



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JALLES GABRIEL CARDOSO SILVA

**APLICAÇÃO DE FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS PARA ANÁLISE DE PERDA DE
CARGA EM REDES DE DUTOS AVAC**

**TERESINA
2025**

JALLES GABRIEL CARDOSO SILVA

APLICAÇÃO DE FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS PARA ANÁLISE DE PERDA DE
CARGA EM REDES DE DUTOS AVAC

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Orientador: Prof. Me. Anderson Felipe Chaves
Fortes.

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, Jalles Gabriel Cardoso

S586a Aplicação de famílias paramétricas para análise de perda de carga em
redes de dutos AVAC / Jalles Gabriel Cardoso Silva. - 2025.
127 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Me. Anderson Felipe Chaves Fortes .

1. BIM. 2. Revit. 3. Perda de carga. 4. AVAC. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

JALLES GABRIEL CARDOSO SILVA

APLICAÇÃO DE FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS PARA ANÁLISE DE PERDA DE
CARGA EM REDES DE DUTOS AVAC

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Aprovado em: 16/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Anderson Felipe Chaves Fortes (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Janiel Fontineles Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Prof.^a Dra. Luciane Norberto Menezes de Araújo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser meu guia e por me conceder forças nos momentos em que mais precisei.

Dedico meus mais sinceros agradecimentos aos meus pais, José Francisco e Rejane, que nunca me deixaram faltar o necessário para uma vida digna e jamais mediram esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Sem a base de vocês, eu nada seria.

Estendo minha gratidão a toda a minha família, pelo apoio constante e pela torcida, mesmo à distância. Em especial, agradeço ao meu tio Zezé e à sua esposa, tia Maura, que me ofereceram todo o suporte necessário desde que vim morar em Teresina. Agradeço, com igual carinho, à minha avó, que desde a minha infância sempre foi como uma segunda mãe.

Não poderia deixar de mencionar minha doce Julia Maria. Minha parceira de jornada, que surgiu em minha vida quando eu menos esperava, mas quando mais precisava. Certamente, eu não teria chegado até aqui sem o seu inestimável apoio.

Aos meus amigos Gabriel Sá, Lázaro Francisco, Otávio Germano e Ribamar Júnior, sou grato pelo companheirismo ao longo destes cinco anos de graduação. Todo desafio se torna mais leve de enfrentar na companhia de vocês.

Registro meus agradecimentos ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, que contribuiu diretamente para o resultado aqui alcançado. Manifesto minha imensa gratidão ao meu professor, mentor e orientador, Anderson Fortes, pelos ensinamentos, pelas orientações e pelas exigências construtivas. Jamais esquecerei as oportunidades concedidas, fundamentais para a minha formação acadêmica e experiência profissional.

A todos que se fizeram presentes, mesmo distantes, e que contribuíram direta ou indiretamente para esta conquista, deixo o meu muito obrigado!

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”
(Ayrton Senna)

RESUMO

O presente trabalho aborda uma solução para as limitações do software Autodesk Revit quanto ao cálculo automático de perda de carga localizada em conexões de dutos. O objetivo principal consiste no desenvolvimento de uma metodologia de parametrização que se aplique às mais variadas famílias de singularidades presentes em sistemas AVAC em ambiente BIM, seguindo os padrões da ASHRAE e SMACNA. A metodologia adotada envolveu a modelagem geométrica de singularidades críticas, como cotovelos, transições e têes, aliada à estruturação de dados experimentais em tabelas de pesquisa externas (*Lookup Tables*). Implementaram-se fórmulas com lógica condicional complexa dentro das famílias para correlacionar variáveis geométricas e de fluxo com os respectivos coeficientes, permitindo que o software tome decisões autônomas sobre qual tabela consultar. A validação da ferramenta ocorreu por meio de um estudo de caso comparativo entre o cálculo manual analítico e o automatizado via BIM, utilizando um sistema de dutos de referência da literatura técnica. Os resultados indicaram uma precisão elevada, com erros relativos nulos na seleção dos coeficientes e variações desprezíveis, na ordem de milésimos de porcentagem, nos valores de pressão dinâmica e perda de carga total, atribuídas apenas a diferenças de arredondamento computacional. Conclui-se que a solução tecnológica desenvolvida preenche satisfatoriamente a lacuna funcional do software, elimina a necessidade de consultas manuais a tabelas normativas e proporciona maior agilidade e confiabilidade ao fluxo de trabalho de engenharia em ambiente BIM.

Palavras-chave: BIM; Revit; Perda de Carga; AVAC; Famílias Paramétricas.

ABSTRACT

The present work addresses a solution to the limitations of Autodesk Revit software regarding the automatic calculation of localized head loss in duct fittings. The main objective consists of developing a parametrization methodology applicable to the most varied families of singularities present in HVAC systems within a BIM environment, following ASHRAE and SMACNA standards. The adopted methodology involved the geometric modeling of critical singularities, such as elbows, transitions, and tees, combined with the structuring of experimental data into external Lookup Tables. Formulas with complex conditional logic were implemented within the families to correlate geometric and flow variables with the respective coefficients, allowing the software to make autonomous decisions on which table to consult. The tool validation occurred through a comparative case study between the analytical manual calculation and the automated calculation via BIM, using a reference duct system from technical literature. The results indicated high precision, with null relative errors in the selection of coefficients and negligible variations, in the order of thousandths of a percent, in dynamic pressure and total head loss values, attributed solely to computational rounding differences. It is concluded that the developed technological solution satisfactorily fills the software's functional gap, eliminates the need for manual consultations of standard tables, and provides greater agility and reliability to the engineering workflow in a BIM environment.

Keywords: *BIM; Revit; Head Loss; HVAC; Parametric Families.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Ferramenta ineficiente para dimensionamento de perda de carga localizada no Revit	19
Figura 2	- Duto em aço galvanizado (a) e conexão de duto em PU (b)	24
Figura 3	- Diagrama de Moody	33
Figura 4	- Fluxo de ar em cotovelo 90° sem veios via CFD	34
Figura 5	- Coeficientes de perda de carga para cotovelo retangular suave sem veio	35
Figura 6	- Fluxograma de informações BIM automatização de microsserviços.....	36
Figura 7	- Aplicação de detecção de interferências em ferramenta BIM	38
Figura 8	- Sistema de distribuição de ar modelado em Revit	39
Figura 9	- Seleção de dados de parâmetro em tipo e em instância	41
Figura 10	- Aplicação de fórmulas em famílias paramétricas	42
Figura 11	- Tabela de pesquisa feita no software Excel	43
Figura 12	- Diagrama metodológico	44
Figura 13	- Modelo 3D da família de cotovelo retangular suave sem veios	45
Figura 14	- Referência utilizada para o cotovelo retangular suave sem veios ...	46
Figura 15	- Parâmetros inseridos na família	48
Figura 16	- Tabela de pesquisa inserida no ambiente de parametrização	50
Figura 17	- Recursos de modelagem tridimensional no Revit	51
Figura 18	- Referências utilizadas para o cotovelo retangular com quina e sem veios	52
Figura 19	- Família de cotovelo retangular com quina e sem veios modelada ...	52
Figura 20	- Parâmetros inseridos na família	56
Figura 21	- a) Ar de fornecimento selecionado e b) Ar de fornecimento não selecionado	58
Figura 22	- a) Inverter fluxo de ar selecionado e b) Inverter fluxo de ar não selecionado	58
Figura 23	- Família de transição retangular modelada em ambiente BIM	60
Figura 24	- Referências de transições retangulares disponíveis na literatura técnica	61

Figura 25	- Parâmetros inseridos na família de transição retangular	66
Figura 26	- Modelos de referência para o tê retangular reto	69
Figura 27	- Modelo geométrico da família de tê retangular reto	69
Figura 28	- Parâmetros da família de tê retangular reto inseridos no editor de famílias	75
Figura 29	- Lógica de cálculo da vazão do ramal do tê retangular	77
Figura 30	- Modelos de referência pra modelagem geométrica do tê retangular com chanfro a 45°	79
Figura 31	- Modelo BIM geométrico da família de tê retangular com chanfro em 45°	79
Figura 32	- Parâmetros inseridos na família de tê retangular com chanfro em 45°	84
Figura 33	- Projeto de sistemas de referência utilizados	88
Figura 34	- Modelo BIM adaptado com as famílias modeladas para os sistemas de referência utilizados	89
Figura 35	- Modelo BIM adaptado com as famílias modeladas para os sistemas de referência utilizados	92
Figura 36	- Parâmetros de cálculo de perda de carga para transição retangular em projeto adaptado para Revit	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Tabela de coeficientes de perda de carga para o cotovelo retangular suave sem veios	46
Tabela 2	- Tabela do fator de ângulo K	47
Tabela 3	- Tabela de coeficientes de perda de carga para o cotovelo retangular com quinas, sem veios, ar de fornecimento	53
Tabela 4	- Tabela de coeficientes de perda de carga para o cotovelo retangular com quina, sem veios, ar de retorno ou exaustão	53
Tabela 5	- Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, piramidal, sistemas de ar de fornecimento	62
Tabela 6	- Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, simétrica, sistemas de ar de fornecimento	62
Tabela 7	- Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, piramidal, sistemas de ar de exaustão ou retorno	63
Tabela 8	- Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, simétrica, sistemas de ar de exaustão ou retorno	63
Tabela 9	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas diferentes, duto principal	70
Tabela 10	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas diferentes, ramal	70
Tabela 11	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas iguais, duto principal	70
Tabela 12	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas iguais, ramal	71
Tabela 13	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, convergente, alturas diferentes, duto principal	71
Tabela 14	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, convergente, alturas diferentes, ramal	71
Tabela 15	- Reestruturação de dados para a tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas diferentes, ramal	76
Tabela 16	- Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, divergente duto principal	80

Tabela 17 - Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, divergente, ramal	80
Tabela 18 - Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, convergente, duto principal	80
Tabela 19 - Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, convergente, ramal	81
Tabela 20 - Reestruturação de dados para a tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, divergente, ramal	85
Tabela 21 - Tabela de avaliação manual de perda de carga das singularidades para o ar seco a 20°C, ao nível do mar, para o sistema de fornecimento de ar	93
Tabela 22 - Tabela de avaliação manual de perda de carga singularidades para o ar seco a 20°C, ao nível do mar, para o sistema de exaustão de ar	94
Tabela 23 - Tabela de avaliação de perda de carga das famílias parametrizadas em Revit para o ar seco a 20°C, ao nível do mar, para o sistema de fornecimento de ar	95
Tabela 24 - Tabela de avaliação de perda de carga das famílias parametrizadas em Revit para o ar seco a 20°C, ao nível do mar, para o sistema de exaustão de ar	96
Tabela 25 - Erros relativos percentuais para o sistema de fornecimento de ar ...	98
Tabela 26 - Erros relativos percentuais para o sistema de exaustão de ar	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BIM	Building Information Modeling
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSV	Comma-Separated Values
gbXML	Green Building XML
IFC	Industry Foundation Classes
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MEP	Mechanical, Electrical and Plumbing (Mecânica, Elétrica e Hidráulica)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PIR	Poliisocianurato
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
SMACNA	Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association

LISTA DE SÍMBOLOS

J	Perda de carga unitária
Δp	Perda de carga do trecho
L_t	Comprimento total de tubos do trecho
D_{eq}	Diâmetro equivalente à seção retangular
c_d	Coeficiente de perda distribuída
c_o, C_o	Coeficiente de perda localizada
ρ	Massa específica do ar
Q	Vazão volumétrica no trecho
p_{def}	Perdas de carga já definidas (grelhas e ventiladores)
$\dot{m}$	Vazão mássica
P	Pressão absoluta
$R_{ar\ seco}$	Constante específica do gás para o ar seco
T	Temperatura absoluta do ar
W	Razão de umidade
v	Volume específico
P_{atm}	Pressão atmosférica
p_w	Pressão parcial do vapor de água no ar úmido
ϕ	Umidade relativa

p_{ws}	Pressão de saturação da água líquida
C_1 a C_6	Constantes para cálculo da pressão de saturação da água
Z	Altitude do local da instalação
E_m	Energia mecânica total por unidade de massa
p	Pressão estática
g	Aceleração da gravidade
z	Altura geométrica (energia potencial)
ΔP_{12}	Perda de carga entre dois pontos
P_d	Perda de carga distribuída
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
L	Comprimento do duto
D	Diâmetro hidráulico ou interno da seção
V	Velocidade do escoamento
D_h	Diâmetro hidráulico para seção retangular
H	Altura da seção do duto
W	Largura da seção do duto
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ϵ	Rugosidade absoluta da superfície interna
ΔP_l	Perda de carga localizada

P_{vo}	Pressão dinâmica
r	Raio de curvatura
K	Fator de ângulo
ΔP_{tot}	Perda de carga total
Σ	Somatório
C_n	Coeficiente de perda de um componente específico
V_n	Velocidade no componente específico
C_p	Coeficiente de perda tabelado para cotovelo suave
θ	Ângulo do cotovelo ou da transição
W_0	Largura de saída ou referência
W_1	Largura de entrada ou secundária
A_0	Área da seção de referência (saída ou entrada)
A_1	Área da seção secundária
V_c	Velocidade no duto comum (Tê)
Q_c	Vazão no duto comum (Tê)
V_s	Velocidade no trecho reto de saída/entrada (Tê)
Q_s	Vazão no trecho reto de saída/entrada (Tê)
V_b	Velocidade no ramal (Tê)
Q_b	Vazão no ramal (Tê)
A_b	Área da seção do ramal

A_s	Área da seção do trecho reto
A_c	Área da seção do duto comum
$C_{c,s}, C_s$	Coeficiente de perda de carga do duto principal (reto)
$C_b, C_{c,b}$	Coeficiente de perda de carga do ramal
V_{manual}	Valor calculado manualmente
V_{BIM}	Valor calculado via software BIM
$E_{relativo}$	Erro relativo percentual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVO	22
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1	DUTOS E SISTEMAS DE VENTILAÇÃO	23
3.1.1	Materiais para fabricação	24
3.1.2	Métodos de dimensionamento de dutos	25
3.2	PROPRIEDADES DO AR EM DUTOS AVAC	27
3.2.1	Parâmetros psicrométricos	28
3.2.1.1	Densidade do ar	28
3.2.2	Perda de carga em sistemas de duto	31
3.2.3	Perda de carga distribuída.....	32
3.2.4	Perda de carga localizada	34
3.2.5	Perda de carga total	36
3.3	<i>BUILDING INFORMATION MODELING</i>	37
3.3.1	Autodesk Revit	38
3.3.2	Aplicação do BIM em projetos AVAC no Revit.....	39
3.3.3	Trabalho Colaborativo.....	40
3.4	FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS.....	41
3.4.1	Mecanismos de parametrização em famílias Revit	42
3.4.1.1	Fórmulas e lógica condicional	43
3.4.1.2	<i>Lookup tables</i>	43
4	METODOLOGIA.....	45
4.1	DESENVOLVIMENTO DAS FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS	45
4.1.1	Cotovelo retangular suave sem veios.....	46
4.1.1.1	Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o cotovelo suave	51
4.1.2	Cotovelo retangular com quina, sem veios e de áreas variáveis	52
4.1.2.1	Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o cotovelo com quina.....	58
4.1.3	Transição retangular.....	60
4.1.3.1	Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para a transição retangular	68
4.1.4	Tê retangular reto	69

4.1.4.1	Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o tê retangular reto	78
4.1.5	Tê retangular com chanfro em 45°	79
4.1.5.1	Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o tê chanfrado a 45°	86
4.2	APLICAÇÃO DAS FAMÍLIAS PARAMETRIZADAS EM AMBIENTE BIM	88
4.2.1	Verificação	90
4.2.1.1	Cálculos manuais para avaliação de perda de carga das singularidades em BIM	91
4.2.1.2	Desempenho da parametrização das famílias modelas em ambiente BIM ..	95
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
5.1	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	98
5.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DESVIOS E PRECISÃO COMPUTACIONAL	98
5.2.1	Validação da lógica de seleção de coeficientes	100
5.2.2	Análise de precisão numérica	100
5.3	DISCUSSÃO	101
6	CONCLUSÃO	102
6.1	TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A	109

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) são soluções tecnológicas voltadas à melhoria das condições ambientais internas. Esses sistemas têm como principal função garantir o bem-estar térmico dos ocupantes, ao mesmo tempo em que asseguram níveis adequados de qualidade do ar interior. O desenvolvimento de projetos AVAC é um campo específico da engenharia mecânica, baseado nos fundamentos da termodinâmica, da mecânica dos fluidos e da transferência de calor (AGARWAL e GERA, 2020). Nesse contexto, a aplicação de dutos de ventilação tem sido cada vez mais adotada para transportar o ar do ponto de condicionamento até os ambientes a serem climatizados de forma uniforme e eficiente.

Contudo, a eficácia desse transporte está diretamente ligada a um dimensionamento preciso. Os impactos econômicos, energéticos e ambientais decorrentes de dutos mal dimensionados podem ser bastante expressivos, chegando a aumentar o consumo de energia de uma instalação predial em até 40% (CORNELLI, 2022). Quando o dimensionamento não é realizado de forma adequada, ocorrem perdas de carga acentuadas, exigindo esforços maiores dos sistemas de ventilação para manter as condições ideais de operação. Isso se traduz em um elevado consumo de energia, aumento dos custos operacionais e intensificação das emissões de gases de efeito estufa, agravando os impactos ambientais (KABBARA *et al.*, 2023). Além disso, dutos ineficientes podem resultar em desgaste prematuro dos equipamentos e em custos significativos com manutenção, afetando a sustentabilidade econômica dos empreendimentos.

Nesse quesito, a perda de carga representa um fator essencial no dimensionamento de sistemas de ventilação, influenciando diretamente tanto o desempenho quanto a eficiência energética. O controle desse parâmetro contribui para resultados financeiros e ambientais mais favoráveis, com a redução do consumo de energia e da necessidade de manutenções frequentes (SANTOS, 2021). Essa perda está relacionada a diversos elementos, como as dimensões da seção e a rugosidade interna dos dutos, a velocidade do fluxo de ar, além do número e configuração das conexões utilizadas (SILVA e MARTINS, 2018).

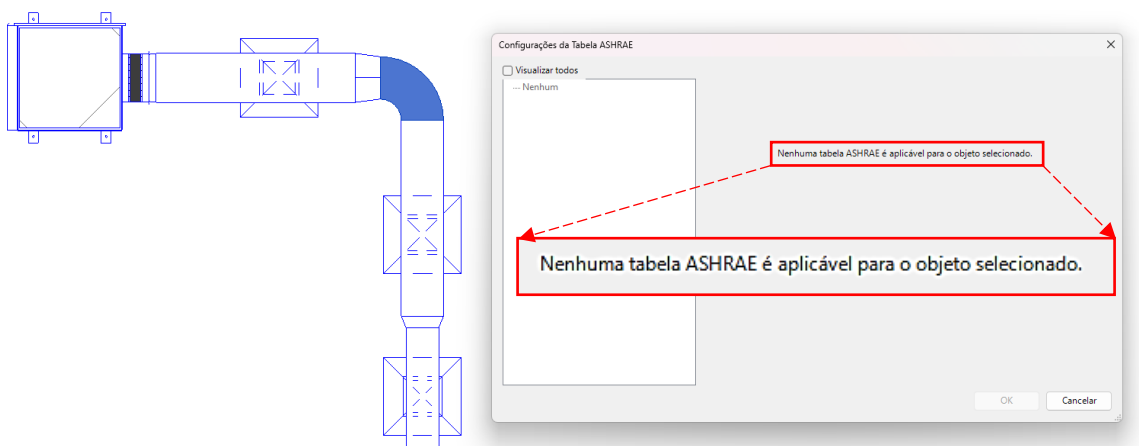
Conforme Assunção (2024), a perda de carga pode ser dividida em distribuída e localizada. A perda distribuída ocorre ao longo de trechos retilíneos, enquanto a perda de carga localizada ocorre pela presença de acessórios que alteram a direção

e a velocidade do escoamento, gerando turbulência. Para avaliar esses efeitos, é comum a aplicação de coeficientes específicos para perda de carga localizada, assim como da equação de Darcy-Weisbach para a perda distribuída (ABDULAMEER *et al.*, 2022).

Paralelamente, a metodologia *Building Information Modeling* (BIM) vem sendo cada vez mais adotada para aperfeiçoar projetos de sistemas AVAC. Segundo Rosati *et al.* (2020), o BIM prioriza a criação de objetos arquitetônicos enriquecidos com conjuntos de dados, onde o modelo tridimensional se torna uma consequência das propriedades atribuídas a cada componente. Essa abordagem transforma o projeto em uma plataforma colaborativa que integra todo o ciclo de vida da edificação (DING *et al.*, 2014). Nesse viés, o *software* Revit, da Autodesk, surge como uma das principais ferramentas BIM para o dimensionamento de redes de dutos de ventilação.

Entretanto, apesar dos avanços proporcionados pelo BIM, persiste uma lacuna tecnológica crítica: o programa carece de um sistema funcional para o cálculo automático e preciso da perda de carga em conexões de duto. Isso força o engenheiro projetista a consultar manualmente Tabelas de coeficientes de perda, um processo lento e suscetível a erros. Segundo Santos (2021), grande parte das abordagens empregadas no dimensionamento de dutos ainda se baseia em métodos empíricos estabelecidos no início do século XX, um paradoxo no contexto da engenharia digital moderna. A ineficiência da ferramenta nativa do Revit é evidenciada na Figura 1.

Figura 1 – Ferramenta ineficiente para dimensionamento de perda de carga localizada no Revit



Fonte: o Autor.

Como observado, ao tentar calcular a perda de carga em uma singularidade, a mensagem “Nenhuma Tabela ASHRAE é aplicável para o objeto selecionado” é frequentemente retornada ao utilizador. Para contornar essa problemática, este estudo propõe a implementação, em ambiente BIM (Autodesk Revit), de famílias paramétricas de conexões de dutos retangulares que calculam automaticamente a perda de carga localizada. A solução integra os coeficientes fornecidos em Tabelas pela Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado (ASHRAE) e pela Associação Nacional de Empreiteiros de Chapas Metálicas e Ar Condicionado (SMACNA), eliminando a necessidade de consulta manual, acelerando a análise de redes de ventilação e acelerando o fluxo de trabalho do projetista de sistemas AVAC.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver, em ambiente BIM (Autodesk Revit), uma metodologia de parametrização que se aplique às mais variadas famílias de singularidades presentes em sistemas AVAC. A partir disso, busca-se viabilizar o cálculo dinâmico das perdas localizadas com base na geometria e na vazão, aprimorando o processo de dimensionamento e análise de sistemas AVAC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Modelar as famílias paramétricas dos acessórios críticos de dutos — cotovelos, transições e tês — na plataforma Autodesk Revit, estabelecendo uma base geométrica flexível;
- Estruturar os parâmetros operacionais e geométricos (áreas, vazões, ângulos, relações dimensionais) que servirão como entradas para o modelo de cálculo;
- Traduzir as Tabelas experimentais da ASHRAE e da SMACNA em correlações matemáticas e lógicas que relacionem as variáveis geométricas e de fluxo aos respectivos coeficientes de perda de carga;
- Implementar essas correlações nas famílias paramétricas por meio de fórmulas condicionais, criando rotinas internas de cálculo automático;
- Avaliar a precisão dos resultados gerados pelas famílias de componentes do Revit por meio da comparação com valores de referência das Tabelas da ASHRAE e SMACNA e de métodos consagrados de dimensionamento de dutos, utilizando como base estudos de caso da literatura técnica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção estabelece a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho, abordando os princípios essenciais desde a física do escoamento até a automação em ambientes digitais. Inicialmente, são apresentados os conceitos gerais de dutos e sistemas de ventilação, incluindo os materiais normatizados para sua fabricação e os métodos de dimensionamento. O foco então se aprofunda na mecânica dos fluidos aplicada a sistemas AVAC. Para uma análise precisa da perda de carga, detalham-se primeiramente as propriedades do ar como fluido de trabalho, explicando a influência de fatores como temperatura, altitude e umidade em sua densidade. Com essa base, são dissecados os fenômenos de perda de carga distribuída e localizada, que impactam diretamente o desempenho energético dos sistemas. Posteriormente, o referencial se desloca para a metodologia digital, introduzindo o BIM e sua aplicação em projetos AVAC através do *software* Autodesk Revit. Discute-se a limitação das ferramentas convencionais quanto ao cálculo automático de perdas localizadas, justificando o desenvolvimento de famílias paramétricas em ambiente BIM. Para embasar tecnicamente a solução, são explorados os mecanismos de parametrização avançada, detalhando o uso de fórmulas com lógica condicional e a aplicação de tabelas de pesquisa (*Lookup Tables*) como método para integrar dados experimentais tabelados, como os da ASHRAE e SMACNA, diretamente nos componentes BIM.

3.1 DUTOS E SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A rede de dutos de ventilação consiste em um conjunto de tubulações projetadas para transportar ar sob regimes de baixa pressão e baixa velocidade. Nessa condição, os efeitos de compressibilidade do ar são irrelevantes, uma vez que as variações de pressão não são suficientes para alterar significativamente sua densidade ou gerar efeitos termodinâmicos complexos (SANTOS, 2021). A ventilação, por sua vez, refere-se ao processo de renovação do ar em ambientes fechados, que pode ocorrer de forma natural ou mecânica, com o objetivo de manter a qualidade do ar em níveis adequados ao conforto e à saúde dos ocupantes (LACERDA, 2023).

Os sistemas de ventilação mecânica se dividem em sistemas de suprimento de ar e de retorno ou exaustão, sendo sua classificação determinada pela finalidade e pelas propriedades do ar transportado (ROSATI *et al.*, 2020). Embora sua aplicação mais comum seja em sistemas de climatização predial, a funcionalidade das redes de dutos se estende a ambientes industriais e cenários críticos. Segundo Santos (2021), esses dutos são amplamente utilizados em aplicações industriais. Castro (2021) destaca seu uso na coleta de resíduos provenientes do processo de laminação a quente, enquanto Cruz (2022) aponta sua aplicação na ventilação de minas, onde garantem a entrada de ar limpo e a exaustão de contaminantes, sendo essenciais para a segurança dos trabalhadores.

Além da função primária de transporte de ar, o projeto de dutos deve considerar critérios de desempenho que impactam diretamente o bem-estar e a segurança dos usuários. A análise acústica, por exemplo, é um fator crucial, como investigado por Felipetto *et al.* (2021), que focaram no conforto sonoro de ambientes climatizados. O estudo aponta que o revestimento interno dos dutos com materiais como espumas ou fibras, e a instalação de atenuadores de ruído, são medidas eficazes para o controle da poluição sonora gerada pelo sistema (FELIPETTO *et al.*, 2021). De forma análoga, a integração de sistemas AVAC com estratégias de combate a incêndios é vital para a segurança humana, como explorado por Victor (2020), que enfatizou como a ventilação forçada pode influenciar diretamente o tempo disponível para evacuação em uma emergência.

A análise desses diversos campos de aplicação evidencia a importância multifuncional dos sistemas de dutos — não apenas no transporte de ar, mas também no controle da poluição sonora, na salubridade de ambientes industriais e na segurança contra incêndios. Fica clara, portanto, a necessidade de considerar um conjunto complexo de variáveis, como pressão, acústica e desempenho térmico, no desenvolvimento de um projeto de dutos eficiente e seguro.

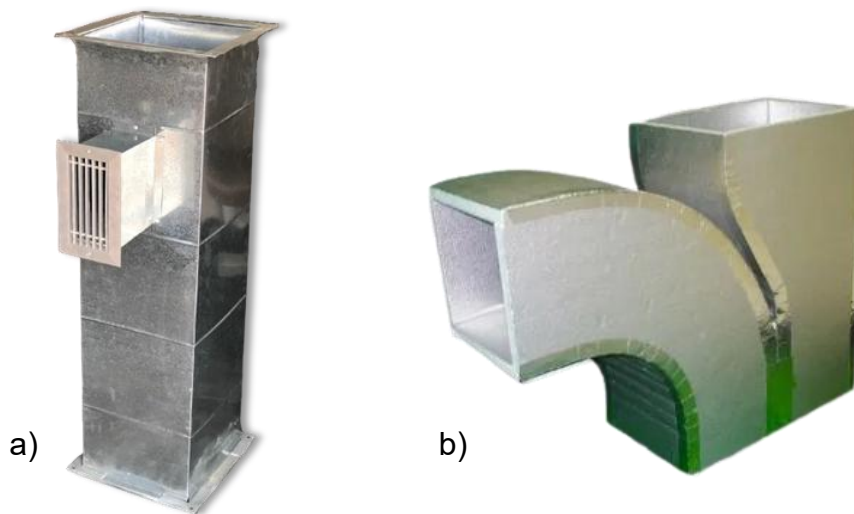
3.1.1 Materiais para fabricação

A seleção dos materiais para a fabricação de dutos de ventilação é um processo rigorosamente regido por normas técnicas. No Brasil, a principal diretriz é a ABNT NBR 16401-1, que em sua revisão de 2024 prescreve como material preferencial o aço-carbono, seja ele preto ou galvanizado. A norma também estabelece requisitos

específicos para aplicações críticas, como em sistemas de exaustão de cozinhas, onde o uso de chapa preta é obrigatório. A norma, contudo, oferece flexibilidade ao projetista, permitindo a adoção de outros materiais, como cobre ou PVC, desde que sua aplicação atenda aos requisitos de pressão e temperatura do projeto.

