada no solo.

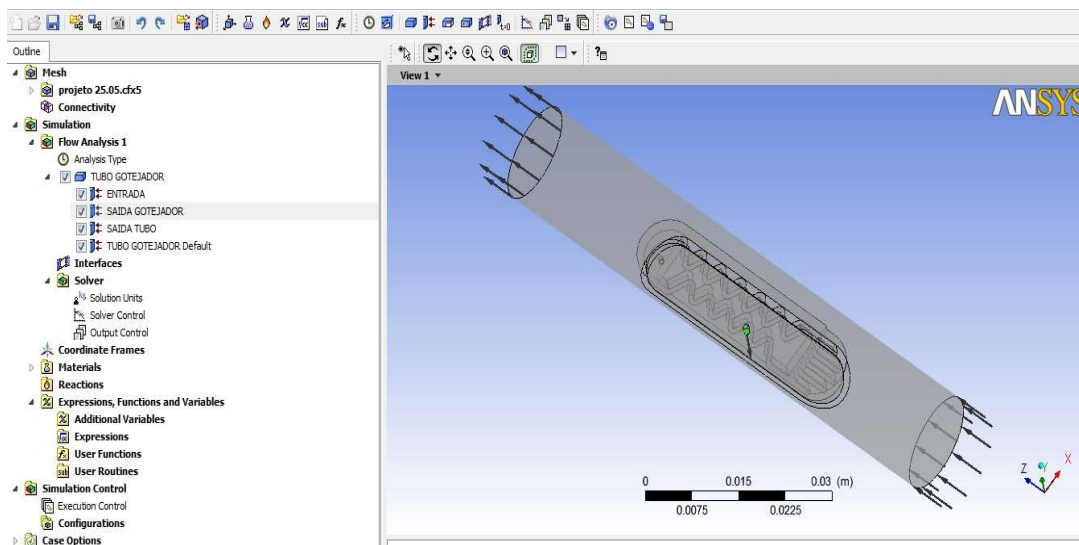


Figura 21 - CFX Pré (saída de água do gotejador)

Para o domínio “Saída Gotejador” a condição “Outlet” também foi aplicada, já que também representa uma saída de água.

Não foi inserida nenhuma condição de vazão na saída, para que o resultado final pudesse ser comparado com o modelo do fabricante.

Considerando esse fato, aplicou-se a condição de pressão na saída igual a 0Pa, devido a perda de carga, provida pelo caminho hidráulico, ser muito alta.

- “Pressão estática”: 0Pa

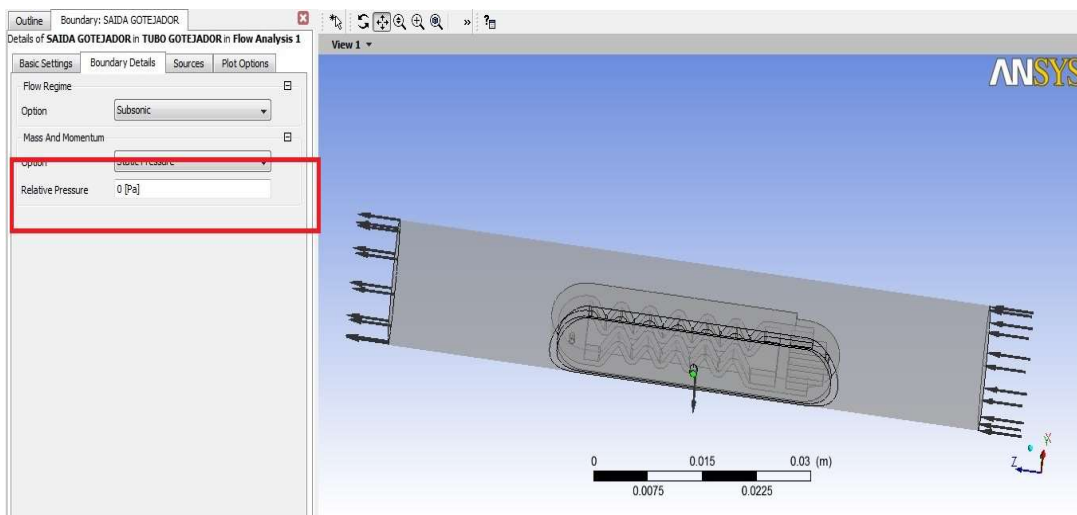


Figura 22 - CFX Pré (condição de contorno saída de água do gotejador)

As condições de contorno aplicadas ao seguinte trabalho foram baseadas em condições reais de modelos de gotejadores produzidas por um determinado fabricante.

Dentre vários gotejadores “in-line” no catálogo do fabricante foi escolhido aquele que apresentava dimensões, as quais, o gotejador deste trabalho se enquadrava.

TUBO GOTEJADOR TIRAN NÃO-COMPENSADO DE PAREDE GROSSA



Tube Gotejador Tiran

Tube gotejador integral não-compesando de parede grossa

Aplicações:

Irrigação de culturas perenes em áreas planas.

Especificações:

- Pressão máxima de serviço de acordo com a espessura da parede do tubo gotejador. Labirinto TurboNet™ com amplas secções de passagem de água. 2 vazões diferentes. Para ser utilizado em tubos de parede grossa (0.9, 1.0 e 1.2 mm). Gotejador injetado, baixo CV.
- Os gotejadores Tiran™ cumprem com as normas ISO 9261 e sua produção está certificada pelo Instituto de Normas de Israel (SII)
- Pressão máxima de serviço de acordo com a espessura da parede do tubo gotejador. Labirinto TurboNet™ com amplas secções de passagem de água. 2 vazões diferentes. Para ser utilizado em tubos de parede grossa (0.9, 1.0 e 1.2 mm). Gotejador injetado, baixo CV.
- Os gotejadores Tiran™ cumprem com as normas ISO 9261 e sua produção está certificada pelo Instituto de Normas de Israel (SII)

Vazões Nominais: 1,6 2,0 4,0 e 8,0 l/h

Diâmetro: de 13,7 a 20,80 mm

Espessura da parede: 0,90 1,00 e 1,20 mm

Figura 23 - Modelo do gotejador utilizado como parâmetro

Como a tubulação do gotejador em questão apresenta um diâmetro de 14mm e a espessura da parede de 1mm, o gotejador acima foi utilizado como modelo comparativo de resultados.

O gotejador acima dispõe de diversos modelos para um determinado valor de vazão nominal. Neste trabalho a vazão nominal de saída foi de aproximadamente 4l/h.

5.7 Descrição das condições de cálculo

Segundo H. Pimentel et al. (1994), O comportamento hidráulico dos gotejadores está caracterizado, de uma maneira geral, através da expressão:

$$q = Cd \times h^x \quad (\text{Equação 4.1})$$

Em que:

q = vazão ou descarga do gotejador

Cd = coeficiente de proporcionalidade, que depende da forma e tamanho da seção transversal do gotejador.

h = pressão de serviço do gotejador, em altura de coluna d'água

x = expoente de descarga do gotejador

O expoente "x", que depende do regime do fluxo d'água através do emissor, indica a relação entre a pressão de serviço do gotejador e a vazão de saída correspondente. Quanto mais baixo o valor de x, menor será a flutuação da vazão, perante a variação da pressão na entrada do gotejador. Se o fluxo d'água através do gotejador é realizado em regime laminar, x é igual a 1 e a vazão do gotejador varia linearmente com a pressão. Para gotejadores que funcionam em regime turbulento, x é igual a 0,5, significando que a vazão do emissor é menos sensível à variação da pressão (q varia com a raiz quadrada de h). Para um gotejador totalmente autocompensante, x assume valor de zero. A tabela 2 apresenta os intervalos de valores do expoente x para as distintas categorias de gotejadores existentes no mercado.

Tabela 2 - Expoentes x segundo a categoria do gotejador

Categoria do gotejador	Expoente x
longo percurso tipo microtubo	0,7 - 1,0
longo percurso tipo labirinto*	0,5 - 0,8
curto percurso, de orifício	0,4 - 0,6
tipo vórtice	0,3 - 0,5
autocompensante	0,0 - 0,5

Nos projetos hidráulicos dos sistemas de irrigação por gotejamento é necessário se conhecer previamente o expoente de descarga do gotejador a utilizar, para se estimar as possíveis variações das vazões, segundo as variações das pressões de serviço ao longo das linhas laterais. O expoente x deve ser indicado nas características técnicas do gotejador fornecidas pelo fabricante. O valor de x pode ser obtido também experimentalmente, em função de valores de duas pressões quaisquer de serviço aplicadas ao gotejador (h_1 e h_2) e de suas descargas correspondentes (q_1 e q_2), através da expressão:

$$x = \frac{\log \frac{q_1}{q_2}}{\log \frac{h_1}{h_2}} \quad (\text{Equação 4.2})$$

Com o valor calculado de x se poderá obter o valor do coeficiente de descarga do gotejador (C_d) por meio da equação 4.1.

A seleção definitiva do tipo de gotejador depende de vários fatores: topografia do terreno a irrigar, qualidade da água disponível, uniformidade de irrigação desejada, influência do custo dos gotejadores no orçamento da instalação, etc. Como orientação, deve-se selecionar um gotejador pouco sensível à variação de pressão (baixo expoente x) quando o terreno é acidentado ou quando se utilizam linhas laterais de grandes comprimentos. Águas com um alto conteúdo de materiais sólidos em suspensão requerem gotejadores pouco sensíveis a entupimentos. Pode-se dispor de gotejadores menos sensíveis às variações de carga no sistema quando a instalação possui uma densidade adequada de válvulas reguladoras de pressão.

Os melhores gotejadores são aqueles que são pouco sensíveis à variação de pressão (baixo x), à variação de temperatura, e ao desgaste com o tempo. Estes gotejadores são evidentemente mais caros, o que pode comprometer o custo total da instalação do sistema de irrigação.

Para definir as condições de cálculo utiliza-se o CFX-Pré, onde a primeira parte do processamento é realizada. Através de um processo de iteração o *solver* é um componente que produz os resultados requeridos resolvendo os problemas em CFD.

Pode-se descrever os procedimentos que o solver utilizada como sendo: as equações diferenciais parciais são integradas nos volumes de controle dentro da região de interesse. Isto equivale ao mesmo que se aplicar as leis de conservação ao volume de controle. Estas equações integrais são convertidas em um sistema de equações algébricas pela geração de um conjunto de aproximações para os termos das equações integrais. Através de processos iterativos as equações algébricas são resolvidas. O processo iterativo é necessário devido à natureza não-linear das equações, na medida em que a solução se aproxima da solução exata. Assim, pode-se assumir que a solução está convergindo. Para cada iteração, um erro ou um resíduo é comparado a uma precisão especificada. Quão próximo o resultado vai ficar da solução exata vai depender de uma série de fatores, dentro os quais pode-se citar o tamanho do volume de controle e ordem de grandeza dos resíduos.

Embasado nas condições de contorno fornecidas durante o pré-processamento, o mesmo fornece essas informações para que o problema seja processado e solucionado. Durante o processamento o usuário, além de acompanhar o progresso de convergência e andamento da solução, ele também pode (sem interromper o solver) ajustar alguns parâmetros, condições de contorno, entre outros.

Os parâmetros a serem monitorados no solver são os de distribuição de velocidade e gradiente de pressão. Cada parâmetro foi definido nas expressões do pré-processador. A análise do comportamento da convergência é demonstrada na figura 24, a qual apresenta o relatório de acompanhamento de cálculo.

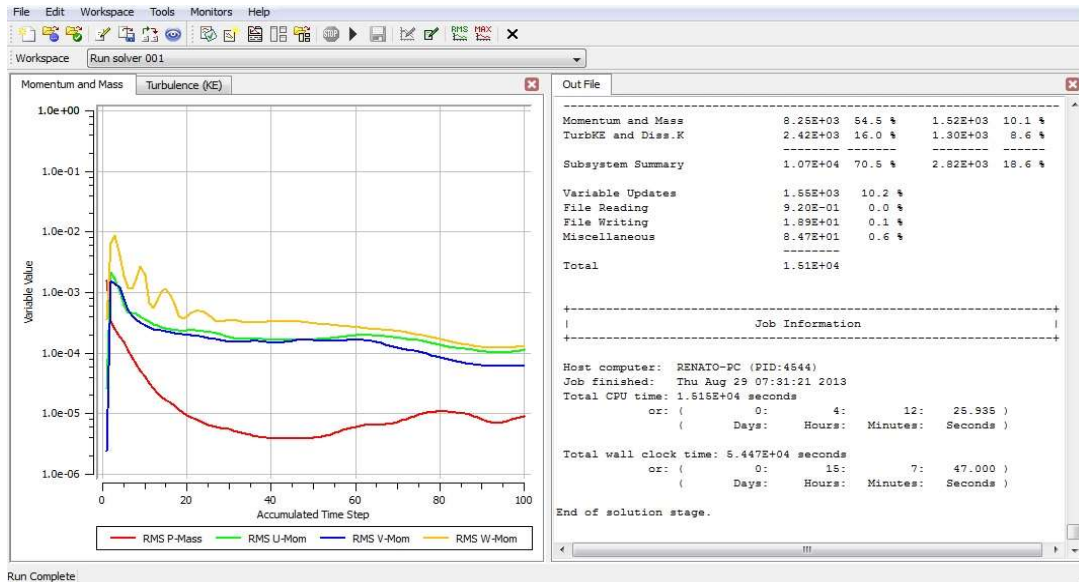


Figura 24 - Gráfico do erro residual pelo número de iterações das variáveis monitoradas

Para efeito de uma visualização melhorada, no seguinte trabalho realizou-se uma segunda simulação, porém com os mesmos parâmetros de condições de contorno.

Pelo fato de existir uma diferença de escala muito grande, a visualização da água na saída do gotejador fica comprometida. Desta maneira, uma nova geometria foi importada e simulada. Geometria essa que apresenta a saída do gotejador mais alargada. Para esse caso simulou-se apenas o gotejador em questão, excluindo a parte da tubulação. Deste modo as condições de contorno foram aplicadas diretamente na entrada do gotejador e saída do mesmo. Neste caso um estado bifásico também foi estudado. Sendo assim, foi simulada a inserção de ar no sistema em contato direto com a saída de água do gotejador, para que, assim, pudéssemos visualizar a formação de gotas.

As figuras representando a geometria desse caso e respectivos resultados serão apresentados no tópico a seguir.

6 CÁLCULOS E RESULTADOS

O seguinte tópico apresentará a validação dos resultados obtidos pela simulação computacional através da comparação com os resultados do modelo de gotejador selecionado para o estudo.

6.1 CFD

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), através do CFD, é possível se realizar estudos e modelagens de predição de campos de concentração, de velocidades, de pressão, de temperaturas, as operações de mudança de fase, as características das tensões e de deslocamento de sólidos imersos ou circundantes e das reações químicas, as propriedades turbulentas, etc. Todos esses estudos podem ser efetuados através do uso de modelos microscópicos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo.

Hoje encontram-se aplicações específicas do CFD nos seguintes estudos de casos e áreas:

- Aeroespacial (reações de combustão, propulsores de foguetes, etc)
- Aerodinâmico e aerotermodinâmico (avaliação de fenômenos de turbulência, escoamento e pressão).
- Automotivo (desenvolvimento de protótipos, estudos em túnel de vento, comportamento de linhas de corrente, etc)
- Desenvolvimento e otimização de produtos (antenas meteorológicas resistentes a intempéries, peças e componentes de motores, etc.)
- Segurança (simulação de incêndios, deformação de pontes)
- Biomédica (Temperatura e correntes de convecção natural no olho após aquecimento a laser, tensão cisalhante pelo fluxo sanguíneo na aorta, etc)
- Hidráulica (planejamento e gestão dos recursos hídricos , escoamentos internos de turbinas, tubos de sucção, vertedouros, canais de fuga, etc)
- Geração de energia (estudo dos impactos causados pelo lançamento dos gases de escape pelas chaminés de usinas termelétricas, análise das reações de combustão nas turbinas, etc)

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), o processo global de simulação requer uso da metodologia de trabalho que deve utilizada no desenvolvimento de projetos em CFD. Esta metodologia é feita a partir da definição dos seguintes elementos:

- Características gerais das geometrias (forma e tamanho do domínio, entradas, saídas, blocos, tipos de materiais utilizado em cada superfície de contato, etc.);
- Propriedade dos escoamentos dos fluidos (viscosidade, densidade, condutividade térmica, etc.)
- Condições iniciais do ambiente onde o escoamento acontece (quando o escoamento é dependente do tempo);
- Condições de contorno (especificações de entrada e saída dos fluxos de massa, momento e energia no domínio da simulação desejada);
- Modelos da dinâmica dos fluidos adequada para o caso em estudo;
- Discretização e geração das malhas;
- Especificação dos parâmetros numéricos;
- Solução do escoamento;
- Pós-Processamento (análise, visualização e otimização de resultados).

6.1.1 Modelo completo do Gotejador

Após a realização dos cálculos numéricos dentro do número de iterações adotadas, utiliza-se o CFX-Post para analisar os resultados fornecidos.

Comportamento do escoamento no interior do gotejador e também cálculos termodinâmicos são gerados pelo programa através de um relatório.

Foram criados quatro planos (plano1, plano2, plano3 e plano4 nos eixos XZ, YZ e dois no plano XY respectivamente) para visualização tanto da variação de velocidade e pressão dentro do gotejador como também dos vetores de velocidade.

Para todas as imagens a seguir o sentido do fluxo de água é da direita para esquerda.

