

Redução de temperatura em tubos de PPR embutidos em alvenaria

Temperature reduction in PPR pipes embedded in masonry

Reducción de temperatura en tuberías de PPR empotradas en mampostería

Takashi Uehara * 

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo; *Campus* São Paulo; Departamento de Construção Civil. São Paulo (SP), Brasil

Armando Traini Ferreira 

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo; *Campus* São Paulo; Departamento de Construção Civil. São Paulo (SP), Brasil. traini@ifsp.edu.br

* Autor correspondente.

CRediT

Contribuição de autoria: Concepção, Curadoria de dados, Metodologia, Software, Supervisão, Validação, Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: UEHARA, T.; Concepção, Curadoria de dados, Análise, Coleta de dados, Metodologia, Software, Supervisão, Validação, Visualização, Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: FERREIRA, A. T.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Não se aplica.

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Ricardo Prado Abreu Reis (Editor Convidado); Heber Martins de Paula (Editor Convidado); Simone Buiarte Brandão (Assistente Editorial); Sarah Adorno Blanco Vencio (Assistente Editorial).

Resumo

No transporte de água quente através de tubulações, ocorre transferência de calor para o ambiente, ocasionando a redução da temperatura da água. Cabe aos projetistas de sistemas prediais de água quente estimar as perdas térmicas, contudo, os dados disponíveis para diferentes configurações e condições de operação são insuficientes. Este artigo visa determinar a redução de temperatura no escoamento de água quente em tubulações de polipropileno copolímero random (PPR) embutidas em alvenaria, considerando diferentes diâmetros de tubo e velocidades de escoamento. Para isso, foi elaborado um modelo com formulações fundamentadas na literatura de transferência de calor, e foram realizadas simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional. O teste-*t* indicou que os resultados de redução obtidos pelos dois métodos foram significativamente diferentes para os tubos de 20 mm ($t = 2,7516$ e $p\text{-valor} = 0,02961$) e 25 mm ($t = 3,0391$ e $p\text{-valor} = 0,02080$), porém, as diferenças se mantiveram aproximadamente constantes ao variar a velocidade. Considerando as características de cada abordagem, conclui-se que o modelo é promissor e pode representar uma opção para a estimativa da perda térmica nos tubos, sendo necessário um aprofundamento da compreensão do fenômeno com a realização de ensaios.

Palavras-chave: Sistema predial de água quente; Redução de temperatura; Perda térmica; Tubulação de PPR; Alvenaria; CFD.

Abstract

During hot water transport through pipelines, heat is transferred to the surroundings, leading to a reduction in water temperature. It is the responsibility of building system designers to estimate thermal losses in hot water systems; however, the available data for different configurations and operating conditions are insufficient. This article aims to determine the temperature reduction in the flow of hot water in polypropylene random copolymer (PPR) pipes embedded in masonry, considering different pipe diameters and flow velocities. For this purpose, a model was developed with formulations based on heat transfer literature and Computational Fluid Dynamics simulations were conducted. The *t*-test indicated that the temperature reduction results obtained by the two methods were significantly different for the 20 mm pipe ($t = 2.7516$ and $p\text{-value} = 0.02961$) and 25 mm pipe ($t = 3.0391$ and $p\text{-value} = 0.02080$); however, the differences remained approximately constant when varying the velocity. Considering the characteristics of each approach, it can be concluded that the model shows promise and could serve as an option for estimating thermal losses in pipes, although further understanding of the phenomenon through experimental tests is necessary.

Keywords: Building hot water system; Temperature reduction; Thermal loss; PPR piping; Masonry; CFD.

Resumen

En el transporte de agua caliente a través de tuberías, se produce una transferencia de calor al entorno, lo que resulta en una reducción de la temperatura del agua. Corresponde a los diseñadores de sistemas de agua caliente en edificios estimar las pérdidas térmicas, pero los datos disponibles para diferentes configuraciones y condiciones de operación son insuficientes. Este artículo tiene como objetivo determinar la reducción de temperatura en el flujo de agua caliente a través de tuberías de polipropileno copolímero random (PPR) empotradas en mampostería, considerando diferentes diámetros de tubería y velocidades de flujo. Para ello, se desarrolló un modelo basado en la literatura de transferencia de calor, y se realizaron simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional. La prueba *t* indicó que los resultados de reducción obtenidos por los dos métodos fueron significativamente diferentes para las tuberías de 20 mm ($t = 2.7516$ y $p\text{-valor} = 0.02961$) y 25 mm ($t = 3.0391$ y $p\text{-valor} = 0.02080$), sin embargo, las diferencias se mantuvieron aproximadamente constantes al variar la velocidad. Considerando las características de cada enfoque, se concluye que el modelo es prometedor y puede representar una opción para estimar la pérdida térmica en tuberías, siendo necesario profundizar la comprensión del fenómeno mediante la realización de ensayos.

Palabras-clave: Sistema de agua caliente en edificios; Reducción de temperatura; Pérdida térmica; Tubería de PPR; Mampostería, CFD.

1 Introdução

A disponibilidade de água quente para o uso hidrossanitário é considerada uma necessidade básica (Borges, 2000). Segundo Chaguri Junior (2009), o volume de água quente consumido exclusivamente para banho pode representar aproximadamente de 6% a 12% do consumo total no Brasil, e os sistemas prediais de água quente são responsáveis por uma parcela significativa no consumo de energia do país. Esses sistemas devem ser projetados para funcionarem de forma eficiente, de modo a otimizar o consumo de energia e minimizar o impacto sobre o meio ambiente.

No escoamento de água quente em uma tubulação, a diferença de temperatura entre a água e o ambiente ocasiona transferência de calor entre esses meios e, conseqüentemente, a redução de temperatura do fluido interno (Incropera *et al.*, 2008). Para evitar a necessidade do aumento do consumo de energia para alcançar temperaturas confortáveis para o uso da água, a perda térmica deve ser pequena, o que é possível em sistemas adequadamente concebidos. Um bom desempenho energético do sistema de água quente pode ser obtido por meio da adoção de tubulações de materiais apropriados, tais como o polipropileno copolímero random (PPR), um material plástico com baixa condutividade térmica, o que o classifica como um isolante térmico (Tigre, 2012).

Conforme a NBR 5626 (ABNT, 2020), as perdas térmicas devem ser estimadas pelos projetistas em função dos materiais utilizados e da configuração e operação do sistema. É importante a estimativa da queda de temperatura na tubulação para conhecimento da quantidade de energia necessária para compensar essa perda, o que permite a escolha dos equipamentos e materiais mais adequados e a previsão de gastos com fontes de energia.

Os manuais técnicos dos fabricantes de tubos de PPR, geralmente, apresentam dados de perda de energia térmica nas tubulações obtidos por meio de formulações simplificadas que não consideram os diferentes modos de transferência de calor atuantes nos sistemas, tampouco a variação de parâmetros importantes, como a vazão e a configuração da tubulação. Além disso, estudos para determinar métodos de cálculos mais precisos são escassos.

Chaguri Junior (2009) estudou as perdas térmicas em tubulações de água quente tendo em consideração a transferência de calor por condução através da parede dos tubos. Outro estudo foi realizado por Ywashima, Ilha e Ferreira (2017), no qual foram consideradas a condução através da parede do tubo e as convecções interna e externa, determinadas a partir de valores de coeficientes de transferência de calor por convecção obtidos na literatura. Cardoso, Damo e Matter (2007) compararam, de forma experimental, o desempenho de diferentes materiais de tubos e isolamentos térmicos na condução de água quente em uma parede de alvenaria.

Uehara, Nascimento e Ferreira (2022) apresentaram um modelo para a determinação da redução de temperatura em tubos de PPR PN 25 aparentes, considerando todos os modos de transferência de calor atuantes e diversas vazões e diâmetros de tubo, e comparando os resultados com simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional realizadas no programa Ansys®.

Uehara e Ferreira (2022a) realizaram um estudo comparando um modelo teórico para a redução de temperatura em tubos embutidos em alvenaria e os resultados de simulações

no Ansys®, considerando o tubo de PPR PN 25 de diâmetro DN20 e variando as vazões. Uehara e Ferreira (2022b) também realizaram esse estudo, porém o parâmetro variável foi a velocidade do escoamento da água. No entanto, nesses estudos não foi feita uma análise para determinar o valor adequado para a altura da seção de parede contida no volume de controle do modelo, parâmetro importante para a análise de convecção e radiação e que influencia o resultado da perda térmica no tubo.