Em paralelo aos dutos metálicos, uma alternativa tecnológica contemplada pela norma ABNT NBR 16235, em sua atualização de 2013, é o uso de painéis pré-isolados. Conforme Bizerra (2021), materiais como o Poliuretano (PU) e o Poliisocianurato (PIR) são amplamente utilizados nesta solução construtiva. Tais painéis consistem em uma estrutura tipo sanduíche, com um núcleo de espuma de PU ou PIR revestido por folhas de alumínio. A principal vantagem dessa composição é sua baixa condutividade térmica, uma característica intrínseca que elimina a necessidade de isolamento térmico adicional — uma etapa obrigatória no caso dos dutos metálicos convencionais.

Figura 2 – Duto em aço galvanizado (a) e conexão de duto em PU (b)



Fonte: NOVATHERM (2025) e MPU (2025).

3.1.2 Métodos de dimensionamento de dutos

O dimensionamento de redes de dutos pode ser abordado por diferentes metodologias. Behls (2021) aponta a existência de três abordagens principais: o método da perda de carga constante, o da recuperação de pressão estática e o da velocidade constante. No primeiro, também conhecido como método do atrito igual, a perda de carga por atrito é mantida uniforme ao longo de toda a rede (PUGLIA, 2023). O segundo método dimensiona os trechos de forma que o ganho de pressão estática

em uma seção compense as perdas da seção seguinte (MONTALVÃO, 2019). Já o terceiro busca manter uma velocidade de ar constante em toda a extensão da rede (SALES, 2023).

Dentre as abordagens mencionadas, o método da perda de carga constante (ou atrito igual) destaca-se por sua eficácia e adaptabilidade a ambientes BIM, como o Autodesk Revit, sendo particularmente adequado para sistemas de climatização em edifícios comerciais e residenciais. Sua aplicação, no entanto, pode ser limitada em sistemas industriais que exigem uma distribuição de vazão extremamente precisa. Montalvão (2019) afirma que essa técnica se baseia na consideração de dutos redondos e suas perdas. Consequentemente, quando se utilizam dutos retangulares, torna-se necessário aplicar a conversão para o diâmetro equivalente, um cálculo que preserva a mesma vazão e perda de carga por metro, mas que resulta em velocidades de ar menores para os mesmos parâmetros hidráulicos.

A aplicação prática do método inicia-se com a definição de um valor de projeto para a perda de carga por atrito, expresso em Pascal por metro. Para orientar essa escolha, o manual de Fundamentos da ASHRAE (2001) recomenda que, para sistemas com vazões entre 0,02 e 7 m³/s, o intervalo de perda de carga se situe entre 0,7 e 5 Pa/m.

O processo de dimensionamento começa pela identificação do "caminho crítico" — o trajeto da rede que, devido ao seu comprimento e número de singularidades, apresenta a maior resistência total ao fluxo de ar. Matematicamente, as perdas de pressão e as dimensões dos trechos pertencentes a este caminho podem ser definidas conforme as equações 3.1 e 3.2, segundo Oliveira (2011):

$$J = \frac{\Delta p}{L_t} \quad (3.1)$$

$$D_{eq} = \sqrt[4]{\frac{(c_d + \sum c_o) \cdot \rho \cdot 8 \cdot Q^2}{\pi^2 (\Delta p - p_{def})}} \quad (3.2)$$

Onde:

- J = Perda de carga unitária, Pa;
- Δp = Perda de carga do trecho, Pa;
- L_t = Comprimento total de tubos do trecho em questão, m;

- D_{eq} = Diâmetro equivalente à seção retangular do duto, m;
- c_d = Coeficientes de perda distribuídas;
- c_o = Coeficiente de perda localizada;
- ρ = massa específica do ar, kg/m³;
- Q = Vazão no trecho, m³/s;
- p_{def} = Perdas de carga já definidas (grelhas e ventiladores), Pa.

Uma vez dimensionados os trechos do caminho crítico, o processo segue com o cálculo da pressão total requerida no equipamento de ventilação. Com as pressões nas junções já definidas, determina-se a queda de pressão disponível para os ramos secundários, permitindo o dimensionamento de seus respectivos dutos. Embora o sistema resulte teoricamente balanceado ao final do processo, uma etapa final de verificação é indispensável para garantir que as velocidades do ar em todos os trechos permaneçam dentro dos limites estabelecidos por normas. Caso algum trecho exceda o valor permitido, suas dimensões devem ser ajustadas para reduzir a velocidade e, assim, preservar o equilíbrio do sistema.

3.2 PROPRIEDADES DO AR EM DUTOS AVAC

Para o correto dimensionamento de uma rede de dutos, é imprescindível o domínio dos princípios da mecânica dos fluidos e da termodinâmica que governam o escoamento do ar. Esta seção aprofunda-se na física do problema, abordando-o em duas frentes complementares. Primeiramente, analisa-se o ar não como uma substância de propriedades constantes, mas como o fluido de trabalho do sistema AVAC. Será detalhado como sua principal propriedade, a densidade, é uma variável dinâmica, diretamente influenciada pelas condições de operação como temperatura, pressão atmosférica (e, conseqüentemente, a altitude) e umidade. Em seguida, o capítulo se dedica à perda de carga, o fenômeno central que se opõe ao movimento deste fluido. Será apresentado o conceito de perda de carga como a dissipação de energia que ocorre devido ao atrito e às perturbações no escoamento, manifestando-se como uma queda de pressão ao longo da rede. A compreensão conjunta desses dois elementos é a base para qualquer cálculo de engenharia preciso e para o desenvolvimento de soluções automatizadas, como a proposta neste trabalho.

3.2.1 Parâmetros psicrométricos

A psicrometria, um campo da termodinâmica aplicada, dedica-se ao estudo das propriedades do ar úmido e suas interações. No âmbito da climatização, sua aplicação é fundamental para analisar e controlar as condições do ar interior, com o objetivo de garantir o conforto térmico, a qualidade do ar e a mitigação de riscos associados a patógenos aéreos, cuja proliferação é influenciada pela temperatura e umidade (ASHRAE, 2001).

De acordo com Martins (2024), as propriedades psicrométricas são categorizadas em medições de temperatura, umidade, energia e volume. Dentre os principais indicadores térmicos, a temperatura de bulbo seco representa a temperatura real do ar, enquanto a temperatura de bulbo úmido reflete a influência da evaporação e da umidade. Complementarmente, a temperatura de ponto de orvalho indica o limiar de saturação em que o vapor de água se condensa.

A umidade, por sua vez, é quantificada pela umidade relativa, que é a razão entre a quantidade de vapor presente e a capacidade máxima de retenção do ar, e pela umidade absoluta, que define a massa real de vapor por volume de ar.

Adicionalmente, o volume específico (volume por unidade de massa de ar) e a entalpia (energia total do ar, considerando temperatura, umidade e pressão) são cruciais para cálculos de sistemas aquecimento, ventilação e ar-condicionado. A análise integrada de todas essas propriedades é indispensável para o projeto e a eficiência operacional de sistemas de climatização (ALVES, 2024).

3.2.1.1 Densidade do ar

Conhecendo a importância das propriedades psicrométricas do ar em sistemas AVAC, em muitos cálculos preliminares de engenharia AVAC, é comum a utilização do conceito de "ar padrão", uma condição de referência definida a uma temperatura de 20°C e ao nível do mar, resultando em uma densidade de aproximadamente 1,20 kg/m³. Embora essa simplificação seja útil para estimativas rápidas, sua aplicação em projetos finais é inadequada, pois as condições reais de operação raramente coincidem com as padronizadas, podendo levar a erros de dimensionamento e desempenho energético insatisfatório do sistema (SANTOS, 2021). Para uma análise de engenharia precisa, o ar deve ser tratado como um fluido de trabalho cujas

propriedades termodinâmicas são variáveis e interdependentes.

A propriedade mais crítica para o dimensionamento de dutos é a densidade. O objetivo de um sistema AVAC é transportar energia térmica, e o ar atua como o veículo para essa energia. Segundo Almeida (2024), a relação fundamental que conecta essas duas grandezas é mediada pela densidade:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (3.3)$$

Uma estimativa incorreta da densidade resulta em uma vazão mássica inadequada, fazendo com que o sistema falhe em atingir as condições de conforto projetadas, mesmo que a vazão volumétrica aparente estar correta (ROSATI *et al.*, 2020).

O comportamento do ar em sistemas AVAC se aproxima notavelmente do de um gás ideal, cuja relação entre pressão, temperatura e densidade é descrita pela Equação de Estado dos Gases Ideais. Para aplicações de engenharia, essa relação é comumente expressa como:

$$\rho = \frac{P}{R_{ar\ seco} \cdot T} \quad (3.4)$$

Onde P é a pressão absoluta (em Pascal), T é a temperatura absoluta (em Kelvin), e $R_{ar\ seco}$ é a constante específica do gás para o ar seco, com valor de $287,058 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Esta equação revela que a densidade é diretamente proporcional à pressão e inversamente proporcional à temperatura. Além disso, o ar atmosférico nunca é perfeitamente seco, contendo sempre uma parcela de vapor d'água. Como mencionado anteriormente, presença de umidade, embora muitas vezes desprezada, também altera a densidade do ar.

Para traduzir esses princípios em um modelo de cálculo aplicável, Behls (2021), em *Duct Systems Design Guide*, apresenta um conjunto de formulações para calcular a densidade do ar com base em suas variáveis físicas fundamentais: temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa. As equações que descrevem essas relações são:

$$\rho = \frac{1+W}{v} \quad (3.5)$$

$$v = \frac{R_{ar\ seco} \cdot T}{P_{atm}} \cdot (1 + 1,6079 \cdot W) \quad (3.6)$$

$$W = 0,622 \cdot \left(\frac{p_w}{P_{atm} - p_w} \right) \quad (3.7)$$

$$p_w = \Phi \cdot p_{ws} \quad (3.8)$$

Onde:

- ρ = Densidade do ar, em kg/m^3 ;
- W = Razão de umidade, adimensional;
- v = Volume específico, m^3/kg ;
- $R_{ar\ seco}$ = Constante específica do gás para o ar seco, $J/(kg \cdot K)$;
- T = Temperatura absoluta do ar, em K ;
- P_{atm} = Pressão atmosférica, em Pa ;
- p_w = pressão parcial do vapor de água no ar úmido, em Pa ;
- Φ = Umidade relativa, em %;
- p_{ws} = Pressão de saturação da água líquida, em Pa ;

Para a avaliação da pressão de saturação da água líquida (p_{ws}), a seguinte equação se faz válida e presente em *ASHRAE Handbook — Fundamentals* (2001):

$$\ln(p_{ws}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6 \ln T \quad (3.9)$$

Onde as constantes em questão possuem os seguintes valores:

- $C_1 = -5,8002206 \cdot 10^3$
- $C_2 = 1,3914993 \cdot 10^0$
- $C_3 = -4,8640239 \cdot 10^{-2}$
- $C_4 = 4,1764768 \cdot 10^{-5}$
- $C_5 = -1,4452093 \cdot 10^{-8}$
- $C_6 = 6,5459673 \cdot 10^0$

Para avaliação da pressão atmosférica, Behls (2021) apresenta a seguinte equação:

$$P_{atm} = 101325(1 - 2,25577 \cdot 10^{-5}Z)^{5,2559} \quad (3.10)$$

Na equação (3.10), a variável Z representa a altitude do local da instalação em metros. O modelo abrange valores positivos, negativos ou nulos, indicando, neste último caso, que a instalação se encontra ao nível do mar.

O conjunto de equações apresentado demonstra, portanto, a complexa interdependência entre as variáveis que definem a densidade do ar em sistemas AVAC. Essa análise reforça o dinamismo da propriedade e evidencia a ineficácia de se utilizar um valor padrão para cálculos de engenharia que exijam precisão.

3.2.2 Perda de carga em sistemas de duto

O conceito de perda de carga origina-se da primeira lei da termodinâmica, que trata da conservação de energia. De acordo com Wijesundera (2016), a energia mecânica total por unidade de massa do fluido, em qualquer ponto de uma rede de dutos, é composta por três componentes: a energia associada à pressão estática, a energia cinética associada à velocidade do escoamento e a energia potencial devido à altura. Matematicamente, essa relação é expressa por:

$$E_m = \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (3.11)$$

Onde as parcelas do lado direito da equação representam, respectivamente, a energia de pressão, a energia cinética e a energia potencial gravitacional.

À medida que o fluido se desloca ao longo do sistema, parte dessa energia mecânica é irreversivelmente convertida em energia térmica devido ao atrito com as paredes internas dos dutos. Essa dissipação de energia entre dois pontos, 1 e 2, é o que se define como perda de carga. Ela corresponde, portanto, à diferença de energia mecânica entre essas duas seções:

$$\Delta P_{12} = \left(\frac{E_{m1}}{g} - \frac{E_{m2}}{g} \right) = \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) \quad (3.12)$$

Sob uma perspectiva prática de engenharia, essa perda de energia se manifesta como uma redução de pressão ao longo da rede. Segundo Pereira (2017), a perda de carga em sistemas de dutos refere-se a essa queda de pressão que ocorre

à medida que o ar escoia através de condutos, conexões e demais componentes. Essa perda é um fator crítico no dimensionamento de sistemas AVAC, pois influencia diretamente o desempenho energético, a seleção dos ventiladores e a eficiência geral do sistema.

Para fins de análise e cálculo, a perda de carga total é decomposta em duas componentes principais: a perda de carga distribuída e a perda de carga localizada, que serão detalhadas nas seções seguintes.

3.2.3 Perda de carga distribuída

A perda de carga distribuída, também conhecida como perda por atrito, ocorre ao longo dos comprimentos retilíneos dos dutos. É provocada pela resistência que as superfícies internas do conduto oferecem ao escoamento, resultado do atrito entre as partículas do fluido e as paredes (MOTA *et al.*, 2024). A equação universalmente aceita para quantificar essa perda é a de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P_d = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (3.13)$$

Onde o termo f representa o fator de atrito, L o comprimento do duto, D o diâmetro hidráulico da seção e V a velocidade ao longo do trecho.

Conforme Behls (2021), para seções circulares, ele equivale ao próprio diâmetro interno do duto. Contudo, para dutos de seção retangular, que são o foco deste trabalho, o diâmetro hidráulico é calculado por uma relação equivalente, dada por:

$$D_h = \frac{2HW}{H+W} \quad (3.14)$$

Onde H e W são, respectivamente, a altura e a largura do duto.

A complexidade no cálculo da perda de carga distribuída reside na determinação do fator de atrito, f . Este coeficiente não é um valor constante; sua magnitude depende do regime de escoamento (laminar ou turbulento), que é caracterizado pelo número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.15)$$

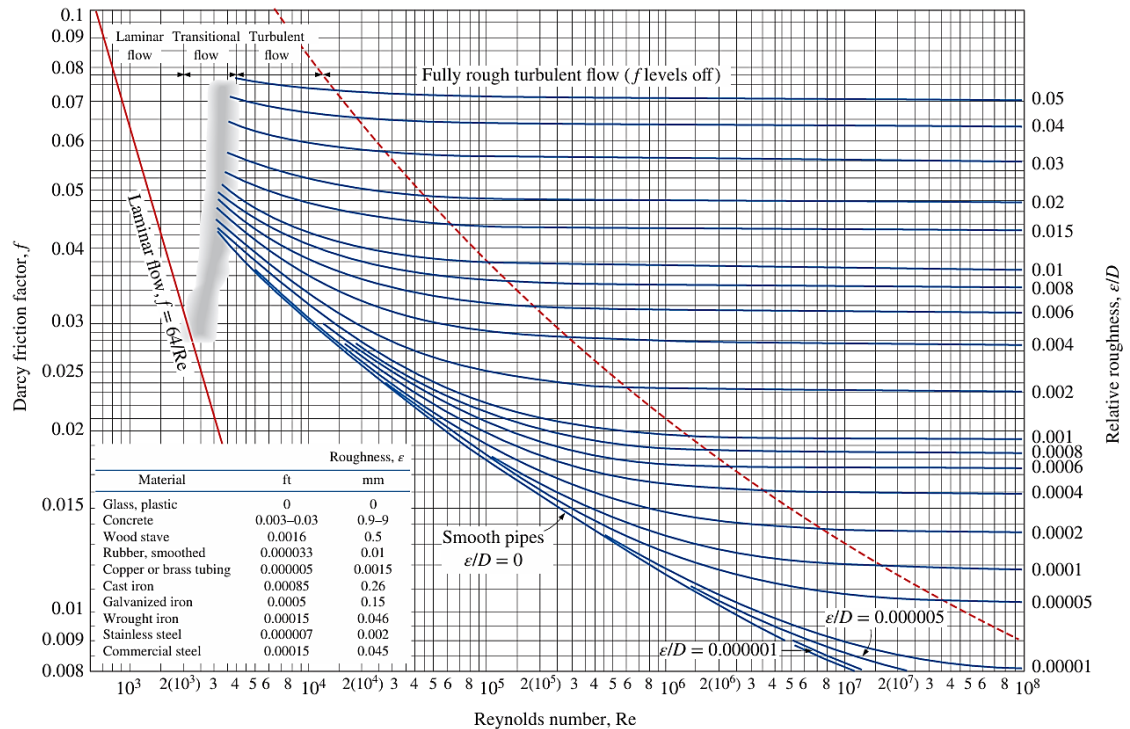
- Se $Re < 2300$: escoamento laminar, com $f = 64/Re$
- Se $Re \geq 4000$: escoamento turbulento, com f obtido por fórmulas empíricas, como a equação de Colebrook-White (QIU, 2021):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 + 2 \log \left(\frac{D}{\varepsilon} \right) - 2 \log \left[1 + 9,3 \left(\frac{D}{\varepsilon} \right) \left(\frac{1}{Re \sqrt{f}} \right) \right] \quad (3.16)$$

Onde ε representa a rugosidade absoluta da superfície interna do duto.

A principal dificuldade da equação de Colebrook-White reside em sua natureza implícita, ou seja, o fator de atrito f aparece em ambos os lados da equação, exigindo que sua solução seja encontrada por meio de métodos numéricos iterativos. Para contornar essa complexidade no dia a dia da engenharia, uma alternativa prática e amplamente utilizada para a determinação do fator de atrito é a consulta ao Diagrama de Moody, que apresenta a solução gráfica da equação de Colebrook-White.

Figura 3. Diagrama de Moody

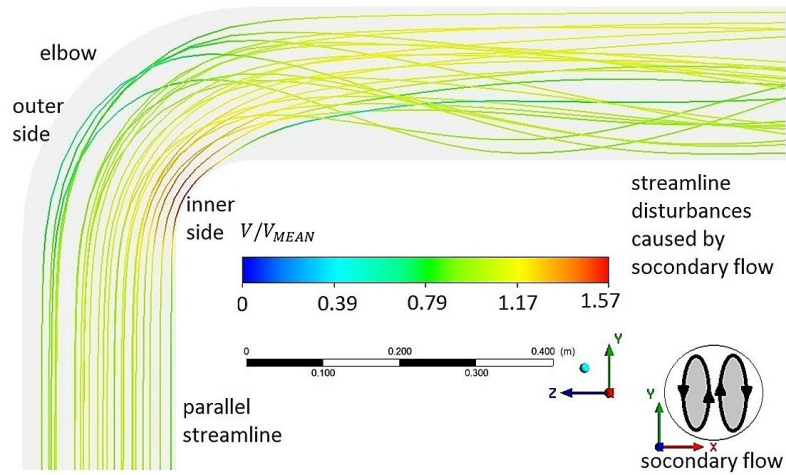


Fonte: Çengel e Cimbala (2018).

3.2.4 Perda de carga localizada

Diferentemente da perda distribuída, que ocorre de forma contínua, a perda de carga localizada (ou singular) é gerada em pontos específicos da rede onde o escoamento é perturbado. Essas perturbações são causadas por alterações geométricas ou pela presença de dispositivos como cotovelos, bifurcações, registros, transições, entradas e saídas de ar (CAMARGO, 2020). Tais singularidades geram fenômenos como turbulência, separação de fluxo e formação de vórtices, que dissipam uma quantidade significativa de energia.

Figura 4 – Fluxo de ar em cotovelo 90° sem veios via CFD



Fonte: Smyk *et al.* (2024)

Analiticamente, a perda de carga localizada é calculada pela seguinte expressão:

$$\Delta P_l = C_o P_{vo} = C_o \left(\frac{1}{2} \rho V_o^2 \right) \quad (3.17)$$

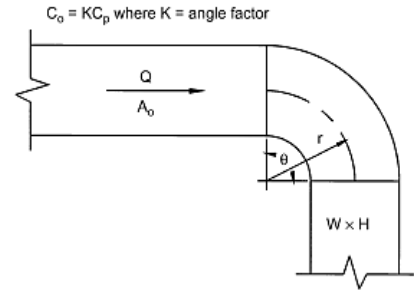
Na equação, P_{vo} representa a pressão dinâmica, que é função da densidade do ar (ρ) e da sua velocidade (V_o) no trecho analisado. O grande desafio no cálculo da perda de carga localizada reside na determinação do coeficiente de perda, C_o . Trata-se de um coeficiente empírico, obtido experimentalmente, e sua magnitude depende intrinsecamente da geometria detalhada da peça e das condições do fluxo. Por exemplo, para um cotovelo retangular, o valor de C_o varia com a razão entre o raio de curvatura e a largura do duto (r/W) e com a razão de aspecto da seção (H/W).

A determinação correta desses coeficientes é, portanto, um processo de consulta a normas e manuais técnicos. As principais referências para esses dados são as Tabelas publicadas pela ASHRAE e pela SMACNA. Publicações como o *ASHRAE Handbook—Fundamentals* (2001) compilam décadas de dados experimentais em formatos tabulares que o engenheiro deve consultar manualmente para cada singularidade do projeto. Este processo manual não é apenas um gargalo de produtividade, mas também uma fonte significativa de imprecisão e erros, o que justifica a busca por métodos automatizados, como o proposto neste trabalho.

Figura 5 – Coeficientes de perda de carga para cotovelo retangular suave sem veio

C_p Values											
r/W	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00
0.50	1.53	1.38	1.29	1.18	1.06	1.00	1.00	1.06	1.12	1.16	1.18
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.00	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21
1.50	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.00	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

Angle Factor K											
θ	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K	0.00	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40



Fonte: ASHRAE Handbook — Fundamentals (2001).

3.2.5 Perda de carga total

A perda de carga total em um sistema de dutos representa a soma de todas as resistências que o ar encontra em seu percurso. Conforme Camargo (2020), ela é calculada pela soma das perdas distribuídas e localizadas ao longo do caminho crítico do sistema, que é definido como o trajeto que oferece a maior resistência total ao escoamento e, portanto, determina a exigência mínima de pressão para o ventilador.

Matematicamente, a relação é expressa de forma simples pela soma das duas componentes:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_d + \Delta P_l \quad (3.18)$$

Expandindo esta fórmula para incluir os métodos de cálculo detalhados nas seções anteriores, a perda de carga total pode ser representada como:

$$\Delta P_{tot} = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) + \sum_n C_n \left(\frac{1}{2} \rho V_n^2 \right) \quad (3.19)$$

Como explicitado na equação, o primeiro termo corresponde à perda por atrito ao longo dos trechos retilíneos ΔP_d , enquanto o segundo termo, $\sum_n C_n \left(\frac{1}{2} \rho V_n^2 \right)$ representa o somatório das perdas de pressão de cada singularidade (ΔP_l) presente no trecho. É este somatório que torna o cálculo manual tão trabalhoso, pois exige a análise individual de cada componente, cujos coeficientes (C_n) variam com a geometria e a vazão.

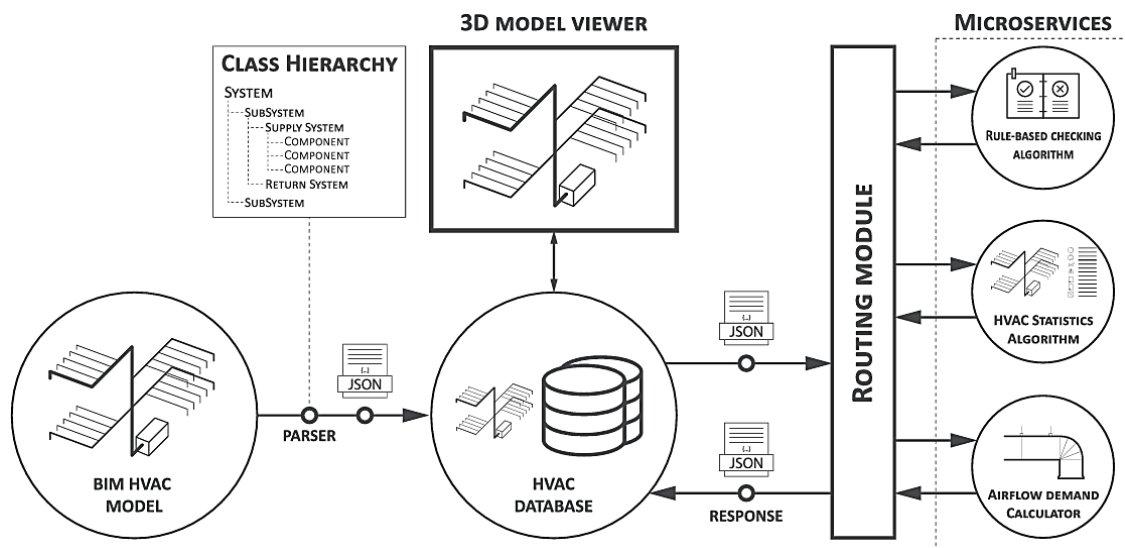
O cálculo preciso da perda de carga total não é um mero exercício acadêmico;

ele é o resultado fundamental que dita o dimensionamento do principal componente ativo do sistema: o ventilador. Este valor representa a resistência total que o equipamento deve ser capaz de vencer para garantir que a vazão de ar projetada seja efetivamente entregue em todos os terminais do ambiente condicionado.

3.3 BUILDING INFORMATION MODELING

A Modelagem da Informação da Construção, mais conhecida pela sigla BIM, é uma metodologia integrada que representa uma evolução no planejamento, execução e operação de edificações e infraestruturas. Ela se fundamenta na elaboração e no gerenciamento de um modelo digital que representa, de forma precisa, todos os aspectos físicos e funcionais de um empreendimento, indo muito além de uma simples representação 3D. Em sua essência, o modelo BIM atua como uma base de informações centralizadas e inteligentes, permitindo que todos os envolvidos no projeto colaborem de maneira mais eficiente e tomem decisões mais bem fundamentadas ao longo de todo o ciclo de vida da construção, desde o planejamento e execução até a operação e manutenção (MISTRY, 2020).

Figura 6. Fluxograma de informações BIM automatização de microsserviços



Fonte: Seidenschnur *et al.* (2022)

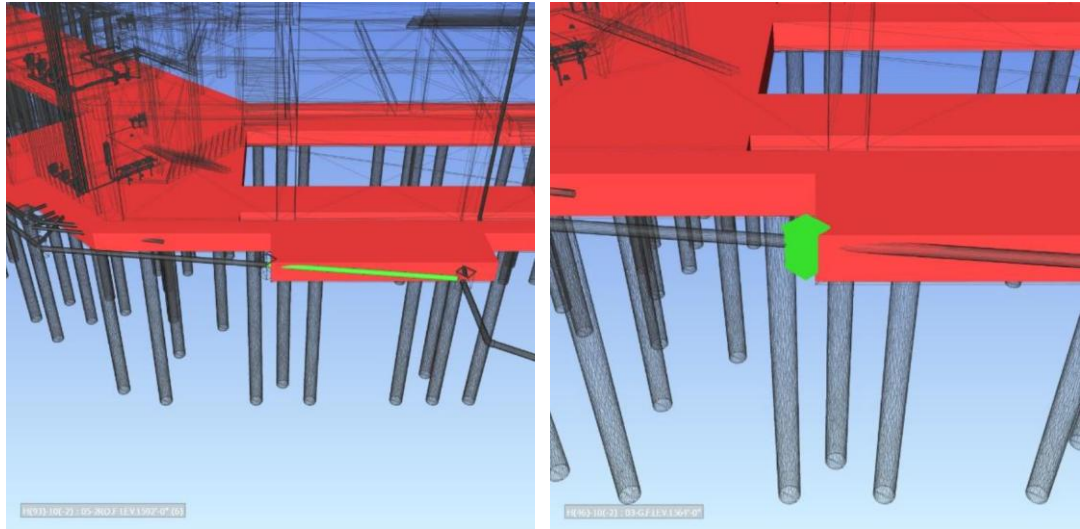
3.3.1 Autodesk Revit

Sendo uma das ferramentas mais utilizadas para aplicação do BIM, o Revit, *software* desenvolvido pela Autodesk, se apresenta como uma plataforma muito versátil para a implementação da metodologia. Sua base é a modelagem tridimensional paramétrica, que permite a edição não apenas da geometria, mas também das informações associadas a cada elemento do projeto (FARIAS, 2018). Essa capacidade de incorporar dados transforma simples desenhos em uma representação digital detalhada da edificação, abrangendo desde componentes arquitetônicos, como portas e janelas, até sistemas complexos de hidráulica, elétrica e climatização.