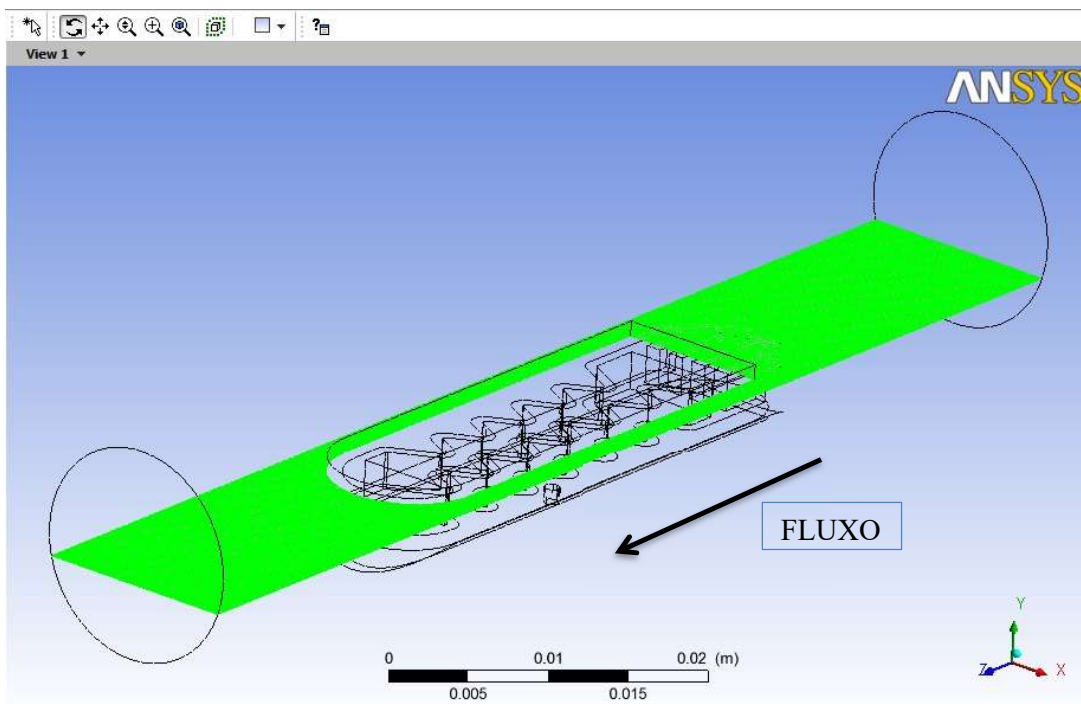


Figura 25 - Plano 1 (eixo XZ)

No plano 1 destacou-se as linhas de corrente de velocidade, pressão e os vetores de velocidade ao longo do escoamento.

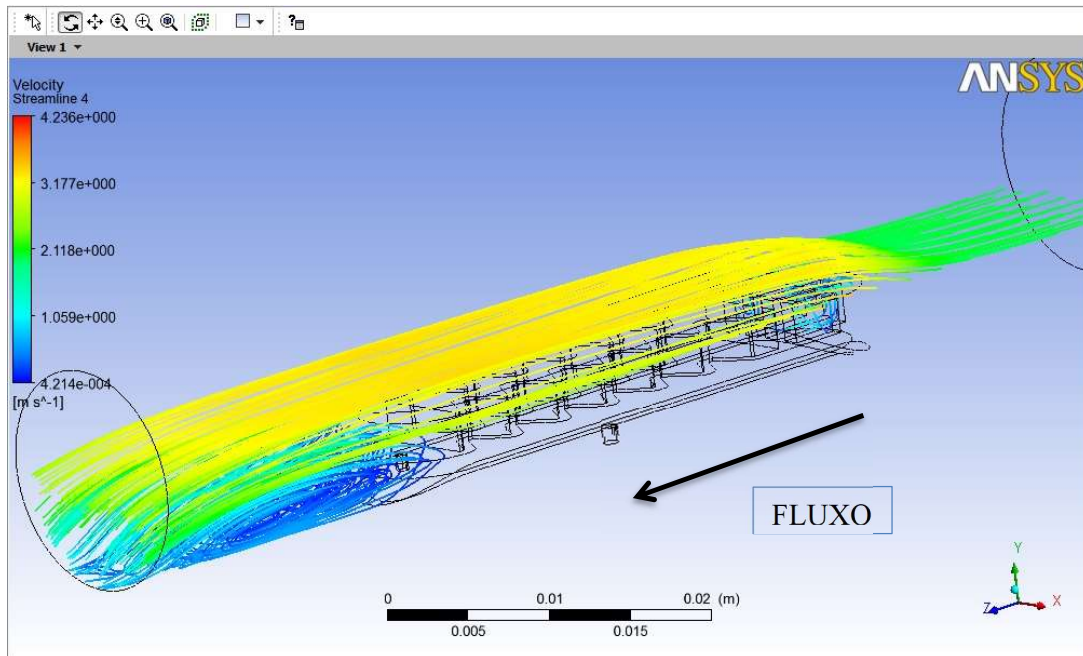


Figura 26 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 1.

As linhas de corrente representadas ao longo do plano 1 nos mostram um ressaltado, como se o gotejador fosse uma espécie de obstáculo.

Como as linhas de corrente estão apenas inseridas no plano, não se pode notá-las dentro do gotejador, embora algumas ainda indiquem que há água entrando no gotejador.

Pode-se ainda notar um pequeno aumento de velocidade de escoamento ao longo da tubulação. Isso se dá pela redução da área de escoamento, pelo fato de um “obstáculo” ter sido introduzido no centro da tubulação.

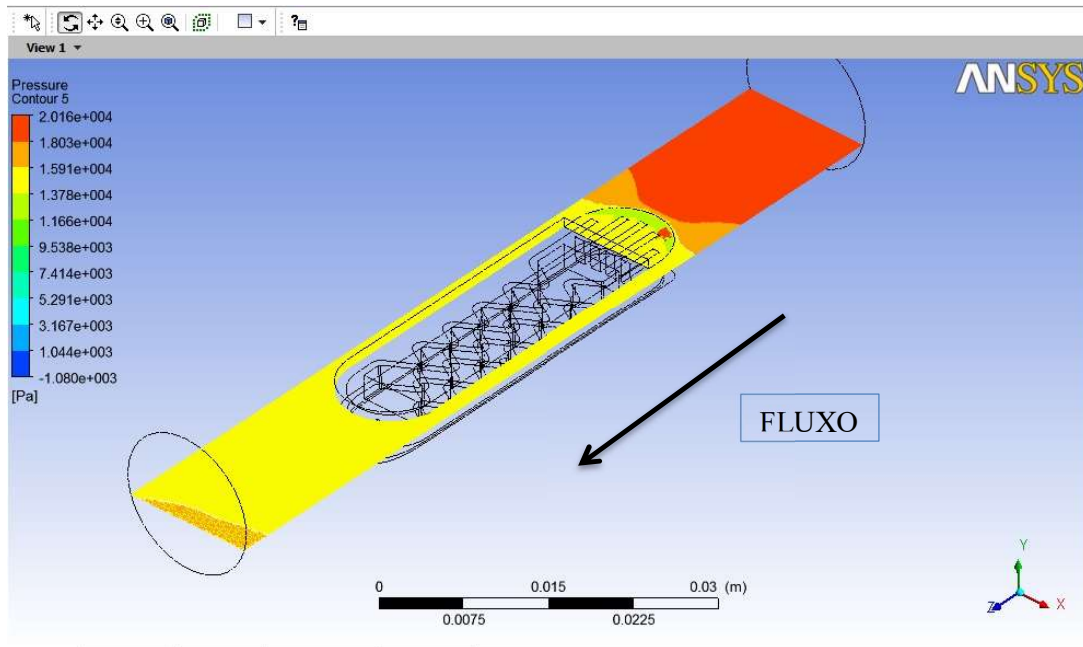


Figura 27 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 1

A variação de pressão externa do gotejador é muito baixa. Nota-se na entrada do gotejador uma pressão de aproximadamente $2 \times 10^4 \text{ Pa}$. Quando o fluido atinge a região do gotejador esse valor cai para aproximadamente $1,6 \times 10^4 \text{ Pa}$. Essa pequena variação de pressão que nota-se na região de contorno acompanha a variação do comportamento da velocidade. Quando se tem um aumento da velocidade existe um decaimento da pressão. Ainda pode-se confirmar isso através da equação de Bernoulli para tubos horizontais. Desta maneira se tem aproximadamente na entrada do gotejador um valor de $1,6 \times 10^4 \text{ Pa}$.

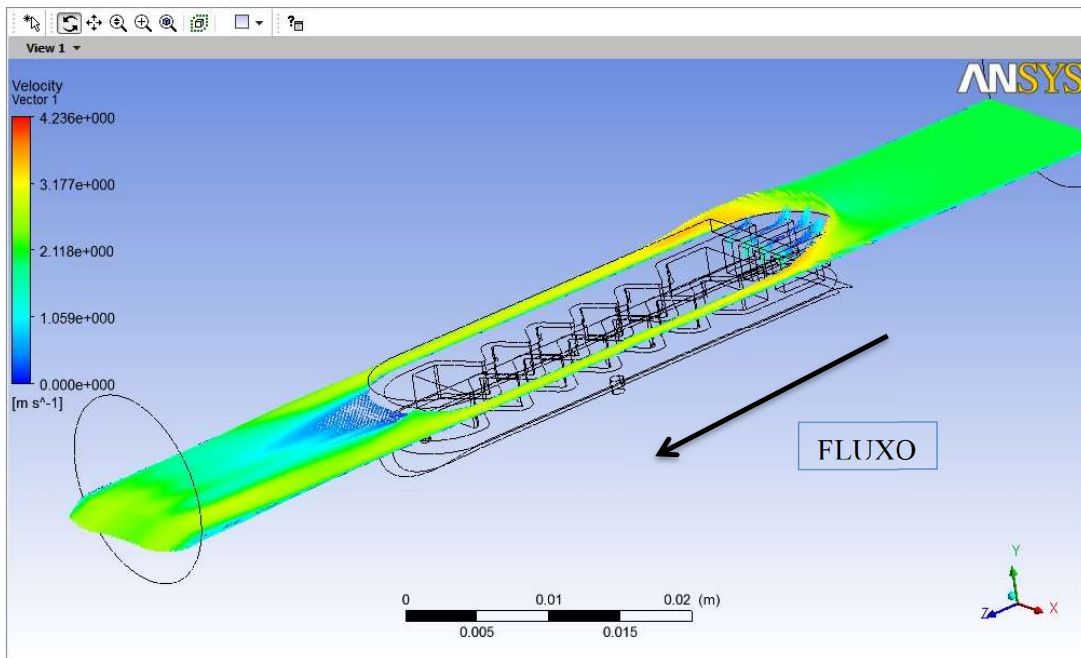


Figura 28 - Vetores de velocidade ao longo do plano 1

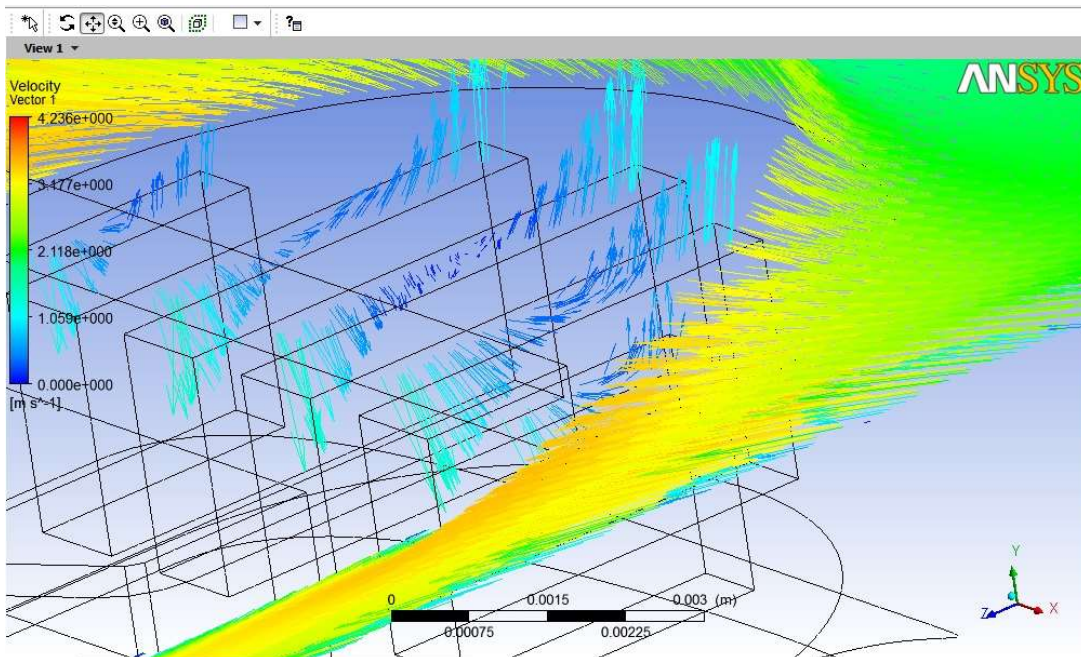


Figura 29 - Vetores de velocidade no plano 1 com zoom na entrada do gotejador

Do mesmo modo que as linhas de corrente de velocidade no plano 1, os vetores de velocidade no plano em questão apenas estão inseridos na entrada do gotejador.

Além da formação de vórtices na entrada do gotejador, podem-se observar os vetores de velocidade em amarelo representando o ressalto dito anteriormente.

No plano 2 (direção YZ) os mesmos procedimentos foram inseridos para efeito de visualização do escoamento.

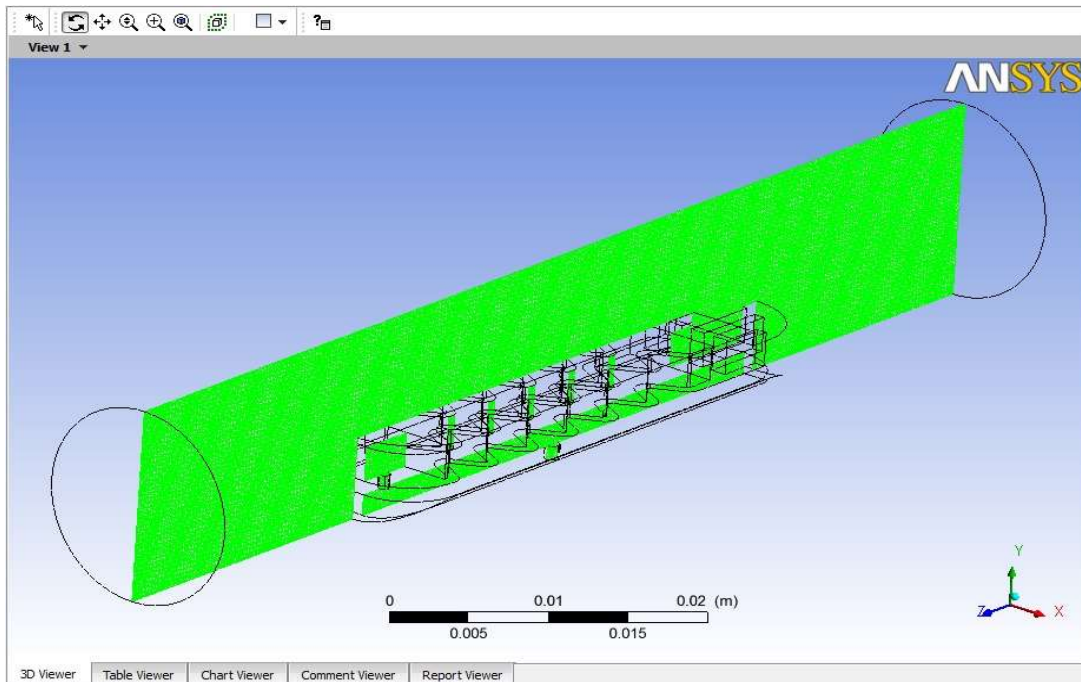


Figura 30 - Plano 2 (eixo YZ)

Neste plano em questão já é possível observar o comportamento do escoamento dentro do gotejador, como demonstrado nas figuras 31, 32, 33 e 34.

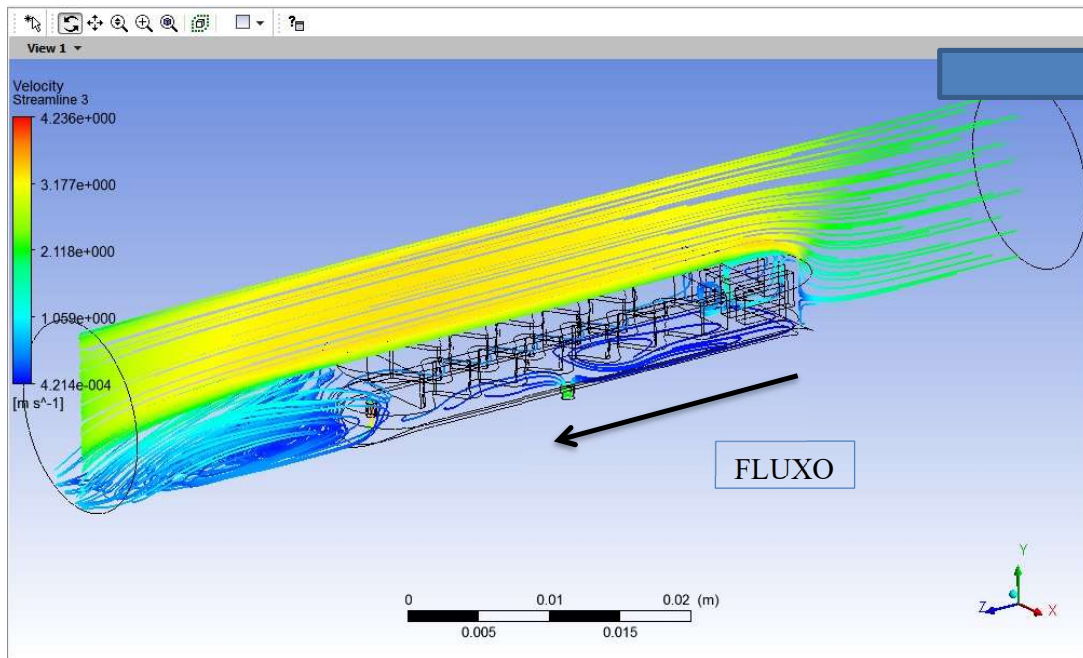


Figura 31 – Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 2

Na figura 31 temos o plano 2 cortando a tubulação ao meio nos eixos YZ. As linhas de corrente acompanham esse plano, e assim como representado no plano 1, onde as linhas de corrente acompanhavam o plano nos eixos XZ.