Existem poucos estudos a respeito desse tema, com soluções que envolvem uma pequena abrangência de condições de contorno. Dessa forma, este artigo visa determinar a redução de temperatura no escoamento de água quente em tubulações de PPR embutidas em alvenaria, considerando diferentes diâmetros de tubo e velocidades de escoamento e determinando a altura ideal da seção de parede do modelo teórico para os cálculos.

2 Fundamentação teórica

O polipropileno copolímero random (PPR) é uma matéria-prima polimérica utilizada para a fabricação de tubos e conexões, podendo ser aplicada tanto em sistemas prediais de água quente como em sistemas prediais de água fria (Botelho; Ribeiro Junior, 2014). Esse material possui boas propriedades térmicas e mecânicas, como estabilidade térmica e resistência ao envelhecimento, tornando-o adequado para sistemas de tubulação para aplicações domésticas e industriais (Yu *et al.*, 2014).

Uma característica do PPR é a baixa condutividade térmica, que o classifica como um isolante térmico (Tigre, 2012). Essa propriedade do material permite uma menor perda de calor da água quente para o ambiente. Por outro lado, em relação à resistência à pressão interna, os tubos de PPR estão agrupados em três classes de pressão denominadas PN 25, PN 20 e PN 12,5, sendo esta última exclusiva para uso com água fria (Benedicto, 2009). As tubulações de PPR são especificadas pela NBR 15813-1 (ABNT, 2018), que estabelece diâmetros nominais (DN) de 20 mm a 160 mm.

Segundo Borgnakke e Sonntag (2018), o calor é definido como a transferência de energia através da fronteira de um sistema, em uma dada temperatura, para outro, com temperatura inferior. Considerando-se um sistema em condições de regime estacionário, com fluido entrando e saindo a diferentes temperaturas, a equação da energia térmica pode ser expressa pela Equação 1 (Borgnakke; Sonntag, 2018).

$$q = -\dot{m}c_p(T_{sai} - T_{ent}) \quad (1)$$

Em que:

q = saída de energia térmica do fluido (W);

\dot{m} = vazão mássica de entrada no sistema (kg s^{-1});

c_p = calor específico a pressão constante do fluido ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

T_{sai} = temperatura do fluido na saída do escoamento (K);

T_{ent} = temperatura do fluido na entrada do escoamento (K).

Conforme Incropera *et al.* (2008), há três modos de transferência de calor em um meio ou entre meios: condução, convecção e radiação. A condução ocorre através de um meio estacionário sólido ou fluido com gradiente de temperatura. A convecção é a transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento, estando os dois meios com diferentes temperaturas. A radiação ocorre entre superfícies a diferentes temperaturas.

Toda superfície com temperatura não nula (acima de 0 K) emite energia na forma de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, duas superfícies a diferentes temperaturas trocam calor por radiação, desde que não haja obstáculos entre elas (Incropera *et al.*, 2008).

A quantidade de energia transferida por unidade de tempo pode ser obtida através de equações de taxa apropriadas para cada modo de transferência. Para a condução, utiliza-se a lei de Fourier, para a convecção utiliza-se a lei do resfriamento de Newton, e para a radiação utiliza-se a lei de Stefan-Boltzmann (Incropera *et al.*, 2008).

No estudo da transferência de calor, sistema unidimensional é aquele em que gradientes de temperatura e, conseqüentemente, a transferência de calor ocorrem ao longo de uma única direção (Incropera *et al.*, 2008). Segundo Moran *et al.* (2005), os sistemas cilíndricos frequentemente apresentam gradientes de temperatura ao longo de uma única direção, a radial. Assim, esses sistemas podem ser tratados como unidimensionais.

Em algumas situações, a consideração de condução unidimensional não pode ser aceita devido à geometria do meio. Conforme Incropera *et al.* (2008), os efeitos multidimensionais nesses casos tornam os efeitos de condução bidimensional importantes. Problemas de transferência de calor bidimensional podem ser resolvidos com o uso de fatores de forma nas equações de taxa de transferência, que são encontrados na literatura para diversas geometrias.

Em problemas que envolvem transferência de calor, é comum a consideração de um “circuito” de resistências térmicas. A resistência térmica pode ser definida como a razão entre uma diferença de temperatura e a correspondente taxa de transferência de calor, podendo ser expressa pela Equação 2 (Moran *et al.*, 2005).

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (2)$$

Em que:

R = resistência térmica ($K W^{-1}$);

ΔT = diferença de temperatura (K);

q = taxa de transferência de calor (W).

3 Metodologia

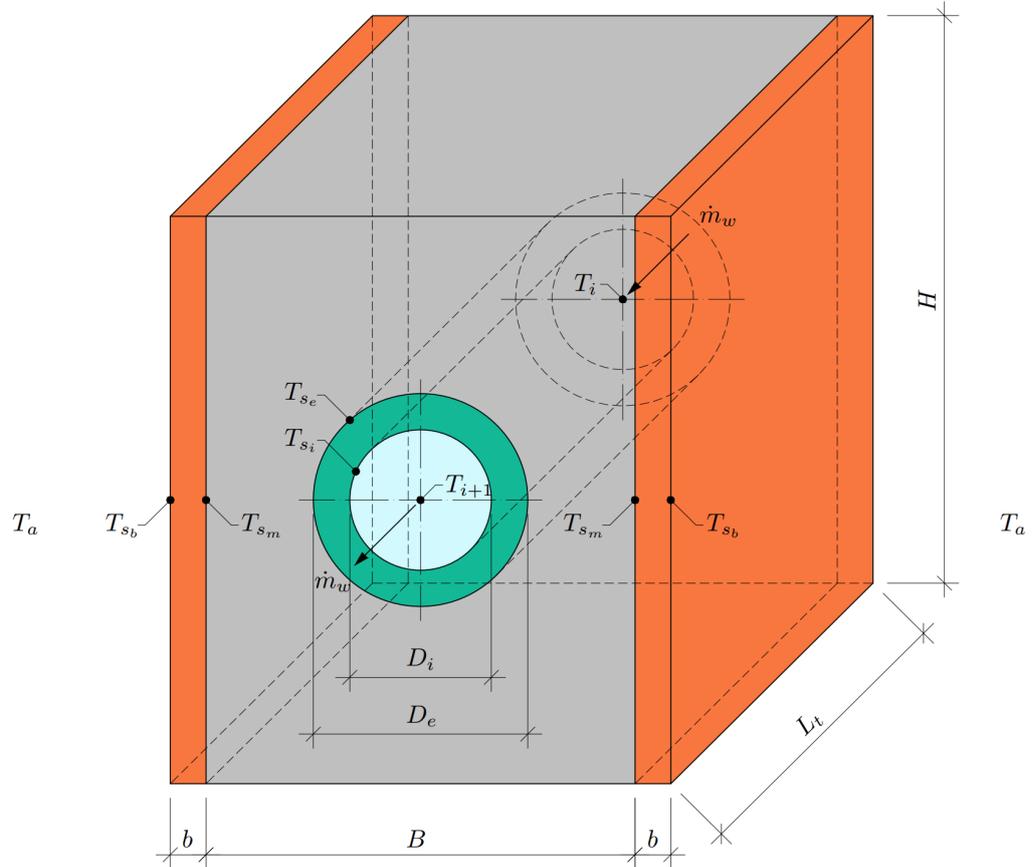
Foi definido um modelo teórico para calcular a redução de temperatura no escoamento em tubos de PPR embutidos em alvenaria e foram realizadas simulações computacionais, com o intuito de comparar os resultados dos dois métodos e avaliar a aplicabilidade das formulações do modelo na estimativa da perda térmica nas tubulações de sistemas prediais de água quente. Posteriormente, o modelo teórico foi empregado em um projeto de sistema predial de água quente de uma residência unifamiliar para exemplificar a determinação das perdas térmicas nas tubulações e das temperaturas nos pontos de utilização (aparelhos sanitários).

3.1 Modelo teórico

Foi considerado um sistema em condições de regime estacionário. Essa consideração significa que a redução de temperatura é calculada quando a temperatura em qualquer ponto do sistema é constante, desconsiderando o período em que parte da energia térmica da água é utilizada para aquecer a tubulação e a parede, que inicialmente se encontram a temperatura ambiente. O modelo teórico (Figura 1) é composto por um

volume de controle que contém uma “fatia” de parede de alvenaria, um tubo de PPR posicionado em seu centro e o ar na parte externa. A alvenaria é constituída por um bloco cerâmico representado por duas placas (os sólidos laranjas na figura) e uma argamassa (sólido cinza) que envolve o tubo.

Figura 1: Modelo teórico.