Sua aplicação transcende a modelagem de edificações, estendendo-se a projetos de infraestrutura e oferecendo suporte a todo o ciclo de vida da construção, desde o planejamento até a operação. Ao centralizar as informações em um único modelo, o *software* viabiliza a integração entre disciplinas, facilita a comunicação e permite simulações precisas do projeto. Além da representação geométrica (3D), o modelo pode ser enriquecido com o que se convencionou chamar de “dimensões BIM”: a 4D incorpora o planejamento e o cronograma da obra, a 5D agrega a estimativa de custos, a 6D analisa aspectos de sustentabilidade e a 7D foca na gestão e manutenção da edificação ao longo de sua vida útil (HABTE *et al.*, 2021).

No campo específico de projetos AVAC, o Revit permite a criação de sistemas inteligentes, uma capacidade que será aprofundada no item a seguir. A modelagem tridimensional de componentes MEP (Mecânica, Elétrica e Hidráulica) é fundamental para a coordenação espacial, permitindo a detecção precoce de interferências entre a rede de dutos e outros sistemas, como elementos estruturais, o que reduz significativamente erros e retrabalho em obra, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Aplicação de detecção de interferências em ferramenta BIM



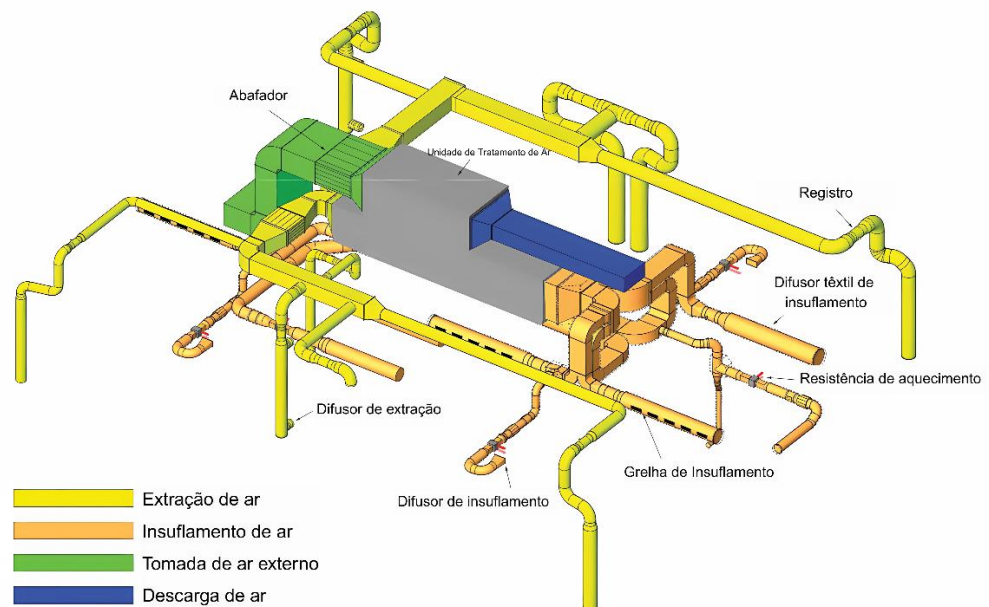
Fonte: Jahangir *et al.* (2024)

3.3.2 Aplicação do BIM em projetos AVAC no Revit

De acordo com Knight (2010), em se tratando de Revit para a disciplina de AVAC, os sistemas são representados por modelos 3D compostos por objetos inteligentes, que contêm informações como dimensões, propriedades físicas e dados operacionais. Esses objetos são parametrizados e interligados, de modo que qualquer alteração em um componente, como a vazão de ar de um difusor, provoca ajustes automáticos nos elementos dependentes, como dutos, conexões e bocais, sem comprometer a consistência do projeto.

Essa estrutura de informações pode ser comparada a uma planilha organizada: cada linha pode representar um ambiente, e as colunas contêm dados como medidas, materiais, orientação solar e elementos de fechamento. Essa planilha pode ser detalhada progressivamente, incluindo aberturas (como janelas e portas), dados técnicos dos materiais, desempenho térmico e informações dos fabricantes. À medida que o projeto evolui, os dados do modelo também se ampliam, acompanhando todas as fases do ciclo de vida da edificação (KNIGHT *et al.*, 2010). Esse modelo aplica-se na geração de Tabelas automáticas, onde as informações do modelo do projeto são atualizadas e contabilizadas em tempo real, refinando o fluxo de trabalho com relação aos levantamentos de quantitativos de materiais.

Figura 8 – Sistema de distribuição de ar modelado em Revit



Fonte: Adaptado de Seidenschnur *et al.* (2022)

Além da representação gráfica, o *software* permite a exportação das informações para *softwares* de simulação térmica e energética, por meio de formatos como IFC (Industry Foundation Classes) e gbXML (Green Building XML). Isso garante que as ferramentas de análise reproduzam com precisão o modelo virtual, mantendo a lógica e as características definidas no projeto original (KOUTAMANIS, 2020).

Dessa forma, o Revit não é apenas uma plataforma de desenho, mas um sistema inteligente de apoio ao projeto, que permite análises mais precisas e tomadas de decisão mais embasadas em projetos de sistemas AVAC.

3.3.3 Trabalho Colaborativo

A centralização das informações em um modelo digital compartilhado é o pilar que permite ao BIM promover uma atuação integrada e colaborativa entre todos os profissionais de um projeto, como arquitetos, engenheiros e gestores (MISTRY, 2020). Essa abordagem, como enfatiza Yuan (2020), favorece a comunicação em tempo real, reduz falhas por desencontro de informações e aprimora a tomada de decisões ao longo de todas as etapas do projeto. O poder dessa metodologia reside na capacidade de combinar, em um único ambiente, diferentes tipos de dados, desde a geometria 3D a especificações técnicas, cronogramas e orçamentos, oferecendo uma visão holística

e coerente da edificação e de seus sistemas (SEIDENSCHNUR *et al.*, 2022). Como resultado, a metodologia não apenas fomenta uma documentação mais precisa, mas também otimiza os processos, promovendo a atuação sinérgica entre as disciplinas e, conseqüentemente, acelerando a coordenação e a entrega de projetos complexos (NETO, 2020).

3.4 FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS

No ecossistema Revit, os componentes que formam o modelo BIM são conhecidos como famílias. Elas são os blocos de construção de um projeto, representando desde elementos arquitetônicos, como portas e janelas, até componentes de sistemas MEP, como equipamentos e conexões de dutos. O que torna essas famílias "inteligentes" e as diferencia de simples blocos 3D é a parametrização. Este conceito refere-se à capacidade de definir as dimensões, materiais e propriedades de um objeto através de parâmetros que podem ser ajustados pelo usuário (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A principal função das famílias paramétricas é agilizar o fluxo de trabalho e automatizar a modelagem. Uma vez que um objeto é parametrizado, ele não precisa ser redesenhado a cada alteração; basta modificar o valor de um parâmetro para que a geometria se atualize automaticamente. Por exemplo, ao alterar o parâmetro de largura de um tipo de janela, todas as instâncias daquela janela no projeto são atualizadas simultaneamente em todas as vistas, cortes e elevações, garantindo consistência e eliminando retrabalho. Essa capacidade de embutir regras e informações de comportamento transforma um componente geométrico em um objeto BIM inteligente (DE BRITO *et al.*, 2021). Para controlar como essas atualizações ocorrem, existem dois tipos de parâmetros, os de tipo e os de instância.

Os parâmetros de tipo afetam todas as instâncias de uma família que compartilham do mesmo tipo. Um tipo em uma família pode ser desde uma dimensão simples a uma característica representada por texto. Uma alteração em um parâmetro de tipo modifica todos os elementos daquele tipo no projeto. São ideais para definir padrões, como os diferentes diâmetros nominais de uma linha de tubos (HOLANDA *et al.*, 2023).

Os parâmetros de instância permitem que cada elemento inserido no projeto tenha um valor único para aquele parâmetro, mesmo que sejam do mesmo tipo. Estes

parâmetros são os que devem ser utilizados para a aplicação de fórmulas para a parametrização de famílias (RIBEIRO *et al.*, 2021). Além disso, oferecem flexibilidade caso a caso, como o ângulo específico de um cotovelo retangular de duto, que pode variar em cada ponto da rede. A seleção da característica do parâmetro está presente na Figura 9.

Figura 9 – Seleção de dados de parâmetro em tipo e em instância

A imagem mostra uma janela de configuração de parâmetros com o título "Dados de parâmetro".

- Nome:** Um campo de texto contendo "Largura do duto".
- Disciplina:** Um menu suspenso com "AVAC" selecionado.
- Tipo de dados:** Um menu suspenso com "Tamanho do duto" selecionado.
- Parâmetro de grupo em:** Um menu suspenso com "Cotas" selecionado.
- Descrição da dica de ferramenta:** Um campo de texto contendo "<Nenhuma descrição de dica de ferramenta. Edite este parâmetro para gravar". Abaixo dele há um botão "Editar dica de ferramenta...".
- Seleção de Tipo/Instância:**
 - Do lado direito, há duas opções de seleção: "Tipo" (com um botão de rádio desativado) e "Instância" (com um botão de rádio ativado).
 - Abaixo de "Instância", há uma opção "Parâmetro do relatório" com um botão de caixa de seleção desativado.
 - Logo abaixo, há um texto explicativo: "(Pode ser utilizado para extrair o valor de uma condição geométrica e incluir em uma fórmula, ou como um parâmetro de tabela)".

Fonte: o Autor.

3.4.1 Mecanismos de parametrização em famílias Revit

A inteligência de uma família paramétrica vai além do controle geométrico. Para traduzir a lógica de engenharia, como a seleção de coeficientes ou a verificação do tipo de sistema ao qual a singularidade pertence, diretamente para dentro dos componentes BIM, o Revit oferece mecanismos de automação que operam dentro dos parâmetros. Esses mecanismos permitem que as famílias realizem cálculos, tomem decisões e consultem dados externos (SANTOS, 2024). Os dois mais importantes para a automação de cálculos complexos, como o proposto neste trabalho, são as fórmulas com lógica condicional e as Tabelas de pesquisa (*Lookup Tables*).

3.4.1.1 Fórmulas e lógica condicional

O Revit permite que o valor de um parâmetro seja definido não por uma entrada manual, mas pelo resultado de uma fórmula matemática. Essa capacidade utiliza operadores aritméticos padrão (+, -, *, /) e um conjunto de funções matemáticas (sqrt, sin, cos, etc.). Uma ferramenta de grande valia para a implementação de diversas lógicas aplicáveis à engenharia, no entanto, é a instrução condicional “IF”. De acordo com Aubin (2020), sua sintaxe é apresentada como “IF(<condição>, <resultado_se_verdadeiro>, <resultado_se_falso>)”.

Essa estrutura permite que a família avalie uma condição e retorne um de dois resultados possíveis. Para construir condições mais complexas, a declaração IF pode ser combinada com operadores lógicos como *AND*, *OR* e *NOT* (AUBIN, 2020). Por exemplo, uma regra de projeto que exige um atenuador de ruído específico apenas se a vazão for maior que um limite e a velocidade for maior que outro, pode ser implementada com a função *AND* dentro da condição do *IF*.

Para cenários que exigem mais de duas saídas, as declarações condicionais podem ser aninhadas umas dentro das outras, onde o "resultado se falso" de uma condição se torna uma nova declaração condicional completa (AUBIN, 2020). Isso permite a criação de uma árvore de decisão que pode replicar a lógica de consulta a uma tabela de normas, como determinar a espessura de uma chapa de duto com base em sua dimensão, conforme os padrões da SMACNA.

Figura 10 – Aplicação de formulas em famílias paramétricas

Cotas		
Largura do duto (padrão)	300.0 mm	=
Altura do duto (padrão)	300.0 mm	=
Comprimento do duto 1 (padrão)	300.0 mm	= if(Ângulo = 180°, Raio do centro * tan(90° / 2), Raio do centro * tan(Ângulo / 2))
Raio Interno (padrão)	150.0 mm	= Raio do centro - Largura do duto / 2
Raio do centro (padrão)	300.0 mm	= Multiplicador de raio * Largura do duto
Multiplicador de raio	1.000000	=
Ângulo (padrão)	90.00°	=

Fonte: o Autor.

3.4.1.2 Lookup tables

Este mecanismo permite que uma família consulte dados de um arquivo de texto externo no formato CSV (*Comma-Separated Values*), que é essencialmente uma

planilha salva como texto simples. A estrutura desse arquivo é rígida e seu cabeçalho (a primeira linha) deve seguir uma sintaxe específica para que o Revit entenda os dados, no formato “*NomedoParametro##TipodeDado##Unidade*” (RADNIA, 2021). Essa formatação pode ser realizada como o auxílio do programa *Microsoft Office Excel*.

Figura 11 – Tabela de pesquisa feita no *software* Excel

	LarguraDuto##LENGTH##millimeters	AlturaDuto##LENGTH##millimeters
"Curva 300x200"	300	200
"Curva 300x250"	300	250
"Curva 400x300"	400	300
"Curva 400x350"	400	350

Fonte: o Autor.

A função que realiza a consulta dentro da família é a “*size_lookup()*”. Sua sintaxe básica é representada por “*size_lookup(NomedaTabela, "ColunadeRetorno", ValorPadrão, ValordeBusca1, ..., ValordeBuscaN)*”.

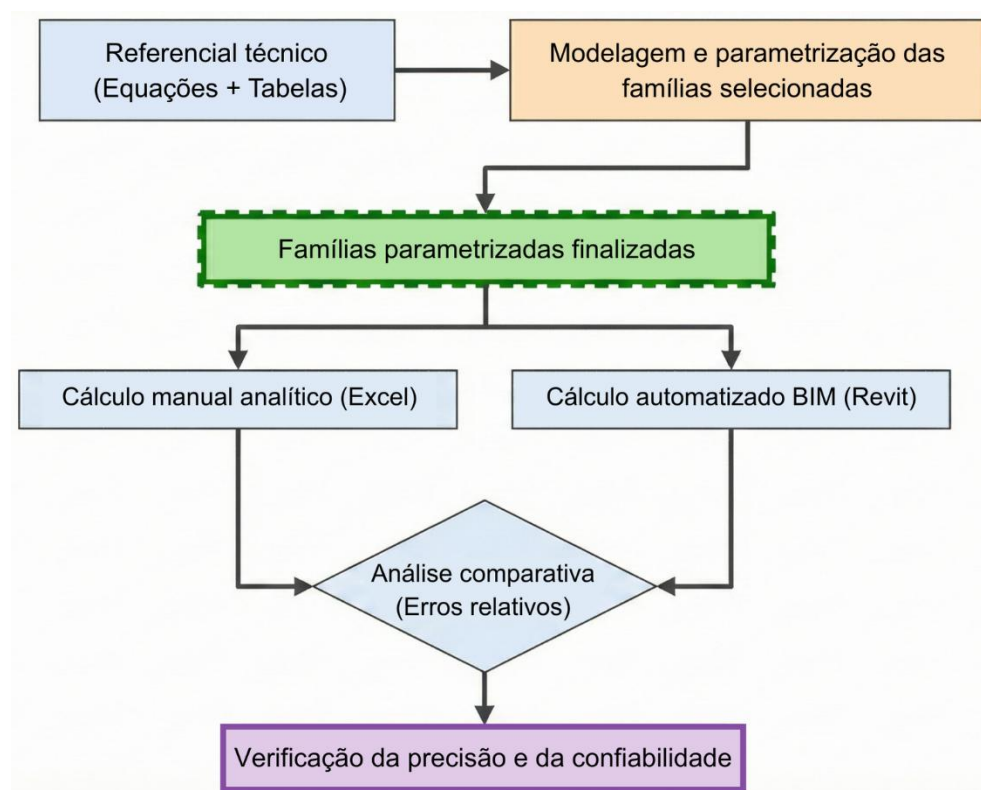
A função busca no arquivo CSV uma linha que corresponda exatamente aos "Valores de Busca" fornecidos (ex: largura e altura do duto) e retorna o valor encontrado na "Coluna de Retorno" especificada (ex: "Coeficiente_Cp"). Se nenhuma correspondência exata for encontrada, a função retorna o "Valor Padrão" definido na fórmula. Uma limitação fundamental deste mecanismo, e que é crucial para o desenvolvimento deste trabalho, é que a função em questão não realiza interpolação de valores. Isso significa que, para garantir a precisão em uma gama contínua de geometrias, os dados tabulares das normas precisam ser pré-processados e expandidos antes de serem inseridos no arquivo CSV.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o delineamento metodológico e os procedimentos técnicos adotados para alcançar os objetivos propostos. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de desenvolvimento tecnológico aplicado, focado na criação de uma solução para a lacuna identificada na ferramenta BIM Autodesk Revit referente ao cálculo da perda de carga localizada.

A metodologia foi estruturada com base no desenvolvimento das famílias paramétricas, que envolve desde a tradução dos dados experimentais até sua implementação computacional, seguida dos procedimentos de teste, compostos pela verificação da solução desenvolvida, assim como evidencia a Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma metodológico



Fonte: o Autor.

4.1 DESENVOLVIMENTO DAS FAMÍLIAS PARAMÉTRICAS

Para aplicar o cálculo automático de perda de carga nas famílias, é necessário primeiramente obtê-las. Para esta metodologia, as famílias de cotovelo retangular

suave sem veios e transição foram obtidas através do *template* padrão do Revit para projetos mecânicos, sendo então exportadas e modificadas pelo autor.

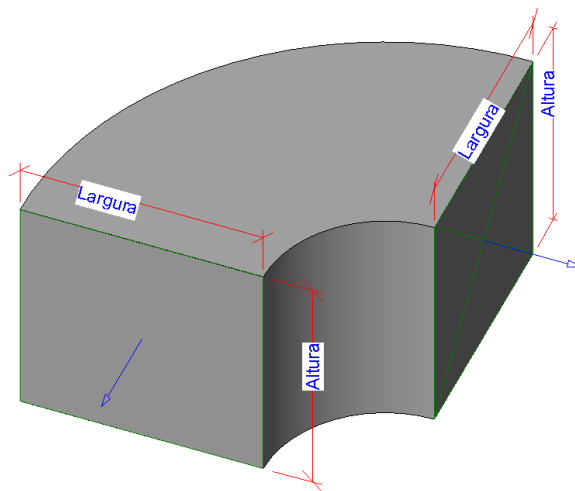
Entretanto, para o caso das famílias de tê reto, tê chanfrado 45° e cotovelo de áreas variáveis, estas foram modeladas originalmente pelo próprio autor. Esta decisão foi tomada pela ausência (completa ou parcial) destas famílias nativas com parâmetros suficientes para atender às condições geométricas impostas pelos limites das tabelas de coeficientes da literatura.

O processo de desenvolvimento de cada família seguiu uma rotina estruturada, detalhada nos itens a seguir para cada singularidade.

4.1.1 Cotovelo retangular suave sem veios

O primeiro passo consistiu na obtenção da família em questão, obtido através de um *template* do Revit, como explicado anteriormente.

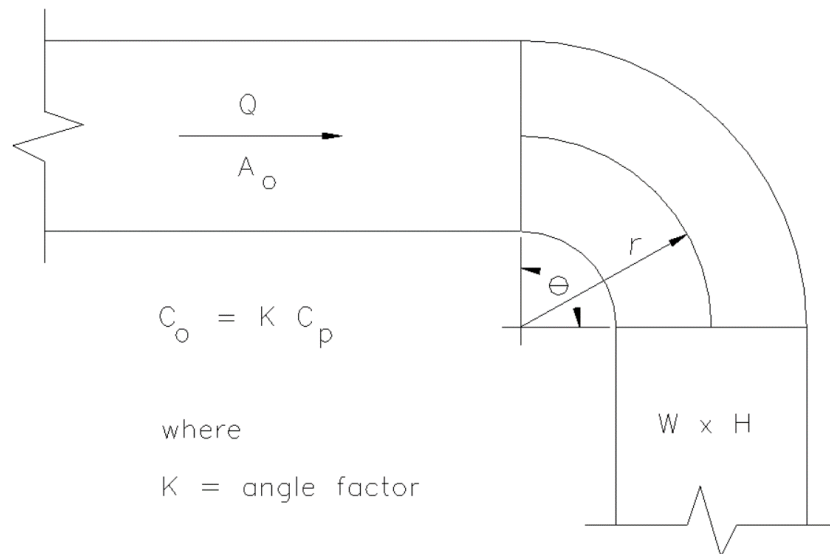
Figura 13 – Modelo 3D da família de cotovelo retangular suave sem veios



Fonte: o Autor.

Com o modelo em mãos, a Figura 14 foi utilizada como referência para implementação das relações necessárias e cálculo do coeficiente de perda de carga, assim como a Tabela 1 e a Tabela 2, utilizadas como referência para os coeficientes de perda de carga.

Figura 14 – Referência utilizada para o cotovelo retangular suave sem veios



Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals*, 2001.

Tabela 1 – Tabela de coeficientes de perda de carga para o cotovelo retangular suave sem veios

C_p											
r/W	H/W										
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	8,00
0,50	1,53	1,38	1,29	1,18	1,06	1,00	1,00	1,06	1,12	1,16	1,18
0,75	0,57	0,52	0,48	0,44	0,40	0,39	0,39	0,40	0,42	0,43	0,44
1,00	0,27	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,18	0,19	0,20	0,27	0,21
1,50	0,22	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17
2,00	0,20	0,18	0,16	0,17	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals*, 2001.

C_o , coeficiente de perda de carga

H, altura de conexão do duto

W_o , largura de saída do fluxo

W_1 , largura de entrada do fluxo

Tabela 2 – Tabela do fator de ângulo K

Fator de ângulo											
θ	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K	0,00	0,31	0,45	0,60	0,78	0,90	1,00	1,13	1,20	1,28	1,40

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals*, 2001.

θ , ângulo do cotovelo conforme Figura 14.

Como próximo passo, criaram-se os parâmetros necessários para o cálculo de perda de carga. Parâmetros referentes à geometria base (Altura do duto, Largura do duto, Raio do centro, Ângulo e Multiplicador de raio) já estavam presentes na família padrão. Os novos parâmetros criados foram:

- Status: Valor de saída que controla e retorna ao usuário a situação do cálculo, indicando possíveis erros ou se a perda de carga foi calculada corretamente;
- Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$): Valor de entrada para o cálculo de densidade do ar (conforme equação 3.9);
- Umidade relativa do ar (%): Valor de entrada (0-100) para o cálculo de densidade do ar;
- Altitude: Valor de entrada da altitude do local do projeto;
- Pressão atmosférica (Pa): Valor de saída, calculado com base na altitude (conforme equação 3.10);
- Vazão: Valor de entrada, atribuído automaticamente quando a singularidade é conectada a um sistema;
- Densidade do ar: Valor de saída, calculado com base na equação 3.5 e nos parâmetros de entrada;
- Área da seção: Valor de saída (Altura x Largura);
- Velocidade: Valor de saída (Vazão / Área da seção);
- Pressão dinâmica: Valor de saída, calculada com base na equação 3.17;
- HW: Parâmetro de saída (Altura / Largura), usado para a consulta na Tabela (Conforme a Figura 14);
- Cp: Valor de saída (coeficiente de perda) em função da geometria (H, W e Raio). Calculado via Tabelas de pesquisa;

- K: Valor de saída (coeficiente de perda) em função do ângulo. Mensurado conforme apresentado na Figura 14;
- Co: Valor de saída. Coeficiente de perda calculado pelo produto entre Cp e K;
- Perda de carga: Parâmetro que calcula a perda de carga. Valor de saída (Conforme equação 3.17);
- NomeColunaCp: Parâmetro do tipo texto responsável por retornar o nome da coluna da Tabela de pesquisa de onde a função irá procurar o valor de Cp correspondente.

Figura 15 – Parâmetros inseridos na família

Tipos de famílias

Digite o nome: 1 W

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula
Restrições		
Gráficos		
Cotas		
Largura do duto (padrão)	300.0 mm	=
Altura do duto (padrão)	300.0 mm	=
Comprimento do duto 1 (padrão)	300.0 mm	= if(Ângulo = 180°, Raio do centro * tan(90° / 2
Raio Interno (padrão)	150.0 mm	= Raio do centro - Largura do duto / 2
Raio do centro (padrão)	300.0 mm	= Multiplicador de raio * Largura do duto
Multiplicador de raio	1.000000	=
Ângulo (padrão)	90.00°	=
Mecânica – Vazão		
Status (padrão)	Valor de perda de carga encontrado!	= if(Pressão atmosférica = 0 Pa, "Erro ao calcul
Temperatura do ar (°C) (padrão)	20.000000	=
Umidade relativa do ar (%) (padrão)	0.000000	=
Altitude (padrão)	0.0000 m	=
Pressão atmosférica (padrão)	101325.000000 Pa	= 101325 Pa * (1 - 2.25577 * (10 ^ -5) * (Altitude
Vazão (padrão)	600.0000 m³/h	=
Densidade do ar (padrão)	1.204085 kg/m³	= (1 kg/m³ + (0.622 kg/m³ * (((Umidade relatin
Área da seção (padrão)	0.090	= Largura do duto * Altura do duto
Velocidade (padrão)	1.85 m/s	= Vazão / Área da seção
Pressão Dinâmica (padrão)	2.064617 Pa	= Densidade do ar * (Vazão / Área da seção) ^
Perda de Carga (padrão)	0.433570 Pa	= (Densidade do ar * (Vazão / Área da seção) ^
HW (padrão)	1.000000	= Altura do duto / Largura do duto
Cp (padrão)	0.210000	= size_lookup("CurvaRetangular_Cp", NomeCc
Co (padrão)	0.210000	= if(Cp > 0, Cp * K, -1)
K (padrão)	1.000000	= if(Ângulo < 0°, -1, if(Ângulo = 0°, 0, if(Ângul
Parâmetros IFC		
Resultados da análise		
NomeColunaCp (padrão)	Cp_1_00	= if(Multiplicador de raio = 0.500001, "Cp_0_50

Como posso gerenciar meus tipos de família?

Gerenciar tabelas de pesquisa...

OK Cancelar Aplicar

Fonte: o Autor.

As fórmulas completas referentes a cada parâmetro citado estão disponíveis no Apêndice A.

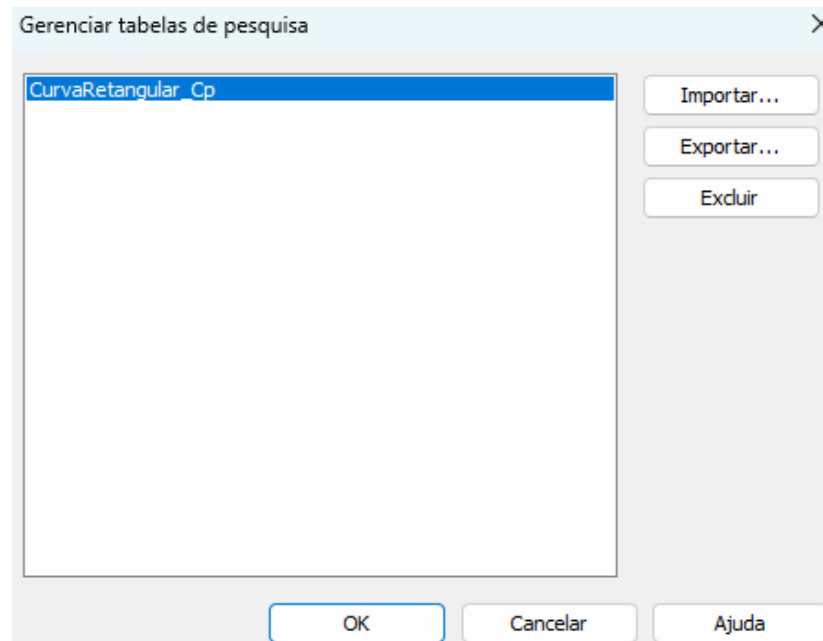
O terceiro passo consistiu na obtenção dos valores tabulados do coeficiente de perda de pressão. Para isso, os dados foram extraídos da Tabela 1 por meio da função “*size_lookup*” do Revit. Para facilitar o tratamento e a organização dos valores, os dados foram inicialmente exportados para uma planilha no Excel.