Observa-se que a velocidade do fluido na parte externa do gotejador é a mesma, porém com esse plano a velocidade da água na parte interna do mesmo é analisada.

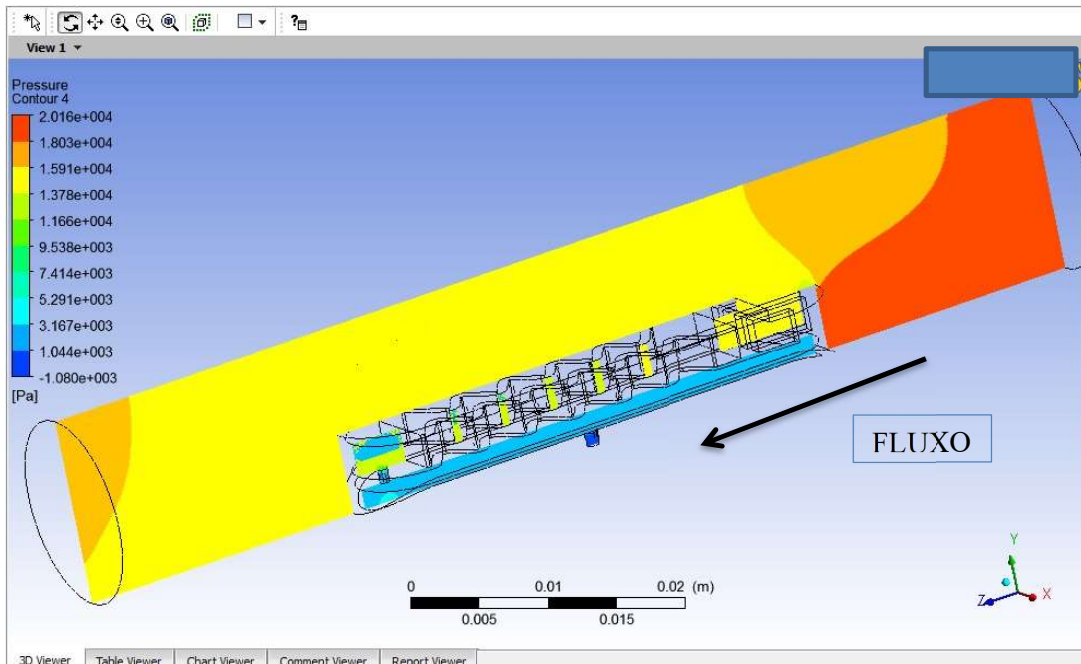


Figura 32 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 2

A pressão distribuída ao longo do plano 2 está representada na figura 32, mostra que os valores de pressão apresentado dentro do gotejador são muito baixos. Isso se dá pelo fato de a perda de carga produzida pelo caminho hidráulico ser muito alta. Pode-se analisar a entrada do gotejador a cor amarela que nos mostra o valor de $1,6 \times 10^4$ Pa e já na parte inferior do gotejador nota-se a coloração azul clara que nos mostra o decréscimo da pressão. O valor representado por essa cor azul clara é de aproximadamente 4×10^3 Pa.

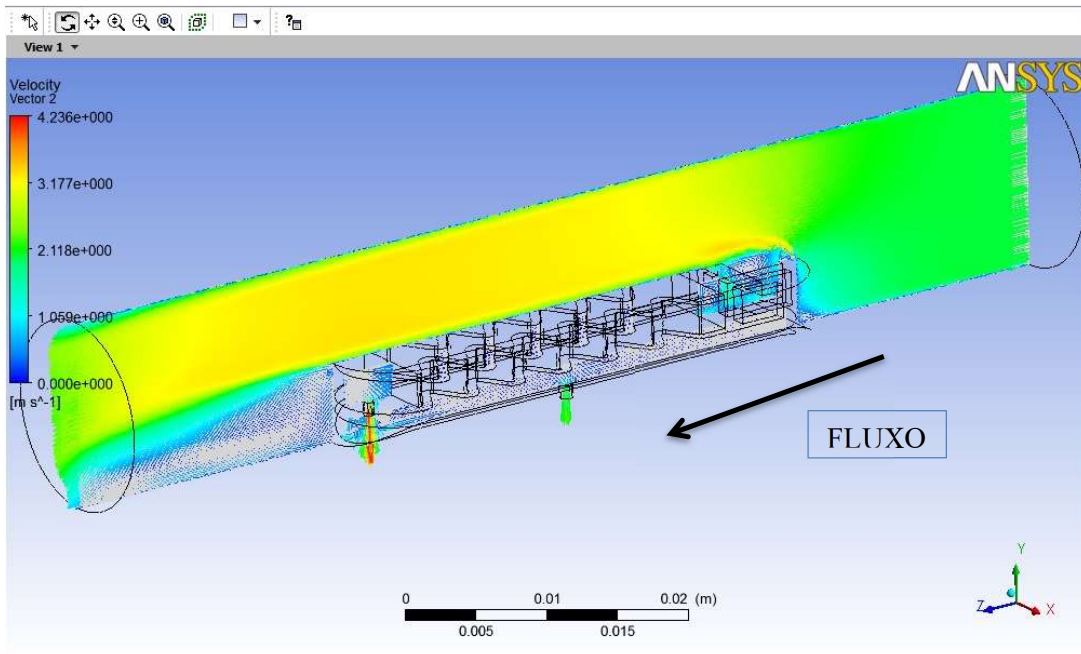


Figura 33 - Vetor velocidade no plano 2

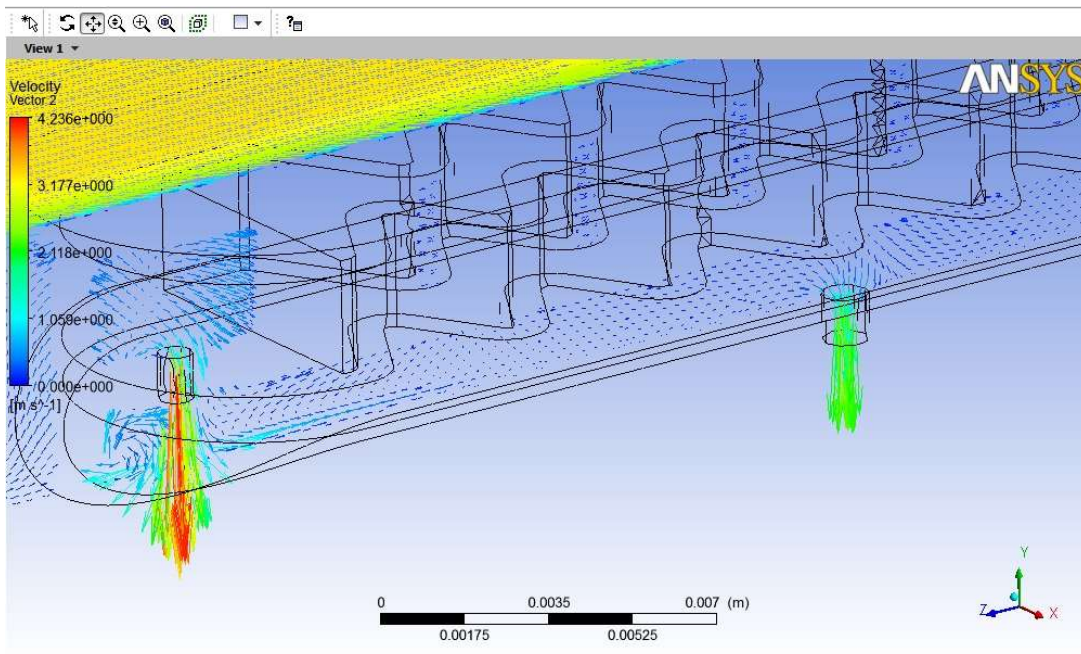


Figura 34 - Vetor velocidade plano 2 com zoom nas saídas do gotejador

Os vetores de velocidade representados na figura 34 estão ampliados sendo que o da esquerda representa a passagem de água que provém do caminho hidráulico e despeja em um reservatório (fundo do gotejador).

Já o vetor da direita representa a saída do gotejador.

Analisando as escalas obtém-se os valores aproximados de velocidade dessa transição de uma parte para outra. Esses valores médios estão em torno de 2m/s.

Os planos 3 e 4, ambos no eixo XY, foram inseridos na passagem de água de um “mini reservatório” até um reservatório maior e na saída do gotejador respectivamente.

As linhas de corrente para velocidade e a região de contorno da pressão também foram analisadas nessas passagens.

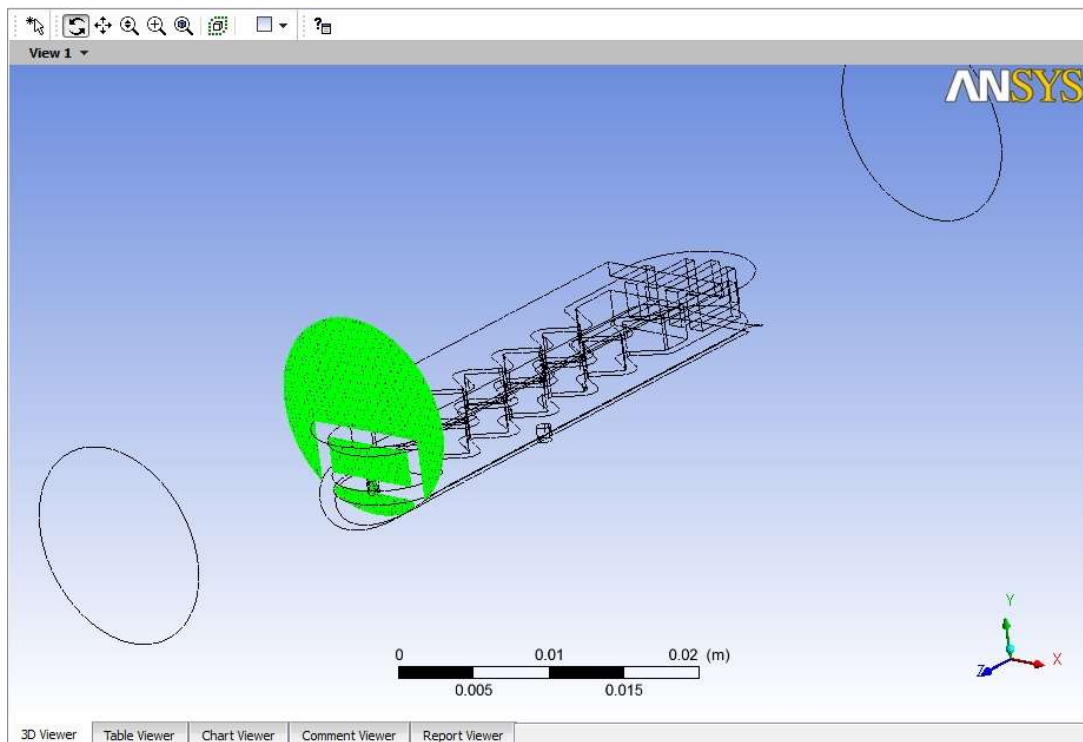


Figura 35 - Plano 3 (eixo XY) inserido na passagem de água

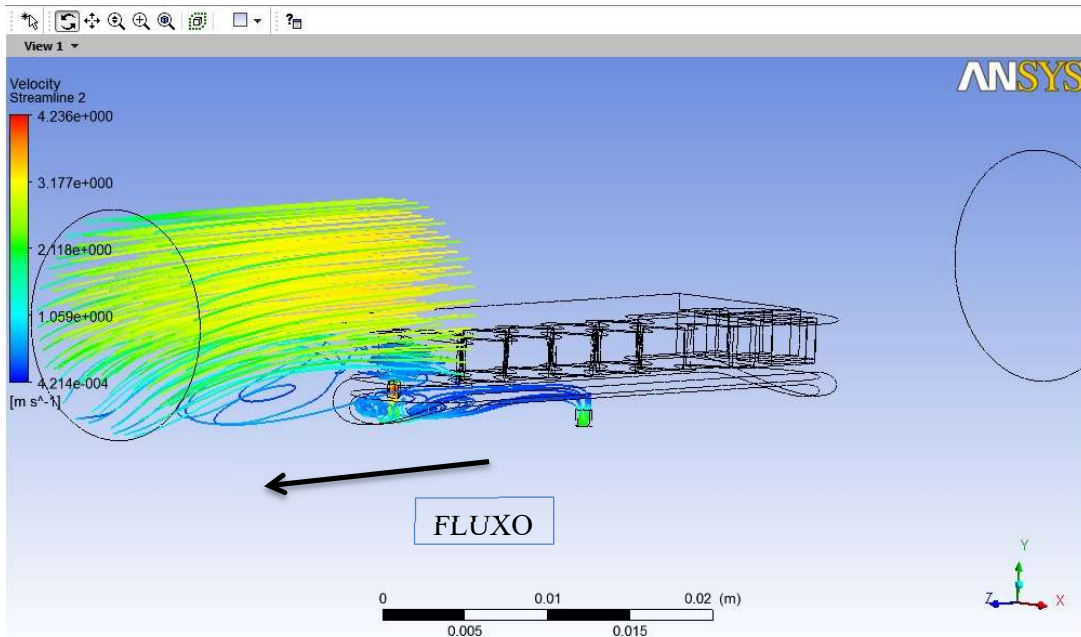


Figura 36 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 3

Quando se analisa as linhas de corrente para uma variável, tem-se a opção de fazer essa análise na direção do fluxo, na direção contrária ao fluxo ou até mesmo em ambas as direções.

Na figura 36 a análise foi feita na direção do fluxo a partir do plano 3.

O aumento da velocidade na passagem de água do “mini reservatório” até o fundo do gotejador e também as linhas de corrente seguindo até a saída do gotejador nos mostram a água saindo do gotejador.