Legenda:

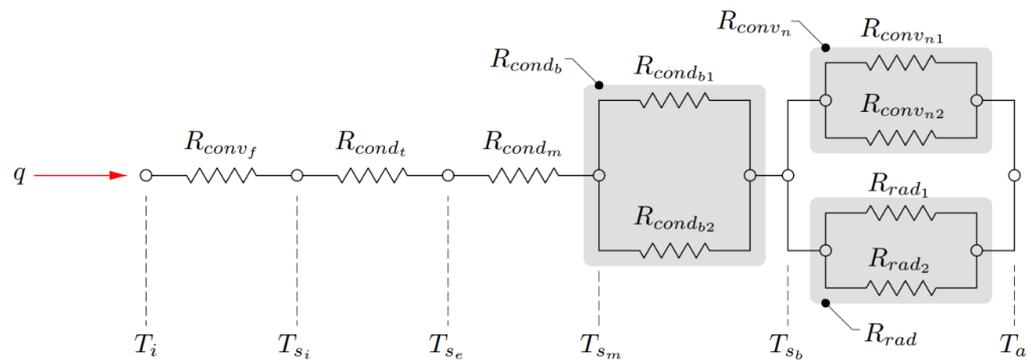
- B = largura da argamassa (m);
- b = largura das placas do bloco (m);
- D_e = diâmetro externo do tubo (m);
- D_i = diâmetro interno do tubo (m);
- H = altura da seção de parede (m);
- L_t = comprimento do tubo (m);
- \dot{m}_w = vazão mássica no escoamento da água (kg s^{-1});
- T_a = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);
- T_i = temperatura da água a montante ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{i+1} = temperatura da água a jusante ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{sb} = temperatura da superfície da parede ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{se} = temperatura da superfície externa do tubo ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{si} = temperatura da superfície interna do tubo ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{sm} = temperatura da superfície da argamassa em contato com o bloco ($^{\circ}\text{C}$).

Considerou-se que as faces de ambos os lados da parede (nomeados como lado 1 e 2) possuem a mesma temperatura, e o ar externo e a vizinhança estão a temperatura ambiente (T_a). O tubo conduz água com vazão mássica \dot{m}_w . A montante (entrada) desse trecho de tubo (identificado por trecho “i”), a temperatura da água é T_i , e a jusante (saída),

a temperatura é T_{i+1} . O objetivo do modelo é, a partir da temperatura a montante de um trecho, determinar a temperatura a jusante, que corresponde à temperatura a montante do trecho subsequente. Dessa forma, pode-se calcular a perda térmica de diversos trechos i de uma tubulação.

Para melhor aproximação entre o modelo e um sistema real, consideraram-se todos os modos de transferência de calor atuantes, e as correlações empíricas necessárias foram escolhidas de forma que o sistema atendesse às condições de aplicação. O sistema pode ser representado por meio do circuito térmico mostrado na Figura 2, utilizando resistências térmicas para cada modo de transferência de calor e cada elemento da geometria.

Figura 2: Circuito térmico do modelo teórico.



Considerou-se que ocorre convecção forçada (R_{convf}) entre a água e a superfície interna do tubo, condução unidimensional na direção radial no tubo (R_{condt}), condução bidimensional na argamassa (R_{condm}), condução unidimensional no bloco (R_{condb}) e convecção natural e radiação atuando em paralelo entre a superfície da parede e a vizinhança (R_{convn} e R_{rad}). Para estes três últimos, o fluxo de calor ocorre em paralelo entre os lados 1 e 2 da parede, conforme a Figura 2. Dessa forma, foi calculada a resistência equivalente para cada modo. Em cada lado, também foi calculada a resistência equivalente de convecção natural e radiação.

O escoamento de água quente no sistema possui regime turbulento. O número de Reynolds foi calculado com a formulação para escoamentos internos em tubos circulares, conforme apresentada por Brunetti (2008). Para o cálculo das propriedades de convecção forçada, considerou-se que o escoamento é completamente desenvolvido (fluidodinâmica e termicamente), ou seja, as formulações são aplicáveis em uma região do tubo distante do seu início.

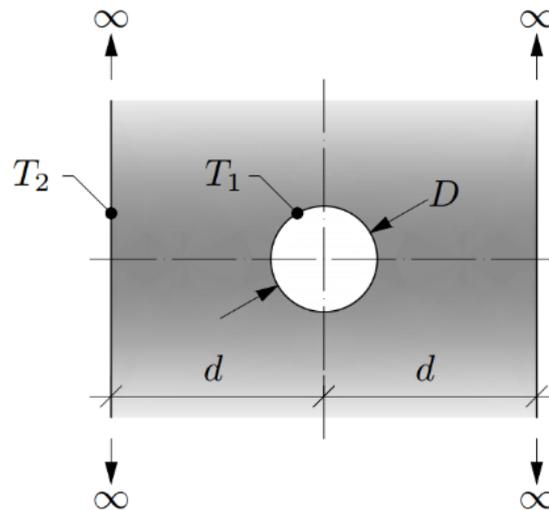
O número de Nusselt foi calculado por meio da analogia de Chilton-Colburn, uma correlação bastante aceita para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos em tubos circulares lisos (Incropera *et al.*, 2008). Para o fator de atrito, foi usada a expressão de Swamee, que permite determinar o valor dessa propriedade sem restrições quanto ao regime de escoamento (Porto, 2006). O comprimento característico da superfície para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada corresponde ao diâmetro interno do tubo.

Para a condução no tubo, utilizou-se a expressão para o cálculo da resistência térmica condutiva de um sistema cilíndrico oco, obtida de Incropera *et al.* (2008) e Moran *et al.* (2005), que considera a condução unidimensional na direção radial. O bloco cerâmico é

constituído por duas placas cerâmicas, uma de cada lado da alvenaria e em contato com a argamassa. A resistência térmica de cada placa foi calculada pela expressão para a resistência térmica condutiva de uma placa plana obtida de Moran *et al.* (2005).

Na argamassa, ocorre condução bidimensional, em que a energia é transferida da superfície externa do tubo para as superfícies da argamassa em contato com o bloco. Geralmente, uma tubulação é embutida próxima a uma das faces da parede, o que torna a seção transversal do sistema assimétrica. Para possibilitar o uso de um fator de forma para condução na argamassa disponível na literatura, a geometria foi simplificada para uma tubulação centralizada na seção da parede, que é comparada com a geometria real assimétrica modelada nas simulações computacionais. Um fator de forma apropriado para essa geometria é o obtido de Incropera *et al.* (2008), que contempla a situação de um cilindro circular horizontal longo no meio do caminho entre dois planos paralelos espessos de igual comprimento e largura infinita, expresso pela Equação 3. A geometria para uso do fator de forma é representada na Figura 3.

Figura 3: Geometria para a determinação do fator de forma.



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2008).

$$S = \frac{2\pi L_t}{\ln\left(\frac{4B}{\pi D_e}\right)} \quad (3)$$

Em que:

S = fator de forma (m);

L_t = comprimento do tubo (m);

B = largura da argamassa (m);

D_e = diâmetro externo do tubo (m).

Em ambos os lados da parede, ocorre transferência de calor por convecção natural do bloco para o ar. A geometria da parede determinou o equacionamento de convecção natural para placas verticais. Dessa forma, o cálculo do número de Rayleigh e do coeficiente de transferência de calor por convecção natural utilizou como comprimento característico da superfície a altura da parede. O número de Nusselt foi determinado por meio da correlação de Churchill e Chu, expressão bastante aceita para a situação de placas verticais em convecção natural (Moran *et al.*, 2005).

Para a modelagem da radiação, considerou-se que a parede está envolta em ambos os lados por uma superfície vizinha a temperatura ambiente para utilização do equacionamento apresentado por Incropera *et al.* (2008), que analisa uma superfície que troca energia com uma superfície isotérmica (vizinhança) que a envolve. As propriedades do ar foram avaliadas à temperatura do filme, calculada pela média entre a temperatura da superfície da parede e a temperatura ambiente.

A temperatura T_{sb} das superfícies externas da parede é inicialmente desconhecida, porém é necessária para o cálculo das resistências térmicas convectiva e radiante. Seu valor foi calculado pela Equação 4, desenvolvida com base nas equações de taxa de cada modo de transferência e na consideração da conservação de energia em um sistema estacionário (primeira lei da termodinâmica), conforme Borgnakke e Sonntag (2018). Isso permitiu afirmar que as taxas de transferência de calor em cada modo possuem o mesmo valor (q).

$$T_{sb} = T_i - q (R_{convf} + R_{condt} + R_{condm} + R_{condb}) \quad (4)$$

Em que:

T_{sb} = temperatura da superfície da parede (°C);

T_i = temperatura da água a montante do tubo (°C);

q = taxa de transferência de calor (W);

R_{convf} = resistência térmica de convecção forçada ($K W^{-1}$);

R_{condt} = resistência térmica condutiva do tubo ($K W^{-1}$);

R_{condm} = resistência térmica condutiva da argamassa ($K W^{-1}$);

R_{condb} = resistência térmica condutiva do bloco ($K W^{-1}$).