A análise da função evidenciou que ela não realiza interpolações. A função retorna um valor apenas quando há coincidência exata entre a entrada e a razão entre altura e largura (H/W). Quando não existe correspondência, a função retorna o valor padrão -1, o que impossibilita a utilização direta do coeficiente e facilita a identificação de inconsistências.

Para solucionar essa limitação, foi realizada a interpolação linear dos valores intermediários da razão entre altura e largura utilizando a função “=PREVISÃO.LINEAR” no Excel. A tabela foi ampliada e refinada com precisão de 0,01 para a razão H/W, assegurando abrangência total do intervalo de operação do modelo com elevado nível de precisão.

A coluna da Tabela correspondente à razão r/W (raio do centro dividido pela largura) foi vinculada a um parâmetro de tipo já existente denominado “Multiplicador de raio”. Essa vinculação foi essencial para delimitar as geometrias válidas da família, de forma que apenas tipos compatíveis com os valores apresentados na Tabela 1 pudessem ser selecionados. Essa restrição assegurou que a consulta ao coeficiente de perda fosse sempre válida e padronizou a parametrização da família no Revit, garantindo consistência geométrica do modelo. Ao final, a tabela refinada foi importada para a área de parametrização da família.

Figura 16 – Tabela de pesquisa inserida no ambiente de parametrização



Fonte: o Autor.

4.1.1.1 Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o cotovelo suave

Com a Tabela incorporada ao modelo, tornou-se possível correlacionar o coeficiente “Cp” com qualquer combinação de parâmetros geométricos dentro dos limites fornecidos pela tabela de cotovelo retangular suave sem veios da ASHRAE (2001). Dessa forma, consolidou-se a lógica de parametrização da família para a determinação da perda de carga.

Ao selecionar o tipo da família, definido pelo parâmetro “Multiplicador de raio”, e conectar a singularidade ao sistema modelado em ambiente BIM no Revit, a parametrização interna à família recebe do sistema automaticamente os valores de altura, largura do duto e vazão ao qual a singularidade será conectada. Esta é uma característica intrínseca ao Revit quanto à operação de famílias em sistemas AVAC. A partir desses dados, os demais parâmetros derivados são calculados até a determinação da perda de carga, conforme ilustrado na Figura 15. Em paralelo, o parâmetro “NomeColunaCp” lê o valor calculado pelo parâmetro “HW” e retorna ao parâmetro “Cp” qual valor de texto indica a coluna da Tabela que deverá consultada pela função “*size_lookup*”, ainda em função do valor da razão r/W selecionada, retornando o coeficiente de perda correspondente. Além disso, o parâmetro K, que

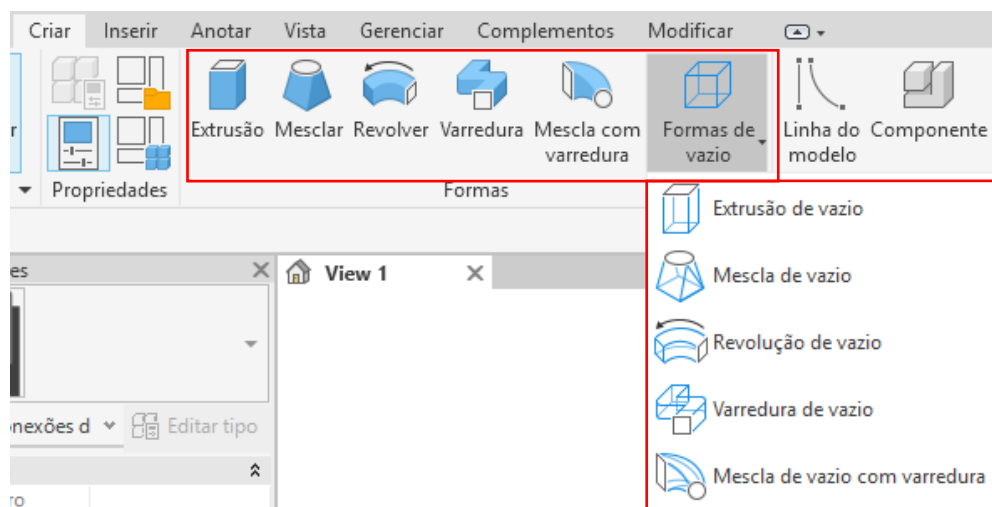
representa o coeficiente devido ao ângulo do cotovelo, é calculado com base no parâmetro “Ângulo” presente na família. Com os valores de C_p e K encontrados, o coeficiente de perda C_o é então calculado.

Por fim, o parâmetro de controle “*Status*” verifica a validade das entradas. Caso o parâmetro C_p retorne, através da função “*size_lookup*”, o valor -1, o parâmetro “*Status*” retornará o erro ao utilizador, indicando ainda que a geometria possui relações fora da tabela de coeficientes de perda referente a ela. Caso os valores geométricos e as propriedades do ar (parâmetros de entrada manual) não estejam coerentes com as condições de instalação, ou não forem devidamente preenchidas pelo utilizador, o parâmetro “*Status*” também retorna erro, indicando ainda a localização do provável erro. Entretanto, sempre que as entradas estiverem definidas de forma correta, assim como as relações referentes à tabela de coeficiente de perda de carga estejam de acordo com os limites, o parâmetro irá retornar “Valor de perda de carga encontrado!”. Com isso, finaliza-se o cálculo de perda de carga para a singularidade.

4.1.2 Cotovelo retangular com quina, sem veios e de áreas variáveis

Para esta família, foi necessário modelar a geometria utilizando os recursos de modelagem presentes no editor de famílias do Revit. As principais ferramentas básicas de modelagem 3D estão disponíveis no software.

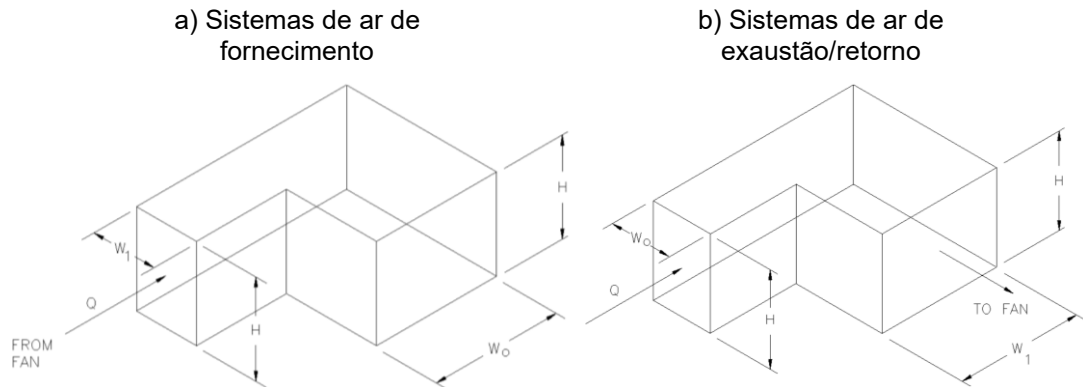
Figura 17 – Recursos de modelagem tridimensional no Revit



Fonte: o Autor.

A nova família foi parametrizada seguindo as restrições impostas pela ASHRAE (2001), presentes na Figura 18.

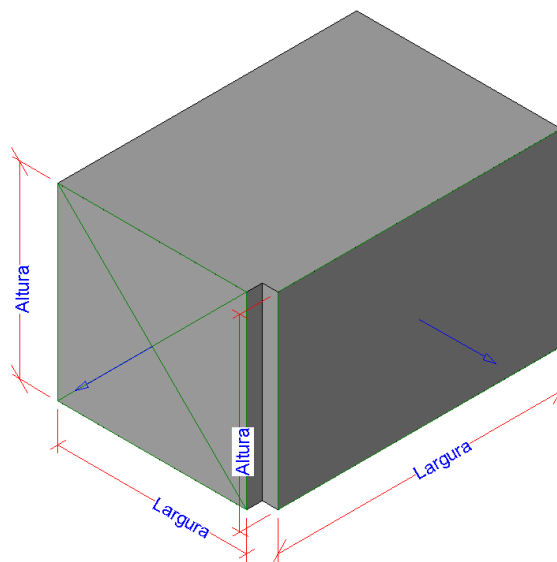
Figura 18 – Referências utilizadas para o cotovelo retangular com quina e sem veios



Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals, 2001*.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as razões geométricas necessárias para definir o coeficiente de perda de carga de acordo com o sistema e foram utilizadas como referência para implementação das relações geométricas necessárias e seleção do coeficiente de perda de carga durante a parametrização.

Figura 19 – Família de cotovelo retangular com quina e sem veios modelada



Fonte: o Autor.

Tabela 3 - Tabela de coeficientes de perda de carga para o cotovelo retangular com quinas, sem veios, ar de fornecimento

H/W₁	C_o						
	W_o/W₁						
	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	2,00
0,25	0,63	0,92	1,24	1,64	2,14	2,71	4,24
1,00	0,61	0,87	1,15	1,47	1,86	2,3	3,36
4,00	0,53	0,70	0,9	1,17	1,49	1,84	2,64
100,00	0,54	0,67	0,79	0,99	1,23	1,54	2,20

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals, 2001*.

C_o, coeficiente de perda de carga

H, altura de conexão do duto

W_o, largura de saída do fluxo

W₁, largura de entrada do fluxo

Tabela 4 - Tabela de coeficientes de perda de carga para o cotovelo retangular com quina, sem veios, ar de retorno ou exaustão

H/W_o	C_o						
	W₁/W_o						
	0,600	0,8	1,00	1,20	1,40	1,60	2,00
0,25	1,76	1,43	1,24	1,14	1,09	1,06	1,06
1,00	1,70	1,36	1,15	1,02	0,95	0,90	0,84
4,00	1,46	1,10	0,90	0,81	0,76	0,72	0,66
100,00	1,50	1,04	0,79	0,69	0,63	0,60	0,55

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals, 2001*.

C_o, coeficiente de perda de carga

H, altura de conexão do duto

W_o, largura de entrada do fluxo

W₁, largura de saída do fluxo

Por conseguinte, com base nas informações de entrada presentes nas Tabelas 3 e 4, criaram-se os parâmetros necessários para o cálculo de perda de carga. Os parâmetros criados foram:

- NOTA 1: Parâmetro de texto responsável por direcionar o utilizador quanto à

referência das áreas das seções, conforme a Figura 18;

- NOTA 2: Parâmetro de texto responsável por direcionar o utilizador quanto ao uso do parâmetro "Inverter fluxo de ar";
- Status: Valor de saída que controla e retorna ao usuário a situação do cálculo, indicando possíveis erros ou se a perda de carga foi calculada corretamente;
- Temperatura do ar (°C): Valor de entrada para o cálculo de densidade do ar (conforme equação 3.9);
- Umidade relativa do ar (%): Valor de entrada (0-100) para o cálculo de densidade do ar;
- Altitude: Valor de entrada da altitude do local do projeto;
- Inverter fluxo de ar: Parâmetro do tipo "Sim/Não". Durante o uso, apresenta-se como uma caixa selecionável. Responsável por inverter as áreas das seções para ficarem em conformidade com a Figura 18;
- Ar de fornecimento: Parâmetro do tipo "Sim/Não". Define o tipo de sistema para ar de fornecimento;
- Ar de Exaustão/Retorno: Parâmetro do tipo "Sim/Não". Define o tipo de sistema para exaustão ou retorno. Representa o oposto do parâmetro "Ar de fornecimento";
- A1: Valor de saída. Parâmetro de área correspondente à área de entrada ou saída do fluxo, conforme Figura 18;
- A0: Valor de saída. Parâmetro de área correspondente à área de entrada ou saída do fluxo, conforme Figura 18;
- Vazão: Valor de entrada, atribuído automaticamente quando a singularidade é conectada a um sistema;
- Pressão atmosférica: Valor de saída, calculada com base na equação 3.17;
- Densidade do ar: Valor de saída, calculado com base na equação 3.5 e nos parâmetros de entrada;
- Velocidade de entrada: Valor de saída, calculado conforme referência de área de entrada de acordo como sistema (Figura 18);
- Velocidade de saída: Valor de saída, calculado conforme referência de área de entrada de acordo como sistema (Figura 18);
- Pressão dinâmica: Valor de saída, calculada com base na equação 3.17;
- Perda de Carga: Parâmetro que calcula a perda de carga. Valor de saída

(Conforme equação 3.17);

- Co: Valor de saída calculado com base na função "*size_lookup*". Coeficiente de perda de caga conforme Tabelas 1 e 2;
- NomeColunaINS: Parâmetro de texto que retorna ao sistema a coluna que deve ser buscada pela função "*size_lookup*" na Tabela de pesquisa para sistemas de fornecimento, conforme a Tabela 1;
- NomeColunaRET: Parâmetro de texto que retorna ao sistema a coluna que deve ser buscada pela função "*size_lookup*" na Tabela de pesquisa para sistemas de exaustão ou retorno, conforme a Tabela 2;
- W0: Largura de entrada ou saída (de acordo com o sistema), em conformidade com a Figura 18;
- W1: Largura de entrada ou saída (de acordo com o sistema), em conformidade com a Figura 18;
- W0_W1: Razão entre as larguras de saída e entrada para sistemas de ar de fornecimento, conforme Tabela 1 e Figura 18;
- HW1: Razão entre a altura e a largura de entrada para sistemas de ar de fornecimento, conforme Tabela 1 e Figura 18;
- W1_W0: Razão entre as larguras de saída e entrada para sistemas de ar de exaustão/retorno, conforme Tabela 2 e Figura 18;
- HW0: Razão entre a altura e a largura de entrada para sistemas de ar exaustão ou retorno, conforme Tabela 2 e Figura 18.

Figura 20 – Parâmetros inseridos na família

Tipos de famílias

Digite o nome:

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula	Bloquear
Mecânica – Vazão			
NOTA 1 (padrão)	Para fornecimento de ar, área A1 = en	= "Para fornecimento de ar, área A1 = en"	
NOTA 2 (padrão)	Usar caixa 'Inverter fluxo' de ar confor	= "Usar caixa 'Inverter fluxo' de ar confor"	
Status (padrão)	Valor de perda de carga encontrado!	= if(Pressão atmosférica = 0 Pa,	
Temperatura do ar (°C) (padrão)	20.000000	=	
Umidade relativa do ar (%) (padrão)	0.000000	=	
Altitude (padrão)	0.0000 m	=	☐
Inverter fluxo de ar (padrão)	☐	=	
Ar de fornecimento (padrão)	☒	=	
Ar de Exaustão/Retorno (padrão)	☐	= not(Ar de fornecimento)	
A1 (padrão)	0.090 m ²	= if(Inverter fluxo de ar, Largura	
A0 (padrão)	0.135 m ²	= if(Inverter fluxo de ar, Largura	
Vazão (padrão)	1200.0000 m ³ /h	=	
Pressão atmosférica (padrão)	101325.000000 Pa	= 101325 Pa * (1 - 2.25577 * (10	
Densidade do ar (padrão)	1.204085 kg/m ³	= (1 kg/m ³ + (0.622 kg/m ³ * (((	
Velocidade de entrada (padrão)	3.70 m/s	= if(Ar de fornecimento, Vazão	
Velocidade de saída (padrão)	2.47 m/s	= if(Ar de fornecimento, Vazão	
Pressão dinâmica (padrão)	3.670431 Pa	= (Densidade do ar * (Vazão / A	
Perda de Carga (padrão)	7.634496 Pa	= ((Densidade do ar * (Vazão /	
Co (padrão)	2.080000	= if(Ar de fornecimento, size_lo	
Parâmetros IFC			
Resultados da análise			
Meia altura positiva (padrão)	150.0 mm	= Altura / 2	☐
Meia altura negativa (padrão)	-150.0 mm	= -Altura / 2	☐
NomeColunaINS (padrão)	W0_W1_1_50	= if(W0_W1 = 0.6, "W0_W1_0_60	
NomeColunaRET (padrão)	W1_W0_0_67	= if(W1_W0 = 0.6, "W1_W0_0_60	
W0 (padrão)	450.0 mm	= A0 / Altura	☐
W1 (padrão)	300.0 mm	= A1 / Altura	☐
W0_W1 (padrão)	1.500000	= round((W0 / W1) * 100) / 100	
HW1 (padrão)	1.000000	= round((Altura / W1) * 100) / 1	
W1_W0 (padrão)	0.670000	= round((W1 / W0) * 100) / 100	
HW0 (padrão)	0.670000	= round((Altura / W0) * 100) / 1	

Gerenciar tabelas de pesquisa...

[Como posso gerenciar meus tipos de família?](#)

OK Cancelar Aplicar

Fonte: o Autor.

As fórmulas completas referentes a cada parâmetro citado estão disponíveis no Apêndice A.

Assim como na aplicação da metodologia para a parametrização da singularidade anterior, o próximo passo consistiu na obtenção dos valores tabulados do coeficiente de perda de pressão. Para isso, os dados foram extraídos das Tabelas 3 e 4 para uso da função “size_lookup”. Da mesma forma, os dados também foram tratados e interpolados previamente em Excel com uma precisão de 0,01. Além disso,

o valor -1 também foi utilizado como valor de referência para depuração de erros por parte da função. Com as Tabelas formatadas, deu-se a importação das mesmas para o ambiente de parametrização da família.

4.1.2.1 Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o cotovelo com quina

Para essa família, duas tabelas de pesquisa foram criadas, um referente a sistemas de fornecimento e outra referente a sistemas de exaustão ou retorno, respectivas às Tabelas 3 e 4. Com as Tabelas incorporadas ao modelo, tornou-se possível então correlacionar o coeficiente “Co” com qualquer combinação de parâmetros geométricos dentro dos limites apresentados nas Tabelas 3 e 4, para ambos os tipos de sistema. Dessa forma, consolidou-se a lógica de parametrização da família para a determinação da perda de carga.

Para esta família, inicialmente, o utilizador deve atentar-se aos parâmetros de nota. Eles servem para seguir as referências de área de entrada e de saída presentes na Figura 18, além de orientá-lo sobre o uso da caixa de seleção "Inverter fluxo de ar". Ao conectar a singularidade ao sistema modelado em ambiente BIM no Revit, a parametrização interna à família recebe do sistema automaticamente os valores de altura, larguras do duto e vazão ao qual a singularidade será conectada, da mesma forma como a singularidade anterior. A partir desses dados, os demais parâmetros derivados são calculados até a determinação da perda de carga, conforme ilustrado na Figura 20. Entretanto, ao contrário do cotovelo suave, o cotovelo com quina pode possuir áreas variáveis, conforme apresentado na Figura 18. Por esse motivo, o utilizador deve selecionar a qual o tipo de sistema a família pertence, pois não é possível obter esse tipo de informação para uma família externa ao software, ou seja, que foi importada para o projeto. Por esse motivo, o parâmetro "Ar de fornecimento", do tipo Sim/Não, se apresentam como uma caixa de seleção para que o utilizador defina o tipo de sistema da singularidade. Dessa forma, sempre que a caixa desse parâmetro é selecionada, a caixa do parâmetro "Ar de exaustão/retorno" é deselecionada automaticamente, e vice-versa.

Figura 21 – a) Ar de fornecimento selecionado e b) Ar de fornecimento não selecionado

a)	Ar de fornecimento (padrão)	☒
	Ar de Exaustão/Retorno (padrão)	☐
b)	Ar de fornecimento (padrão)	☐
	Ar de Exaustão/Retorno (padrão)	☒

Fonte: o Autor.

Além disso, ainda de acordo com a Figura 20, o utilizador deve utilizar ou não a caixa de seleção referente ao parâmetro "Inverter fluxo". Isso ocorre por conta do processo de modelagem imprevisível. O sistema pode ser desenhado em diversas orientações, como da esquerda para a direita ou da direita para a esquerda. Com isso, não é possível que a família possua somente uma única de referência para as áreas de entrada ou saída. O parâmetro "Inverter fluxo" vem em forma de caixa de seleção para permitir que o utilizador corrija este imprevisto manualmente, ainda de acordo com o parâmetro de texto "Nota 1". Dessa forma, quando acionado, ele inverte os valores de área dos parâmetros A0 e A1.

Figura 22 – a) Inverter fluxo de ar selecionado e b) Inverter fluxo de ar não selecionado

a)	Inverter fluxo de ar (padrão)	☒
	A1 (padrão)	0.135 m ²
	A0 (padrão)	0.090 m ²
b)	Inverter fluxo de ar (padrão)	☐
	A1 (padrão)	0.090 m ²
	A0 (padrão)	0.135 m ²

Fonte: o Autor.

Em paralelo, o parâmetro "NomeColunaINS" lê o valor calculado pelos

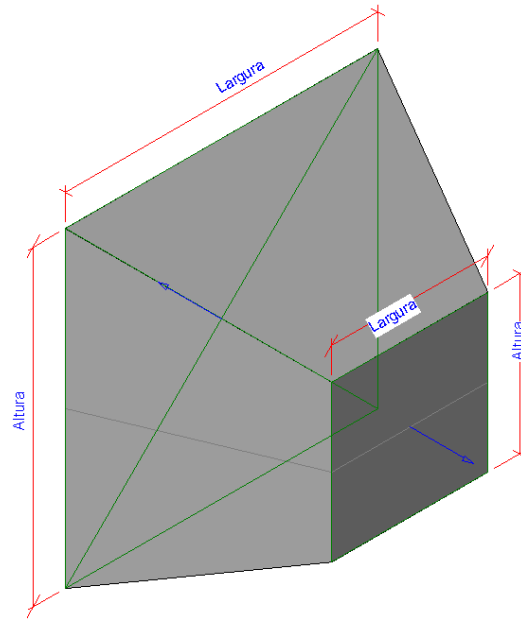
parâmetros "HW1" e "W0_W1" para sistemas de fornecimento de ar e o parâmetro "NomeColunaRET" lê o valor calculado pelos parâmetros "HW0" e "W1_W0" para sistemas de exaustão ou retorno e retorna ao parâmetro "Co" qual valor de texto indica a coluna da tabela que deverá consultada pela função "*size_lookup*". Para o parâmetro "Co", quando selecionada a caixa de "Ar de fornecimento", a função retorna à correspondência do coeficiente somente com base na tabela de pesquisa para sistemas de ar de fornecimento (Tabela 3). Caso contrário, ele retorna o valor do coeficiente de perda com base na tabela de pesquisa para sistemas de exaustão ou retorno (Tabela 4) retornando o coeficiente de perda correspondente.

Por fim, assim como para a família de cotovelo suave, o parâmetro de controle "Status" verifica a validade das entradas. Nesse sentido, caso o parâmetro Co retorne o valor -1, o parâmetro "*Status*" retornará o erro ao utilizador, indicando ainda que a geometria possui relações fora da tabela de coeficiente de perda referente a ela. Caso os valores geométricos e as propriedades do ar (parâmetros de entrada manual) não estejam coerentes com as condições de instalação, ou não forem devidamente preenchidas pelo utilizador, o parâmetro "*Status*" também retornará erro, indicando ainda a localização do provável erro. Entretanto, sempre que as entradas estiverem definidas de forma correta, assim como também as relações referentes à tabela de coeficiente de perda de carga estiverem dentro dos limites, o parâmetro irá retornar "Valor de perda de carga encontrado!", finalizando, assim, o cálculo de perda de carga para a singularidade em questão.

4.1.3 Transição retangular

Da mesma forma que para a primeira singularidade na qual se aplicou a metodologia, o primeiro passo consistiu na obtenção da família em questão, já existente, apenas exportada do próprio Revit.

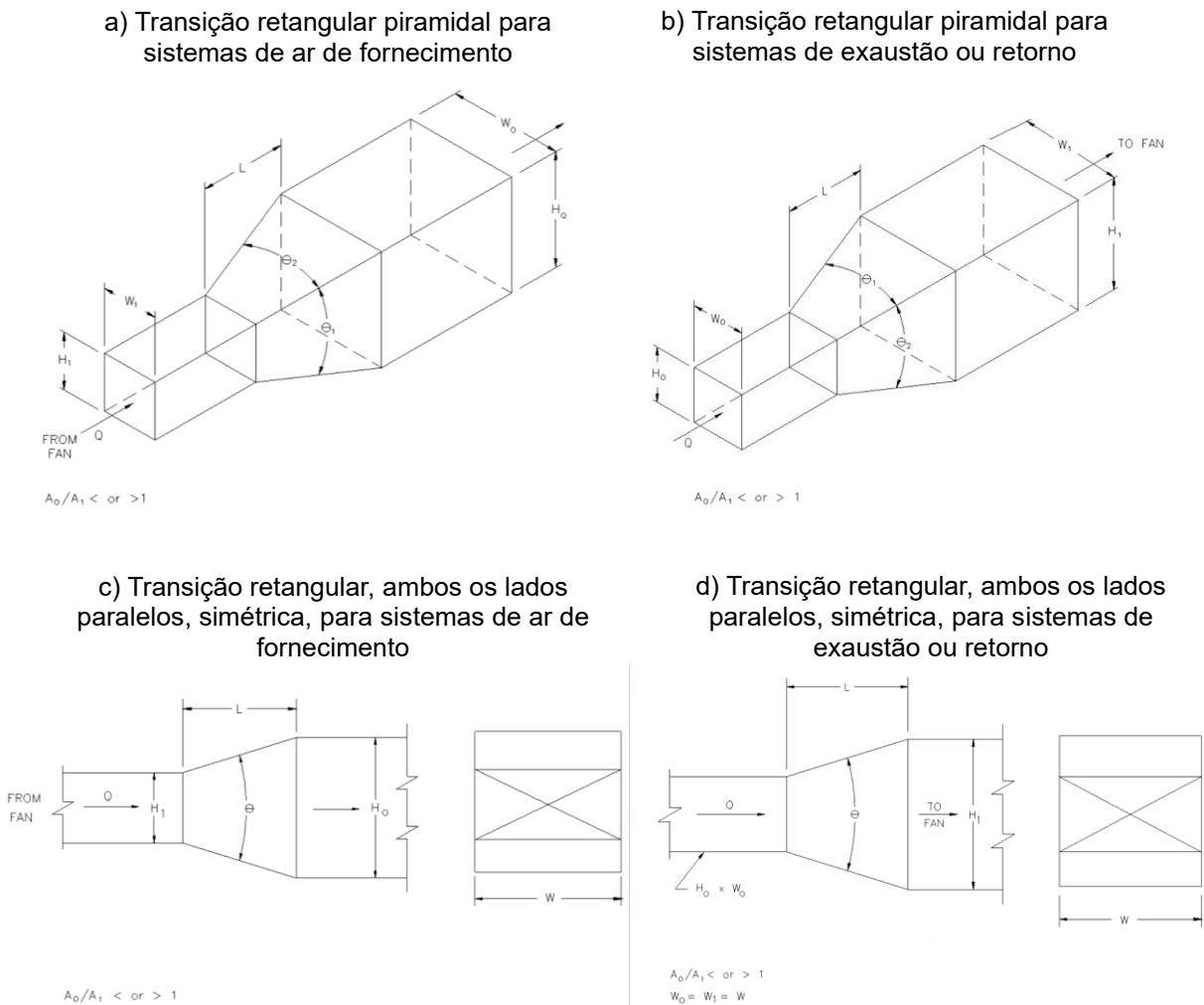
Figura 23 – a) Família de transição retangular modelada em ambiente BIM



Fonte: o Autor.

Com o modelo em mãos, a Figura 24 foi utilizada como referência para implementação das relações geométricas de entrada e saída do fluxo de ar necessárias para seleção do coeficiente de perda de carga.

Figura 24 – Referências de transições retangulares disponíveis na literatura técnica



Fonte: adaptado de *ASHRAE Handbook — Fundamentals* (2001).

Como observado na Figura 24, a literatura técnica consultada (*ASHRAE Handbook — Fundamentals, 2001*) traz dois tipos de transições: piramidal e simétrica. Nesse sentido, ambas as transições, para ambos os tipos sistemas, tiveram as referidas tabelas de coeficiente de perda de carga utilizadas como referência para as tabelas de pesquisa na parametrização da família. As transições para sistemas de fornecimento são representadas pelas Tabelas 5 e 6, sendo a Tabela 5 para a transição piramidal. Para sistemas de exaustão ou retorno, a Tabela 7 se refere à transição piramidal, enquanto a Tabela 8 se refere à transição simétrica.