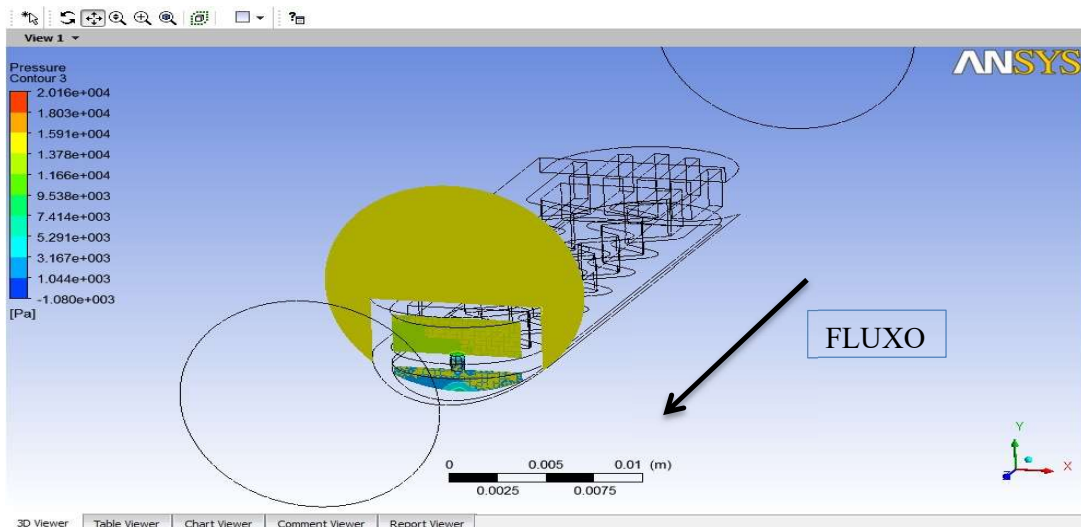


Figura 37 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 3

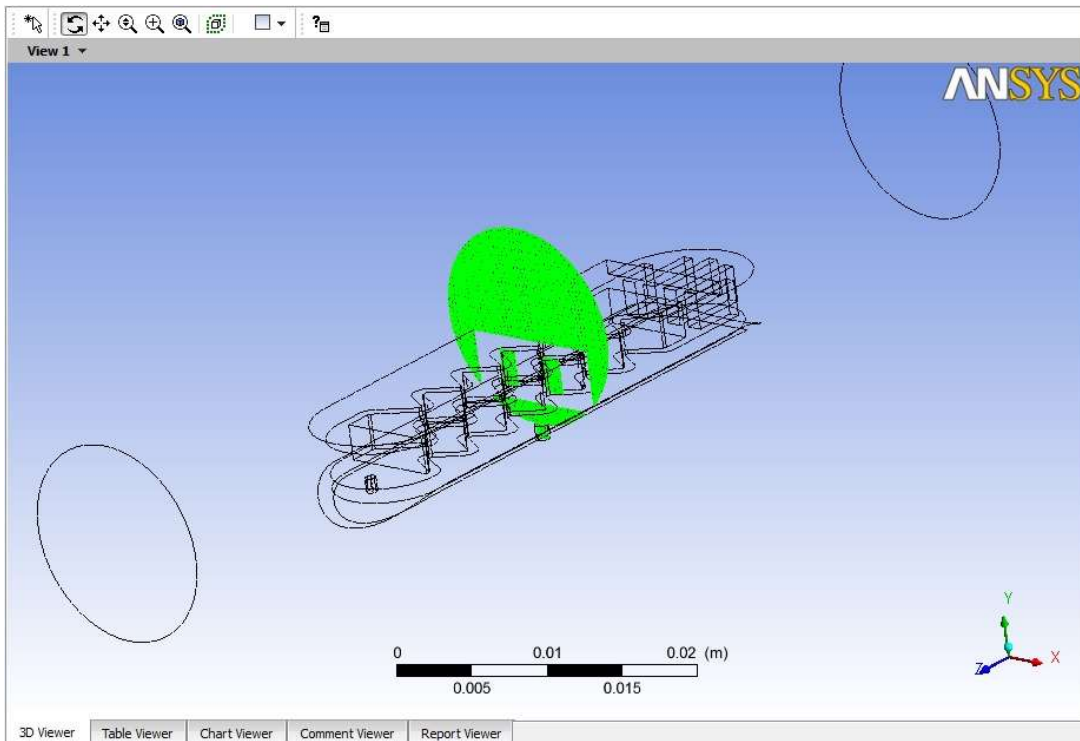


Figura 38 - Plano 4 (eixo XY) inserido na saída do gotejador

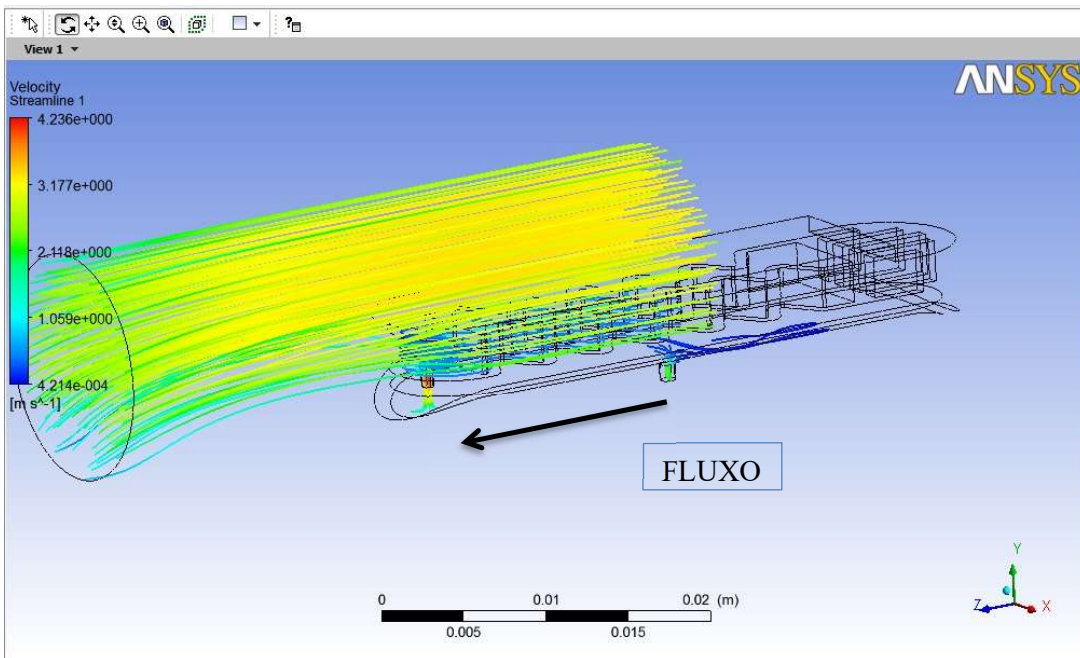


Figura 39 - Linhas de corrente do gradiente de velocidade no plano 4

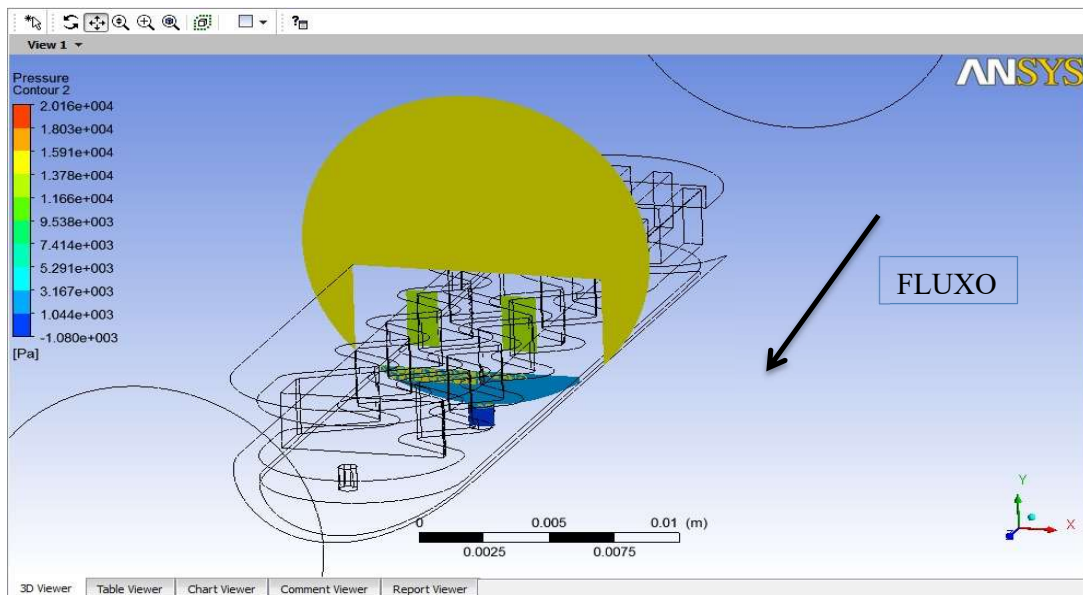


Figura 40 - Linhas de corrente do gradiente de pressão no plano 4

Através da figura 40, analisando a região de contorno para pressão no plano 4, pode-se analisar a saída do gotejador.

Como o valor de perda de carga é muito alta atribuída ao caminho hidráulico dentro do gotejador, a pressão de saída é praticamente zero, contribuindo para o processo de formação da gota.

A visualização da gota para essa simulação não ficou muito nítida, porém inserindo um contorno com a variável velocidade a ser analisada, pode-se comparar com o modelo de gotejador, do fabricante em questão, utilizado neste trabalho.

A figura 41 mostra essa análise de velocidade para a saída do gotejador.

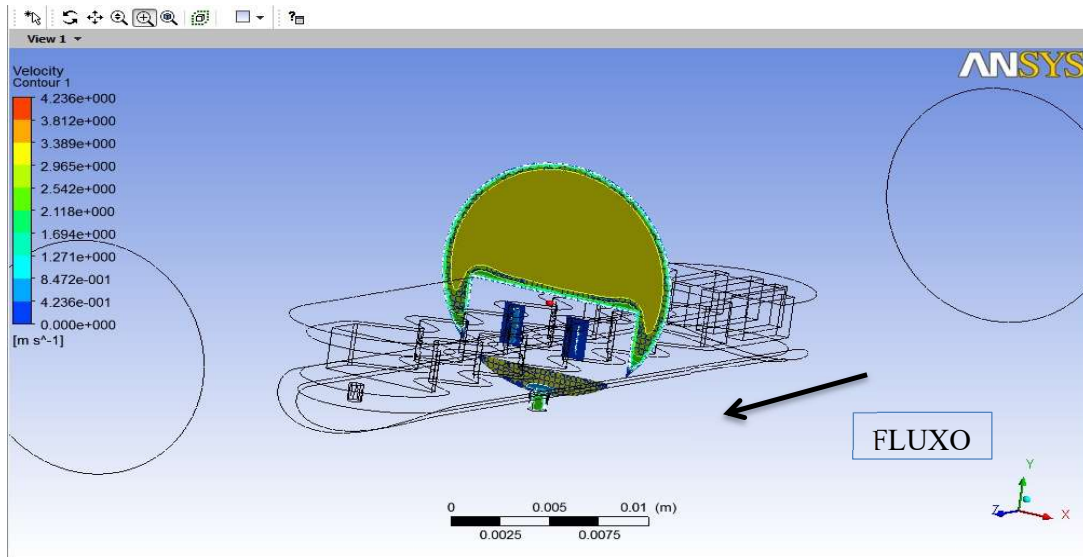


Figura 41 - Velocidade do fluxo no plano 4

Pode-se analisar na saída do gotejador que a cor verde escuro é representada na legenda pelo valor aproximado de 1,8m/s.

Através da proposta inicial do projeto que é de trabalhar com uma vazão de 4L/h, faz-se o calculo partindo da velocidade de saída de água na região de contorno do plano 4.

Analisando pontualmente, temos um diâmetro de 1mm na saída do gotejador.

Como:

$$Q = V \times A$$

Calculando a área

$$A = \pi \times r^2$$

$$\text{Raio} = 0,0005\text{m}$$

$$A = 0,000000785\text{m}^2$$

Assim:

$$Q = 1,8 \times 0,000000785$$

$$Q = 0,000001413 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,001413\text{L/s}$$

$$Q = 0,001413 \times 3600 \text{ L/h}$$

$$Q = 5\text{L/h}$$

6.1.2 Modelo reduzido do Gotejador

No modelo reduzido do gotejador, utilizou-se as mesmas condições de contorno. A única mudança feita foi em sua geometria. Ao invés de simularmos todo o sistema, reduziu-se o domínio apenas para o gotejador (sem a tubulação). Além disso, a saída do gotejador foi ampliada para que o processo de formação de gotas possa ser melhor visualizado.

Em sua geometria alteramos a saída do gotejador, de modo que a mesma fora ampliada como ilustra a figura 42.

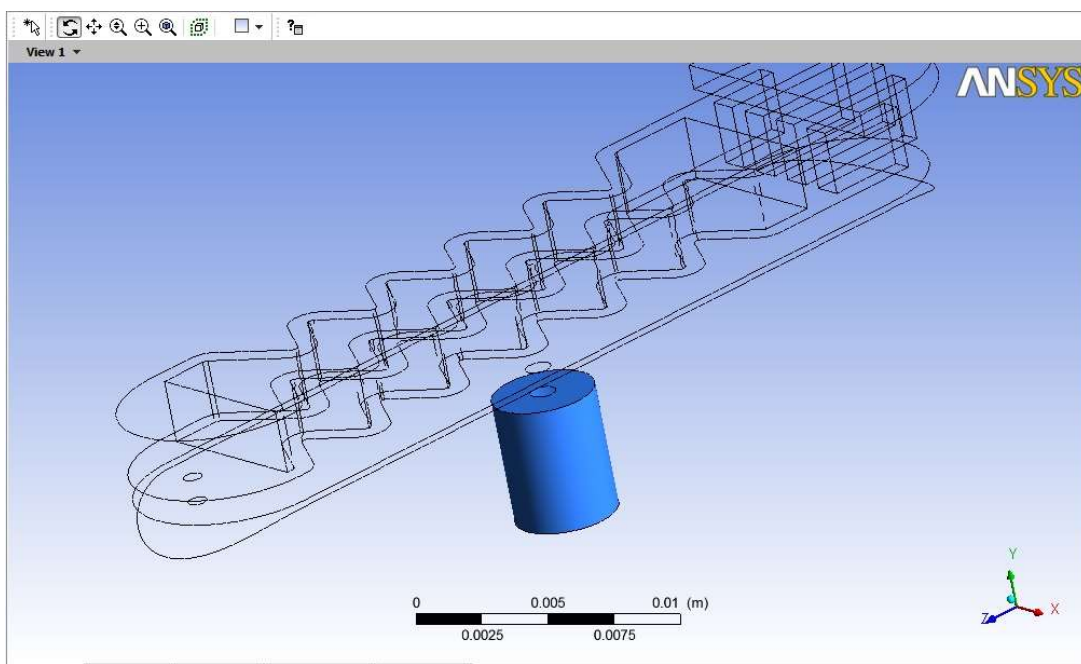


Figura 42 - Gotejador reduzido com saída ampliada

Neste caso foi aplicado um sistema bifásico (ar e água), como dito anteriormente, já que a visualização da formação de gotas é o objetivo.

Diversas condições de contorno foram aplicadas nesse sistema, já que agora, trata-se com dois fluidos.

Primeiramente o sistema fora separado em quatro partes para inserir as condições de contorno.

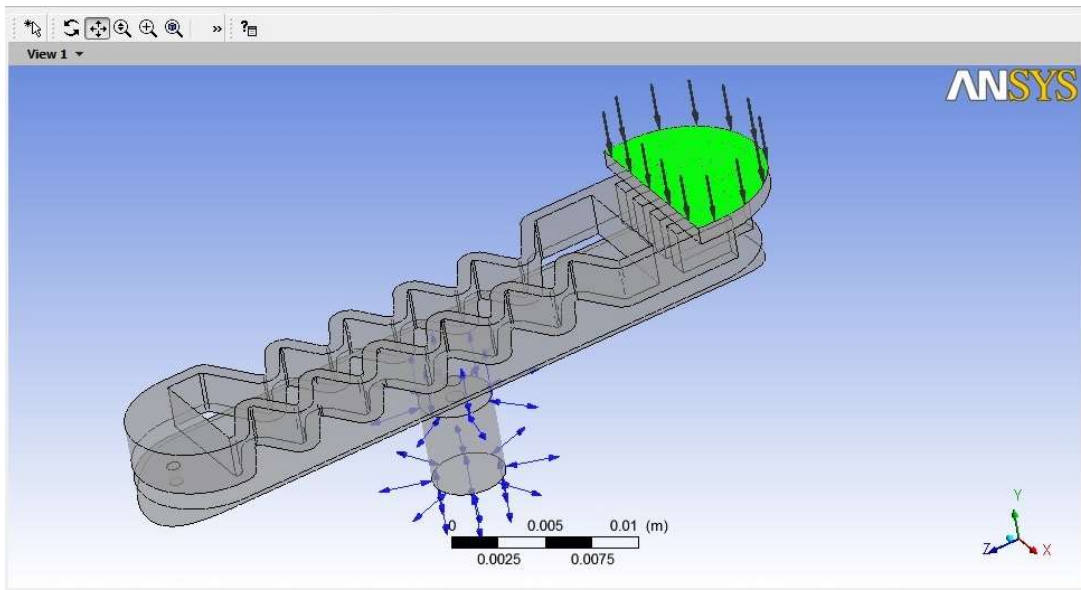


Figura 43 - Condição de contorno 1 (entrada gotejador)

A primeira região definida para o sistema é a entrada do gotejador. Para essa região aplica-se a condição de contorno de vazão de entrada.

As setas representadas na figura demonstram o sentido do fluxo no qual a condição foi aplicada.

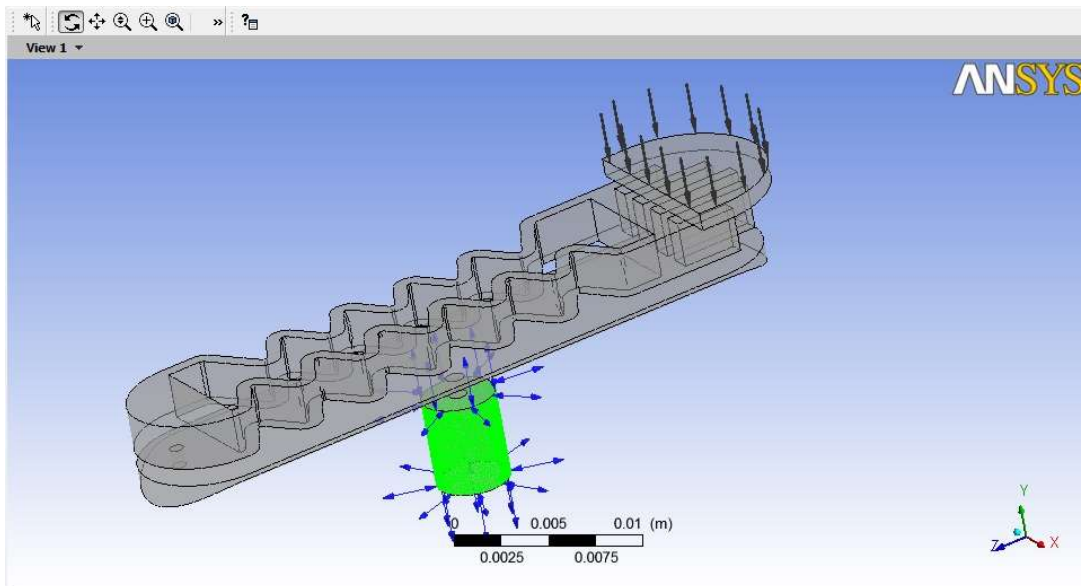


Figura 44 - Condição de contorno 2 (parede lateral da saída do gotejador)

Na parede lateral do gotejador tem-se tanto uma saída de água quanto uma entrada de ar. Do mesmo modo que a figura 44, as figuras 45 e 46 também apresentam entrada de ar no sistema.