Para a determinação do valor correto de T_{sb} , realizou-se um processo iterativo partindo-se da atribuição de um valor inicial para essa temperatura. Com esse valor, calcularam-se todas as resistências térmicas para a determinação da taxa de transferência de calor por meio da Equação 2. Em seguida, verificou-se o valor da mesma temperatura com a Equação 4. Caso os valores estipulado e verificado fossem diferentes, atribuíam-se um novo valor e repetiam-se os cálculos. Quando os valores se igualaram, a conservação de energia foi satisfeita e a temperatura da água a jusante do tubo foi determinada com os valores corretos de resistências térmicas.

Substituiu-se T_{sai} por T_{i+1} e T_{ent} por T_i na Equação 1. A saída de energia térmica corresponde à taxa de transferência de calor da Equação 2. Dessa forma, obteve-se a expressão usada para determinar a temperatura da água a jusante do tubo, apresentada na Equação 5.

$$T_{i+1} = T_i - \frac{T_i - T_a}{\dot{m}_w c_p (R_{convf} + R_{condt} + R_{condm} + R_{condb} + R_{convn,rad})} \quad (5)$$

Em que:

T_{i+1} = temperatura da água a jusante do tubo (°C);

T_i = temperatura da água a montante do tubo (°C);

T_a = temperatura do ar e da vizinhança (°C);

\dot{m}_w = vazão mássica no escoamento da água ($kg s^{-1}$);

c_p = calor específico a pressão constante da água ($J kg^{-1} K^{-1}$);

R_{convf} = resistência térmica de convecção forçada ($K W^{-1}$);

R_{condt} = resistência térmica condutiva do tubo ($K W^{-1}$);

R_{cond_m} = resistência térmica condutiva da argamassa ($K W^{-1}$);

R_{cond_b} = resistência térmica condutiva do bloco ($K W^{-1}$);

$R_{conv_n,rad}$ = resistência térmica equivalente de convecção natural e radiação ($K W^{-1}$).

As formulações do modelo teórico foram implementadas em uma planilha no software Microsoft® Excel®. Para a obtenção das propriedades termofísicas da água e do ar, foi utilizado o software mini-REFPROP (versão 10.0) do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST do inglês, National Institute of Standards and Technology). Essa ferramenta permite obter propriedades de diversos fluidos puros e pseudo-puros (NIST, 2020).

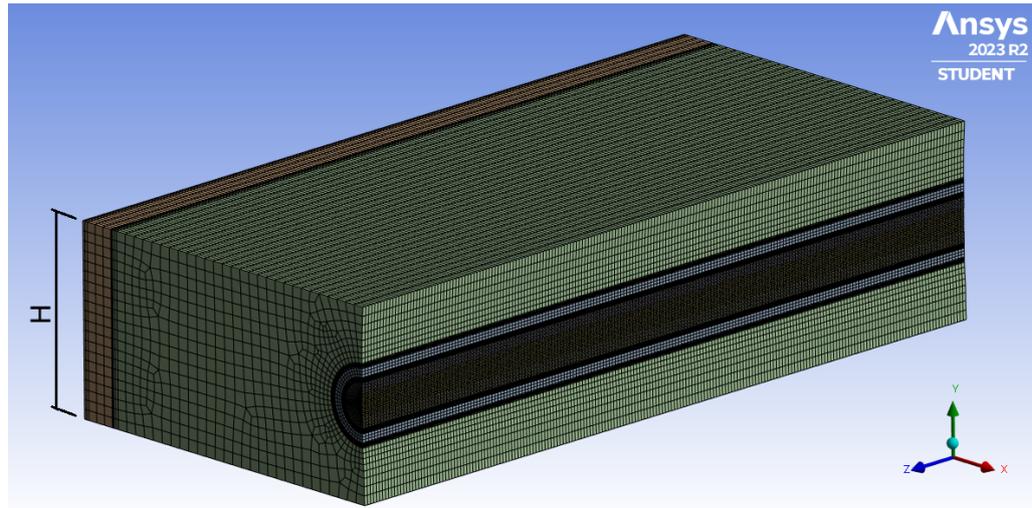
3.2 Simulação computacional

Para as simulações, foi utilizado o pacote Fluent do software Ansys® 2023 R2 Student (versão acadêmica e gratuita do programa Ansys® 2023 R2), um software de simulação baseado em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e amplamente aceito e usado em análises de mecânica dos fluidos e transferência de calor (Versteeg; Malalasekera, 2007). As equações utilizadas para a solução das simulações de CFD são as de conservação de massa, de momento e de energia. Outros processos importantes podem ser descritos por equações que são resolvidas em conjunto com as equações de conservação como, por exemplo, a turbulência, em que são utilizados modelos empíricos para diminuir o poder computacional requerido para as simulações (Silva, 2019).

Para a aplicação das equações governantes, é necessária a geração de uma malha de elementos sobre o domínio. No Fluent, o método numérico de solução é o Método dos Volumes Finitos (MVF), no qual o domínio é dividido em volumes de controle para a integração das equações em cada elemento (Versteeg; Malalasekera, 2007). A proximidade entre a solução da simulação e a solução exata depende de diversos fatores, como o tamanho e formato dos volumes de controle (qualidade da malha) e o tamanho dos erros (resíduos) gerados nas iterações (Silva, 2019). Por se tratar de uma versão gratuita, esse programa tem uma limitação de 1048576 elementos na malha (Ansys Inc, 2023b).

Devido ao fato de a geometria do problema ser bastante simples (não possui curvaturas no escoamento nem formas complexas), foi gerada uma malha estruturada de volumes hexaédricos, conforme recomendação de Ansys Inc (2023a). A malha foi criada no programa Ansys Meshing, já incorporado ao pacote. A qualidade da malha foi avaliada pelo próprio programa, por meio dos indicadores relação de aspecto, ortogonalidade e assimetria. Estes dois últimos apresentaram valores considerados bons. A malha foi refinada no domínio do escoamento de água para reduzir as dimensões dos elementos próximos à superfície interna do tubo na direção radial, com o objetivo de simular com maior precisão as condições da camada limite. Isso tornou os elementos alongados nas direções circunferencial e longitudinal, ocasionando a avaliação da relação de aspecto como aceitável. A Figura 4 mostra uma seção da geometria com a malha utilizada em uma das simulações.

Figura 4: Malha gerada no Ansys Meshing.



O programa foi configurado para realizar a simulação baseada em pressão, que é uma das formas disponíveis para a solução das equações de conservação, geralmente utilizada para escoamentos incompressíveis (Ansys Inc, 2023a). Foi utilizado o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão, pois o escoamento é simples (não possui curvaturas, fluxos livres, fluxos separados, entre outros), não exigindo as vantagens de outros modelos mais aprimorados.

Nos materiais, foram definidas as propriedades dos fluidos (água e ar) e dos sólidos (PPR, argamassa e cerâmica). O Fluent permite especificar a massa específica, o calor específico a pressão constante, a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica dos materiais. As propriedades dos fluidos foram obtidas no mini-REFPROP, as propriedades do PPR foram obtidas de Amanco (2010) e Tigre (2012), e as propriedades da argamassa e da cerâmica foram obtidas de Incropera *et al.* (2008).

Nas condições de contorno, foram definidas a temperatura e a velocidade da água na entrada do escoamento e as condições térmicas nas fronteiras. Em todas as fronteiras externas (exceto as laterais) foi atribuída a condição térmica de fluxo de calor nulo para simular a condição de parede adiabática. Nas laterais, foi imposta a condição “mixed” para radiação e convecção, na qual foram especificados o coeficiente de transferência de calor por convecção (que deve ser estimado, nesse caso, pelo modelo teórico), a temperatura do fluxo livre (temperatura ambiente) e um valor de emissividade da superfície. O coeficiente de transferência de calor informado é o coeficiente de convecção natural calculado pelo modelo teórico, e a emissividade é a da superfície da cerâmica.

Escolheu-se realizar 250 iterações para cada simulação. Os valores dos resíduos da simulação diminuem com o andamento da solução e foram armazenados e exibidos em um gráfico. Por padrão, o critério de convergência do Fluent é de 10^{-3} para todas as equações exceto a da energia, que possui um critério de valor 10^{-6} . Todas as simulações desta pesquisa alcançaram valores abaixo desses critérios, indicando que as iterações foram suficientes para a solução convergir para o resultado final.