Tabela 5 – Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, piramidal, sistemas de ar de fornecimento

C_o										
A_o/A_1	θ									
	10°	15°	20°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,19	0,29	0,37	0,43
0,17	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,07	0,18	0,28	0,36	0,42
0,25	0,06	0,05	0,05	0,04	0,06	0,06	0,12	0,18	0,24	0,26
0,50	0,06	0,07	0,07	0,05	0,06	0,07	0,17	0,27	0,35	0,41
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,60	0,84	1,00	1,20	1,32	1,32	1,32	1,28	1,24	1,20
4,00	4,00	5,76	7,20	8,32	9,28	9,92	10,24	10,24	10,24	10,24
10,00	30,00	50,00	53,00	64,00	75,00	84,00	89,00	91,00	91,00	88,00
16,00	76,80	138,24	135,68	166,40	197,12	225,28	243,20	250,88	250,88	238,08

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals, 2001*

C_o , coeficiente de perda de carga

θ , maior ângulo entre θ_1 e θ_2 (Fig. 24)

A_o , área de saída do fluxo

A_1 , largura de entrada do fluxo

Tabela 6 – Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, simétrica, sistemas de ar de fornecimento

C_o										
A_o/A_1	θ									
	10°	15°	20°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,19	0,29	0,37	0,43
0,17	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,18	0,28	0,36	0,42
0,25	0,05	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,17	0,27	0,35	0,41
0,5	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,14	0,20	0,26	0,27
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2,00	0,56	0,52	0,60	0,96	1,40	1,48	1,52	1,48	1,44	1,40
4,00	2,72	3,04	3,52	6,72	9,60	10,88	11,2	11,04	10,72	10,56
10,00	24,00	26,00	36,00	53,00	69,00	82,00	93,00	93,00	92,00	91,00
16,00	66,56	69,12	102,4	143,36	181,76	220,16	256,00	253,44	250,88	250,88

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals (2001)*.

C_o , coeficiente de perda de carga

θ , ângulo resultante entre as seções de entrada e saída (Fig. 24)

A_o , área de saída do fluxo

A_1 , largura de entrada do fluxo

Tabela 7 – Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, piramidal, sistemas de ar de exaustão ou retorno

C_o										
A_o/A_1	θ									
	10°	15°	20°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
0,06	0,30	0,54	0,53	0,65	0,77	0,88	0,95	0,98	0,98	0,93
0,10	0,30	0,50	0,53	0,64	0,75	0,84	0,89	0,91	0,91	0,88
0,25	0,25	0,36	0,45	0,52	0,58	0,62	0,64	0,64	0,64	0,64
0,50	0,15	0,21	0,25	0,30	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,24	0,28	0,26	0,20	0,22	0,24	0,49	0,73	0,97	1,04
4,00	0,89	0,78	0,79	0,70	0,88	1,12	2,72	4,33	5,62	6,58
6,00	1,89	1,67	1,59	1,49	1,98	2,52	6,51	10,14	13,05	15,14
10,00	5,09	5,32	5,15	5,05	6,50	8,05	19,06	29,07	37,08	43,05

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals* (2001).

C_o , coeficiente de perda de carga

θ , maior ângulo entre θ_1 e θ_2 (Fig. 24)

A_o , área de entrada do fluxo

A_1 , largura de saída do fluxo

Tabela 8 – Tabela de coeficientes de perda de carga para transição retangular, simétrica, sistemas de ar de exaustão ou retorno

C_o										
A_o/A_1	θ									
	10°	15°	20°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
0,06	0,26	0,27	0,40	0,56	0,71	0,86	1,00	0,99	0,98	0,98
0,10	0,24	0,26	0,36	0,53	0,69	0,82	0,93	0,93	0,92	0,91
0,25	0,17	0,19	0,22	0,42	0,6	0,68	0,70	0,69	0,67	0,66
0,50	0,14	0,13	0,15	0,24	0,35	0,37	0,38	0,37	0,36	0,35
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,23	0,20	0,20	0,20	0,24	0,28	0,54	0,78	1,02	1,09
4,00	0,81	0,64	0,64	0,64	0,88	1,12	2,78	4,38	5,65	6,60
6,00	1,82	1,44	1,44	1,44	1,98	2,53	6,56	10,20	13,00	15,20
10,00	5,03	5,00	5,00	5,00	6,50	8,02	19,10	29,10	37,10	43,10

Fonte: *ASHRAE Handbook — Fundamentals* (2001).

C_o , coeficiente de perda de carga

θ , ângulo resultante entre as seções de entrada e saída (Fig. 24)

A_0 , área de entrada do fluxo

A_1 , largura de saída do fluxo

Por conseguinte, com base nas informações de entrada necessárias, presentes nas Tabelas de 4 a 8, criaram-se os parâmetros necessários para o cálculo de perda de carga. Os parâmetros criados foram:

- NOTA 1: Parâmetro de texto responsável por direcionar o utilizador quanto à referência das áreas das seções, conforme a Figura 24;
- NOTA 2: Parâmetro de texto responsável por direcionar o utilizador quanto ao uso do parâmetro "Inverter fluxo de ar";
- Status: Valor de saída que controla e retorna ao usuário a situação do cálculo, indicando possíveis erros ou se a perda de carga foi calculada corretamente;
- Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$): Valor de entrada para o cálculo de densidade do ar (conforme equação 3.9);
- Umidade relativa do ar (%): Valor de entrada (0-100) para o cálculo de densidade do ar;
- Altitude: Valor de entrada da altitude do local do projeto;
- Inverter fluxo de ar: Parâmetro do tipo "Sim/Não". Durante o uso, apresenta-se como uma caixa selecionável. Responsável por inverter as áreas das seções para ficarem em conformidade com a Figura 24;
- Ar de fornecimento: Parâmetro do tipo "Sim/Não". Define o tipo de sistema para ar de fornecimento; Ar de Exaustão/Retorno: Parâmetro do tipo "Sim/Não". Define o tipo de sistema para exaustão ou retorno. Representa o oposto do parâmetro "Ar de fornecimento";
- A_1 : Valor de saída. Parâmetro de área correspondente à área de entrada ou saída do fluxo, ajustado conforme o sentido do fluxo (Figura 24);
- A_0 : Valor de saída. Parâmetro de área correspondente à área de entrada ou saída do fluxo, ajustado conforme o sentido do fluxo (Figura 24);
- Vazão: Valor de entrada, atribuído automaticamente quando a singularidade é conectada a um sistema;
- Pressão atmosférica: Valor de saída, calculada com base na equação 3.17;
- Densidade do ar: Valor de saída, calculado com base na equação 3.5 e nos

parâmetros de entrada (Temperatura, Umidade Relativa e Pressão);

- Velocidade: Valor de saída, calculado pela divisão da Vazão pela área de referência A0, utilizado para determinar a pressão dinâmica;
- Pressão dinâmica: Valor de saída, calculada com base na equação 3.17 utilizando a densidade do ar e a velocidade;
- Perda de Carga: Parâmetro que calcula a perda de carga total. Valor de saída obtido pelo produto da Pressão Dinâmica pelo Coeficiente (Co);
- Co: Valor de saída calculado com base na função "size_lookup". Coeficiente de perda de carga local obtido através da tabela de pesquisa;
- Area_conector_1: Valor de saída. Área geométrica calculada diretamente das dimensões (Largura x Altura) do Conector 1 da família;
- Area_conector_2: Valor de saída. Área geométrica calculada diretamente das dimensões (Largura x Altura) do Conector 2 da família;
- NomeColunaCo: Parâmetro de texto que retorna ao sistema o nome da coluna que deve ser buscada pela função "size_lookup" na tabela de pesquisa, variando de acordo com o ângulo da transição (ex: 10°, 15°, 45°, etc.);
- Razao_A0_A1: Valor de saída. Razão entre as áreas A0 e A1, utilizada como parâmetro de entrada na função "size_lookup" para encontrar o coeficiente de perda correspondente.

Figura 25 – Parâmetros inseridos na família de transição retangular

Tipos de famílias

Digite o nome: 45 Graus

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula
Mecânica – Vazão		
NOTA 1 (padrão)	Para fornecimento de ar, área A1 = entrada do	= "Para fornecimento de ar,
NOTA 2 (padrão)	Usar caixa 'Inverter fluxo' de ar conforme NOT	= "Usar caixa 'Inverter fluxo'
Status (padrão)	Valor de perda de carga encontrado!	= if(Pressão atmosférica = C
Temperatura do ar (°C) (padrão)	15.000000	=
Umidade relativa do ar (%) (padrão)	0.000000	=
Altitude (padrão)	0.0000 m	=
Inverter fluxo de ar (padrão)	☐	=
Ar de fornecimento (padrão)	☒	=
Ar de Exasutão/Retorno (padrão)	☐	= not(Ar de fornecimento)
A1 (padrão)	0.360	= if(Inverter fluxo de ar, Are
A0 (padrão)	0.090	= if(Inverter fluxo de ar, Are
Vazão (padrão)	600.0000 m³/h	=
Pressão atmosférica (padrão)	101325.000000 Pa	= 101325 Pa * (1 - 2.25577
Densidade do ar (padrão)	1.224978 kg/m³	= (1 kg/m³ + (0.622 kg/m³
Velocidade (padrão)	1.85 m/s	= Vazão / A0
Pressão dinâmica (padrão)	2.100443 Pa	= (Densidade do ar * (Vazã
Perda de Carga (padrão)	0.126027 Pa	= ((Densidade do ar * (Vazã
Co (padrão)	0.060000	= if(and(Largura do duto 1 :
Parâmetros IFC		
Resultados da análise		
Area_conector_1 (padrão)	0.360	= Largura do duto 1 * Altur
Area_conector_2 (padrão)	0.090	= Largura do duto 2 * Altur
NomeColunaCo (padrão)	Co_45deg	= if(Ângulo = 10°, "Co_10de
Razao_A0_A1 (padrão)	0.250000	= A0 / A1

Como posso gerenciar meus tipos de família?

Gerenciar tabelas de pesquisa...

OK Cancelar Aplicar

Fonte: o Autor.

As fórmulas completas referentes a cada parâmetro citado estão disponíveis no Apêndice A.

Assim como na aplicação da metodologia para a parametrização das singularidades anteriores, a obtenção dos valores tabulados do coeficiente de perda de pressão ocorreu, desta vez, pela manipulação dos dados presentes nas Tabelas 3 a 6 para aplicação da função “*size_lookup*”. Da mesma forma, os dados também foram tratados e interpolados previamente em Excel com uma precisão de 0,01. Além disso, o valor -1 também foi utilizado como valor de referência para depuração de erros por parte da função. Com as tabelas formatadas, deu-se a importação destas para o

ambiente de parametrização da família.

4.1.3.1 Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para a transição retangular

Para a família de transição retangular, quatro tabelas de pesquisa foram criadas, cada uma respectiva às Tabelas 3 a 6. Com as tabelas incorporadas ao modelo, tornou-se possível então correlacionar o coeficiente “Co” com qualquer combinação de parâmetros geométricos dentro dos limites presentes nas Tabelas 4 a 7, para ambos os tipos de sistema. Dessa forma, consolidou-se a lógica de parametrização da família para a determinação da perda de carga.

Inicialmente, assim como para a família de cotovelo com quinas, o utilizador deve atentar-se aos parâmetros de nota. Eles servem para seguir as referências de área de entrada e de saída presentes na Figura 24, além de orientá-lo sobre o uso da caixa de seleção "Inverter fluxo de ar". Ao conectar a singularidade ao sistema modelado em ambiente BIM no Revit, a parametrização interna à família recebe do sistema automaticamente os valores de alturas, larguras do duto e vazão ao qual a singularidade será conectada. A partir desses dados, os demais parâmetros derivados são calculados até a determinação da perda de carga, conforme ilustrado na Figura 25.

Assim como para o cotovelo com quinas, a transição retangular sempre possuirá áreas variáveis. Por esse motivo, o utilizador deve selecionar a qual o tipo de sistema a família pertence, pois não é possível obter esse tipo de informação para uma família externa ao software, ou seja, que foi importada para o projeto. Por esse motivo, o parâmetro "Ar de fornecimento", do tipo Sim/Não, se apresentam como uma caixa de seleção para que o utilizador defina o tipo de sistema da singularidade. Dessa forma, sempre que a caixa desse parâmetro é selecionada, a caixa do parâmetro "Ar de exaustão/retorno" é deselecionada automaticamente, e vice-versa (vide Figura 21).

Além disso, ainda de acordo com a Figura 25, o utilizador deve utilizar ou não a caixa de seleção referente ao parâmetro "Inverter fluxo". Isso ocorre por conta do processo de modelagem imprevisível, explicado na subseção 4.1.2.1. Dessa forma, o parâmetro "Inverter fluxo" vem em forma de caixa de seleção para permitir que o utilizador corrija este imprevisto manualmente, ainda de acordo com o parâmetro de texto "Nota 1". Dessa forma, quando acionado, ele inverte os valores de área dos

parâmetros A0 e A1.

Somado a isso, para atender às situações de transições simétricas apresentadas na Figura 24, a formula de parametrização do parâmetro “Co” reconhece ainda quando as larguras das duas seções da transição são iguais. Nesse sentido, para sistemas de ar de fornecimento, a função faz uso da Tabela 5, enquanto para sistemas de exaustão ou retorno, ela faz uso da Tabela 7. Caso as seções permaneçam diferentes, a função atrela essa diferença ao uso das Tabela 4, para ar de fornecimento, e ao uso da Tabela 6, para ar de exaustão ou retorno.

Em paralelo, o parâmetro “NomeColunaCo” lê o valor calculado pelo parâmetro de ângulo, pré-existente no modelo importado da família, retornando ao parâmetro “Co” qual valor de texto indica a coluna da tabela que deverá consultada pela função “size_lookup”. Para o parâmetro "Co", quando selecionada a caixa de "Ar de fornecimento", a função retorna à correspondência do coeficiente somente com base na Tabela de pesquisa para sistemas de ar de fornecimento. Caso contrário, ele retorna o valor do coeficiente de perda com base na tabela de pesquisa para sistemas de exaustão ou retorno, retornando o coeficiente de perda correspondente. Além disso,

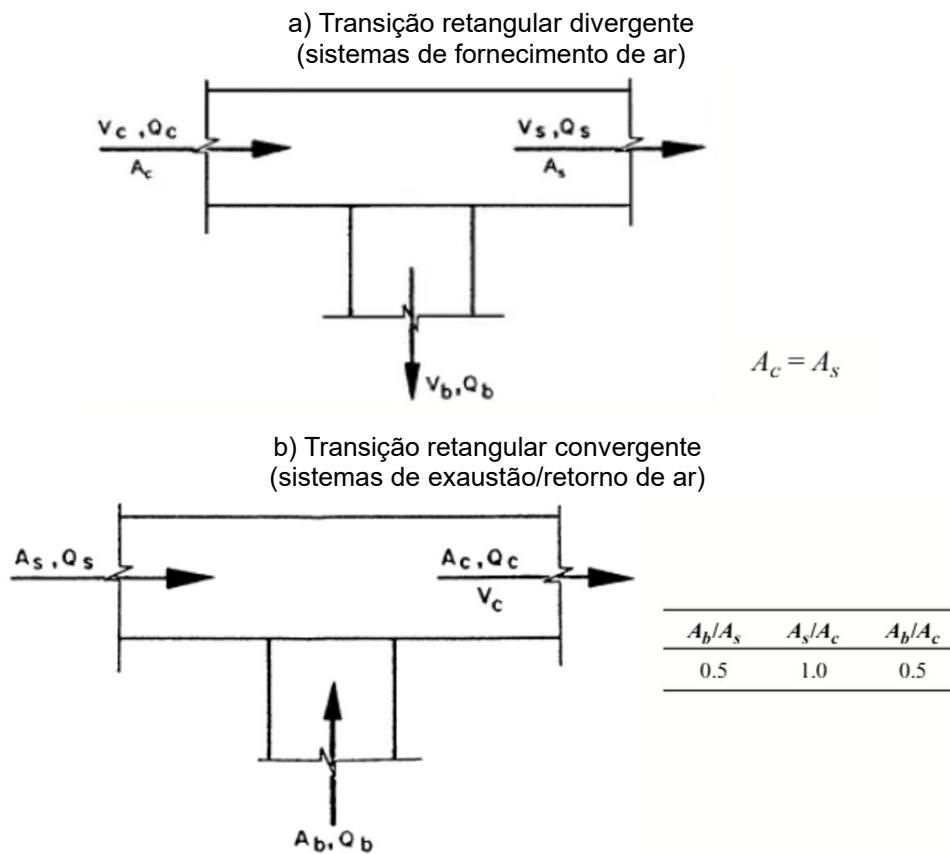
Por fim, o parâmetro de controle “Status” verifica a validade das entradas. Nesse sentido, caso o parâmetro Co retorne o valor -1, o parâmetro “Status” retornará o erro ao utilizador, indicando ainda que a geometria possui relações fora da tabela de coeficiente de perda referente a ela. Caso os valores geométricos e as propriedades do ar (parâmetros de entrada manual) não estejam coerentes com as condições de instalação, ou não forem devidamente preenchidas pelo utilizador, o parâmetro “Status” também retornará erro, indicando ainda a localização do provável erro. Entretanto, sempre que as entradas estiverem definidas de forma correta, assim como também as relações referentes à tabela de coeficiente de perda de carga estiverem dentro dos limites, o parâmetro irá retornar “Valor de perda de carga encontrado!”, finalizando, assim, o cálculo de perda de carga para a singularidade em questão.

4.1.4 Tê retangular reto

Assim como para o cotovelo retangular com quina, o modelo geométrico da família de tê retangular reto foi modelado utilizando as ferramentas de modelagem presentes no Revit. A geometria pode ser observada na Figura 27, e foi modelada

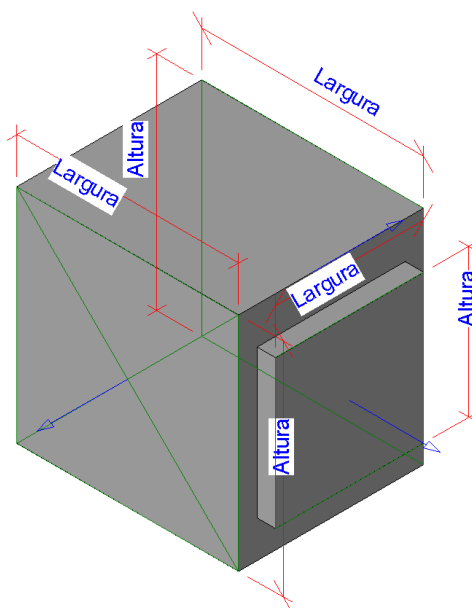
conforme a Figura 26.

Figura 26 – Modelos de referência para o tê retangular reto.



Fonte: adaptado de SMACNA, 2006.

Figura 27 – Modelo geométrico da família de tê retangular reto.



Fonte: o Autor.

Por conseguinte, seguiu-se com a inserção dos parâmetros responsáveis pelo cálculo de perda de carga da família. A parametrização seguiu as relações impostas pelas Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14.

Tabela 9 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas diferentes, duto principal

Coeficiente de perda de carga do duto principal, $C_{c,s}$									
V_s/V_c	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,5	0,60	0,80	1,00
$C_{c,s}$	0,40	0,32	0,26	0,20	0,14	0,10	0,06	0,02	0,00

Fonte: SMACNA (2006).

$C_{c,s}$, coeficiente de perda de carga do duto principal

V_o , velocidade de saída do fluxo do duto principal

V_s , velocidade de entrada do fluxo do duto principal

Tabela 10 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas diferentes, ramal

Coeficientes de perda de carga do ramal, C_b									
V_b/V_c	Q_b/Q_c								
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,20	1,03								
0,40	1,04	1,01							
0,60	1,11	1,03	1,05						
0,80	1,16	1,21	1,17	1,12					
1,00	1,38	1,40	1,30	1,36	1,27				
1,20	1,52	1,61	1,68	1,91	1,47	1,66			
1,40	1,79	2,01	1,90	2,31	2,28	2,20	1,95		
1,60	2,07	2,28	2,13	2,71	2,99	2,81	2,09	2,20	
1,80	2,32	2,54	2,64	3,09	3,72	2,48	2,21	2,57	2,32

Fonte: SMACNA (2006).

C_b , coeficiente de perda de carga do ramal

V_b , velocidade de saída do fluxo do ramal

V_c , velocidade de entrada do fluxo do duto principal

Tabela 11 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas iguais, duto principal

Coeficiente de perda de carga do duto principal, C_s								
Q_s/Q_c	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00
C_s	32,00	6,50	2,22	0,87	0,40	0,17	0,03	0,00

Fonte: ASHRAE Handbook — Fundamentals (2001).

C_s , coeficiente de perda de carga do duto principal

Q_s , vazão de saída do fluxo do duto principal

Q_c , vazão de entrada do fluxo do duto principal

Tabela 12 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas iguais, ramal

Coeficientes de perda de carga do ramal, C_b									
A_b/A_c	Q_b/Q_c								
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,10	2,06	1,20	0,99	0,87	0,88	0,87	0,87	0,86	0,86
0,20	5,16	1,92	1,28	1,03	0,99	0,94	0,92	0,90	0,89
0,30	10,26	3,13	1,78	1,28	1,16	1,06	1,01	0,97	0,94
0,40	15,84	4,36	2,24	1,48	1,11	0,88	0,80	0,75	0,72
0,50	24,25	6,31	3,03	1,89	1,35	1,03	0,91	0,84	0,78
0,60	34,56	8,73	4,04	2,41	1,64	1,22	1,04	0,94	0,87
0,70	46,55	11,51	5,17	3,00	2,00	1,44	1,20	1,06	0,96
0,80	60,80	14,72	6,54	3,72	2,41	1,69	1,38	1,20	1,07

Fonte: ASHRAE Handbook — Fundamentals (2001).

C_b , coeficiente de perda de carga do ramal

A_b , área de saída do fluxo do ramal

A_c , área de entrada do fluxo do duto principal

Q_b , vazão de saída do fluxo do ramal

Q_c , vazão de entrada do fluxo do duto principal

Tabela 13 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, convergente, alturas diferentes, duto principal

Coeficientes de perda de carga do duto principal, C_s										
Q_b/Q_c	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
C_s	0,16	0,27	0,38	0,46	0,53	0,57	0,59	0,60	0,59	0,55

Fonte: SMACNA (2006).

C_s , coeficiente de perda de carga do duto principal

Q_b , vazão de saída do fluxo do ramal

Q_c , vazão de saída do fluxo do duto principal

Tabela 14 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, convergente, alturas diferentes, ramal

$C_{c,b}$										
V_c (fpm)	Q_b/Q_c									
	0,100	0,2	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
< 1200	-0,75	-0,53	-0,03	0,33	1,03	1,10	2,15	2,93	4,18	4,78
> 1200	-0,69	-0,21	0,23	0,67	1,17	1,66	2,67	3,36	3,93	5,13

Fonte: SMACNA (2006).

$C_{c,b}$, coeficiente de perda de carga do ramal

Q_b , vazão de saída do fluxo do ramal

Q_c , vazão de saída do fluxo do duto principal

V_c , velocidade de saída do fluxo do duto principal, em pés por minuto

Nesse sentido, selecionaram-se seis tabelas como referência para a seleção dos coeficientes de perda de carga, para o ramal e o duto principal, referentes a três variações de tês retangulares retos. Por conseguinte, com base nas informações de entrada presentes nas Tabelas de 9 a 14, criaram-se os parâmetros necessários para o cálculo de perda de carga. Os parâmetros criados listam-se abaixo, também visíveis na Figura 28:

- Status: Parâmetro de saída (texto). Retorna ao usuário a situação do cálculo da perda de carga, indicando ou possíveis erros de entrada que impedem o cálculo;
- Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$): Parâmetro de entrada (numérico). Define a temperatura do fluido (ar) utilizada como entrada para o cálculo da densidade do ar;
- Umidade relativa do ar (%): Parâmetro de entrada (numérico, 0-100). Define a umidade relativa do ar, utilizada para o cálculo da densidade do ar;
- Altitude: Parâmetro de entrada (numérico). Define a altitude do local da instalação, utilizada como base para o cálculo da pressão atmosférica local;
- Ar de fornecimento: Parâmetro de controle (Sim/Não). Define a direção do fluxo como divergente (fornecimento), onde um fluxo de entrada se divide em dois fluxos de saída;
- Ar de Exaustão/Retorno: Parâmetro de controle (Sim/Não). Define a direção do fluxo como convergente (exaustão/retorno), onde dois fluxos de entrada. Logicamente, é o oposto do parâmetro "Ar de fornecimento";
- Pressão atmosférica (Pa): Parâmetro de saída (numérico). Pressão atmosférica local, calculada com base no parâmetro de entrada "Altitude", seguindo a fórmula da atmosfera padrão;
- Vazão principal de entrada: Parâmetro de entrada (numérico). Define a vazão volumétrica no conector principal comum;
- Vazão principal de saída: Parâmetro de saída (numérico). Define a vazão volumétrica no conector principal reto. Seu valor é determinado pela conservação da massa, com base no tipo de fluxo;

- Vazão ramal: Parâmetro de entrada (numérico). Define a vazão volumétrica no conector do ramal;
- Densidade do ar: Parâmetro de saída (numérico). Massa específica do ar, calculada em função dos parâmetros "Temperatura do ar", "Umidade relativa do ar" e "Pressão atmosférica";
- Área duto principal: Parâmetro de saída (área). Área da seção transversal dos conectores principal comum e principal reto, assumidas iguais;
- Área ramal: Parâmetro de saída (área). Área da seção transversal do conector do ramal;
- Velocidade principal de entrada: Parâmetro de saída (velocidade). Velocidade média do ar no duto principal comum;
- Velocidade principal de saída: Parâmetro de saída (velocidade). Velocidade média do ar no duto principal reto;
- Velocidade ramal: Parâmetro de saída (velocidade). Velocidade média do ar no duto do ramal;
- Pressão dinâmica principal: Parâmetro de saída (pressão). Pressão dinâmica de referência no duto principal comum;
- Pressão dinâmica ramal: Parâmetro de saída (pressão). Pressão dinâmica de referência no duto do ramal;
- Perda de carga principal: Parâmetro de saída (pressão). Calcula a perda de carga local total para o fluxo que segue reto;
- Perda de carga ramal: Parâmetro de saída (pressão). Calcula a perda de carga local total para o fluxo do ramal;
- Cs: Parâmetro de saída (coeficiente adimensional). Coeficiente de perda de carga local para o fluxo reto. Valor obtido através da função *"size_lookup"*, que consulta uma tabela de pesquisa externa;
- Cb: Parâmetro de saída (coeficiente adimensional). Coeficiente de perda de carga local para o fluxo do ramal. Valor obtido através da função *"size_lookup"*, consultando uma tabela de pesquisa externa;
- Area_ramal_Div_Area_principal: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Área ramal" e a "Área duto principal". Utilizada como parâmetro de entrada na função *"size_lookup"*, para tês convergentes;
- Qs_Qc_div: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão principal

de saída" e a "Vazão principal de entrada" para fluxo divergente. Utilizada como parâmetro de entrada na função *“size_lookup”*;

- **Ab_Ac_div**: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Área ramal" e a "Área duto principal" para fluxo divergente. Utilizada como parâmetro de entrada na função *“size_lookup”*;
- **Qb_Qc_div**: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão ramal" e a "Vazão principal de entrada" para fluxo divergente. Utilizada como parâmetro de entrada na função *“size_lookup”*;
- **Vs_Vc_div**: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Velocidade principal de saída" e a "Velocidade principal de entrada" para fluxo divergente;
- **Vb_Vc_div**: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Velocidade ramal" e a "Velocidade principal de entrada" para fluxo divergente;
- **Qs_Qc_conv**: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão principal de entrada" e a "Vazão principal de saída" para fluxo convergente. Utilizada como parâmetro de entrada na função *“size_lookup”*;
- **Qb_Qc_conv**: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão ramal" e a "Vazão principal de saída" para fluxo convergente. Utilizada como parâmetro de entrada na função *“size_lookup”*;
- **Vc_conv**: Parâmetro de saída (numérico). Parâmetro de velocidade utilizado como chave de pesquisa na tabela para fluxo convergente;
- **NomeColunaCs**: Parâmetro de saída (texto). Define dinamicamente o nome da coluna a ser pesquisada na tabela de consulta para o coeficiente C_s , com base na geometria (alturas iguais ou diferentes) e no tipo de fluxo;
- **NomeColunaCb_igual_div**: Parâmetro de saída (texto). Define o nome da coluna a ser pesquisada para o coeficiente C_b em fluxo divergente e com alturas iguais, com base na razão "Qb_Qc_div";
- **NomeColunaCb_dif_div**: Parâmetro de saída (texto). Define o nome da coluna a ser pesquisada para o coeficiente C_b em fluxo divergente e com alturas diferentes, com base na razão "Qb_Qc_div";
- **NomeColunaCb_dif_conv**: Parâmetro de saída (texto). Define o nome da coluna a ser pesquisada para o coeficiente C_b em fluxo convergente e com alturas diferentes, com base no valor do parâmetro "Vc_conv".