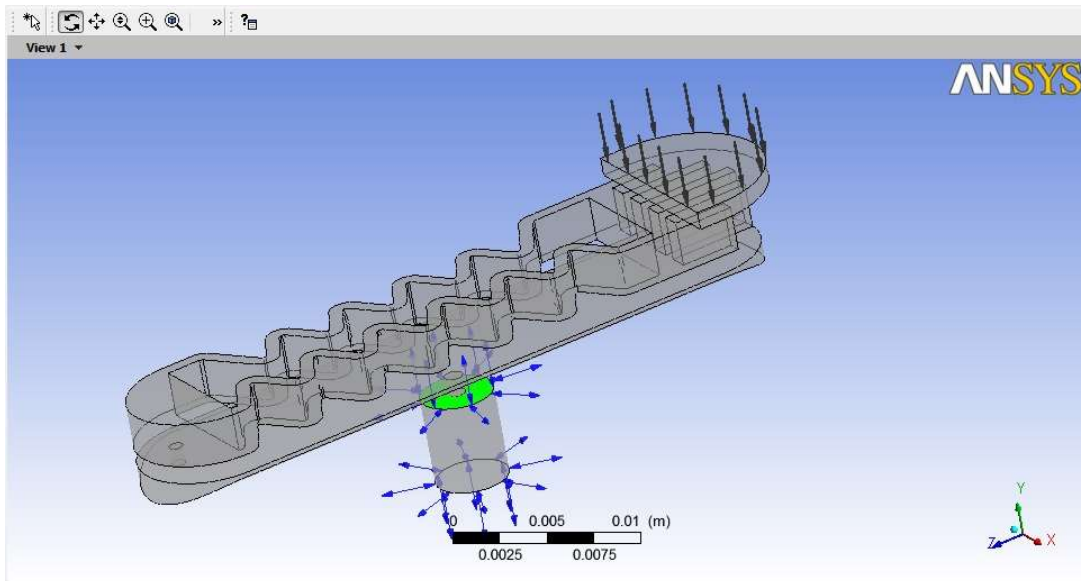


Figura 45 - Condição de contorno 3 (parede superior da saída do gotejador)

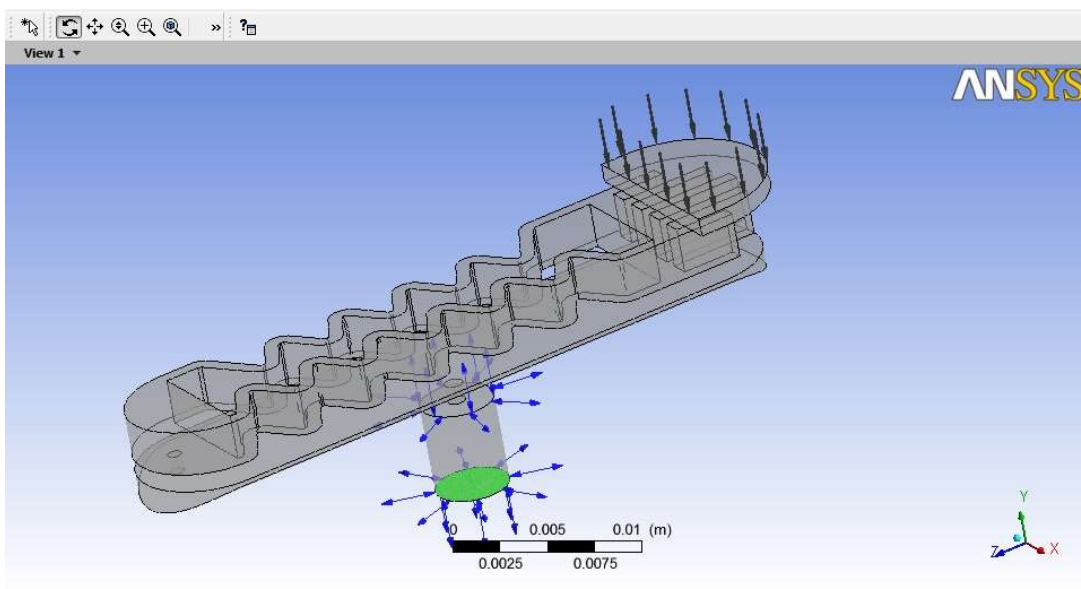


Figura 46 - Condição de contorno 4 (parede inferior da saída do gotejador)

Inicialmente para o domínio do gotejador reduzido inserimos as condições de estado bifásico. Os fluidos ar e água foram inseridos ao sistema.

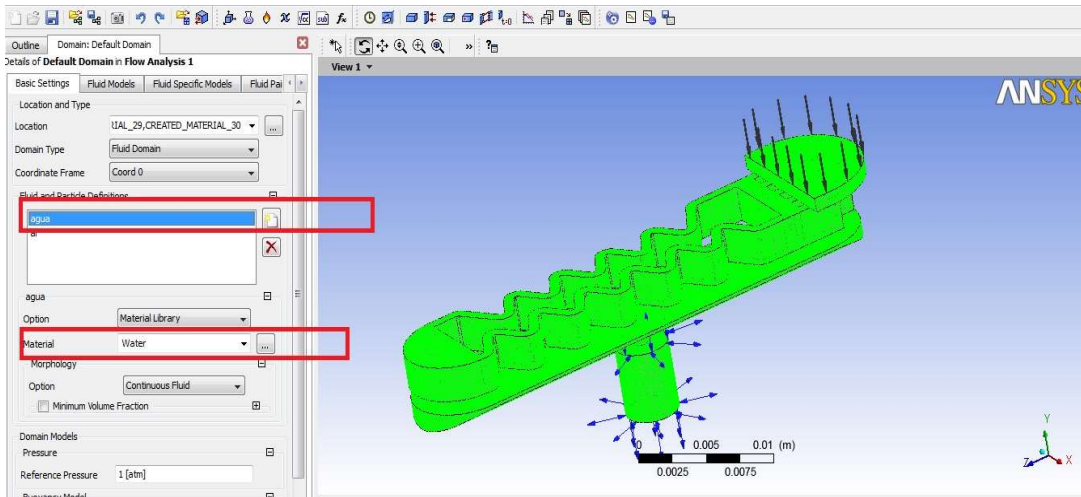


Figura 47 - Definição do fluido 1 (água)

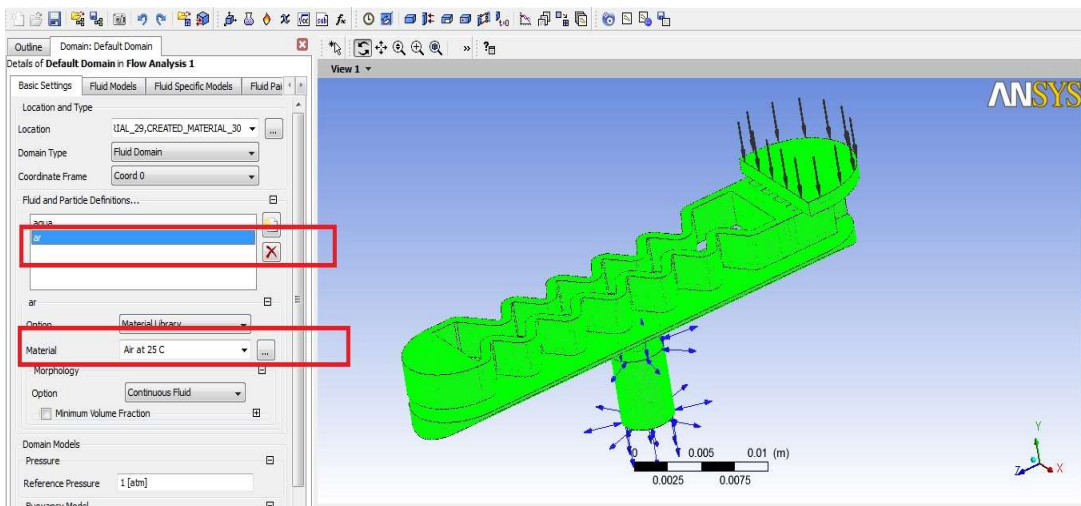


Figura 48 - Definição do fluido 2 (ar a 25°C)

Para a relação água/ar também foi inserido o coeficiente de tensão superficial da água a 25°C que é de 0,0722N/m, como mostra a figura 49.

O coeficiente de tensão superficial é essencial para o resultado esperado, pois influencia no processo final de formação da gota.

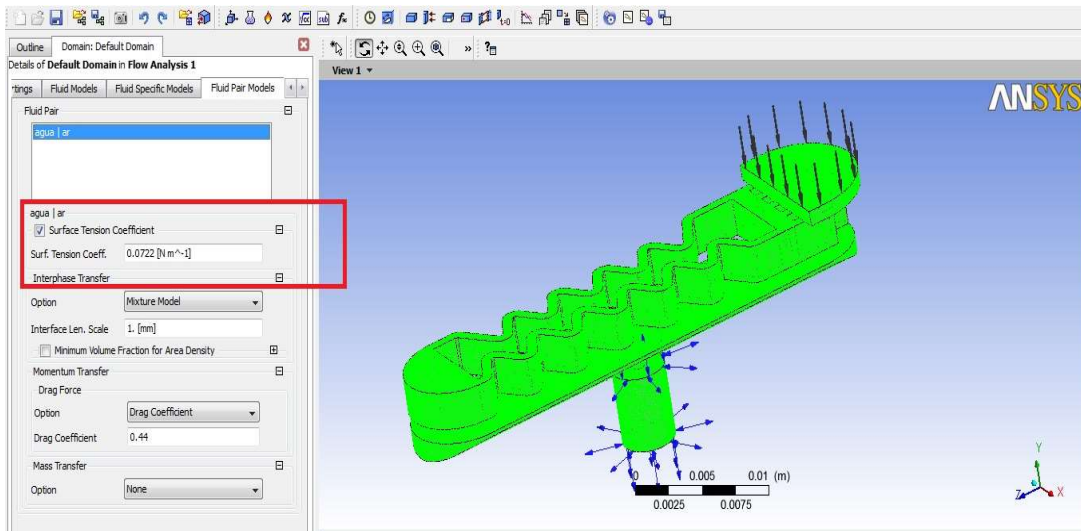


Figura 49 - Coeficiente de tensão superficial da água

Após as condições para o estado bifásico terem sido estabelecidas, partiu-se para as condições de contorno de cada domínio pré-estabelecido.

Para o domínio 1 (entrada do gotejador), a condição para vazão de entrada foi mantida.

Já para relação de água/ar foi estabelecido uma fração de água na entrada do gotejador como 100% e de ar 0%.

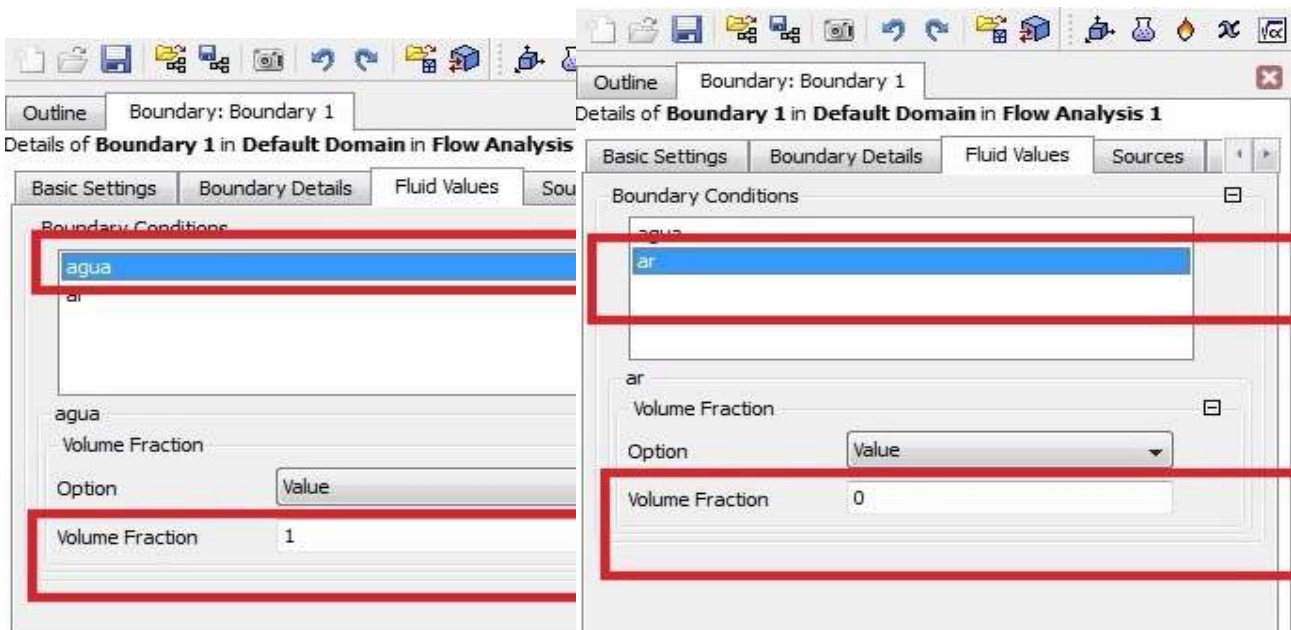


Figura 50 - Fração água/ar para domínio 1

Para o domínio 2 (parede lateral do gotejador), além da relação de fração água/ar foi inserido a pressão atmosférica na saída (101325Pa), como mostra a figura 51.

Para os domínios 3 e 4 as mesmas condições de contorno do domínio 2 foram estabelecidas. Como não há água na parede lateral, superior e inferior do gotejador a fração para este fluido é de 0% e de ar 100%. Todos estão em contato direto com a pressão atmosférica, logo a Pressão Relativa é de 101325Pa.

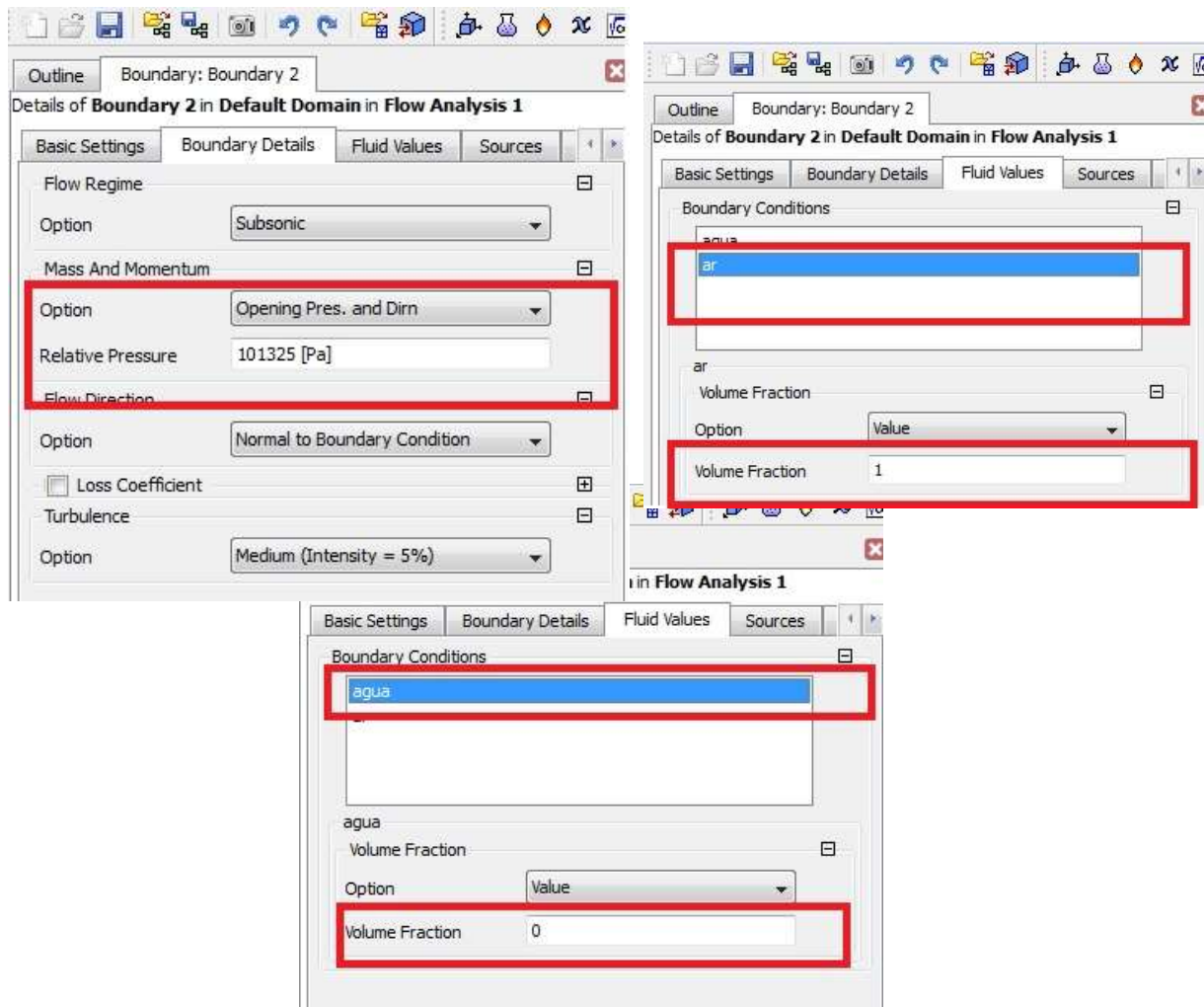


Figura 51 - Condições de contorno para o domínio 2 (parede lateral da saída do gotejador)

De maneira similar a simulação com o gotejador completo, após se inserir as condições de contorno, importa-se o projeto para o CFX-Solver para processar o problema.