A velocidade e a temperatura especificadas a montante do tubo são consideradas constantes em toda a seção do escoamento, o que só ocorreria caso a face a montante fosse a entrada de uma tubulação. Dessa forma, a simulação não atende às premissas do modelo teórico com relação à condição do escoamento desenvolvido. Para corrigir esse

problema, foi exportado um perfil de velocidades a jusante na primeira simulação, que posteriormente foi importado no programa para ser utilizado como o perfil a montante na simulação subsequente. Assim, a nova simulação considerou um escoamento desenvolvido na entrada, atendendo à premissa de escoamento desenvolvido fluidodinamicamente em toda a extensão da tubulação.

No entanto, para a temperatura não foi realizado esse processo, pois a temperatura média a jusante possui um valor menor que a temperatura a ser atribuída a montante (40°C). Além disso, não é possível obter um perfil desenvolvido a jusante com temperatura média de 40°C, pois isso implica em um fluxo térmico nulo, o que só ocorre se não existir gradiente de temperatura no perfil.

3.3 Comparação entre os métodos

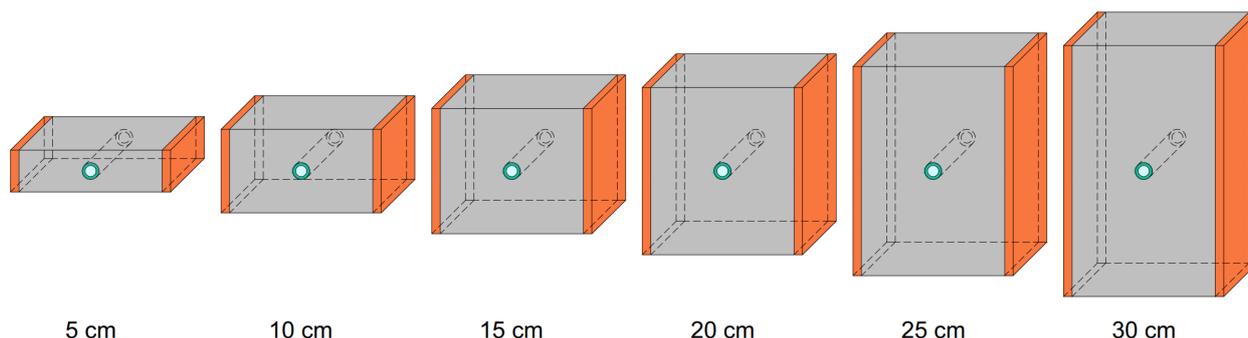
Na comparação entre o modelo teórico e as simulações, consideraram-se as mesmas condições de contorno (dimensões da alvenaria e da tubulação, temperatura de entrada da água, temperatura do ambiente, entre outros). A situação testada foi a de um tubo de PPR PN 25 embutido em alvenaria de tijolos cerâmicos maciços sem revestimento. As análises foram feitas para os diâmetros nominais DN20, DN25 e DN32 (comumente usados em residências unifamiliares) e diferentes velocidades de escoamento da água, com o intuito de verificar a aplicabilidade da formulação em uma ampla faixa de situações. Consideraram-se a temperatura da água a montante de 40°C, a temperatura ambiente de 20°C, o comprimento do tubo de 20 cm, a largura interna da parede de 17 cm e a largura externa de 19 cm.

Para a aplicação do modelo teórico, deve ser considerada uma altura (H) da parede para o cálculo das resistências térmicas de condução do bloco, convecção natural e radiação. O tamanho da parede a ser considerado influencia o resultado do cálculo da redução de temperatura e deve ser adequadamente escolhido. A comparação foi dividida em duas etapas: na primeira, realizou-se um estudo para determinar a altura da parede a ser adotada para cada diâmetro; na segunda, o modelo foi avaliado por meio de uma comparação entre os métodos, considerando-se a altura definida na primeira etapa e variando-se as velocidades de escoamento da água.

3.3.1. Primeira etapa

Na primeira etapa da análise, foi realizada uma comparação entre as reduções de temperatura no modelo teórico e nas simulações para paredes com alturas de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm (representadas na Figura 5) e para velocidades de 0,5 e 3,0 m s⁻¹. A geometria da alvenaria adotada para essas simulações é idêntica à do modelo teórico para facilitar a variação das dimensões na modelagem no Fluent, uma vez que a determinação da altura não requer exatidão nos resultados das simulações, e a argamassa e a cerâmica possuem propriedades termofísicas com valores próximos, conforme Incropera *et al.* (2008).

Figura 5: Alturas de parede consideradas para a primeira etapa.



Para auxiliar na escolha da altura ideal para a aplicação do modelo teórico, os resultados das simulações e do modelo foram comparados com outros dois modelos: um modelo para a situação de tubo aparente (não embutido em alvenaria) e um modelo alternativo para tubo embutido. O modelo para tubo aparente é o apresentado por Uehara, Nascimento e Ferreira (2022), que considera a transferência de calor pelos três modos (condução, convecção e radiação) e utiliza uma correlação específica para convecção natural em cilindros horizontais.

O modelo alternativo é semelhante ao modelo teórico deste trabalho, com apenas uma mudança na representação da argamassa. A geometria da argamassa foi simplificada para duas placas planas verticais, ambas posicionadas entre o tubo e as placas do bloco cerâmico. Dessa forma, ocorre condução unidimensional através de cada placa, dispensando o uso do fator de forma para a condução bidimensional. As placas atuam em paralelo, assim como as placas que compõem o bloco.

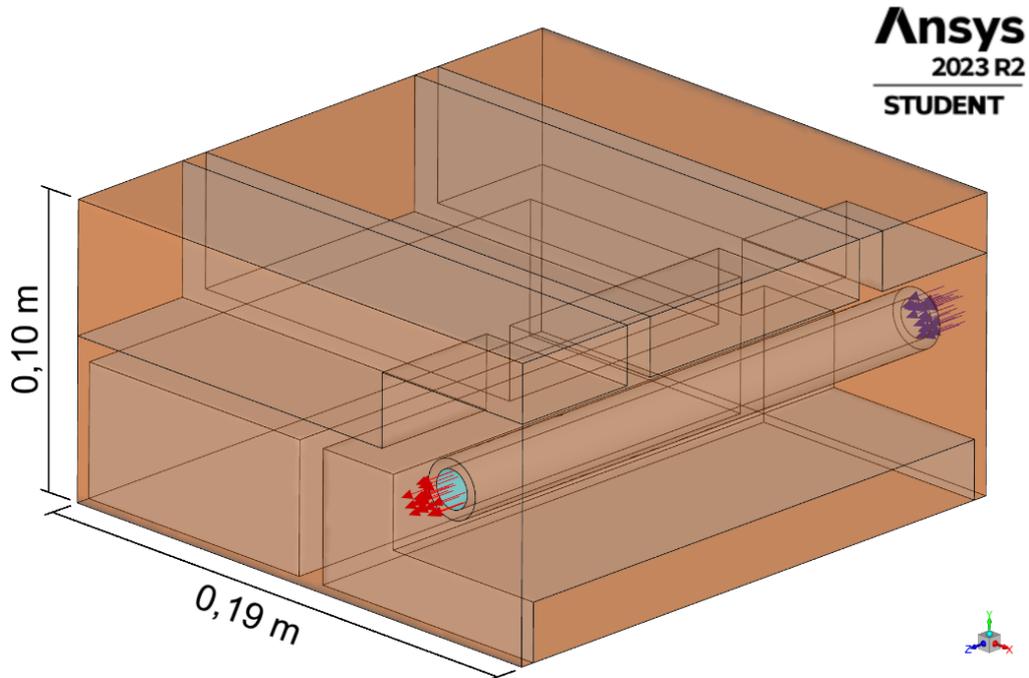
O valor das resistências térmicas das placas verticais que representam a argamassa no modelo alternativo depende da altura da parede, diferentemente do modelo teórico, em que a resistência é calculada em função do fator de forma, o qual não varia com a altura. No modelo alternativo, a condução na argamassa ocorre de forma unidimensional, enquanto no modelo teórico a condução é bidimensional. Considerou-se que a transferência de calor nas duas modelagens é semelhante, com o calor sendo transferido da região mais quente (superfície do tubo, que está a temperatura T_{s_e}) para a região mais fria (superfície da argamassa em contato com o bloco).

Foram elaborados gráficos com os resultados da temperatura a jusante de cada método (modelo teórico, simulação, modelo alternativo e modelo de tubo aparente) em função da altura da parede. Isso foi feito separadamente para cada diâmetro e velocidade de escoamento. Em cada gráfico, foi obtida a altura na qual ocorre a interseção das curvas referentes ao modelo teórico e à simulação, que corresponde à altura na qual os métodos resultam na mesma redução de temperatura. A altura da parede para cada diâmetro foi definida por meio da média das alturas encontradas para as duas velocidades, arredondada em múltiplos de 0,05 m, conforme o incremento utilizado para as alturas testadas. Para avaliar os resultados, verificou-se a proximidade entre as reduções de temperatura dos modelos teórico e alternativo na altura de interseção. Valores próximos de redução também indicam que as resistências térmicas condutivas da argamassa nos dois modelos são semelhantes.