Figura 28 – Parâmetros da família de tê retangular reto inseridos no editor de famílias

Tipos de famílias

Digite o nome:

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula	Bloquear
Mecânica – Vazão			
Status (padrão)	Valor de perda de carga encontrado	=if(and([Ar de Exaustão/Retorno],	
Temperatura do ar (°C) (padrão)	20.000000	=	
Umidade relativa do ar (%) (padrão)	0.000000	=	
Altitude (padrão)	0.0000 m	=	☐
Ar de fornecimento (padrão)	☒	=	
Ar de Exaustão/Retorno (padrão)	☐	=not(Ar de fornecimento)	
Pressão atmosférica (padrão)	101325.000000 Pa	=101325 Pa * (1 - 2.25577 * (10 ^ -5	
Vazão principal de entrada (padrão)	500.0000 m³/h	=	
Vazão principal de saída (padrão)	300.0000 m³/h	=if(Ar de fornecimento, Vazão prin	
Vazão ramal (padrão)	200.0000 m³/h	=	
Densidade do ar (padrão)	1.204085 kg/m³	=(1 kg/m³ + (0.622 kg/m³ * (((Um	
Área duto principal (padrão)	0.090 m²	=Largura do duto principal * Altur	
Área ramal (padrão)	0.040 m²	=Largura do ramal * Altura do ram	
Velocidade principal de entrada (padrão)	1.54 m/s	=Vazão principal de entrada / Área	
Velocidade principal de saída (padrão)	0.93 m/s	= (Vazão principal de entrada - Vaz	
Velocidade ramal (padrão)	1.39 m/s	=Vazão ramal / Área ramal	
Pressão dinâmica principal (padrão)	1.433762 Pa	=Densidade do ar * (Vazão princip	
Pressão dinâmica ramal (padrão)	1.161347 Pa	=Densidade do ar * (Vazão ramal /	
Perda de carga principal (padrão)	0.086026 Pa	=Pressão dinâmica principal * Cs	
Perda de carga ramal (padrão)	1.440071 Pa	=Pressão dinâmica ramal * Cb	
Cs (padrão)	0.060000	=if(and(Altura do duto principal =	
Cb (padrão)	1.240000	=if(and(Altura do duto principal =	
Parâmetros IFC			
Resultados da análise			
Comprimento do duto 1 (padrão)	125.0 mm	= Comprimento1a + Anteparo	☐
Comprimento do duto 3 (padrão)	175.0 mm	= Comprimento3a + Anteparo	☐
Comprimento1a (padrão)	100.0 mm	=Largura do ramal / 2	☐
Comprimento3a (padrão)	150.0 mm	=Largura do duto principal / 2	☐
Área_ramal_div_Área_principal (padrão)	0.440000	=round((Área ramal / Área duto pr	
Qs_Qc_div (padrão)	0.600000	=round((Vazão principal de saída /	
Ab_Ac_div (padrão)	0.440000	=round((Área ramal / Área duto pr	
Qb_Qc_div (padrão)	0.400000	=round((Vazão ramal / Vazão princ	
Vs_Vc_div (padrão)	0.600000	=round((Velocidade principal de s	
Vb_Vc_div (padrão)	0.900000	=round((Velocidade ramal / Veloci	
Qs_Qc_conv (padrão)	1.670000	=round((Vazão principal de entrad	
Qb_Qc_conv (padrão)	0.670000	=round((Vazão ramal / Vazão princ	
Vc_conv (padrão)	0.930000	=round((Velocidade principal de s	
NomeColunaCs (padrão)	Cs_dif_div	=if(and(Altura do duto principal =	
NomeColunaCb_igual_div (padrão)	Qb_Qc_div_0_40	=if(Qb_Qc_div = 0.1, "Qb_Qc_div_0	
NomeColunaCb_dif_div (padrão)	Qb_Qc_div_0_40	=if(Qb_Qc_div = 0.1, "Qb_Qc_div_0	
NomeColunaCb_dif_conv (padrão)	Vc_menor_1200	=if(Vc_conv < 6.096, "Vc_menor_1	
Dados de identidade			

Como posso gerenciar meus tipos de família?

Gerenciar tabelas de pesquisa...

OK Cancelar Aplicar

Fonte: o autor.

As fórmulas completas referentes a cada parâmetro citado estão disponíveis no Apêndice A.

Assim como na aplicação da metodologia para a parametrização da singularidade anterior, o próximo passo consistiu na obtenção dos valores tabulados do coeficiente de perda de pressão. Para isso, os dados foram extraídos das Tabelas 9 a 14 para uso da função “size_lookup”.

Entretanto, analisando-se a Tabela 10, percebe-se que os valores do coeficiente de perda de carga do ramal para muitas relações não são existentes. Isso é um problema com relação à aplicação desta tabela na estimativa de perda de carga da singularidade, pois muitas das vezes as relações de velocidades e vazões da Tabela 10 não haverá correspondência. Nesse sentido, tomou-se a liberdade de expandir esses valores não preenchidos considerando-os constantes conforme se aproximam do limite direito da tabela, com o intuito de dar correspondência ao coeficiente de perda de carga. Em contrapartida, nenhuma ferramenta de extrapolação linear foi abordada com o objetivo de assegurar a segurança e confiabilidade dos dados utilizados, uma vez que os dados não apresentam, na sua maioria, um comportamento linear. Ademais, essa mesma consideração é feita para situações semelhantes também com diferentes singularidades, conforme apresenta SMACNA (2006) no livro *HVAC Systems Duct Design*. Os novos dados considerados podem ser visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 – Reestruturação de dados para a tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular reto, divergente, alturas diferentes, ramal

Coeficientes de perda de carga do ramal, C_b									
V_b/V_c	Q_b/Q_c								
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,20	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
0,40	1,04	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
0,60	1,11	1,03	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
0,80	1,16	1,21	1,17	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
1,00	1,38	1,40	1,30	1,36	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
1,20	1,52	1,61	1,68	1,91	1,47	1,66	1,66	1,66	1,66
1,40	1,79	2,01	1,90	2,31	2,28	2,20	1,95	1,95	1,95
1,60	2,07	2,28	2,13	2,71	2,99	2,81	2,09	2,20	2,20
1,80	2,32	2,54	2,64	3,09	3,72	2,48	2,21	2,57	2,32

Fonte: SMACNA (2006).

C_b , coeficiente de perda de carga do ramal

V_b , velocidade de saída do fluxo do ramal

V_c , velocidade de entrada do fluxo do duto principal

Dessa forma, os dados foram tratados e interpolados em Excel com uma precisão de 0,01. Além disso, o valor -1 também foi utilizado como valor de referência para depuração de erros por parte da função. Com as tabelas formatadas, deu-se a importação das mesmas para o ambiente de parametrização da família.

4.1.4.1 Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o tê retangular reto

Para a família de tê retangular reto, seis tabelas de pesquisa foram criadas, espelhando os dados de referência para perda de carga local, conforme as Tabelas 9, 11, 12, 13, 14 e 15. Com as tabelas incorporadas ao modelo, tornou-se possível correlacionar os coeficientes “Cs” (perda de carga para o fluxo reto) e “Cb” (perda de carga para o fluxo no ramal) com qualquer combinação de parâmetros geométricos e de fluxo) dentro dos limites das tabelas, para ambos os tipos de sistema (fornecimento e retorno). Dessa forma, consolidou-se a lógica de parametrização da família para a determinação da perda de carga.

Ao conectar a singularidade ao sistema modelado em ambiente BIM no Revit, a parametrização interna à família recebe do sistema automaticamente os valores de alturas, larguras dos dutos (principal e ramal). Entretanto, a singularidade não recebe os valores de vazão automaticamente, sendo necessária a inserção dos valores de vazão principal de entrada e vazão principal de saída por parte do utilizador. Por sua vez, a vazão do ramal é calculada automaticamente pelo motor de fórmulas da família, a depender do tipo de sistema, de acordo com a Figura 29.

Figura 29. Lógica de cálculo da vazão do ramal do tê retangular

Vazão principal de entrada (padrão)	500.0000 m ³ /h	=
Vazão principal de saída (padrão)	300.0000 m ³ /h	=if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal)
Vazão ramal (padrão)	200.0000 m ³ /h	=

Fonte: o Autor.

A partir desses dados, os demais parâmetros derivados são calculados até a determinação da perda de carga principal e perda de carga ramal.

Para o tê retangular, é fundamental definir o sentido do fluxo. Por esse motivo, o utilizador deve selecionar a qual tipo de sistema a família pertence, pois não é possível obter esse tipo de informação automaticamente para uma família externa ao software. O parâmetro "Ar de fornecimento", do tipo Sim/Não, vem como caixa de seleção para que o utilizador defina o tipo de sistema da singularidade como fluxo divergente. Dessa forma, sempre que a caixa desse parâmetro é selecionada, a caixa do parâmetro "Ar de Exaustão/Retorno" (que define o fluxo convergente) é deselecionada automaticamente, e vice-versa.

Somado a isso, para atender às diferentes condições de cálculo especificadas nas tabelas de referência, a parametrização dos parâmetros "Cs" e "Cb" reconhece primeiramente o tipo de fluxo (divergente ou convergente, definido pelo parâmetro "Ar de fornecimento"). Em seguida, a lógica verifica a condição geométrica, especificamente se a altura do duto principal é igual à altura do ramal. A combinação dessas duas condições (tipo de fluxo e igualdade das alturas) direciona a função "size_lookup" para a tabela de pesquisa correta.

Em paralelo, os parâmetros de "NomeColuna..." leem os valores calculados pelos parâmetros de razão de fluxo ou velocidade. Esses parâmetros retornam o valor de texto que indica a coluna exata da tabela que deverá ser consultada pela função "size_lookup". Os parâmetros "Cs" e "Cb" utilizam essa lógica complexa para buscar o coeficiente de perda correspondente na tabela de pesquisa apropriada.

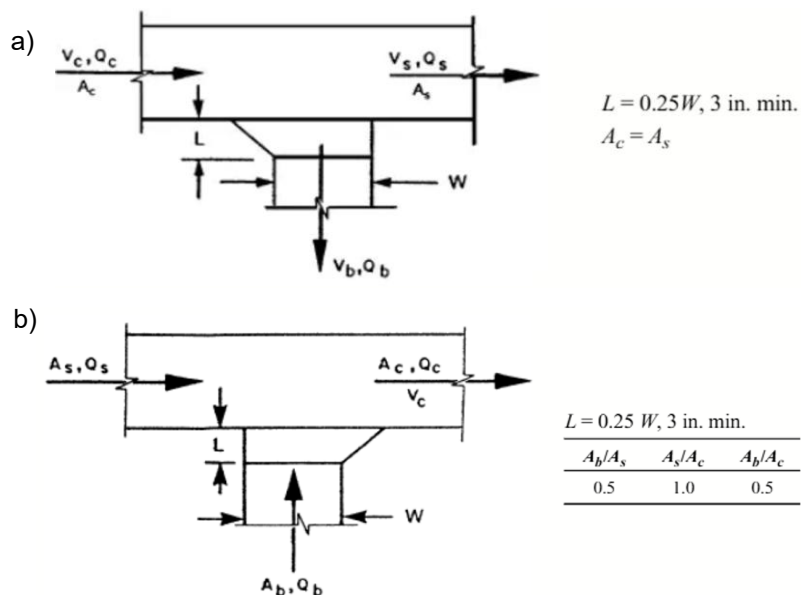
Por fim, o parâmetro de controle "Status" verifica a validade das entradas. Nesse sentido, caso os parâmetros "Cs" ou "Cb" retornem um valor indicativo de erro (proveniente de uma falha na função "size_lookup"), o parâmetro "Status" retornará o erro ao utilizador (ex: "Inputs fora da base de dados"), indicando que a geometria ou as razões de fluxo estão fora dos limites da tabela de coeficiente de perda referente a ela. Caso os valores geométricos e as propriedades do ar (parâmetros de entrada manual) não estejam coerentes com as condições de instalação, ou não forem devidamente preenchidas pelo utilizador, o parâmetro "Status" também retornará erro.

No entanto, sempre que as entradas estiverem definidas de forma correta, e as relações referentes à tabela de coeficiente de perda de carga estiverem dentro dos limites, o parâmetro irá retornar "Valor de perda de carga encontrado!", finalizando, assim, o cálculo de perda de carga para a singularidade em questão.

4.1.5 Tê retangular com chanfro em 45°

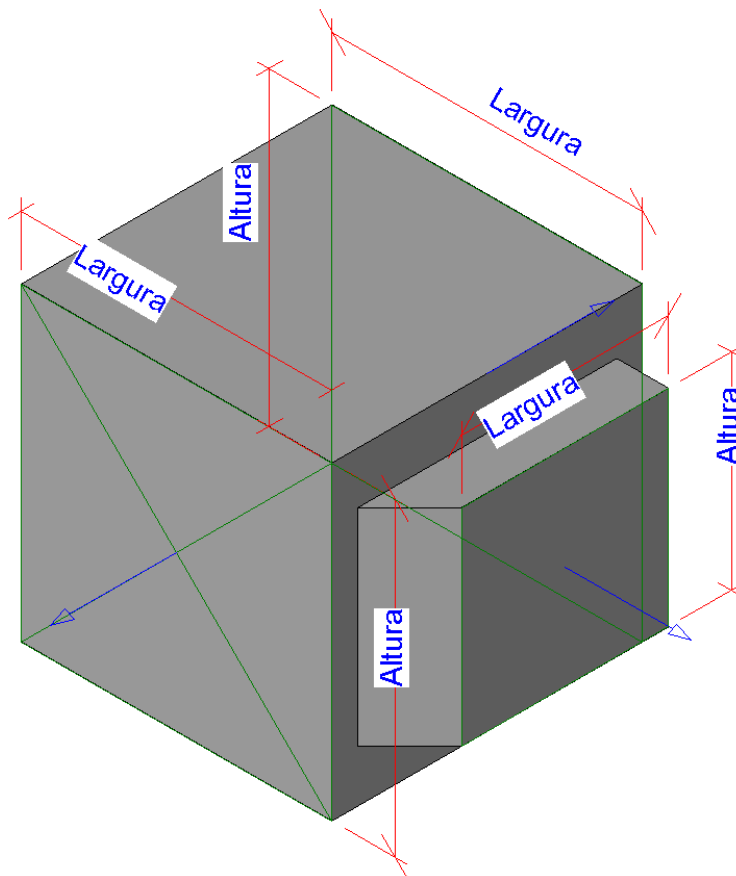
Para aplicação da metodologia desenvolvida nesta singularidade, o processo deu-se de forma bastante semelhante à implementação da metodologia para o tê retangular reto. Nesse sentido, a família em questão foi modelada com base nas referências e restrições geométricas presentes na Figura 30. Além disso, a família modelada pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 30 – Modelos de referência pra modelagem geométrica do tê retangular com chanfro a 45° para a) Sistemas de fornecimento de ar e b) Sistemas de exaustão ou retorno de ar



Fonte: adaptado de SMACNA (2006).

Figura 31 – Modelo BIM geométrico da família de tê retangular com chanfro em 45°



Fonte: o Autor.

Por conseguinte, seguiu-se com a inserção dos parâmetros responsáveis pelo cálculo de perda de carga da família. A parametrização seguiu as relações impostas pelas Tabelas 16, 17, 18 e 19.

Tabela 16 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, divergente duto principal

Coeficiente de perda de carga do duto principal, $C_{c,s}$									
V_s/V_c	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,5	0,60	0,80	1,00
$C_{c,s}$	0,40	0,32	0,26	0,20	0,14	0,10	0,06	0,02	0,00

Fonte: SMACNA (2006).

$C_{c,s}$, coeficiente de perda de carga do duto principal

V_o , velocidade de saída do fluxo do duto principal

V_s , velocidade de entrada do fluxo do duto principal

Tabela 17 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, divergente, ramal

Coeficientes de perda de carga do ramal, $C_{c,b}$									
V_b/V_c	Q_b/Q_s								
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,20	0,91								
0,40	0,81	0,79							
0,60	0,77	0,72	0,70						
0,80	0,78	0,73	0,69	0,66					
1,00	0,78	0,98	0,85	0,79	0,74				
1,20	0,90	1,11	1,16	1,23	1,03	0,86			
1,40	1,19	1,22	1,26	1,29	1,54	0,25	0,92		
1,60	1,35	1,42	1,55	1,59	1,63	1,50	1,31	1,09	
1,80	1,44	1,50	1,75	1,74	1,72	2,24	1,63	1,40	1,17

Fonte: SMACNA (2006).

$C_{c,b}$, coeficiente de perda de carga do ramal

V_b , velocidade de saída do fluxo do ramal

V_c , velocidade de entrada do fluxo do duto principal

Tabela 18 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, convergente, duto principal

Coeficientes de perda de carga do duto principal, C _s										
Q _b /Q _c	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
C _s	0,16	0,27	0,38	0,46	0,53	0,57	0,59	0,60	0,59	0,55

Fonte: SMACNA (2006).

C_s , coeficiente de perda de carga do duto principal

Q_b , vazão de saída do fluxo do ramal

Q_c , vazão de saída do fluxo do duto principal

Tabela 19 – Tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, convergente, ramal

V_c (fpm)	$C_{c,b}$									
	Q_b/Q_c									
	0,100	0,2	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
< 1200	-0,83	-0,68	-0,30	0,28	0,55	1,03	1,50	1,93	2,50	3,03
> 1200	-0,72	-0,52	-0,23	0,34	0,76	1,14	1,83	2,01	2,90	3,63

Fonte: SMACNA (2006).

$C_{c,b}$, coeficiente de perda de carga do ramal

Q_b , vazão de saída do fluxo do ramal

Q_c , vazão de saída do fluxo do duto principal

V_c , velocidade de saída do fluxo do duto principal, em pés por minuto

Nesse sentido, selecionaram-se quatro tabelas como referência para a seleção dos coeficientes de perda de carga, para o ramal e o duto principal, referentes a duas variações de tês retangulares com chanfro em 45°. Por conseguinte, com base nas informações de entrada presentes nas Tabelas 16 a 19, criaram-se os parâmetros necessários para o cálculo de perda de carga. Os parâmetros criados listam-se abaixo, também visíveis na Figura 32:

- Status: Parâmetro de saída (texto). Retorna ao usuário a situação do cálculo (ex: "Valor de perda de carga encontrado") ou indica erros de configuração, como geometrias inválidas para um determinado tipo de fluxo (ex: "Para sistemas de Ar de Exaustão/Retorno, a sua geometria...");
- Temperatura do ar (°C): Parâmetro de entrada (numérico). Define a temperatura do ar, utilizada para o cálculo da densidade;
- Umidade relativa do ar (%): Parâmetro de entrada (numérico, 0-100). Define a umidade relativa, utilizada para o cálculo da densidade do ar;
- Altitude: Parâmetro de entrada (numérico). Define a altitude do local, utilizada para o cálculo da pressão atmosférica;
- Ar de fornecimento: Parâmetro de controle (Sim/Não). Define a direção do fluxo como divergente (fornecimento), onde um fluxo de entrada se divide em dois;
- Ar de Exaustão/Retorno: Parâmetro de controle (Sim/Não). Define a direção do fluxo como convergente (exaustão/retorno), onde dois fluxos de entrada se

- unem. Seu valor é o oposto lógico de "Ar de fornecimento";
- Pressão atmosférica: Parâmetro de saída (numérico). Pressão atmosférica local, calculada com base na "Altitude";
 - Vazão principal de entrada: Parâmetro de entrada (numérico). Vazão volumétrica no conector principal comum;
 - Vazão principal de saída: Parâmetro de saída (numérico). Vazão volumétrica no conector principal reto. Calculada pela conservação da massa, dependendo do tipo de fluxo (convergente ou divergente);
 - Vazão ramal: Parâmetro de entrada (numérico). Vazão volumétrica no conector do ramal;
 - Densidade do ar: Parâmetro de saída (numérico). Massa específica do ar, calculada com base na "Temperatura", "Umidade relativa" e "Pressão atmosférica";
 - Área duto principal: Parâmetro de saída (área). Área da seção transversal do duto principal, calculada a partir de suas dimensões de largura e altura;
 - Área ramal: Parâmetro de saída (área). Área da seção transversal do duto do ramal, calculada a partir de suas dimensões de largura e altura;
 - Velocidade principal de entrada: Parâmetro de saída (velocidade). Velocidade média do ar no duto principal comum, calculada a partir da vazão e área;
 - Velocidade principal de saída: Parâmetro de saída (velocidade). Velocidade média do ar no duto principal reto, calculada a partir da vazão e área;
 - Velocidade ramal: Parâmetro de saída (velocidade). Velocidade média do ar no duto do ramal, calculada a partir da vazão e área;
 - Pressão dinâmica principal: Parâmetro de saída (pressão). Pressão dinâmica de referência no duto principal comum, calculada usando a "Densidade do ar" e a "Velocidade principal de entrada";
 - Pressão dinâmica ramal: Parâmetro de saída (pressão). Pressão dinâmica de referência no duto do ramal, calculada usando a "Densidade do ar" e a "Velocidade ramal";
 - Perda de carga principal: Parâmetro de saída (pressão). Perda de carga local para o fluxo reto, obtida pelo produto da pressão dinâmica e do coeficiente C_s ;
 - Perda de carga ramal: Parâmetro de saída (pressão). Perda de carga local para o fluxo do ramal, obtida pelo produto da pressão dinâmica e do coeficiente C_b ;
 - C_s : Parâmetro de saída (coeficiente adimensional). Coeficiente de perda de

- carga local para o fluxo reto. Obtido por consulta a tabelas (ex: "Cs_te_45_dif_div"), usando o parâmetro "Vs_Vc_div" como chave de pesquisa;
- Cb: Parâmetro de saída (coeficiente adimensional). Coeficiente de perda de carga local para o fluxo do ramal. Obtido por consulta a tabelas (ex: "Cb_te_45_dif_div"), usando os parâmetros "NomeColunaCb_dif_div" e "Vb_Vc_div" como chaves de pesquisa;
 - Area_ramal_Div_Area_principal: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Área ramal" e a "Área duto principal";
 - Qb_Qs_div: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão ramal" e a "Vazão principal de saída" para fluxo divergente. Usada como chave em consulta a tabelas;
 - Vb_Vc_div: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Velocidade ramal" e a "Velocidade principal de entrada". Usada como chave em consulta a tabelas;
 - Vs_Vc_div: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Velocidade principal de saída" e a "Velocidade principal de entrada". Usada como chave em consulta a tabelas;
 - Qs_Qc_conv: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão principal de entrada" e a "Vazão principal de saída" para fluxo convergente;
 - Qb_Qc_conv: Parâmetro de saída (adimensional). Razão entre a "Vazão ramal" e a "Vazão principal de saída" para fluxo convergente;
 - Vc_conv: Parâmetro de saída (numérico). Parâmetro de velocidade utilizado como chave de pesquisa na tabela para fluxo convergente;
 - NomeColunaCs: Parâmetro de saída (texto). Define dinamicamente o nome da tabela (ou parte dele) a ser pesquisada para o coeficiente Cs, com base no tipo de fluxo (ex: "Cs_dif_div" ou "Cs_dif_conv");
 - NomeColunaCb_dif_div: Parâmetro de saída (texto). Define o nome da coluna a ser pesquisada para o coeficiente Cb em fluxo divergente, com base no valor da razão "Qb_Qs_div";
 - NomeColunaCb_dif_conv: Parâmetro de saída (texto). Define o nome da coluna a ser pesquisada para o coeficiente Cb em fluxo convergente, com base no valor do parâmetro "Vc_conv" (ex: "Vc_menor_1200").

Figura 32 – Parâmetros inseridos na família de tê retangular com chanfro em 45°

Tipos de famílias

Digite o nome: Padrão

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula
Gráficos		
Cotas		
Mecânica – Vazão		
Status (padrão)	Valor de perda de carga encontrado!	=if(and(not(Ar de fornecimento), not(Área_ramal_c
Temperatura do ar (°C) (padrão)	20.000000	=
Umidade relativa do ar (%) (padrão)	0.000000	=
Altitude (padrão)	0.0000 m	=
Ar de fornecimento (padrão)	☒	=
Ar de Exaustão/Retorno (padrão)	☐	=not(Ar de fornecimento)
Pressão atmosférica (padrão)	101325.000000 Pa	=101325 Pa * (1 - 2.25577 * (10 ^ -5) * (Altitude / 1 r
Vazão principal de entrada (padrão)	500.0000 m³/h	=
Vazão principal de saída (padrão)	300.0000 m³/h	=if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada
Vazão ramal (padrão)	200.0000 m³/h	=
Densidade do ar (padrão)	1.204085 kg/m³	=(1 kg/m³ + (0.622 kg/m³ * (((Umidade relativa do
Área duto principal (padrão)	0.090 m²	=Largura do duto principal * Altura do duto princip
Área ramal (padrão)	0.040 m²	=Largura do ramal * Altura do ramal
Velocidade principal de entrada (padrão)	1.54 m/s	=Vazão principal de entrada / Área duto principal
Velocidade principal de saída (padrão)	0.93 m/s	=(Vazão principal de entrada - Vazão ramal) / Área
Velocidade ramal (padrão)	1.39 m/s	=Vazão ramal / Área ramal
Pressão dinâmica principal (padrão)	1.433762 Pa	=Densidade do ar * (Vazão principal de entrada / Á
Pressão dinâmica ramal (padrão)	1.161347 Pa	=Densidade do ar * (Vazão ramal / Área ramal) ^ 2.
Perda de carga principal (padrão)	0.086026 Pa	=Pressão dinâmica principal * Cs
Perda de carga ramal (padrão)	0.812943 Pa	=Pressão dinâmica ramal * Cb
Cs (padrão)	0.060000	=if(Ar de fornecimento, size_lookup("Cs_te_45_dif_
Cb (padrão)	0.700000	=if(Ar de fornecimento, size_lookup("Cb_te_45_dif_
Parâmetros IFC		
Resultados da análise		
Comprimento do duto 1 (padrão)	150.0 mm	=Comprimento1a + Anteparo
Comprimento1a (padrão)	125.0 mm	=(Largura do ramal + Comprimento chanfro * tan(
Limite inferior de extrusão (padrão)	100.0 mm	=Altura do ramal / 2
Limite superior de extrusão (padrão)	-100.0 mm	=-Altura do ramal / 2
Área_ramal_div_Área_principal (padrão)	0.440000	=round((Área ramal / Área duto principal) * 100) /
Qb_Qs_div (padrão)	0.670000	=round((Vazão ramal / Vazão principal de saída) * 1
Vb_Vc_div (padrão)	0.900000	=round((Velocidade ramal / Velocidade principal d
Vs_Vc_div (padrão)	0.600000	=round((Velocidade principal de saída / Velocidade
Qs_Qc_conv (padrão)	1.670000	=round((Vazão principal de entrada / Vazão princip
Qb_Qc_conv (padrão)	0.670000	=round((Vazão ramal / Vazão principal de saída) * 1
Vc_conv (padrão)	0.930000	=round((Velocidade principal de saída / 1 m/s) * 10
NomeColunaCs (padrão)	Cs_dif_div	=if(Ar de fornecimento, "Cs_dif_div", if(not(Ar de fo
NomeColunaCb_dif_div (padrão)	Qb_Qs_div_0_67	=if(Qb_Qs_div = 0.1, "Qb_Qs_div_0_10", if(Qb_Qs_d
NomeColunaCb_dif_conv (padrão)	Vc_menor_1200	=if(Vc_conv < 6.096, "Vc_menor_1200", if(Vc_conv :
Dados de identidade		

Gerenciar tabelas de pesquisa...

[Como posso gerenciar meus tipos de família?](#)

OK Cancelar Aplicar

Fonte: o Autor.

As fórmulas completas referentes a cada parâmetro citado estão disponíveis no Apêndice A.

Assim como na aplicação da metodologia para a parametrização da singularidade anterior, o próximo passo consistiu na obtenção dos valores tabulados do coeficiente de perda de pressão. Para isso, os dados foram extraídos das Tabelas 16 a 19 para uso da função “*size_lookup*”.

Entretanto, assim como ocorreu para o tê retangular reto, os valores do coeficiente de perda de carga da Tabela 17 não são existentes para muitas relações. Nesse sentido, a mesma abordagem foi aplicada para o tê chanfrado a fim de contornar essa problemática.

Tabela 20 – Reestruturação de dados para a tabela de coeficientes de perda de carga para tê retangular com chanfro em 45°, divergente, ramal

Coeficientes de perda de carga do ramal, C_b									
V_b/V_c	Q_b/Q_c								
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,20	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
0,40	0,81	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
0,60	0,77	0,72	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
0,80	0,78	0,73	0,69	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
1,00	0,78	0,98	0,85	0,79	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
1,20	0,90	1,11	1,16	1,23	1,03	0,86	0,86	0,86	0,86
1,40	1,19	1,22	1,26	1,29	1,54	0,25	0,92	0,92	0,92
1,60	1,35	1,42	1,55	1,59	1,63	1,50	1,31	1,09	1,09
1,80	1,44	1,50	1,75	1,74	1,72	2,24	1,63	1,40	1,17

Fonte: SMACNA (2006).