Primeiramente foi processado o problema com 100 iterações.

Com o resultado obtido pode-se observar que seria necessário um número maior de iterações.

O resultado do solver está representado na figura 52.

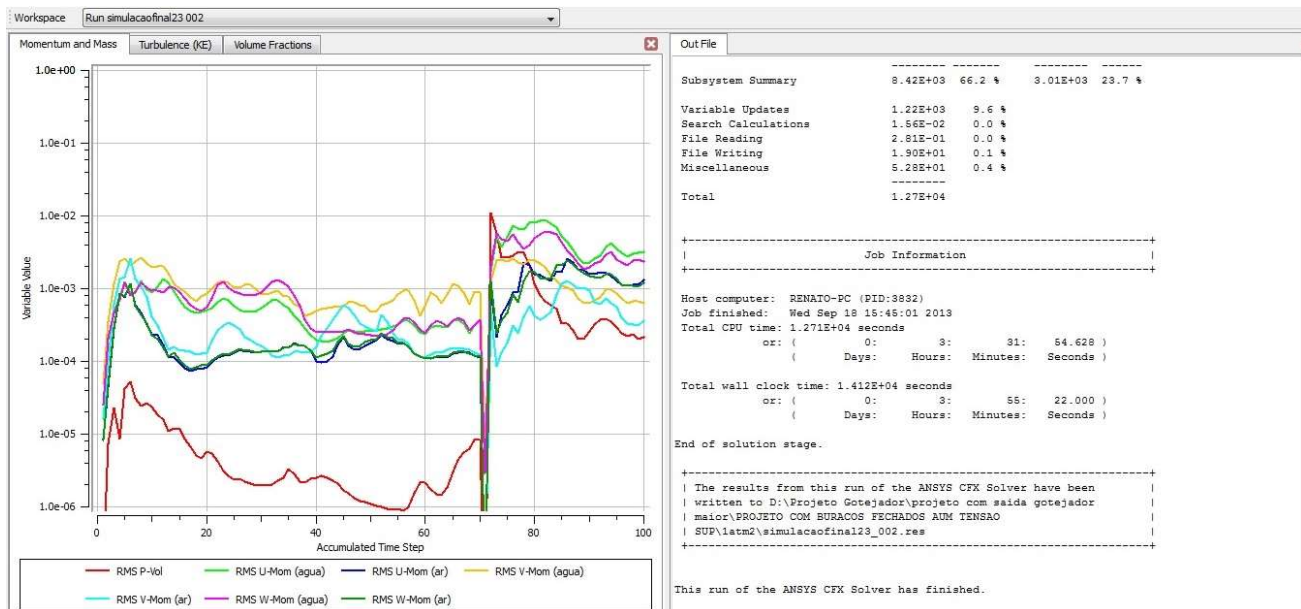


Figura 52 - solver realizado com 100 iterações

Pode-se notar que o processo com 100 iterações aproximadamente na iteração de número 70 ou uma queda dos valores analisados. Logo na próxima iteração os valores subiram e começaram a processar novamente.

Isso se deve ao fato de que na iteração de número 70 houve a formação de uma gota. Quando a gota formou-se e saiu do gotejador, o processo se iniciou novamente, até a formação de uma nova gota.

Nota-se com maior detalhe na figura 53, onde os resultados foram importados para o CFX-Post, e assim analisados graficamente.

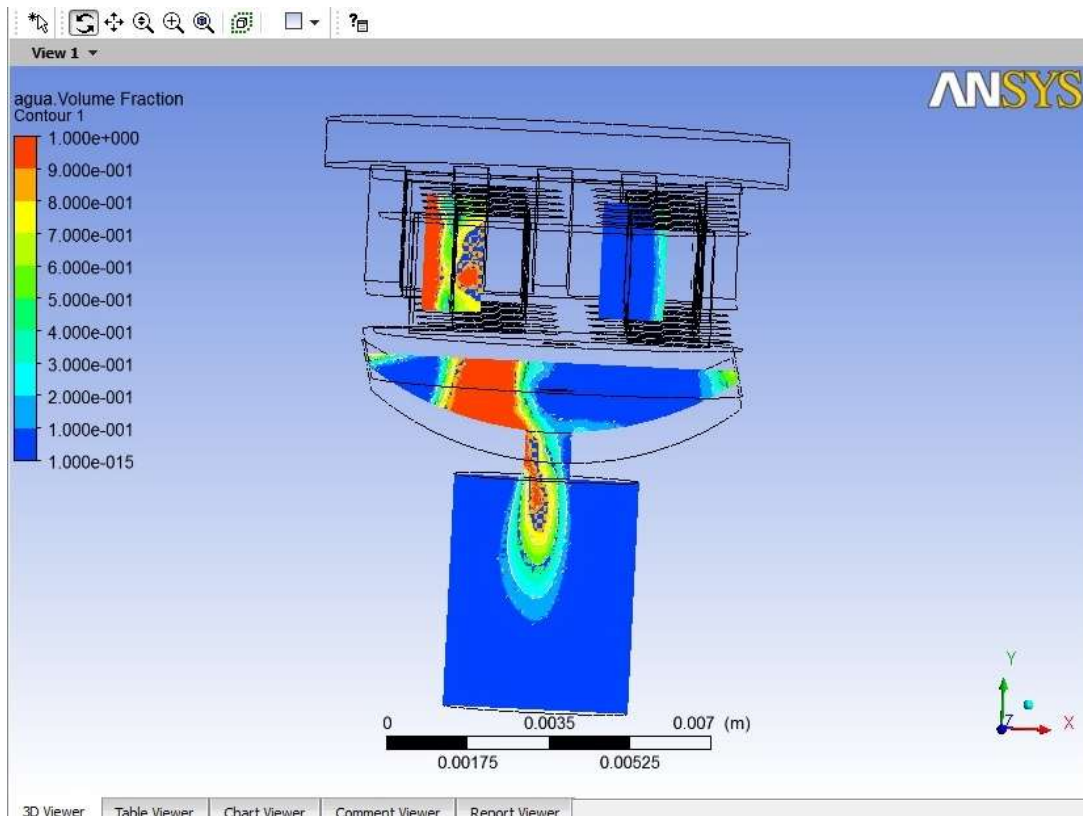


Figura 53 - Resultado com 100 iterações importado para o CFX-Post

Para análise dos resultados para o novo sistema com estado bifásico, insere-se um plano localizado na saída do gotejador.

Neste plano, a variável a ser estudada é a fração do volume de água no domínio.

Pode-se observar na figura 53, que o processo de formação de uma gota foi inicializado e como constatado anteriormente, precisa-se de um número de iterações maior para que o processo se complete.

Chegando a esta conclusão importou-se o problema do CFX-Pré para o CFX-Solver, mas desta vez com 400 iterações.

Com as mesmas condições de contorno da última simulação, porém com um número maior de iterações os resultados obtidos esta ilustrados na figura 54.

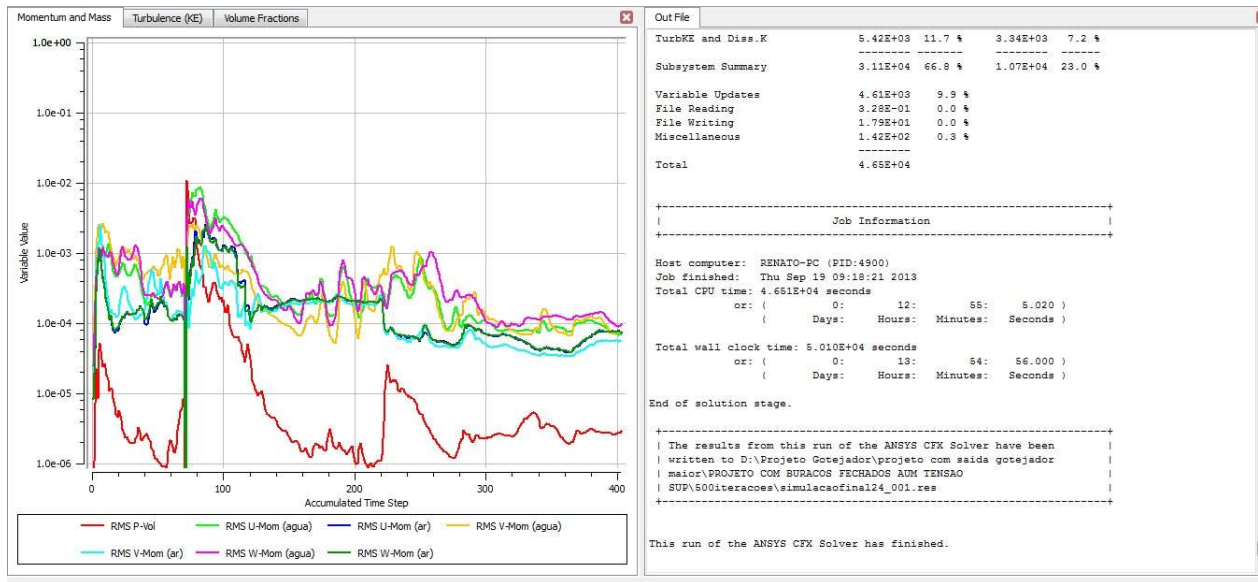


Figura 54 – Velocidade e Pressão analisadas no processo com 400 iterações

Após o processo com as 400 iterações ser concluído importou-se o resultado final para o CFX-Post novamente para análise gráfica dos resultados, e deste modo espera-se que o processo de formação de gotas esteja mais nítido.

Para análise dos resultados primeiramente um plano no eixo XY localizado na saída do gotejador fora criado.

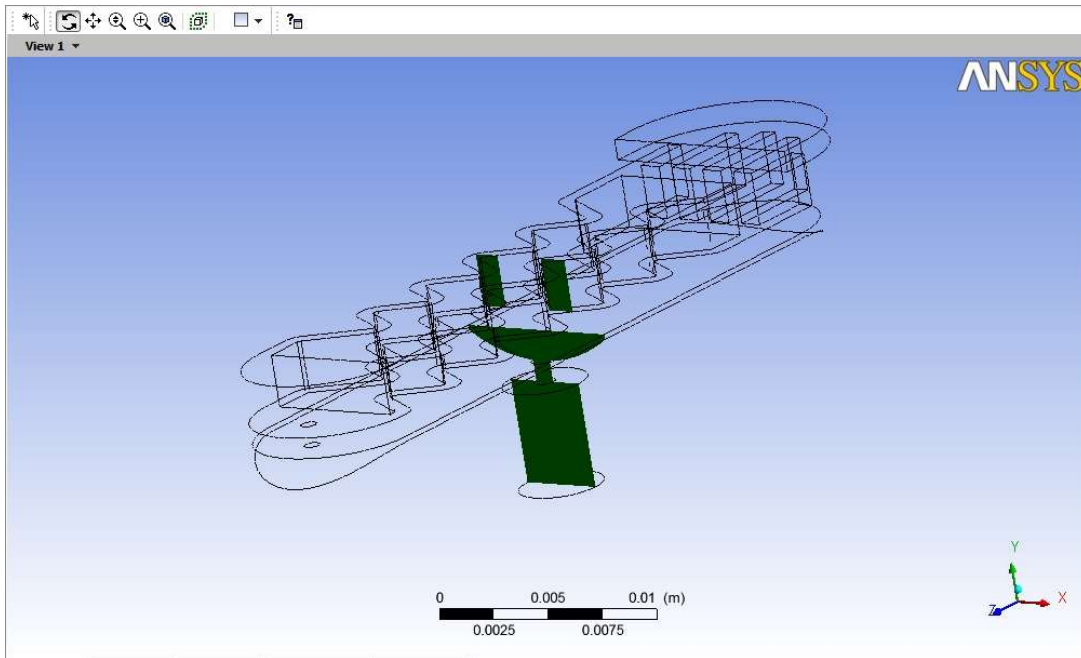


Figura 55 - Plano criado no eixo XY na saída do gotejador

Após a inserção deste plano na saída do gotejador, criou-se um contorno neste plano em questão para análise da fração de água no gotejador.

O plano foi criado na saída do gotejador para análise do processo de formação da gota.

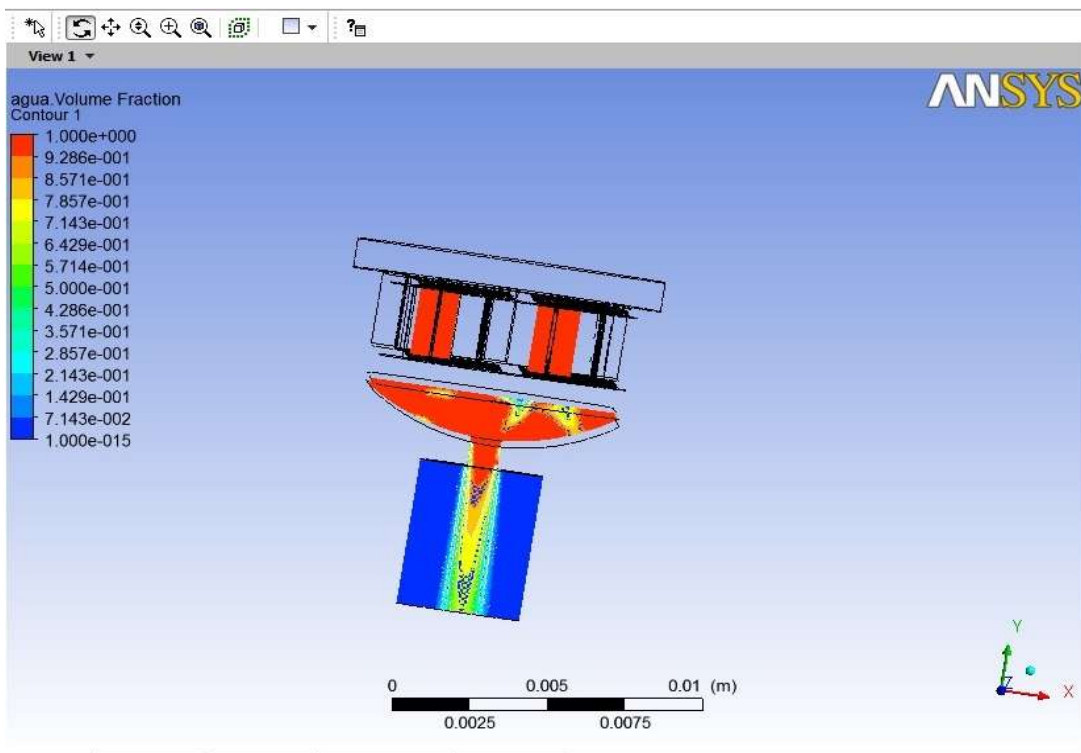


Figura 56 - CFX-Post com 400 iterações

Na figura 56 nota-se que a fração do volume de água apresenta uma escala, de modo que a cor alaranjada representa 100% de água e a cor azul escuro representa 0% da fração do volume de água.

Pode-se assim, desta maneira, observar que o resultado do processo com um número de iterações de 400 nos mostrou um resultado bem mais próximo do esperado quando comparado com o processo de 100 iterações.

Na saída do gotejador consegue-se visualizar o processo de formação de uma gota.

Provavelmente seria necessário um número um pouco maior de iterações para que o processo fosse melhor visualizado, pois pode-se notar algumas imperfeições no meio do gotejador quando analisada a fração do volume de água no gotejador.

Além da fração do volume de água na saída do gotejador, também, assim como na simulação com o gotejador completo, pode-se analisar a velocidade de água na região de contorno do mesmo plano para comparação de resultados, tanto com os valores do fabricante, como valores encontrados com a simulação do gotejador completo.

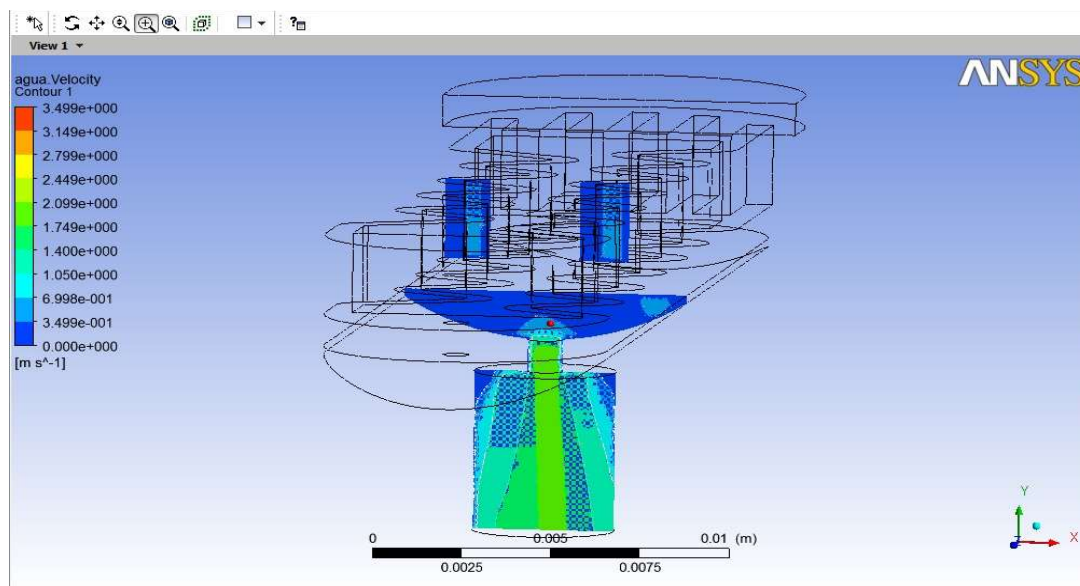


Figura 57 - Velocidade do fluxo de água no plano XY (saída do gotejador)

Do mesmo modo que a simulação do gotejador completo, pode-se analisar através da legenda, com uma simulação melhorada, que o valor da velocidade do fluxo de água na saída do gotejador representa aproximadamente 1,7m/s (demonstrada pela cor verde claro na legenda).