3.3.2. Segunda etapa

Na segunda etapa, foi realizada uma nova comparação entre os dois métodos para cada diâmetro, na qual a modelagem no Fluent consistiu em uma tubulação embutida em parede com geometria e disposição da tubulação usuais (tijolos cerâmicos maciços de 90x53x190 mm, sem revestimento, assentados com argamassa de 10 mm, e tubo embutido próximo a uma das faces da parede), conforme a Figura 6. Nessas simulações, consideraram-se velocidades de escoamento de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 m s⁻¹ e a altura da parede definida na primeira etapa.

Figura 6: Geometria para as simulações da segunda etapa para o tubo DN20.



Para avaliar a diferença entre os resultados da redução de temperatura pelo modelo teórico e pela simulação, foi realizada uma análise estatística para cada diâmetro para testar a diferença entre as médias das reduções pelos dois métodos, sendo cada redução dada pela diferença entre a temperatura a montante (40°C) e a temperatura a jusante. Para a aplicação do teste-*t*, a normalidade das amostras foi verificada utilizando o teste de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%, conforme Frei (2018).

As duas amostras de redução são dependentes, pois cada elemento de uma amostra (modelo teórico) corresponde a um elemento na outra amostra (simulação) (Larson, 2023). Portanto, foi feito o teste-*t* para a diferença entre as médias de duas amostras com dados emparelhados. A hipótese nula é $\mu_d = 0$, o que significa que a média das diferenças entre os dados é igual a zero, indicando que os resultados são significativamente próximos. Dessa forma, a hipótese alternativa é $\mu_d \neq 0$, que indica que há uma diferença significativa entre as reduções de temperatura comparadas.

Para os três diâmetros, foi escolhido o teste bilateral com nível de confiança de 95% e 5 graus de liberdade. Para a aceitação ou não da hipótese nula, foram determinadas a estatística de teste e o p-valor. O teste de Shapiro-Wilk e o cálculo do p-valor para o teste-*t* foram realizados no software de análise estatística Jamovi (versão 2.3.28.0) (Şahin; Aybek, 2019). Posteriormente, foi analisada a diferença percentual entre as reduções para

verificar se esse valor se mantém constante ao variar a velocidade de escoamento da água.

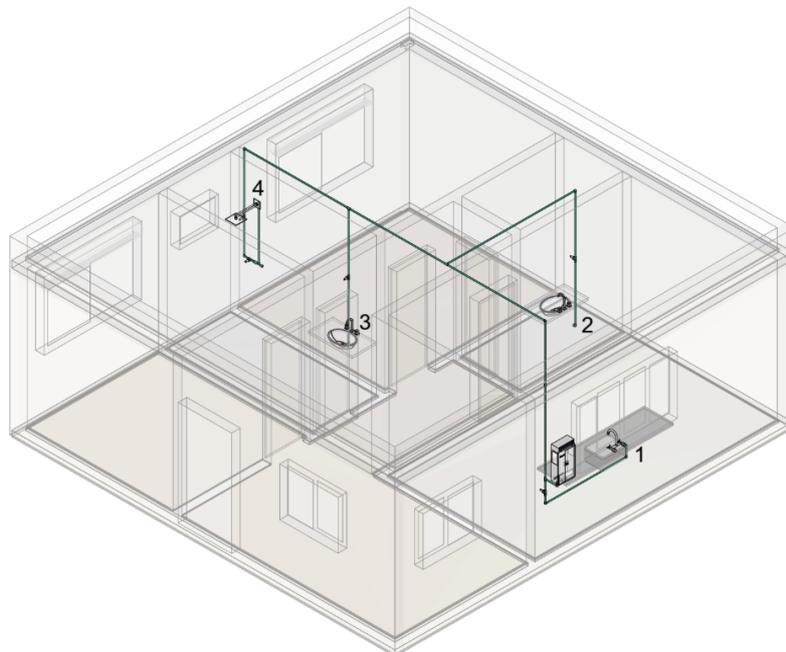
3.4 Perda de temperatura em um sistema predial de água quente de uma residência unifamiliar

Para exemplificar a aplicação do modelo teórico, foi elaborado o projeto de uma residência que consiste em uma casa térrea com dois dormitórios, sala, cozinha, área de serviço, banheiro e lavabo. O sistema estrutural é de concreto armado e a alvenaria é composta por blocos cerâmicos de 14 cm de largura, revestidos com emboço de argamassa de 2 cm de espessura. A cobertura é constituída de uma laje exposta com platibandas de 40 cm de altura em todo o perímetro.

O sistema predial de água quente da residência destina-se a atender aos aparelhos sanitários da cozinha (pia), do lavabo (lavatório) e do banheiro (lavatório e chuveiro). O aquecimento é realizado por um aquecedor de passagem a gás instalado na área externa, que eleva a temperatura da água de 20°C para 40°C. As tubulações de água quente são de PPR PN 25 de diâmetro nominal DN20, embutidas na alvenaria a uma distância de 2 cm da face da parede. Na laje, as tubulações são embutidas a uma distância de 2 cm da face superior.

A perspectiva isométrica da Figura 7 apresenta a residência e o sistema predial de água quente. Os números 1, 2, 3 e 4 indicam, respectivamente, a pia, o lavatório do lavabo, o lavatório do banheiro e o chuveiro. Para minimizar o acúmulo de ar ou vapor nas tubulações, conforme orientado pela NBR 5626 (ABNT, 2020), pode ser instalada uma válvula eliminadora de ar no trecho que corre pelo teto, garantindo o correto funcionamento do sistema.

Figura 7: Perspectiva isométrica da residência.



Para a aplicação do modelo teórico, considerou-se a situação de uso não simultâneo do sistema, ou seja, apenas um dos aparelhos é utilizado por vez, e o cálculo foi realizado para o percurso entre o aquecedor e o ponto de utilização para cada um dos aparelhos. Todos os cálculos consideraram uma parede de largura interna de 0,14 m e altura de 0,10

m, e bloco com espessura de 0,02 m. Por simplificação, essa configuração também foi adotada para os tubos embutidos na laje. As vazões de água quente foram determinadas utilizando o método dos pesos, indicado na NBR 5626 (ABNT, 1998). A vazão para a pia é de $7,5 \text{ L min}^{-1}$, para os lavatórios é de $4,5 \text{ L min}^{-1}$ e para o chuveiro é de $6,0 \text{ L min}^{-1}$. Ademais, a temperatura ambiente adotada foi de 20°C .

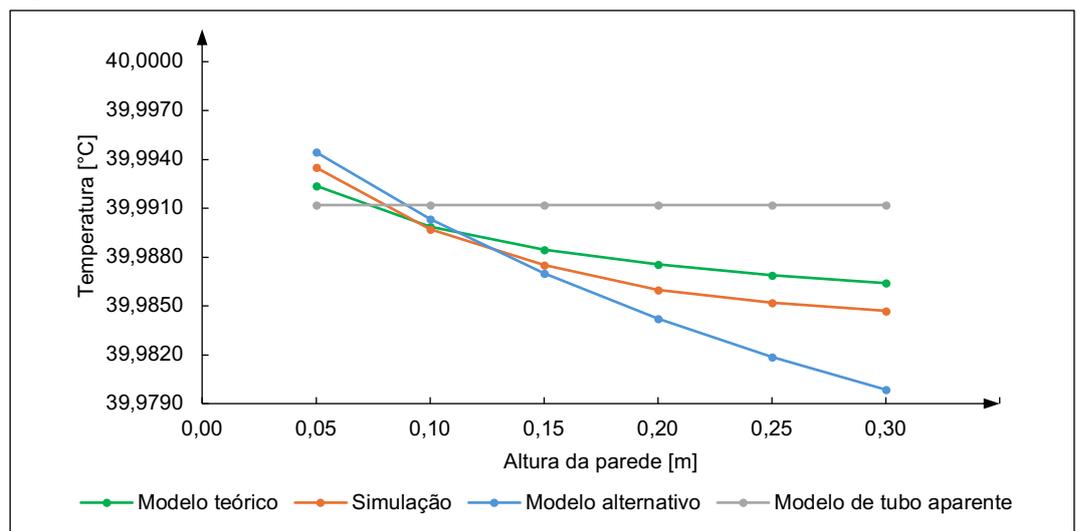
Foram determinadas as temperaturas nos pontos de utilização de cada aparelho, as reduções de temperatura em relação à temperatura na saída do aquecedor, as perdas de energia na tubulação, a energia utilizada para o aquecimento e o percentual de perda de energia. A perda de energia corresponde à saída de energia térmica dada pela Equação 1. A energia para o aquecimento corresponde ao gasto para elevar a temperatura da água de 20°C para 40°C , que foi calculado desconsiderando-se a perda de energia no aquecedor.