C_b , coeficiente de perda de carga do ramal

V_b , velocidade de saída do fluxo do ramal

V_c , velocidade de entrada do fluxo do duto principal

Dessa forma, os dados foram tratados e interpolados em Excel com uma precisão de 0,01. Além disso, o valor -1 também foi utilizado como valor de referência para depuração de erros por parte da função. Com as tabelas formatadas, deu-se a importação das mesmas para o ambiente de parametrização da família.

4.1.5.1 Lógica de parametrização para o cálculo de perda de carga para o tê chanfrado a 45°

Para a família de tê retangular chanfrado a 45°, quatro tabelas de pesquisa foram criadas, espelhando os dados de referência para perda de carga local. Com as

tabelas incorporadas ao modelo, tornou-se possível correlacionar os coeficientes "Cs" (perda de carga para o fluxo reto) e "Cb" (perda de carga para o fluxo no ramal) com qualquer combinação de parâmetros geométricos e de fluxo dentro dos limites das tabelas, para ambos os tipos de sistema. Dessa forma, consolidou-se a lógica de parametrização da família para a determinação da perda de carga.

Ao conectar a singularidade ao sistema modelado em ambiente BIM no Revit, a parametrização interna à família recebe do sistema automaticamente os valores de alturas e larguras dos dutos. No entanto, assim como para o tê reto, as vazões principais de saída são parâmetros de entrada manual, sendo a vazão do ramal calculada a partir delas a depender do tipo de sistema. A partir desses dados, os demais parâmetros são calculados até a determinação da "Perda de carga principal" e "Perda de carga ramal".

Para o tê chanfrado, é fundamental definir o sentido do fluxo. Por esse motivo, o utilizador deve selecionar a qual tipo de sistema a família pertence, pois não é possível obter esse tipo de informação automaticamente para uma família externa ao software. O parâmetro "Ar de fornecimento", do tipo Sim/Não, se apresenta como uma caixa de seleção para que o utilizador defina o tipo de sistema da singularidade como fluxo divergente. Dessa forma, sempre que a caixa desse parâmetro é selecionada, a caixa do parâmetro "Ar de Exaustão/Retorno" (que define o fluxo convergente) é deselecionada automaticamente, e vice-versa.

Somado a isso, a parametrização dos coeficientes "Cs" e "Cb" reconhece primeiramente o tipo de fluxo (divergente ou convergente), definido pelo parâmetro "Ar de fornecimento". A fórmula de cada coeficiente atrela essa seleção à tabela de pesquisa correspondente (tabelas com sufixo "dif_div" para ar de fornecimento e "dif_conv" para ar de exaustão/retorno).

Em paralelo, os parâmetros "NomeColunaCs", "NomeColunaCb_dif_div" e "NomeColunaCb_dif_conv" leem os valores calculados pelos parâmetros de razão de fluxo ou velocidade. Dessa forma, esses parâmetros retornam o valor de texto que indica a coluna exata da tabela que deverá ser consultada pela função `size_lookup`. Os parâmetros "Cs" e "Cb" utilizam essa lógica complexa para buscar o coeficiente de perda correspondente na tabela de pesquisa apropriada.

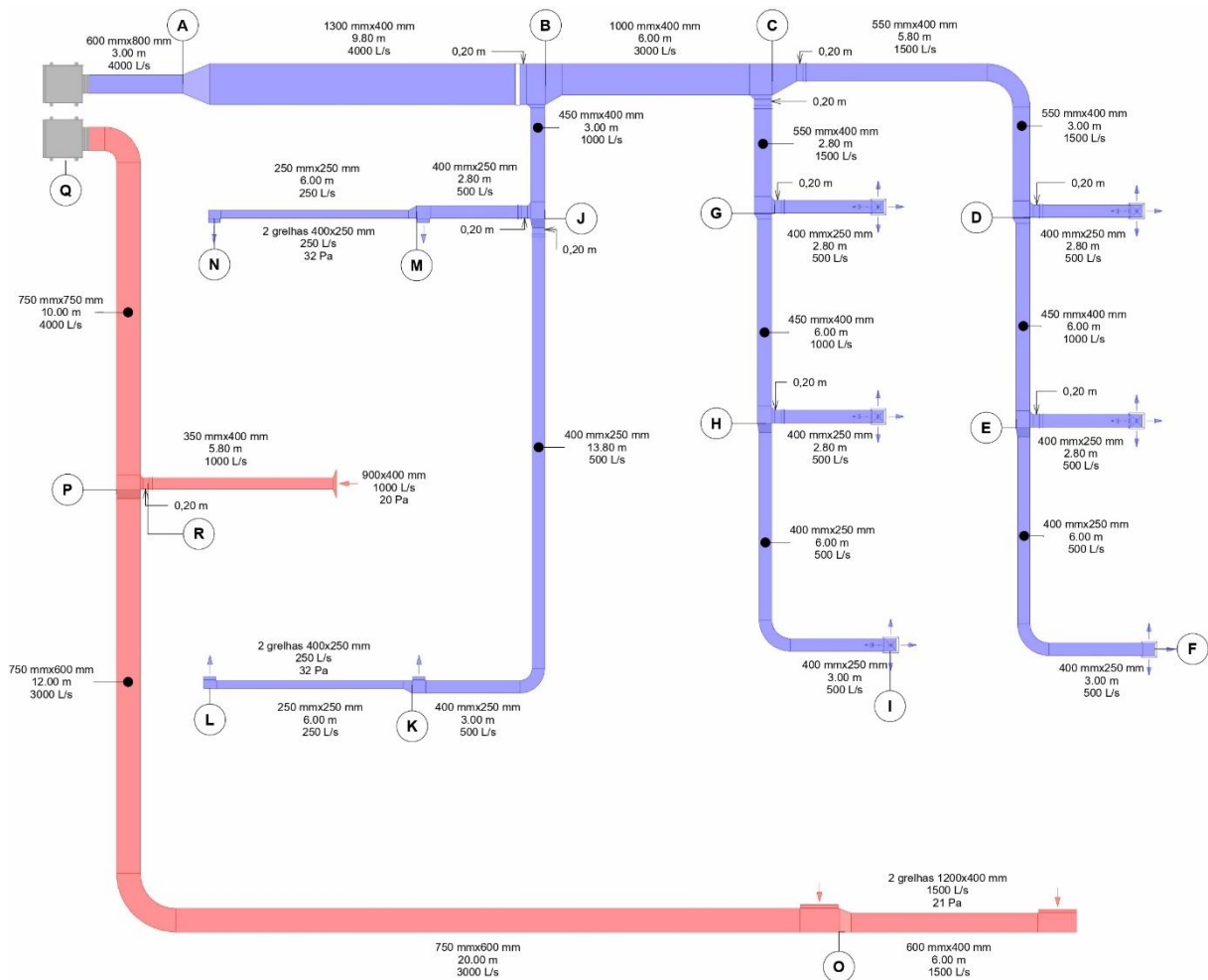
Por fim, o parâmetro de controle "Status" verifica a validade das entradas. Nesse sentido, caso os parâmetros de geometria ou fluxo não sejam válidos para o tipo de sistema selecionado (por exemplo, uma geometria específica que só se aplica

ao fluxo divergente), o parâmetro "Status" retornará um erro ao utilizador, indicando a localização do provável erro. Caso os valores geométricos e as propriedades do ar (parâmetros de entrada manual) não estejam coerentes com as condições de instalação, ou não forem devidamente preenchidas, o parâmetro "Status" também retornará erro. Entretanto, sempre que as entradas estiverem definidas de forma correta, e as relações referentes à tabela de coeficiente de perda de carga estiverem dentro dos limites, o parâmetro irá retornar "Valor de perda de carga encontrado!", finalizando, assim, o cálculo de perda de carga para a singularidade em questão.

4.2 APLICAÇÃO DAS FAMÍLIAS PARAMETRIZADAS EM AMBIENTE BIM

Com o intuito de avaliar a eficácia e a precisão das famílias paramétricas das singularidades desenvolvidas, foi selecionado um estudo de caso da literatura técnica, presente em *HVAC SYSTEMS DUCT DESIGN* (SMACNA, 2006). Esse exemplo detalha o cálculo da perda de pressão para um sistema de ventilação de ar de fornecimento projetado para uma vazão total de 4000 L/s, assim como também para um sistema de exaustão projetado também para 4000 L/s, como o objetivo de mensurar a pressão estática necessária para dimensionar um ventilador que atenda os parâmetros de projeto. O sistema em questão pode ser observado na Figura 33.

Figura 34 – Modelo BIM adaptado com as famílias modeladas para os sistemas de referência utilizados



Fonte: adaptado de SMACNA (2006).

Contudo, conforme o objetivo deste trabalho, as singularidades especificadas no exemplo de referência foram substituídas pelas famílias paramétricas desenvolvidas. Nesse sentido, as conexões "Wye" do exemplo da SMACNA foram substituídas pelas famílias de tê chanfrado a 45°, que possuem funcionalidade similar, mas coeficientes de perda distintos. Além disso, o cotovelo retangular com quina e com veios foi substituído pelo cotovelo retangular suave e sem veios.

4.2.1 Verificação

Como etapa crucial para a relevância da implementação da metodologia desenvolvida, uma verificação será realizada a fim de comparar e avaliar o cálculo de perda de carga executado automaticamente pelas famílias de singularidades no Revit

com a metodologia de cálculo manual do mesmo sistema adaptado. Isso garantirá que as fórmulas implementadas nas famílias estão sendo calculadas da forma correta, assim como os coeficientes de perda de carga devidamente selecionados.

4.2.1.1 Cálculos manuais para avaliação de perda de carga das singularidades em BIM

O cálculo manual terá como foco avaliar a perda de cada singularidade de cada um dos quatro possíveis caminhos críticos para o sistema fornecimento de ar (A-F, A-I, A-L e A-N) e para o caminho crítico do sistema de exaustão de ar (O-Q) presentes no modelo adaptado ao BIM. Nesse sentido, a Equação (3.17) será adotada para mensurar a perda de carga de cada singularidade. De acordo com a equação, a perda de pressão em singularidades é expressa pelo produto entre o coeficiente de perda de carga e a pressão dinâmica ocasionada devido ao fluxo através da singularidade. Ademais, ainda como apresentado nessa equação, a pressão dinâmica depende da massa específica do ar para ser mensurada.

Sob essa ótica, a massa específica do ar será calculada de acordo com as Equações (3.5) a (3.9), em função dos parâmetros de operação do ar para o sistema em questão. Para a análise, a fim de dinamizar os cálculos empegados, será considerado o ar seco operando a 20 °C ao nível do mar. Para avaliar a pressão atmosférica atuante no sistema em questão, será utilizada a Equação (3.10), que calcula a pressão atmosférica local em função da altitude.

Partindo do cálculo da pressão atmosférica, a Equação (4.1) apresenta a pressão atmosférica local em função da altitude para situação considerada.

$$P_{atm} = 101325(1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 0)^{5,2559} \quad (4.1)$$

Para o local de instalação do sistema ao nível do mar, ou seja, altitude igual a zero, a pressão atmosférica local assume um valor de 101325 Pa. Para calcular a massa específica do ar nas condições descritas, as Equações (4.2) a (4.4) serão utilizadas. Elas representam as Equações (3.5) a (3.9) reorganizadas para calcular a massa específica do ar de maneira mais incisiva.

$$\rho = \frac{P_{atm} - 0,378 \cdot \Phi \cdot p_{ws}}{R_{ar\ seco} \cdot T} \quad (4.2)$$

$$\rho = \frac{101325 - 0,378 \cdot 0,234}{287,05 \cdot (273,15 + 20)} \quad (4.3)$$

$$p_{ws=T} = C_6 \cdot e^{\left(\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3\right)} \quad (4.4)$$

Atribuindo os valores às variáveis da Equação (4.4), sendo $T = 293,15\ K$; $C_1 = -5,8002206 \cdot 10^3$; $C_2 = 1,3914993 \cdot 10^0$; $C_3 = -4,8640239 \cdot 10^{-2}$; $C_4 = 4,1764768 \cdot 10^{-5}$; $C_5 = -1,4452093 \cdot 10^{-8}$ e $C_6 = 6,5459673 \cdot 10^0$, além de solucionando as equações, obtêm-se $p_{ws} = 2,34\ kPa$ e $\rho = 1,204\ kg/m^3$.

Com a massa específica do ar em questão calculada, calcula-se então a área e a velocidade de referência. De acordo com *ASHRAE Handbook—Fundamentals* (2001), para singularidades como transição, cotovelo suave e cotovelo de áreas variáveis, a área de referência é calculada pela com base na área A_o como referência para a saída do fluxo de ar para sistemas de fornecimento de ar e entrada do fluxo de ar para sistemas de exaustão ou retorno. Nesse sentido, a área e a velocidade do fluxo são calculadas com base nas Equações (4.5) e (4.6), respectivamente.

$$A = L_o \cdot W_o \quad (4.5)$$

$$V_o = \frac{Q}{A_o} \quad (4.6)$$

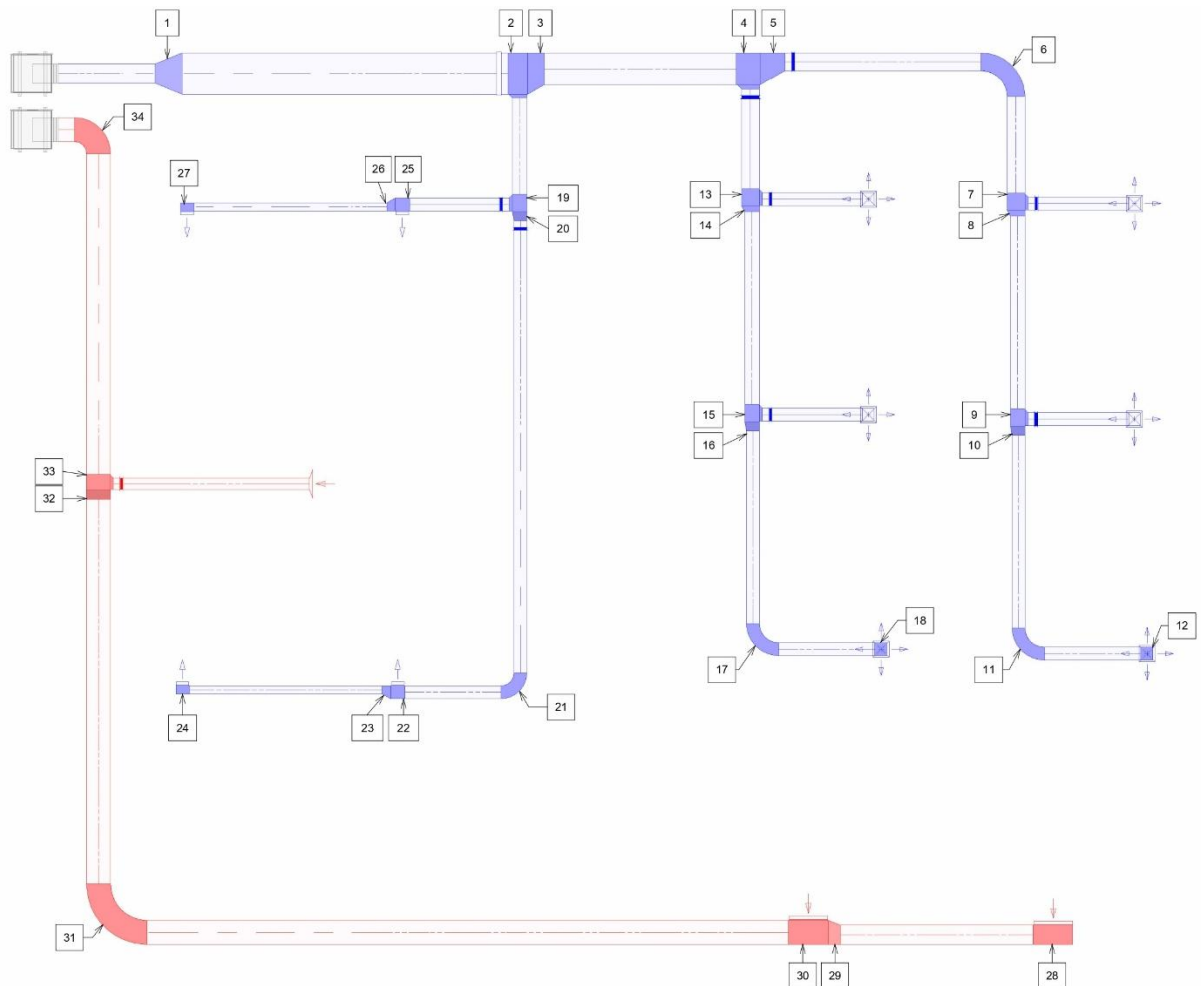
Entretanto, a relação muda quando se trata dos tês retangulares. De acordo com SMACNA (2006), para avaliar a perda de carga do duto principal, deve ser considerada a seção e a vazão de entrada, em se tratando de sistemas de fornecimento de ar, e a seção e a vazão de saída para sistemas de exaustão ou retorno. Ademais, para a perda de carga do ramal, deve ser considerada a seção deste tanto para o cálculo da área como para o cálculo da velocidade. Ambas as situações podem ser calculadas pelas Equações (4.5) e (4.6).

Nesse viés, ainda no que se refere às variáveis necessárias para avaliar a perda de carga das singularidades, as Tabelas 1 e 2 serão utilizadas para selecionar o coeficiente de perda de carga para a curva retangular suave sem veios; as Tabelas 3 e 4 para o cotovelo retangular com quina, sem veios e de áreas variáveis; as Tabelas

5 a 8 para a transição retangular; as Tabelas 9, 11, 12, 13, 14 e 15 para o tê retangular reto e as Tabelas 16, 18, 19 e 20 para o tê retangular chanfrado a 45°.

Os resultados provenientes dos cálculos de área, velocidade, pressão dinâmica, perda de carga e seleção do coeficiente de perda para cada singularidade dos caminhos críticos do sistema de fornecimento de ar, separadas por trecho, estão presentes na Tabela 21. Os resultados para o sistema de exaustão de ar estão presentes na Tabela 22. Além disso, cada singularidade analisada apresenta-se devidamente identificada na Figura 35.

Figura 35 – Modelo BIM adaptado com as famílias modeladas para os sistemas de referência utilizados



Fonte: o Autor.

Tabela 21 – Tabela de avaliação manual de perda de carga das singularidades para o ar seco a 20 °C, ao nível do mar, para o sistema de fornecimento de ar

Trecho	Número da singularidade	Vazão (L/s)	Largura de referência (m)	Altura de referência (m)	Área (m²)	Velocidade (m/s)	Pressão dinâmica (Pa)	Coefficiente de perda de carga	Perda de carga (Pa)
B	1	4000	1,30	0,40	0,52	7,69	35,6213	0,11	3,9183
B	2	4000	1,30	0,40	0,52	7,69	35,6213	0,03	1,0686
C	3	3000	1,00	0,40	0,40	7,50	33,8625	0,02	0,6773
C	4	3000	1,00	0,40	0,40	7,50	33,8625	0,10	3,3863
D	5	1500	0,55	0,40	0,22	6,82	27,9855	0,05	1,3993
D	6	1500	0,55	0,40	0,22	6,82	27,9855	0,16	4,4777
D	7	1500	0,55	0,40	0,22	6,82	27,9855	0,03	0,8396
E	8	1000	0,45	0,40	0,18	5,56	18,5802	0,02	0,3716
E	9	1000	0,45	0,40	0,18	5,56	18,5802	0,10	1,8580
F	10	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,04	0,6020
F	11	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,17	2,5585
F	12	500	0,35	0,40	0,14	3,57	7,6786	1,79	13,7446
G	4	1500	0,55	0,40	0,22	6,82	27,9855	0,70	19,5899
G	13	1500	0,55	0,40	0,22	6,82	27,9855	0,03	0,8396
H	14	1000	0,45	0,40	0,18	5,56	18,5802	0,02	0,3716
H	15	1000	0,45	0,40	0,18	5,56	18,5802	0,10	1,8580
I	16	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,04	0,6020
I	17	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,17	2,5585
I	18	500	0,35	0,40	0,14	3,57	7,6786	1,79	13,7446
J	2	1000	0,45	0,40	0,18	5,56	18,5802	0,69	12,8204
J	19	1000	0,45	0,40	0,18	5,56	18,5802	0,10	1,8580
K	20	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,04	0,6020
K	21	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,19	2,8595
K	22	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,40	6,0200
L	23	250	0,25	0,25	0,06	4,00	9,6320	0,04	0,3853
L	24	250	0,40	0,25	0,10	2,50	3,7625	2,30	8,6538
M	19	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,70	10,5350
M	25	500	0,40	0,25	0,10	5,00	15,0500	0,40	6,0200
N	26	250	0,25	0,25	0,06	4,00	9,6320	0,04	0,3853
N	27	250	0,40	0,25	0,10	2,50	3,7625	2,30	8,6538

Fonte: o Autor.

Tabela 22 – Tabela de avaliação manual de perda de carga singularidades para o ar seco a 20 °C, ao nível do mar, para o sistema de exaustão de ar

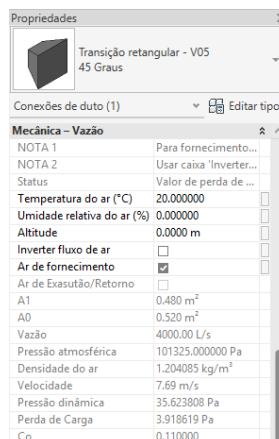
Trecho	Número da singularidade	Vazão (L/s)	Largura de referência (m)	Altura de referência (m)	Área (m²)	Velocidade (m/s)	Pressão dinâmica (Pa)	Coefficiente de perda de carga	Perda de carga (Pa)
O	28	1500	1,20	0,40	0,48	3,13	5,8789	1,75	10,2881
O	29	1500	0,60	0,40	0,24	6,25	23,5156	0,28	6,5844
P	30	3000	0,75	0,60	0,45	6,67	26,7556	0,53	14,1804
P	31	3000	0,75	0,60	0,45	6,67	26,7556	0,16	4,2809
P	32	3000	0,75	0,60	0,45	6,67	26,7556	0,10	2,6756
Q	33	4000	0,75	0,75	0,56	7,11	30,4419	0,60	18,2651
Q	34	4000	0,75	0,75	0,56	7,11	30,4419	0,21	6,3928
R	33	1000	0,35	0,40	0,14	7,14	30,7143	-0,38	-11,6714

Fonte: o Autor.

4.2.1.2 Desempenho da parametrização das famílias modelas em ambiente BIM

Para efeito de comparação com os valores apresentados nas Tabelas 23 e 24, as famílias modeladas e parametrizadas em Revit foram analisadas, e delas, retirados os valores de pressão dinâmica, do coeficiente de perda de carga que foi selecionado pela função “size_lookup” e da perda de carga, obtidos pela parametrização da família. Ademais, como exemplo, a Figura 36 apresenta, por meio da transição retangular, como as famílias se comportam quando aplicadas ao Revit.

Figura 36 –Parâmetros de cálculo de perda de carga para transição retangular em projeto adaptado para Revit



Fonte: o Autor.

Tabela 23 – Tabela de avaliação de perda de carga das famílias parametrizadas em Revit para o ar seco a 20 °C, ao nível do mar, para o sistema de fornecimento de ar

Trecho	Número da singularidade	Pressão dinâmica (Pa)	Coefficiente de perda	Perda de carga (Pa)
B	1	35,6238	0,11	3,9186
B	2	35,6238	0,03	1,0687
C	3	33,8649	0,02	0,6773
C	4	33,8649	0,10	3,3865
D	5	27,9875	0,05	1,3994
D	6	27,9875	0,16	4,4780
D	7	27,9875	0,03	0,8396
E	8	18,5816	0,02	0,3716
E	9	18,5816	0,10	1,8582
F	10	15,0511	0,04	0,6020
F	11	15,0511	0,17	2,5587
F	12	7,6791	1,79	13,7456
G	4	27,9875	0,70	19,5913
G	13	27,9875	0,03	0,8396
H	14	18,5816	0,02	0,3716
H	15	18,5816	0,10	1,8582
I	16	15,0511	0,04	0,6020
I	17	15,0511	0,17	2,5587
I	18	7,6791	1,79	13,7456
J	2	18,5816	0,69	12,8213
J	19	18,5816	0,10	1,8582
K	20	15,0511	0,04	0,6020
K	21	15,0511	0,19	2,8597
K	22	15,0511	0,40	6,0204
L	23	9,6327	0,04	0,3853
L	24	3,7628	2,30	8,6544
M	19	15,0511	0,70	10,5357
M	25	15,0511	0,40	6,0204
N	26	9,6327	0,04	0,3857
N	27	3,7628	2,30	8,6544

Fonte: o Autor.

Tabela 24 – Tabela de avaliação de perda de carga das famílias parametrizadas em Revit para o ar seco a 20 °C, ao nível do mar, para o sistema de exaustão de ar

Trecho	Número da singularidade	Pressão dinâmica (Pa)	Coefficiente de perda	Perda de carga (Pa)
O	28	5,8793	1,75	10,2888
O	29	23,5173	0,28	6,5848
P	30	26,7574	0,53	14,1814
P	31	26,7574	0,16	4,2812
P	32	26,7574	0,10	2,6757
Q	33	30,4440	0,60	18,2664
Q	34	30,4440	0,21	6,3932
R	33	30,7164	-0,38	-11,6723

Fonte: o Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados fundamenta-se na comparação direta entre os valores de perda de carga obtidos através do cálculo manual, utilizando as formulações da mecânica dos fluidos e a consulta direta às tabelas da ASHRAE e SMACNA, e os valores gerados automaticamente pelas famílias paramétricas desenvolvidas no Autodesk Revit. O estudo de caso baseou-se no sistema de dutos adaptado da SMACNA (2006), abrangendo tanto o sistema de fornecimento quanto o de exaustão de ar.

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A validação da metodologia proposta foi realizada confrontando-se os dados das Tabelas 21 e 22 de cálculos manuais com as Tabelas 23 e 24 de cálculo do Revit.

Para o sistema de fornecimento de ar, observou-se uma convergência efetiva entre os métodos. Tomando como exemplo a singularidade N° 1 (Trecho B), que consiste em uma transição retangular, o cálculo manual resultou em uma perda de carga de 3,9183 Pa, enquanto a família paramétrica retornou o valor de 3,9186 Pa. A diferença de apenas 0,0003 Pa é desprezível para fins de engenharia prática.

Comportamento similar foi verificado nas singularidades mais complexas, como os tês. A singularidade N° 19 apresentou perda de 1,8580 Pa no cálculo manual e 1,8582 Pa no modelo BIM. Mesmo em situações de alta perda de carga, como na singularidade N° 18 (Trecho I), onde o coeficiente de perda é elevado, sendo $C_o = 1,79$, os valores mantiveram-se consistentes: 19,5899 Pa (manual) contra 19,5913 Pa (BIM).

No sistema de exaustão, a precisão manteve-se. A singularidade N° 33 (Trecho Q), um tê convergente chanfrado a 45° com fluxo de 4000 L/s, apresentou perda de carga manual de 18,2651 Pa e automática de 18,2664 Pa.

5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DESVIOS E PRECISÃO COMPUTACIONAL

Para quantificar a precisão da ferramenta desenvolvida, procedeu-se ao cálculo do erro relativo entre os valores obtidos manualmente e os extraídos do modelo BIM. O erro relativo foi calculado para três parâmetros fundamentais: pressão dinâmica (P_v), coeficiente de perda de carga (C_o) e perda de carga da singularidade (P_o), conforme a Equação 5.1:

$$E_{relativo} = \left| \frac{V_{manual} - V_{BIM}}{V_{manual}} \right| \times 100\% \quad (5.1)$$

As Tabelas 25 e 26 apresentam a compilação desses erros para os sistemas de fornecimento e exaustão, respectivamente.