Com o mesmo cálculo, temos:

$$Q = V \times A$$

Calculando a área

$$A = \pi \times r^2$$

$$\text{Raio} = 0,0005\text{m}$$

$$A = 0,000000785\text{m}^2$$

Assim:

$$Q = 1,70 \times 0,000000785$$

$$Q = 0,0000013345 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,0013345\text{L}/\text{s}$$

$$Q = 0,0013345 \times 3600 \text{ L}/\text{h}$$

$$Q = 4,8\text{L}/\text{h}$$

6.1.3 Modelo reduzido do Gotejador com regime transiente

Nas simulações realizadas anteriormente, tanto como para o gotejador completo como para o gotejador reduzido, o regime para tal simulação foi definido como estacionário.

Para que o processo de formação da gota pudesse ser visualizado seria necessário que a simulação do problema fosse realizada para um regime transiente.

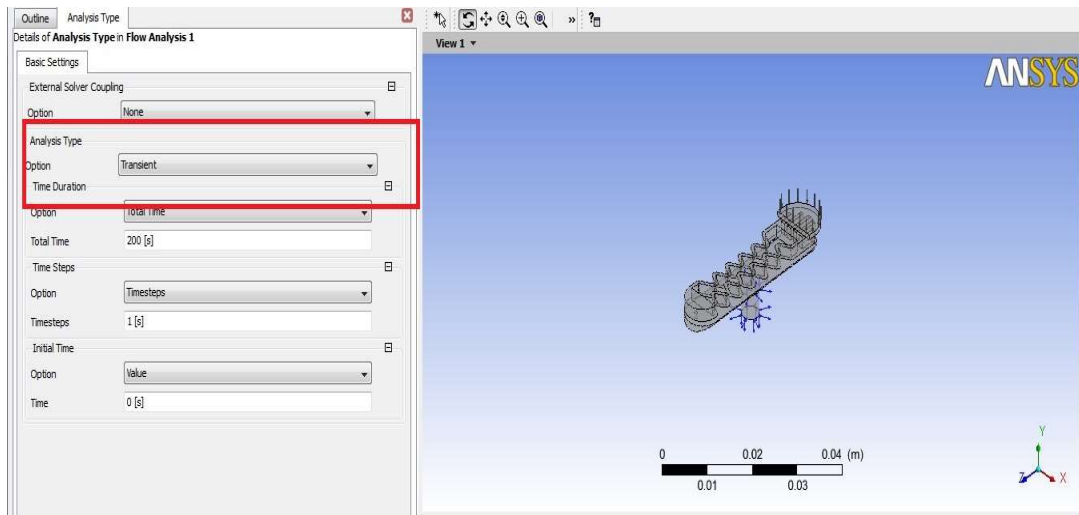


Figura 58 - Condição de contorno para regime transiente

As condições de contorno iniciais foram mantidas. Apenas o regime foi alterado de estacionário para transiente. Para simulações com regime transiente também devemos adicionar condições temporais ao sistema.

O total da duração do problema foi adotado 200 segundos com passos de 1 segundo e 10 iterações para cada segundo.

Um plano no eixo YZ foi inserido para análise da fração de água dentro do gotejador. A região de contorno para fração de água também foi inserida.

Através de uma animação feita para essa região de contorno pode-se observar o processo de formação da gota passo a passo, até a mesma sair do gotejador e atingir o solo.

A figura 59 mostra a respectiva região de contorno para fração de água.

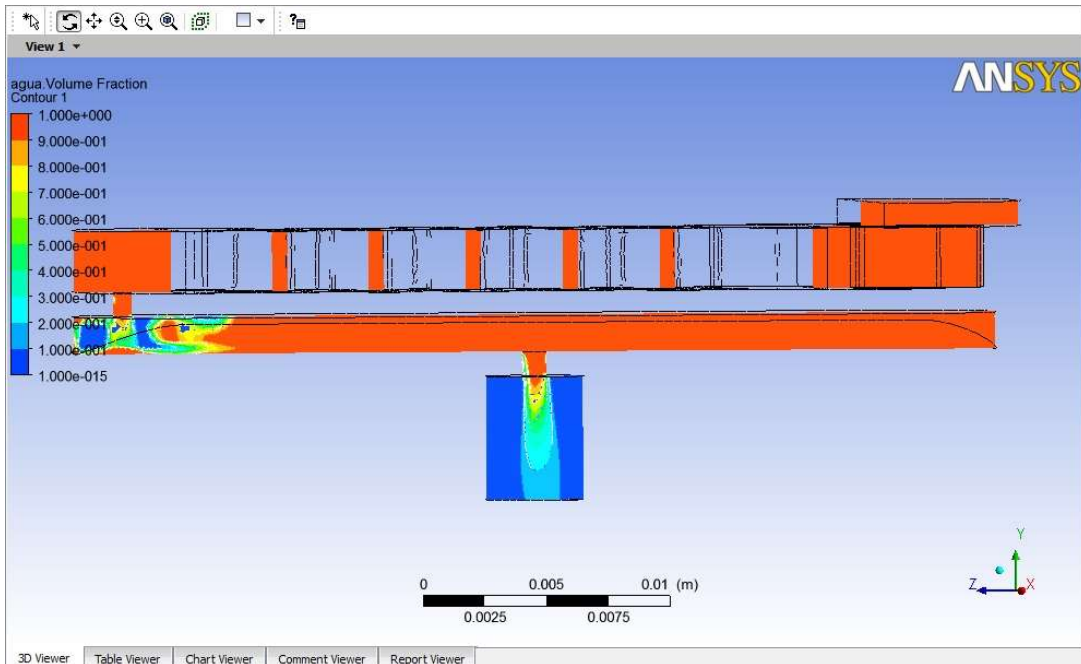
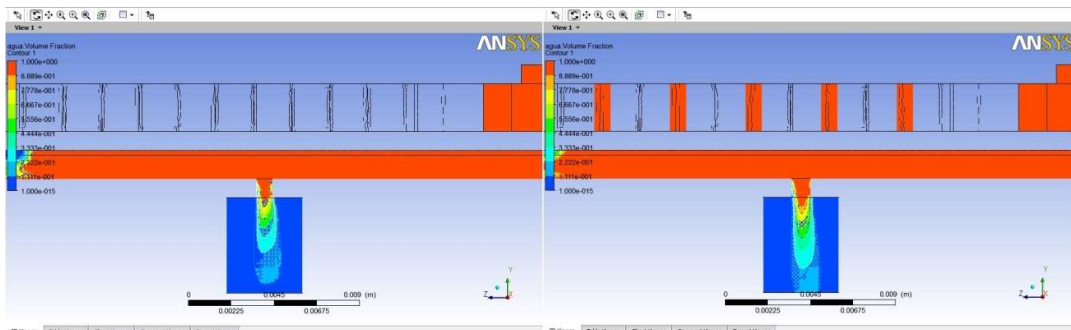


Figura 59 - Região de contorno com porcentagem de água para plano YZ

Em uma escala global pode-se observar o processo de formação da gota. Temos através da escala a coloração vermelha na saída do gotejador. A coloração vermelha representa 100% de água. Logo abaixo, temos a coloração amarela onde representa aproximadamente 80% de água. A seguir sucessivamente.

Uma animação para o contorno inserido ao plano YZ foi realizada. Deste modo temos uma animação em 2D para visualização da gota.

A figura 60 reúne todas as etapas até a formação da gota.



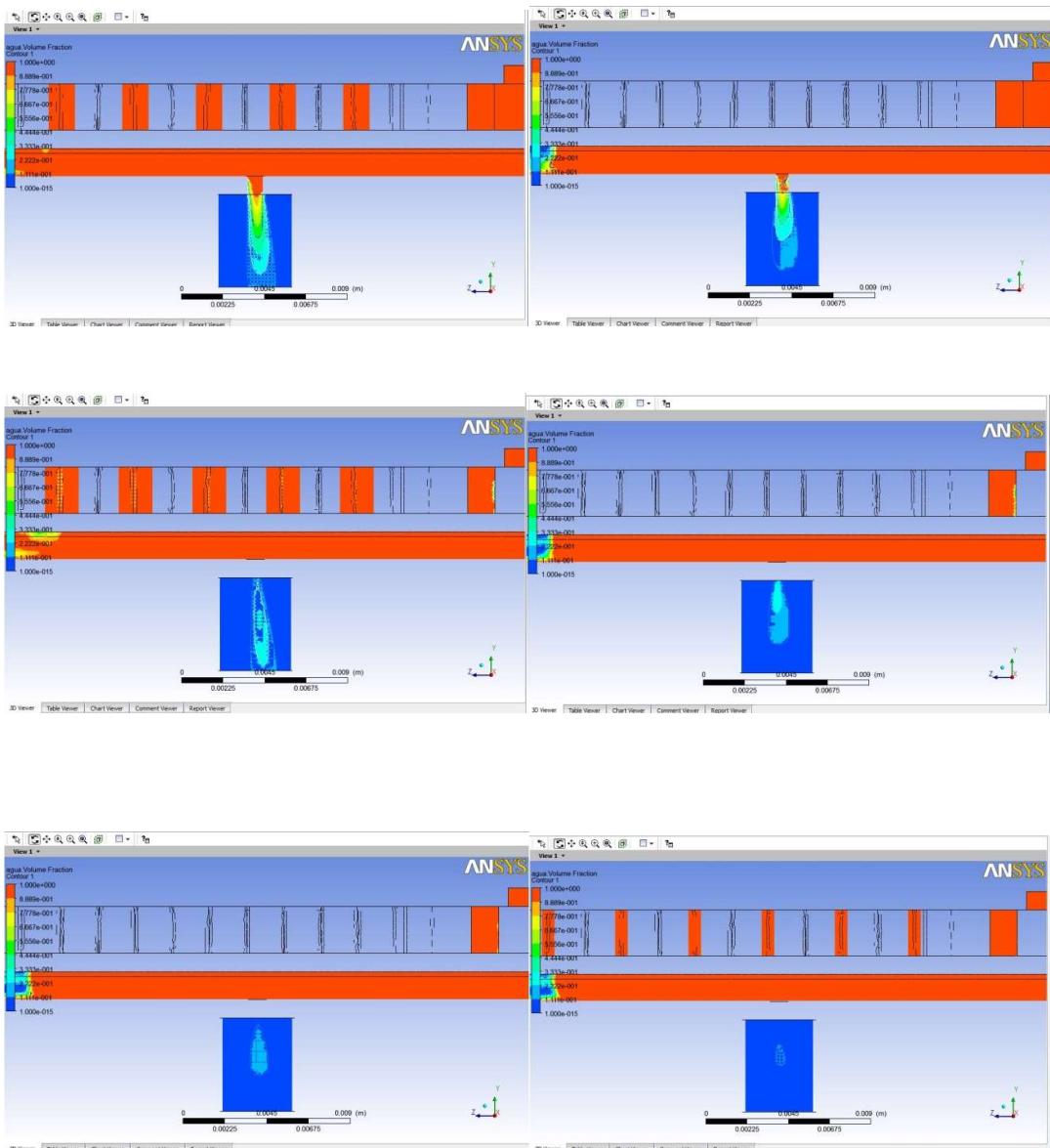
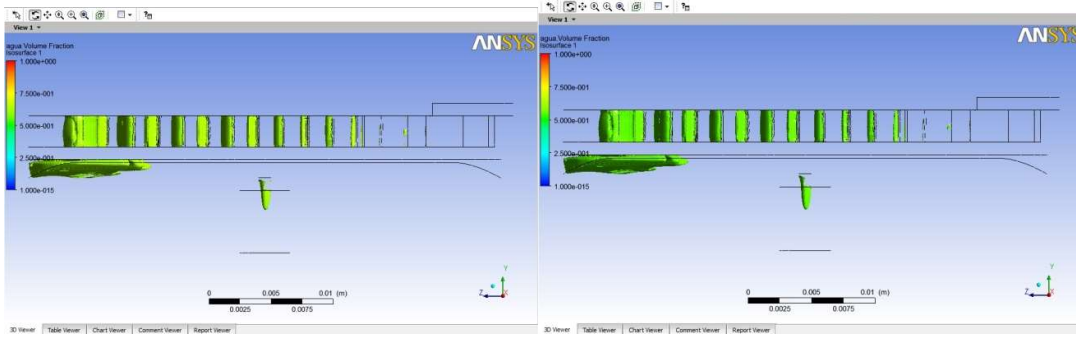
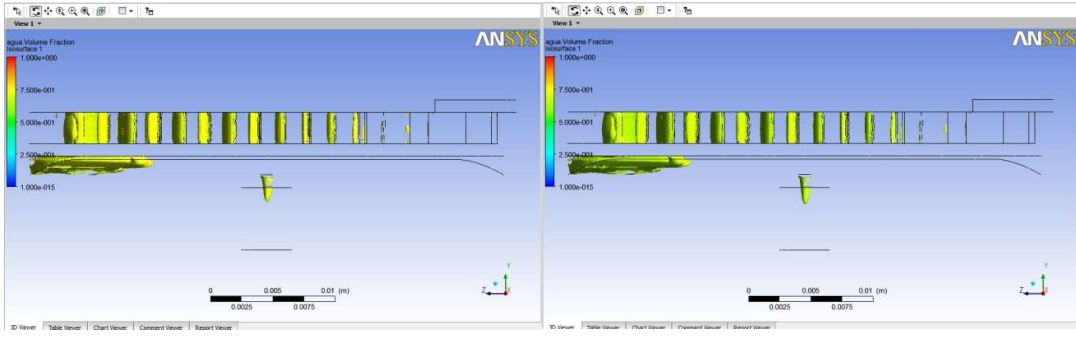
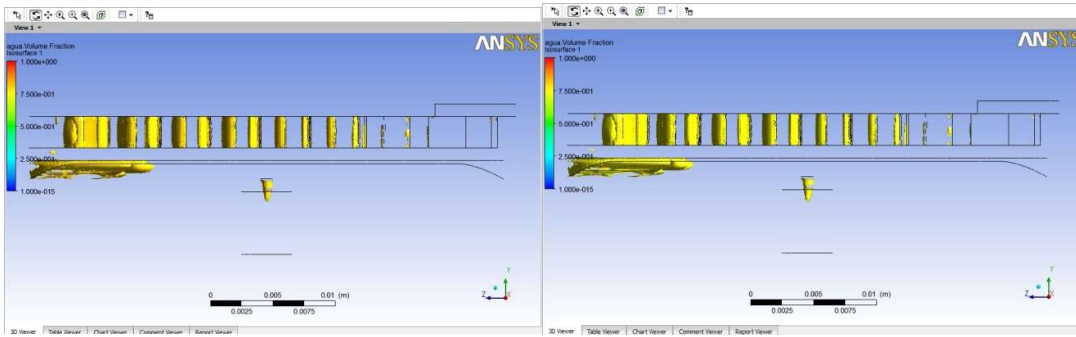
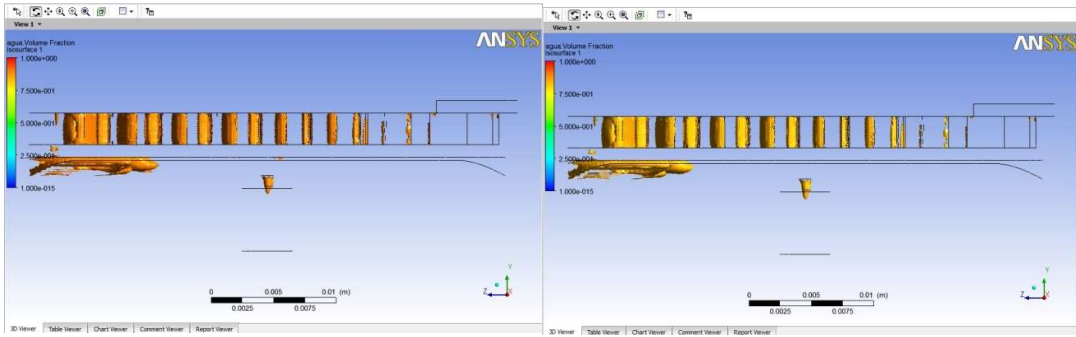
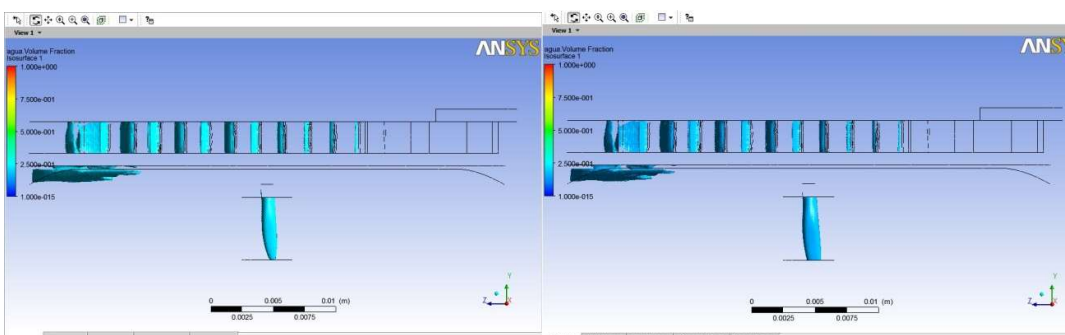
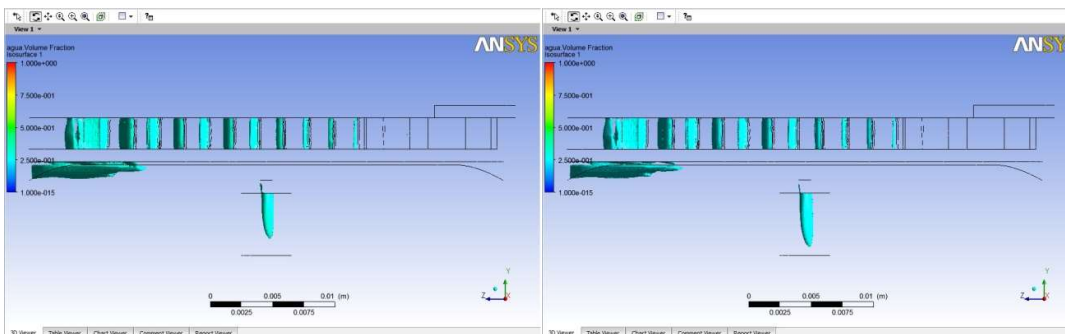
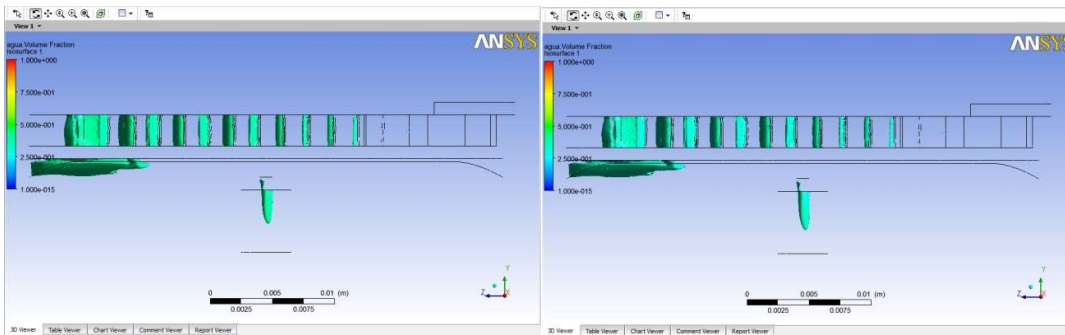
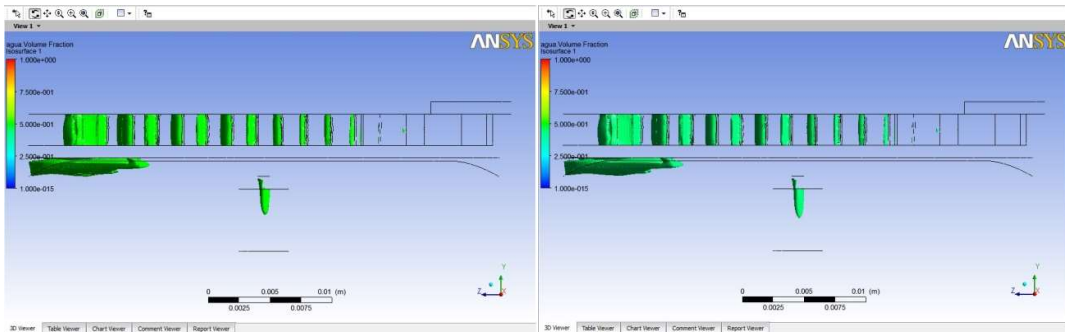