4 Resultados e Discussão

4.1 Primeira etapa

A Figura 8 apresenta os resultados para a temperatura a jusante em função da altura da parede em cada método para o tubo DN20 e velocidade de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Observa-se que a redução de temperatura é maior em paredes de maior altura. Isso ocorre porque o aumento da altura reduz as resistências térmicas condutiva do bloco e equivalente de convecção natural e radiação, o que aumenta a taxa de transferência de calor e, conseqüentemente, a perda de temperatura. No modelo alternativo, a redução é ainda maior devido à dependência da altura da parede na formulação da resistência térmica condutiva da argamassa, algo que não ocorre no modelo teórico, em que é utilizando o fator de forma, que é independente da altura. No modelo de tubo aparente, a resistência térmica do sistema não se altera devido à ausência de parede, e resulta em valor maior que o dos outros modelos a partir da altura de 10 cm, causando uma menor perda térmica.

Figura 8: Temperatura a jusante para o tubo DN20 e velocidade $0,5 \text{ m s}^{-1}$.



No gráfico da Figura 8, foi obtida a altura de 0,0938 m na interseção entre as curvas do modelo teórico e da simulação. Observa-se que o modelo alternativo apresenta uma redução de temperatura próxima à desses métodos na altura de interseção, indicando que, nessa altura, eles apresentam valores semelhantes de resistência térmica condutiva

da argamassa. A Tabela 1 apresenta as alturas de interseção dos outros gráficos, bem como a média calculada para as duas velocidades e a altura adotada para cada diâmetro.

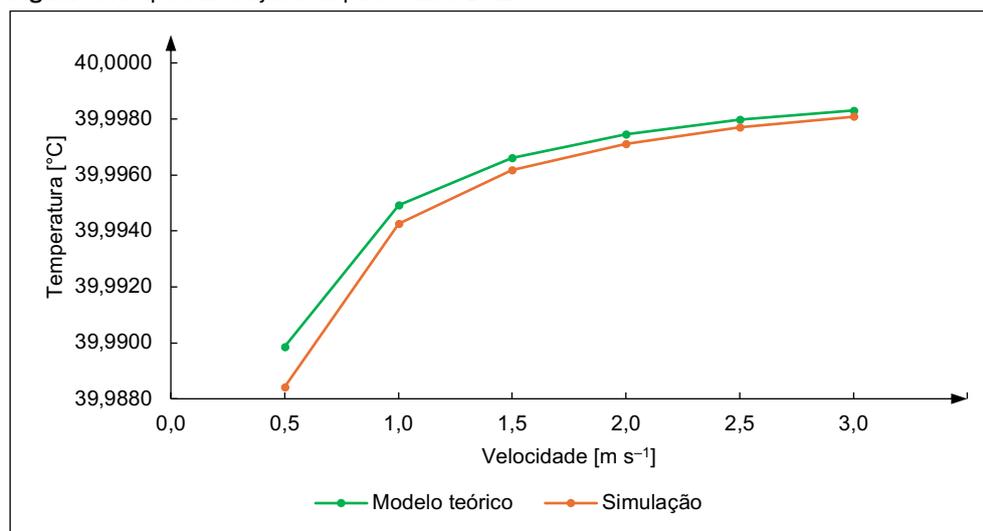
Tabela 1: Altura da parede para cada diâmetro de tubo.

Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de interseção (m)	Média das alturas de interseção (m)	Altura adotada (m)
DN20			
0,5	0,0938	0,0966	0,10
3,0	0,0994		
DN25			
0,5	0,0880	0,0845	0,10
3,0	0,0810		
DN32			
0,5	0,0763	0,0692	0,05
3,0	0,0622		

4.2 Segunda etapa

A Figura 9 mostra a variação da temperatura a jusante em função da velocidade pelo modelo teórico e pela simulação para o diâmetro DN20.

Figura 9: Temperatura a jusante para o tubo DN20.



A Tabela 2 apresenta a média da redução de temperatura, a estatística do teste de Shapiro-Wilk (W) e o p-valor para cada amostra, todos obtidos no Jamovi. Para todas as amostras, o valor da estatística é superior ao valor crítico (0,792251) e o p-valor é maior que o nível de significância do teste (5%), o que indica a normalidade das amostras, permitindo o uso do teste-t para a diferença entre as médias de duas amostras com dados emparelhados.

Tabela 2: Parâmetros do teste de Shapiro-Wilk.

	DN20		DN25		DN32	
	Modelo teórico	Simulação	Modelo teórico	Simulação	Modelo teórico	Simulação
Média (°C)	0,004149	0,004712	0,002735	0,003118	0,001289	0,001269
W	0,802359	0,799306	0,802278	0,801745	0,802072	0,803371
p-valor	0,061712	0,057935	0,061607	0,060934	0,061347	0,063011

A Tabela 3 apresenta os valores da média das diferenças, do desvio padrão, da estatística padronizada do teste-t e do p-valor para cada diâmetro de tubo. Para um nível de confiança de 95% e 5 graus de liberdade, o valor crítico para a rejeição da hipótese nula é 2,571 (Larson, 2023). Portanto, os valores da estatística de teste padronizada para aceitação da hipótese nula devem estar entre -2,571 e 2,571.

Tabela 3: Parâmetros do teste-t.

DN (mm)	Média das diferenças entre os valores dos dados emparelhados (°C)	Desvio padrão das diferenças (°C)	Estatística de teste padronizada	p-valor
20	0,000563	0,000458	2,7516	0,02961
25	0,000383	0,000282	3,0391	0,02080
32	0,000020	0,000025	-1,7975	0,10603

Os resultados da estatística de teste e do p-valor indicam que, para os tubos DN20 e DN25, a hipótese nula deve ser rejeitada, enquanto para o diâmetro DN32, pode ser aceita. Isso mostra que, ao nível de confiança de 95%, pode-se afirmar que há uma diferença significativa entre as reduções de temperatura pelo modelo teórico e pelas simulações para os tubos DN20 e DN25. Para o tubo DN32, conclui-se que não há diferença significativa entre os resultados.

Essas diferenças podem ter sido causadas pelas diferentes características do modelo teórico e das simulações. No modelo teórico, é importante considerar a influência das correlações empíricas, do fator de forma de condução e do equacionamento da radiação. Embora as correlações tenham sido escolhidas de forma que atendessem às condições do problema, deve-se levar em consideração que foram desenvolvidas experimentalmente e, conforme Incropera *et al.* (2008), o uso de algumas correlações para convecção pode resultar em erros de até 25%.

Com relação ao fator de forma, considerou-se o tubo centralizado na seção da alvenaria para a escolha do fator de forma apresentado na literatura. Porém, essa posição difere da forma usual de disposição do tubo próximo à face da parede, situação simulada no Fluent. A simplificação da modelagem da radiação, que considera a troca de energia entre a parede e uma superfície vizinha, também influencia significativamente os resultados, pois o coeficiente de transferência de calor por radiação é fortemente dependente da temperatura da superfície da parede.

Nas simulações, o resultado é influenciado pela qualidade da malha que, na versão do Fluent usada neste trabalho, possui uma limitação na quantidade de elementos gerados. De forma semelhante às correlações empíricas, o modelo de turbulência $k - \epsilon$ é semi-empírico, e seu uso pode acarretar em diferenças em relação aos resultados exatos. Além disso, a necessidade de informar ao programa a estimativa do coeficiente de convecção natural mostra uma deficiência na simulação, e o valor informado facilita a aproximação da solução com o resultado do modelo teórico.

Apesar de os resultados terem sido significativamente diferentes para os tubos DN20 e DN25, foi analisada a diferença percentual entre as reduções, a fim de verificar se esse valor se mantém constante ao variar a velocidade de escoamento da água. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Diferença percentual entre as reduções de temperatura.

Velocidade (m s ⁻¹)	Diferença entre as reduções (%)	
	DN20	DN25
0,5	14,19	13,70
1,0	13,19	13,85
1,5	12,86	13,99
2,0	13,27	14,35
2,5	13,21	14,66
3,0	13,26	14,95

Para o tubo DN20, foi obtida uma média de 13,33% de diferença e desvio padrão de 0,45%. Para o tubo DN25, os resultados foram 14,25% de média e 0,49% de desvio padrão. Os valores encontrados para o desvio padrão são pequenos em relação à média, dessa forma, conclui-se que a diferença entre o modelo teórico e a simulação se mantém aproximadamente constante para as velocidades consideradas.