Figura 60 - animação passo a passo em 2D para região de contorno no plano YZ

Para que a formação da gota se apresentasse de uma maneira mais dinâmica, uma análise passo a passo em 3D foi realizada.

Distribuiu-se essa análise passo a passo em várias figuras acompanhando assim o processo de formação da gota. Logo, a figura 61 acumula os processos de iteração analisados no CFX-Post realizados até o período final pré-estabelecido de 200 segundos.





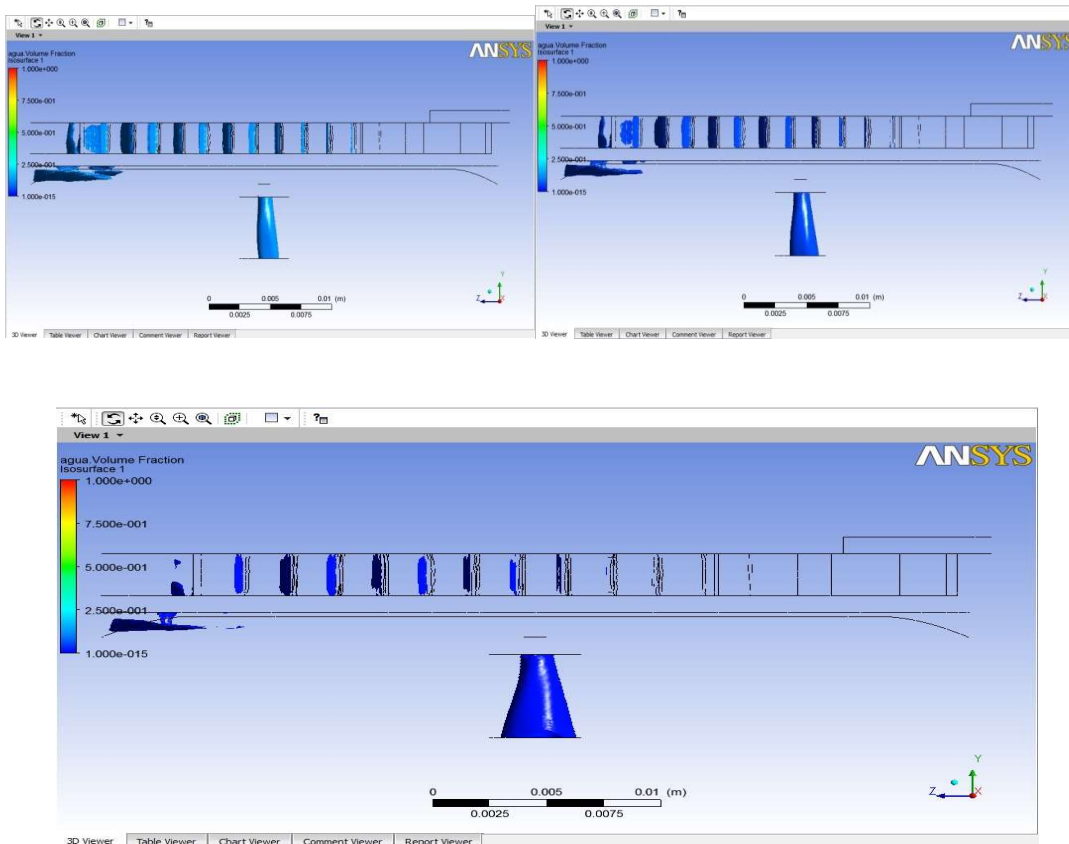


Figura 61 - reprodução passo a passo da simulação para regime transiente

Além da região de contorno inserida no plano YZ, com o parâmetro “isosurface” pode-se analisar uma superfície sólida se formando na saída do gotejador. Deve-se notar que o fluido analisado é representado por uma superfície, logo a água é demonstrada como um material sólido.

Ao realizar uma animação passo a passo, desta vez para o parâmetro “isosurface”, notamos a formação da gota de uma maneira diferente. Ao invés de termos uma imagem em 2D da formação da gota, desta maneira tem-se uma visualização em 3D.

Através dos passos pode-se analisar durante o processo de simulação a condição de verificar o processo de formação da gota em uma animação em 3D. A fração de volume de água pode ser verificada durante o andamento das imagens. No início a coloração alaranjada indica a quantidade de aproximadamente 90% de água. No final do processo tem-se a coloração azul escura que nos indica um valor de aproximadamente 0% de água e desta maneira o processo se encerra quando a gota é formada e assim desponta do gotejador para atingir o solo.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se analisa o objetivo deste trabalho o qual se trata, tanto de uma simulação de um gotejador “in-line” para comparação de resultados com um gotejador “in-line” de um fabricante em questão, quanto à visualização da formação de gotas através de um estado bifásico, pode-se concluir que este objetivo fora alcançado.

Os resultados finais, tanto da primeira simulação, que envolve o gotejador inserido dentro de uma tubulação, como o gotejador analisado separadamente da tubulação, apresentam resultados coerentes e significativos.

Os valores de vazão na saída do gotejador quando comparado com o modelo do fabricante foram bem similares. O erro máximo observado devido as diversas dificuldades encontradas foi de no máximo 10%.

Esta pequena porcentagem de erro valida os resultados e comprova a eficiência da ferramenta de CFD, utilizando o programa CFX. Quando é necessária uma análise visual e detalhada, esta ferramenta é muito promissora, pois se trata de um instrumento que envolve baixo custo, pois há uma economia na construção de protótipos, com um tempo menor de obtenção de resultados o programa.

As simulações para este trabalho se tratavam de simulações estacionárias, porém para efeito de conclusão e visualização de resultados optou-se para realizar uma simulação com um regime transiente.

A visualização da gota para uma análise de superfícies não foi perfeita.

Seria necessário um maior estudo do caso para que houvesse uma melhor visualização. Adaptações nos valores de tensão superficial da água e/ou no número de passos para análise dos resultados da simulação seria necessário para que a formação da gota fosse mais nítida.

Porém quando se analisa o processo de formação de gotas através do contorno de volume de água implantado no plano YZ, é possível visualizar perfeitamente a formação da gota.

Como recomendação para continuidade do trabalho, pode-se através de uma impressora 3D, obter um protótipo para o gotejador estudado.

Por meio deste protótipo pode-se, através de análises laboratoriais, validar o projeto com uma maior confiabilidade, estudando, por exemplo, o valor

de vazão obtido pelo mesmo (número de gotas que caem por um determinado período de tempo) e comparando com o resultado obtido a partir da simulação de um estado transiente.

Este estudo em laboratório não foi feito devido ao fato de o protótipo utilizado para construção da geometria do gotejador estudado, não permitir com que tal feito fosse realizado.

A comparação dos resultados obtidos em laboratórios com os resultados obtidos através da simulação seria ideal.

A simulação computacional é uma ferramenta muito boa para todos os ramos da engenharia. Muito foi acrescentado ao meu conhecimento, porém ainda há muito mais para se explorar. Especificamente na engenharia hídrica o conhecimento sobre esta ferramenta é muito vago, vide a importância que ela apresenta e temos total condição de implementá-la durante o curso de graduação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, E. J. Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil na Área de Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ARRUDA, L. B. Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos. 2004. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BATISTA, VICENTE HELANO FEITOSA, Geração de Malhas Não-Estruturadas Tetraédricas Utilizando um Método de Avanço de Fronteira [Rio de Janeiro] 2005, XIII, 85p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005).

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 6.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BLAZEK, J., Computational Fluid Dynamics - Principles and Applications. Elsevier Science Ltda. Oxford, UK, 2001. 440 p.

BONGANHA, A.C. Meio ambiente: o uso da água na irrigação e o licenciamento ambiental. Citricultura atual, v. 5, n. 25, p.14-15, dez 2001.

BUCKS, D.A.; DAVIS, S. Introduction. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Trickle irrigation for crop production: design, operation and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. Chap. 1, p. 1-26.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. Item Irrigação, n.49, o.8-13, jan/mar. 2001.

DAKER, A. Hidráulica aplicada à agricultura: A água na agricultura. 6.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 316p.

DAVIS, J. A.; STEWART, M. Predicting Globe Control Valve Performance ñ Part I: CFD Modeling. vol.124. Journal of Fluid Engineering. United States, 2002. 772 ñ 777 p.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S. A. Disponível em:

<http://www.furnas.com.br/inovacao_suporte_010.asp>. Acesso em 22 jun. 2011.

H. KURSAT CELIK, DAVUT KARAYEL, NURI CAGLAYAN, ALLAN E.W. RENNIE & IBRAHIM AKINCI (2011): Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: Case study for a sample in-line drip emitter, *Virtual and Physical Prototyping*, 6:1, 47-56

HAMILL, N., *Computational Fluid dynamics for pump related designs*, World Pumps, Volume 1996, Issue 358, Pages 50-53. 1996.

INOUE, F. K., *Modelagem Matemática em Obras Hidráulicas*. Tese (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. 114 f.

Iscan , S. , Ayyildiz , Z. , Uyan , A. , Tepeli , E. , Kaesli , Z. , Saritas , H. , Yasar , E. , Cinar , M. and Celik , A. , 2007 *Projecting of irrigation systems*. Publication of Turkish Republic, Ministry of Farming and Village Affairs, Publication No. 4, Adana/Turkey (in Turkish).

JANTIM NETO, H., *Simulação Computacional de uma Válvula do Tipo Gaveta com o auxílio do Programa ANSYS CFX®*. Tese (Graduação) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007. 88p.

LIMA, J.E.F.W; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. *O uso da irrigação no Brasil*. <http://www.ana.gov.br/usuarios/agropecuaria/main.htm> (10 mai. 2012)

MALISKA, C. R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. 2ª edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2004.

MODENESI, K.; FURLAN, L. T.; TOMAZ, E.; GUIRARDELLO, R.; NÚÑEZ, J. R. A CFD model for pollutant dispersion in rivers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, São Paulo, v. 21, p. 557-568, dec. 2004. Número 04.

NAUTIYAL H, et al. Reverse running pumps analytical, experimental and computational study: A review. *Renew Sustain Energy Rev* (2010).

Palau-Salvador , G. , Arviza-Valverde , J. and Bralts , V.F. , 2004 Hydraulic flow behaviour through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques ASAE/CSAE Annual International Meeting , Paper No. 042252., Ottawa, Ontario, Canada.

PORTO, R. M. Hidráulica básica. 3ª edição. São Carlos: EESC-USP, 2004, 519 p.

RODRIGO LÓPEZ, J; HERNÁNDES ABREU, J.M.; PÉREZ REGALADO, A.; GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, J.F. Riego Localizado. 2.ed.Madri: Ediciones Mundi-Prensa, 1997. 405p.

SOUZA, L. B. S. Estudo experimental e modelagem numérica do escoamento e do assoreamento em uma armadilha de sedimentos. 2006. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil na Área de Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. Mecânica dos fluidos. 7ª Edição. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. 585 p.

TOMAS N.; DA-WEN SUN; GRANT J.; FALLON R.; DODD V.; Applications of computational fluid dynamics (CFD) in modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. Ireland, 2006.

TRIESCH, O., BOHNET, M. Measurement and CFD prediction of velocity and concentration profiles in a decelerated gas-solids flow. Powder Technology, Braunschweig, Germany, v. 115, p. 101-113, may 2000.

VASCONCELOS, J. G., Introdução à hidráulica experimental. Brasília: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UNB, 2007. 48 p. (Apostila técnica).

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W., An introduction to Computational Fluid Dynamics – The finite volume method. Prentice Hall, Longman Group Ltd. New York, USA, 1995.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. Irrigação localizada. Tradução de H.R. Gheyi, F.A.V. Damasceno, L.G.A Silva Júnior e J.F de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1997. 184p. (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 36).

Wang, F.J. and Wang, W.E. 2006. Development and issues of CFD Analysis researches on flow path of emitters. Transactions of the CSAE, 22(7): 188–192.

Wang , W. , Wang , F. and Zhao , F. , 2006 Simulation of unsteady flow in labyrinth emitter of drip irrigation system Computers in Agriculture and Natural Resources: 4th World Congress Conference Proceedings , 24 26 July, Orlando, FL, USA.

Wei , Q. , Shi , Y. , Dong , W. and Huang , S. , 2004 Rapid response solutions to develop drip emitters , [online], Disponivel em :

http://www.watertech.cn/english/rapid%20response%20solutions%20to%20develop%20drip%20emitters_for.pdf

[Acessado em Agosto de 2013].

Wei, Q., Shi, Y., Dong, W. and Huang, S. 2006a. Advanced methods to develop drip emitters with new channel types. Applied Engineering in Agriculture, 22(2): 243–249.

Wei, Q., Shi, Y., Dong, W., Lu, G. and Huang, S. 2006b. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. Agricultural Water Management, 84: 130–136.

Wei, Q., Lu, G., Jie, L., Shi, Y., Dong, W. and Huang, S. 2008. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two phase flow simulations and laboratory experiments. Computers and Electronics in Agriculture, 63: 294–303.

Wei, Z., Tang, Y. and Lu, B. 2003a. A rapid manufacturing method for water-saving emitters for crop irrigation based on Rapid Prototyping and Manufacturing. International Journal for Advances in Manufacturing Technology, 21: 644–648.

WENDT, J. F., Computational Fluid Dynamics – An Introduction. 2ª edição. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1995. 297p.

Zhao, W., Zhang, J., Tang, Y., Wei, Z. and Lu, B. 2009. Research on transitional flow characteristic of labyrinth channel emitter. In: International Federation for Information Processing (IFIP) 294. Computer and Computing Technologies in Agriculture,