Com base nessas análises, considera-se que o modelo teórico fornece resultados próximos aos obtidos pelas simulações e, assim, as formulações podem ser uma opção para a estimativa da perda térmica em tubulações de PPR PN 25 embutidas em alvenaria. No entanto, as limitações nas simulações tornam necessária a realização de experimentos para uma melhor comparação e validação completa do modelo.

4.3 Perda de temperatura em um sistema predial de água quente de uma residência unifamiliar

Na Tabela 5, são apresentadas as temperaturas nos pontos de utilização de cada aparelho da residência, as reduções de temperatura em relação à temperatura na saída do aquecedor, as perdas de energia na tubulação, a energia utilizada para aquecimento e o percentual de perda de energia.

Tabela 5: Temperatura nos pontos de utilização e perdas de energia.

Ponto de utilização	Temperatura (°C)	Redução (°C)	Perda de calor (W)	Gasto para aquecimento (W)	Perda percentual de energia (%)
Pia	39,9289	0,0711	36,84	10367,21	0,36
Lavatório do lavabo	39,5189	0,4811	149,63	6220,32	2,41
Lavatório do banheiro	39,5474	0,4526	140,79	6220,32	2,26
Chuveiro	39,5573	0,4427	183,59	8293,76	2,21

Com base nesses resultados, conclui-se que a perda de energia foi significativamente maior durante o uso dos lavatórios e do chuveiro em comparação com o uso da pia. Isso se deve à distância entre o aquecedor e a pia, que é muito menor que a distância do aquecedor até os outros pontos. Outro fator que contribui para uma menor perda térmica para a pia é a alta vazão e velocidade do escoamento, que acarreta uma menor taxa de transferência de calor em relação às demais situações.

5 Conclusão

A determinação da perda térmica nos sistemas prediais de água quente é uma análise importante para o conhecimento dos gastos com energia e do desempenho dos materiais e equipamentos. Este estudo determinou a redução de temperatura em tubos de PPR embutidos em alvenaria por meio de um modelo teórico. Diferentemente de outros métodos de estimativa de perda térmica, o modelo considerou todos os modos de transferência de calor presentes em um sistema real e a configuração de tubulação embutida em alvenaria, uma situação comum em sistemas prediais de água quente de residências unifamiliares. A aplicação do modelo no projeto da residência demonstrou a obtenção de informações relevantes, como a temperatura nos pontos de utilização e a perda percentual de energia.

Na análise do modelo, observou-se que a perda de temperatura aumenta consideravelmente com o aumento da altura da parede adotada para o cálculo. Por outro lado, a perda diminui conforme aumenta-se o diâmetro do tubo ou a velocidade de escoamento. Foram realizadas simulações de CFD para determinar a altura adequada da parede e para comparar e avaliar o modelo teórico. Essas simulações possuem a vantagem de reduzir o número de experimentos, economizando tempo e dinheiro. No entanto, as limitações da qualidade da malha e a necessidade da entrada do coeficiente estimado de convecção tornam necessária a realização de experimentos para uma melhor análise da altura e validação completa do modelo.

A análise estatística, com um nível de confiança de 95%, mostrou que as médias das reduções de temperatura pelo modelo teórico e pelas simulações foram significativamente diferentes para os tubos DN20 ($t = 2,7516$ e $p\text{-valor} = 0,02961$) e DN25 ($t = 3,0391$ e $p\text{-valor} = 0,02080$). Contudo, as diferenças se mantiveram aproximadamente constantes ao variar a velocidade do escoamento, com uma média de diferença de 13,33% e um desvio padrão de 0,45% para o tubo DN20, e uma média de diferença de 14,25% e um desvio padrão de 0,49% para o tubo DN25. Para o diâmetro DN32, não houve diferença significativa ($t = -1,7975$ e $p\text{-valor} = 0,10603$). Dadas as condições e limitações dos dois métodos, considera-se que as duas abordagens fornecem resultados próximos. Assim, conclui-se que a metodologia utilizada no modelo é promissora e pode ser uma opção para a estimativa da perda térmica nos tubos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um estudo experimental para determinar a redução de temperatura em tubos embutidos em alvenaria, variando a velocidade de escoamento da água. Sugere-se que sejam testadas correlações empíricas mais avançadas para diminuir possíveis erros nos cálculos. Ademais, recomenda-se também que sejam feitas simulações utilizando outros modelos de turbulência, como o $k\text{-}\omega$. Neste artigo, foi considerado apenas o tubo de PPR, contudo, o modelo possui grande potencial de aplicação com outros materiais, como o CPVC e o PEX, por serem elementos com a mesma geometria do tubo de PPR.

Referências

- AMANCO. **Manual técnico:** Linha amanco PPR. Joinville: [s.n.], 2010. Disponível em: http://assets.production.amanco.com.br.s3.amazonaws.com/uploads/gallery_asset/file/37/baixa_amco_atualizacao_manual_tecnico_amanco_PPR_2010_v11.pdf. Acesso em: 02 out. 2022.
- ANSYS INC. **ANSYS Fluent User's Guide.** Canonsburg: [s.n.], 2023. 5050 p.
- ANSYS INC. **Ansys Student - Free Software Download.** [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>. Acesso em: 17 ago. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15813-1:** Sistemas de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria Parte 1: Tubos de polipropileno copolímero random PP-R e PP-RCT – requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 41 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626:** Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998. 41 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626:** Sistemas prediais de água fria e água quente – projeto, execução, operação e manutenção. Rio de Janeiro, 2020. 63 p.
- BENEDICTO, S. M. de O. **Desempenho de sistema predial de água quente.** 200 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- BORGES, T. P. de F. **Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água.** 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica.** 8. ed. São Paulo: Blücher, 2018. 730 p.
- BOTELHO, M. H. C.; RIBEIRO JUNIOR, G. de A. **Instalações hidráulicas prediais utilizando tubos plásticos.** 4. ed. São Paulo: Blücher, 2014. 416 p.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos.** 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 430 p.
- CARDOSO, R. M.; DAMO, R. A. Z.; MATTER, R. M. **Estudo da perda de calor nas tubulações de água quente em parede de alvenaria.** 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2007.
- CHAGURI JUNIOR, J. J. **Sistemas prediais de aquecimento de água a gás:** parâmetros de dimensionamento e gerenciamento. 104 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.
- FREI, F. **Introdução à inferência estatística:** aplicações em saúde e biologia. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2018. 564 p.

- LARSON, R. **Estatística aplicada: Retratando o mundo**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2023. 581 p.
- MORAN, M. J. *et al.* **Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 604 p.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **mini-REFPROP - Version 10.0**. 2020. Disponível em: <https://trc.nist.gov/refprop/MINIREF/MINIREF.HTM>. Acesso em: 05 ago. 2022.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.
- ŞAHIN, M. D.; AYBEK, E. C. Jamovi: an easy to use statistical software for the social scientists. **International Journal of Assessment Tools in Education**, v. 6, n. 4, p. 670–692, 2019.
- SILVA, C. V. da. **Introdução ao Ansys CFX**. Erechim: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2019. 44 p.
- TIGRE. **PPR: Termofusão: Catálogo técnico**. Joinville: [s.n.], 2012. Disponível em: <https://www.tigre.com.br/themes/tigre2016/downloads/catalogos-tecnicos/ctppr-termofusao.pdf>. Acesso em: 01 out. 2022.
- UEHARA, T.; FERREIRA, A. T. Decaimento de temperatura em tubos de PPR PN 25 embutidos em alvenaria. **Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação IFSP – Campus São Paulo**, v. 7, 2022.
- UEHARA, T.; FERREIRA, A. T. Decaimento de temperatura em tubos de PPR PN 25 embutidos em alvenaria. **Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP**, v. 13, 2022.
- UEHARA, T.; NASCIMENTO, C. H. B.; FERREIRA, A. T. Decaimento de temperatura em tubulações de PPR PN 25 para condução de água quente. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc**, v. 7, n. 1, 2022.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. 2. ed. Inglaterra: Pearson Education, 2007. 503 p.
- YU, L. *et al.* Polypropylene random copolymer in pipe application: Performance improvement with controlled molecular weight distribution. **Thermochimica Acta**, Elsevier, v. 578, p. 43–52, 2014.
- YWASHIMA, L. A.; ILHA, M. S. de O.; FERREIRA, A. T. Tempo de recuperação da temperatura no sistema de recirculação de água quente. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.