Tabela 25 – Erros relativos percentuais para o sistema de fornecimento de ar

Trecho	Número da singularidade	Erro relativo P_v (%)	Erro relativo C_o (%)	Erro relativo P_o (%)
B	1	0,0068	0,0000	0,0077
B	2	0,0070	0,0000	0,0094
C	3	0,0071	0,0000	0,0000
C	4	0,0071	0,0000	0,0059
D	5	0,0071	0,0000	0,0071
D	6	0,0071	0,0000	0,0067
D	7	0,0071	0,0000	0,0000
E	8	0,0075	0,0000	0,0000
E	9	0,0075	0,0000	0,0108
F	10	0,0073	0,0000	0,0000
F	11	0,0073	0,0000	0,0078
F	12	0,0065	0,0000	0,0073
G	4	0,0071	0,0000	0,0071
G	13	0,0071	0,0000	0,0000
H	14	0,0075	0,0000	0,0000
H	15	0,0075	0,0000	0,0108
I	16	0,0073	0,0000	0,0000
I	17	0,0073	0,0000	0,0078
I	18	0,0065	0,0000	0,0073
J	2	0,0075	0,0000	0,0070
J	19	0,0075	0,0000	0,0108
K	20	0,0073	0,0000	0,0000
K	21	0,0073	0,0000	0,0070
K	22	0,0073	0,0000	0,0066
L	23	0,0073	0,0000	0,0000
L	24	0,0080	0,0000	0,0069
M	19	0,0073	0,0000	0,0066
M	25	0,0073	0,0000	0,0066
N	26	0,0073	0,0000	0,1038
N	27	0,0080	0,0000	0,0069

Fonte: O Autor.

P_v , pressão dinâmica de referência

C_o , coeficiente de perda de carga; P_o , perda de carga

Tabela 26 – Erros relativos percentuais para o sistema de exaustão de ar

Trecho	Número da singularidade	Erro relativo P_v (%)	Erro relativo C_o (%)	Erro relativo P_o (%)
O	28	0,0068	0,0000	0,0068
O	29	0,0072	0,0000	0,0061
P	30	0,0067	0,0000	0,0071
P	31	0,0067	0,0000	0,0070
P	32	0,0067	0,0000	0,0037
Q	33	0,0069	0,0000	0,0071
Q	34	0,0069	0,0000	0,0063
R	33	0,0068	0,0000	0,0077

Fonte: O Autor.

P_v , pressão dinâmica de referência

C_o , coeficiente de perda de carga

P_o , perda de carga

5.2.1 Validação da lógica de seleção de coeficientes

A análise da coluna referente ao erro relativo do coeficiente revela um dado crucial para a validação da metodologia, em que em praticamente todas as singularidades analisadas, o erro foi 0,0000%.

Este resultado comprova a eficácia da implementação das tabelas de pesquisa e das fórmulas condicionais dentro das famílias do Revit. O erro nulo indica que a ferramenta digital selecionou exatamente o mesmo coeficiente tabular que um engenheiro selecionaria manualmente consultando as normas da ASHRAE e SMACNA. Isso confirma que a família paramétrica é capaz de interpretar corretamente a geometria (razões de área, ângulos) e o tipo de fluxo (convergente ou divergente) sem falhas de lógica.

5.2.2 Análise de precisão numérica

No que tange aos valores de pressão dinâmica (P_v) e perda de carga (P_o), observam-se erros residuais que variam, majoritariamente, entre 0,0060% e 0,0080%, com um pico isolado de 0,1038% no sistema de exaustão.

Essas discrepâncias infinitesimais não decorrem de falhas na metodologia, mas sim das diferenças intrínsecas aos motores de cálculo. O Microsoft Excel, utilizado no

cálculo manual, e o *kernel* do Autodesk Revit utilizam precisões diferentes para o armazenamento de números decimais. Nesse sentido, pequenas variações no número de casas decimais utilizadas para os parâmetros calculados em etapas intermediárias geram esses desvios acumulados.

Conforme observa Rohweder (2020), sob a ótica da engenharia aplicada, um erro de 0,007% em um sistema operando com pressões na ordem de Pascal é desprezível. Para ilustrar, em uma perda de carga de 10,00 Pa, esse erro representaria uma variação de apenas 0,0007 Pa, valor indetectável pela instrumentação de medição padrão utilizada em campo, como manômetros.

5.3 DISCUSSÃO

A pequena variação observada na casa dos milésimos de Pascal pode ser atribuída às diferenças de arredondamento e precisão de ponto flutuante entre o motor de cálculo do Microsoft Excel utilizado no cálculo manual e o motor interno de fórmulas do Autodesk Revit. Contudo, essa discrepância é irrelevante frente à magnitude das pressões operacionais de um sistema AVAC (BEHLS, 2021).

Os resultados demonstram que a estratégia de utilização de tabelas de pesquisa aliada a fórmulas condicionais foi eficaz para superar a limitação nativa do *software*. O sistema foi capaz de identificar geometrias, reconhecendo corretamente as variações de área e dimensões lineares. Além disso, os parâmetros de controle "Ar de fornecimento" e "Ar de Exaustão" permitiram que uma única família se comportasse de maneira distinta (convergente ou divergente), selecionando a tabela correta conforme a lógica da SMACNA e ASHRAE.

Não obstante, o erro comum de "Nenhuma tabela ASHRAE é aplicável", ilustrado na Figura 1 foi eliminado com a automatização da seleção do coeficiente a partir da função "*size_lookup*".

Ademais, o parâmetro "*Status*" serviu como um mecanismo de controle de qualidade, garantindo que o projetista fosse alertado caso a geometria do duto saísse do escopo dos dados experimentais tabulados.

Dessa forma, a metodologia não apenas reproduz com fidelidade os cálculos normativos, mas também fomenta o fluxo de trabalho, eliminando a necessidade de consultas manuais repetitivas e reduzindo a probabilidade de erro humano na seleção de coeficientes.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu objetivo geral ao desenvolver e verificar a aplicação de uma metodologia para cálculo de perda de carga localizada em famílias paramétricas de conexões de dutos retangulares em ambiente BIM (Autodesk Revit), capazes de automatizar o cálculo de perda de carga localizada seguindo os padrões da ASHRAE e SMACNA.

Quanto aos objetivos específicos delineados, conclui-se que:

- Foi possível modelar geometricamente as conexões críticas (cotovelos, transições e tês), garantindo a flexibilidade necessária para projetos reais de AVAC;
- A estruturação dos dados das normas em arquivos .CSV e sua integração via *Lookup Tables* provou ser uma solução robusta para contornar a falta de ferramentas nativas de interpolação no Revit;
- A implementação de lógicas condicionais complexas permitiu que as decisões fossem tomadas de forma autônoma pelas famílias sobre qual tabela consultar baseando-se no tipo de sistema (fornecimento ou retorno) e na geometria da peça;
- A verificação através do estudo de caso confirmou a precisão dos resultados, com desvios desprezíveis em relação ao método manual, validando a confiabilidade da ferramenta para uso profissional.

A principal contribuição desta pesquisa reside na disponibilização de uma solução tecnológica que preenche uma lacuna funcional no software de modelagem BIM mais utilizado no mercado. Isso proporciona aos engenheiros projetistas maior agilidade e confiabilidade no dimensionamento de sistemas de ventilação, permitindo que o foco do profissional se desloque da consulta manual de tabelas para a análise e otimização do desempenho energético do sistema.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para a continuidade e expansão desta pesquisa, recomenda-se:

- A ampliação da biblioteca de famílias para incluir dutos de seção circular e oval, bem como outras singularidades complexas (bifurcações tipo "calça", bifurcações tipo "cauda de andorinha" e *plenums*);

- O desenvolvimento de rotinas de programação visual (via Dynamo ou API do Revit) para automatizar a inserção dessas famílias e a verificação global de todo o sistema de dutos, identificando possíveis trechos críticos automaticamente;
- A investigação da integração desses dados de perda de carga com algoritmos de otimização energética ou *plugins* para sugerir, automaticamente, traçados de dutos mais eficientes dentro do ambiente BIM.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, Shivam; GERA, D. **Study and optimisation of supply duct bend and diffuser in HVAC system for a classroom**. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, v. 5, n. 7, p. 988-995, 2020.
- ABDULAMEER, Layth Saeed *et al.* **Comparison between hazen-williams and darcy-weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in kerbala city, iraq**. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, v. 115, n. 1, 2022.
- ASSUNÇÃO, Talles Rauan Justino de. **Bancada didática para perda de carga**. Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA. Trabalho de Conclusão de Curso. 2024.
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2001.
- ABNT. NBR 16401 -1. **Instalações de ar condicionado, sistemas centrais e unitários –Projeto das instalações**. 2024.
- ALMEIDA, Tiago Capeleiro da. **Desempenho Energético de Sistemas AVAC de um Edifício Baseado em Distintas Tecnologias de Bomba de Calor e Climats**. 2024. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).
- ALVES, Camilo Gustavo Araújo *et al.* **Modelagem computacional de arranjos de desinfecção para melhoria de qualidade de ar interno em ambientes hospitalares**. 2024. UFPB – Universidade Federal da Paraíba. Dissertação de Mestrado.
- AUBIN, Paul. **Revit families: A step-by-step introduction**. Hentet fra: <https://www.autodesk.com/Autodeskuniversity/article/Revit-Families-Step-Step-Introduction-2018>, 2020.
- BEHLS, Herman. **Duct Systems Design Guide**. Ashrae Peachtree Corners, 2021.
- BIZERRA, Alex Sandro Pereira *et al.* **Comparativo entre telha cerâmica e telha isotérmica: análise de parâmetros para conforto térmico**. Faculdade de tecnologia Victor Civita – FATEC. Trabalho de Conclusão de Curso. 2021.
- CASTRO, Leandro Martins. **Dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora para uma área de laminação a quente**. 2021. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- CRUZ, Marcus Vinícius Macedo da. **Dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina subterrânea**. 2022. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e**

Aplicações. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2018.

CAMARGO, Daniel Zancanella de. **Análise numérica do coeficiente de perda de carga em escoamentos laminares de fluidos pseudoplásticos em elementos de conexão.** 2020. 67 f. Monografia (graduação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, Coordenadoria de Curso Superior de Engenharia Mecânica, 2020.

CORNELLI, Nícollas Crema. **Sustentabilidade e as certificações ambientais na construção civil: estudo de caso da certificação LEED em edifício comercial na cidade de Canoas/RS.** 2022. UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS. Trabalho de Conclusão de Curso.

DE BRITO, Bruno Leão et al. **Estudo Comparativo entre ferramentas de projeto paramétrico.** Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2021.

DING, Lieyun; ZHOU, Ying; AKINCI, Burcu. **Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD.** *Automation in construction*, v. 46, p. 82-93, 2014.

FARIAS, Guilherme Cardoso de. **Elaboração de um Template para o software Revit aplicado a uma residência unifamiliar de madeira.** Engenharia Civil-Tubarão, 2018. Universidade do Sul de Santa Catarina. Trabalho de Conclusão de Curso.

FELIPETTO, Tais Jaci et al. **Atenuadores para controle de ruído em sistemas de ar-condicionado: estudos com a utilização de materiais reaproveitados.** *Acústica e Vibrações*, v. 36, n. 53, p. 81–97-81–97, 2021.

HOLANDA, Dackyson Kelwyn de Souza Lopes et al. **Família paramétrica para parede de steel frame.** 2023. Instituto Federal de Alagos. Trabalho de Conclusão de Curso.

HABTE, Bedilu; GUYO, Eyosias. **Application of BIM for structural engineering: a case study using Revit and customary structural analysis and design software.** *J. Inf. Technol. Constr.*, v. 26, p. 1009-1022, 2021.

JAHANGIR, Muhammad Aqib; FAROOQ, Umar; SULTAN, Asim. **Clash Detection Optimization in BIM: A Case Study on Coordination and Design Efficiency in Infrastructure Projects.** 2024.

KABBARA, Zakarya et al. **Improving HVAC ductwork designs while considering fittings at an early stage.** *Building and environment*, v. 237, p. 110272, 2023.

KNIGHT, Dennis; ROTH, Stephen; ROSEN, Steven L. **Using BIM in HVAC design.** *Ashrae Journal*, v. 52, n. 6, p. 24-29, 2010.

KOUTAMANIS, Alexander. **Dimensionality in BIM: Why BIM cannot have more than four dimensions?.** *Automation in Construction*, v. 114, p. 103153, 2020.

LACERDA, João Vitor Barbosa. **Dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora para uma marcenaria**. 2023. 49 f. Monografia (Graduação em (Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

LOPES, Vanessa Lílian da Silva. **Análise do conforto térmico e lumínico em habitações reformadas do residencial Recanto dos Pássaros em Maceió – AL, segundo critérios do Selo Casa Azul + Caixa**. 2023. 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

MARTINS, Rodrigo Todí. **Análise psicrométrica em ambiente de piscina térmica visando atender conforto térmico**. 2024. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Escola Politécnica. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.

MONTALVÃO, Victor Barreto. **Estudo de sistemas de condicionamento de ar e dimensionamento de dutos: o caso de um shopping**. 2019. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

MOTA, Filipe Augusto Resende *et al.* **Avaliação da Perda de Carga de uma Curva em Escoamento Transiente**. Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, 2024.

MPU. **MPU Indústria e Comércio**. Disponível em: <https://mpu.com.br/>. Acesso em: 5 out. 2025.

MISTRY, Vrushank. **Building Information Modeling (BIM) Integration with HVAC Automation. Journal of Civil Engineering Research & Technology**. SRC/JCERT-158. DOI: doi.org/10.47363/JCERT/2020 (2), v. 157, p. 2-5, 2020.

NETO, Antonio Gomes de Farias. **Análise dos processos de colaboração no fluxo de trabalho de projetos em BIM: um estudo de caso**. 2023. Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba Campus Cajazeiras, Trabalho de Conclusão de Curso.

NOVATHERM. **Duto TDC**.: [s. n.], 2024. Disponível em: <https://novatherm.com.br/duto-tdc/>. Acesso em: 5 out. 2025.

OLIVEIRA, Rodrigo Monteiro de. **Comparação entre métodos de dimensionamento de dutos de sistemas de RVAC**. 2011. 107 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

DE OLIVEIRA, Miguel Batista; KALB, Felipe Eder Britz Dotto. **Desenvolvimento de famílias paramétricas para modelagem BIM**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 2, p. 15670-15674, 2021.

PUGLIA, Giovane Costa. **Estudo de caso: projeto de climatização e pressurização para uma subestação elétrica industrial**. 2023. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão de Curso.

PEREIRA, Bruno Eli Alves *et al.* **Método Aplicado vs. Direto: dimensionamento de um sistema de distribuição de ar para instalações HVAC**. Scientia Plena, v. 13, n. 6, 2017.

QIU, Mengning; OSTFELD, Avi. **A head formulation for the steady-state analysis of water distribution systems using an explicit and exact expression of the Colebrook–White equation**. *Water*, v. 13, n. 9, p. 1163, 2021.

RADNIA, Ashkan. **Sequence prediction applied to bim log data, an approach to develop a command recommender system for bim software application**. *Dissertação de Mestrado*. The University of North Carolina at Charlotte. 2021.

ROSATI, Carlo Alberto; CERVO, Andrea; FANTUZZI, Cesare. **Air quality monitoring in a BIM model by means of a IoT sensors network**. In: **2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)**. IEEE, 2020. p. 110-115.

RIBEIRO, Renan Rocha; JÚNIOR, Kléos Magalhães Lenz César. **Modelagem paramétrica baseada em objetos em BIM para o projeto estrutural: estudo de caso de fundações tipo tubulão**. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 12, p. e021029-e021029, 2021.

ROHWEDER, Anderson. **Estudo comparativo de perda de carga em dutos de seção retangular, circular e oblonga utilizados em sistemas de ar condicionado**. 2020. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)* – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

SALES, Luis Fernando; QUIRINO, Jonatas Motta. **Reutilização de descarga de exaustão de cozinhas para geração de energia elétrica**. *Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula*, v. 6, n. 2, p. 115-152, 2023.

SILVA, Hugo Campos Lima; MARTINS, Diego Alves de Moro. **Análise numérica da perda de carga turbulenta em dutos curvos**. XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018– Brasília, DF.

Santos, Antônio Manoel Rocha. **Uso do BIM com programação visual e ferramentas da Power Platform para automação de personalização de apartamentos**. São Cristóvão, 2023. Monografia (graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2024.

SANTOS, Paulo Henrique Rodrigues dos *et al.* **Avaliação do fluxo de ar e da perda de carga localizada em junções de dutos de ventilação industrial através da fluidodinâmica computacional (CFD)**. 2021. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. *Dissertação de Mestrado*.

SEIDENSCHNUR, Mikki *et al.* ***A common data environment for HVAC design and engineering***. 2022.

Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (SMACNA). **HVAC systems: duct design**. 4. ed. Chantilly: SMACNA, 2006.

SMYK, Emil; STOPEL, Michał; SZYCA, Mikołaj. ***Simulation of Flow and Pressure Loss in the Example of the Elbow***. *Water*, v. 16, n. 13, p. 1875, 2024.

VICTOR, Gabriel Uchôa. **Estudo computacional dos efeitos do sistema de ventilação forçada sobre o tempo disponível para evacuação de pessoas em um incêndio em compartimento**. 2020. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia Mecânica. Trabalho de Conclusão de Curso.

WIJEYSUNDERA, Nihal E. ***Principles of heating, ventilation and air conditioning with Worked Examples***. *World Scientific*, 2016.

YUAN, Bohan. ***Integrating BIM and Decision-Making System for HVAC Design of Low Rise Green Buildings***. 2020. Tese de Doutorado. *Université d'Ottawa/University of Ottawa*.

APÊNDICE A

Fórmulas para os parâmetros de perda de carga para o **cotovelo retangular suave e sem veios**:

- Status = if(Pressão atmosférica = 0 Pa, "Erro ao calcular o parâmetro Pressão atmosférica. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Densidade do ar = 0 kg/m³, "Erro ao calcular o parâmetro de Densidade do ar. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or(Cp = -1, K = -1), "Os parâmetros geométricos não compõem o intervalo da base de dados. Verifique os parâmetros geométricos da sua curva. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or([Umidade relativa do ar (%) < 0, or([Umidade relativa do ar (%) > 100]), "O valor da umidade relativa do ar deve compreender o intervalo de 0 a 100. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", "Valor de perda de carga encontrado!"))))
- Pressão atmosférica (Pa) = 101325 Pa * (1 - 2.25577 * (10 ^ -5) * (Altitude / 1 m)) ^ 5.2559
- Densidade do ar = (1 kg/m³ + (0.622 kg/m³ * ((([Umidade relativa do ar (%) / 100) * (exp(-5800.2206 / ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 0.000042 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 2 - 0 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 3 + 6.545967 * (log([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / 0.434294)) * 1 Pa)) / 1 Pa) / ((Pressão atmosférica / 1 Pa) - ((([Umidade relativa do ar (%) / 100) * (exp(-5800.2206 / ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 0.000042 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 2 - 0 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 3 + 6.545967 * (log([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / 0.434294)) * 1 Pa)) / 1 Pa)))) / ((287.058 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / (Pressão atmosférica / 1 Pa)) * (1 + 1.6079 * (0.622 * ((([Umidade relativa do ar (%) / 100) * (exp(-5800.2206 / ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 0.000042 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 2 - 0 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 3 + 6.545967 * (log([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / 0.434294)) * 1 Pa)) / 1 Pa)))) /

$$\frac{(\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa}}{1 \text{ Pa}} / \left(\left(\frac{\text{Pressão atmosférica}}{1 \text{ Pa}} \right) - \left(\left(\frac{[\text{Umidade relativa do ar } (\%)]}{100} \right) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa}) \right) \right)$$
 Área da seção: Valor de saída (Altura x Largura);

- Velocidade = Vazão / Área da seção
- Pressão dinâmica = Densidade do ar * (Vazão / Área da seção) ^ 2 / 2
- Perda de carga = (Densidade do ar * (Vazão / Área da seção) ^ 2 / 2) * Co
- HW = Altura do duto / Largura do duto
- Cp = size_lookup("CurvaRetangular_Cp", NomeColunaCp, -1, round(HW * 100) / 100)
- K = if(Ângulo < 0°, -1, if(Ângulo = 0°, 0, if(Ângulo < 20°, 0 + (Ângulo / 1°) * 0.0155, if(Ângulo = 20°, 0.31, if(Ângulo < 30°, 0.31 + ((Ângulo / 1°) - 20) * 0.014, if(Ângulo = 30°, 0.45, if(Ângulo < 45°, 0.45 + ((Ângulo / 1°) - 30) * 0.01, if(Ângulo = 45°, 0.6, if(Ângulo < 60°, 0.6 + ((Ângulo / 1°) - 45) * 0.012, if(Ângulo = 60°, 0.78, if(Ângulo < 75°, 0.78 + ((Ângulo / 1°) - 60) * 0.008, if(Ângulo = 75°, 0.9, if(Ângulo < 90°, 0.9 + ((Ângulo / 1°) - 75) * (0.1 / 15), if(Ângulo = 90°, 1, if(Ângulo < 110°, 1 + ((Ângulo / 1°) - 90) * 0.0065, if(Ângulo = 110°, 1.13, if(Ângulo < 130°, 1.13 + ((Ângulo / 1°) - 110) * 0.0035, if(Ângulo = 130°, 1.2, if(Ângulo < 150°, 1.2 + ((Ângulo / 1°) - 130) * 0.004, if(Ângulo = 150°, 1.28, if(Ângulo < 180°, 1.28 + ((Ângulo / 1°) - 150) * 0.004, if(Ângulo = 180°, 1.4, -1))))))))))))))))))))))
- Co = if(Cp > 0, Cp * K, -1)
- NomeColunaCp = if(Multiplicador de raio = 0.500001, "Cp_0_50", if(Multiplicador de raio = 0.75, "Cp_0_75", if(Multiplicador de raio = 1, "Cp_1_00", if(Multiplicador de raio = 1.5, "Cp_1_50", if(Multiplicador de raio = 2, "Cp_2_00", "INVALIDO"))))

Fórmulas para os parâmetros de perda de carga para o **cotovelo retangular com quina, sem veios e de áreas variáveis**:

- NOTA 1 = "Para fornecimento de ar, área A1 = entrada do fluxo; para ar de exaustão/retorno, área A1 = saída do fluxo."
- NOTA 2 = "Usar caixa 'Inverter fluxo' de ar conforme NOTA 1"
- Status = if(Pressão atmosférica = 0 Pa, "Erro ao calcular o parâmetro Pressão atmosférica. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Densidade do ar = 0 kg/m³, "Erro ao calcular o parâmetro de Densidade do ar. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Co = -1, "Os parâmetros geométricos não compõem o intervalo da base de dados. Verifique os parâmetros geométricos da sua curva. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or([Umidade relativa do ar (%) < 0, or([Umidade relativa do ar (%) > 100])), "O valor da umidade relativa do ar deve compreender o intervalo de 0 a 100. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", "Valor de perda de carga encontrado!"))))
- Ar de Exaustão/Retorno = not(Ar de fornecimento)
- A1 = if(Inverter fluxo de ar, Largura 2 * Altura, Largura 1 * Altura)
- A0 = if(Inverter fluxo de ar, Largura 1 * Altura, Largura 2 * Altura)
- Pressão atmosférica = 101325 Pa * (1 - 2.25577 * (10 ^ -5) * (Altitude / 1 m)) ^ 5.2559
- Densidade do ar = (1 kg/m³ + (0.622 kg/m³ * ((([Umidade relativa do ar (%) / 100) * (exp(-5800.2206 / ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 0.000042 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 2 - 0 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 3 + 6.545967 * (log([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / 0.434294)) * 1 Pa)) / 1 Pa) / ((Pressão atmosférica / 1 Pa) - ((([Umidade relativa do ar (%) / 100) * (exp(-5800.2206 / ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 0.000042 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 2 - 0 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 3 + 6.545967 * (log([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / 0.434294)) * 1 Pa)) / 1 Pa)))) / ((287.058 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / (Pressão atmosférica / 1 Pa)) * (1 + 1.6079 * (0.622 * ((([Umidade relativa do ar (%) / 100) * (exp(-5800.2206 / ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) + 0.000042 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 2 - 0 * ([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) ^ 3 + 6.545967 * (log([Temperatura do ar (°C)] + 273.15) / 0.434294)) * 1 Pa)) / 1 Pa)))) +

$$273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa}) / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar } (\%)]) / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa}))))))$$

- Velocidade de entrada = if(Ar de fornecimento, Vazão / A1, Vazão / A0)
- Velocidade de saída = if(Ar de fornecimento, Vazão / A0, Vazão / A1)
- Pressão dinâmica = (Densidade do ar * (Vazão / A0) ^ 2) / 2
- Perda de Carga = ((Densidade do ar * (Vazão / A0) ^ 2) / 2) * Co
- Co = if(Ar de fornecimento, size_lookup("CotoveloRetangular_INS", NomeColunaINS, -1, HW1), size_lookup("CotoveloRetangular_RET", NomeColunaRET, -1, HW0))
- NomeColunaINS = if(W0_W1 = 0.5, "W0_W1_0_50", if(W0_W1 = 0.6, "W0_W1_0_60", if(W0_W1 = 0.61, "W0_W1_0_61", if(W0_W1 = 0.62, "W0_W1_0_62", if(W0_W1 = 0.63, "W0_W1_0_63", if(W0_W1 = 0.64, "W0_W1_0_64", if(W0_W1 = 0.65, "W0_W1_0_65", if(W0_W1 = 0.66, "W0_W1_0_66", if(W0_W1 = 0.67, "W0_W1_0_67", if(W0_W1 = 0.68, "W0_W1_0_68", if(W0_W1 = 0.69, "W0_W1_0_69", if(W0_W1 = 0.7, "W0_W1_0_70", if(W0_W1 = 0.71, "W0_W1_0_71", if(W0_W1 = 0.72, "W0_W1_0_72", if(W0_W1 = 0.73, "W0_W1_0_73", if(W0_W1 = 0.74, "W0_W1_0_74", if(W0_W1 = 0.75, "W0_W1_0_75", if(W0_W1 = 0.76, "W0_W1_0_76", if(W0_W1 = 0.77, "W0_W1_0_77", if(W0_W1 = 0.78, "W0_W1_0_78", if(W0_W1 = 0.79, "W0_W1_0_79", if(W0_W1 = 0.8, "W0_W1_0_80", if(W0_W1 = 0.81, "W0_W1_0_81", if(W0_W1 = 0.82, "W0_W1_0_82", if(W0_W1 = 0.83, "W0_W1_0_83", if(W0_W1 = 0.84, "W0_W1_0_84", if(W0_W1 = 0.85, "W0_W1_0_85", if(W0_W1 = 0.86, "W0_W1_0_86", if(W0_W1 = 0.87, "W0_W1_0_87", if(W0_W1 = 0.88, "W0_W1_0_88", if(W0_W1 = 0.89, "W0_W1_0_89", if(W0_W1 = 0.9, "W0_W1_0_90", if(W0_W1 = 0.91, "W0_W1_0_91", if(W0_W1 = 0.92, "W0_W1_0_92", if(W0_W1 = 0.93, "W0_W1_0_93", if(W0_W1 = 0.94, "W0_W1_0_94", if(W0_W1 = 0.95, "W0_W1_0_95", if(W0_W1 = 0.96,

"W0_W1_0_96", if(W0_W1 = 0.97, "W0_W1_0_97", if(W0_W1 = 0.98,
 "W0_W1_0_98", if(W0_W1 = 0.99, "W0_W1_0_99", if(W0_W1 = 1,
 "W0_W1_1_00", if(W0_W1 = 1.01, "W0_W1_1_01", if(W0_W1 = 1.02,
 "W0_W1_1_02", if(W0_W1 = 1.03, "W0_W1_1_03", if(W0_W1 = 1.04,
 "W0_W1_1_04", if(W0_W1 = 1.05, "W0_W1_1_05", if(W0_W1 = 1.06,
 "W0_W1_1_06", if(W0_W1 = 1.07, "W0_W1_1_07", if(W0_W1 = 1.08,
 "W0_W1_1_08", if(W0_W1 = 1.09, "W0_W1_1_09", if(W0_W1 = 1.1,
 "W0_W1_1_10", if(W0_W1 = 1.11, "W0_W1_1_11", if(W0_W1 = 1.12,
 "W0_W1_1_12", if(W0_W1 = 1.13, "W0_W1_1_13", if(W0_W1 = 1.14,
 "W0_W1_1_14", if(W0_W1 = 1.15, "W0_W1_1_15", if(W0_W1 = 1.16,
 "W0_W1_1_16", if(W0_W1 = 1.17, "W0_W1_1_17", if(W0_W1 = 1.18,
 "W0_W1_1_18", if(W0_W1 = 1.19, "W0_W1_1_19", if(W0_W1 = 1.2,
 "W0_W1_1_20", if(W0_W1 = 1.21, "W0_W1_1_21", if(W0_W1 = 1.22,
 "W0_W1_1_22", if(W0_W1 = 1.23, "W0_W1_1_23", if(W0_W1 = 1.24,
 "W0_W1_1_24", if(W0_W1 = 1.25, "W0_W1_1_25", if(W0_W1 = 1.26,
 "W0_W1_1_26", if(W0_W1 = 1.27, "W0_W1_1_27", if(W0_W1 = 1.28,
 "W0_W1_1_28", if(W0_W1 = 1.29, "W0_W1_1_29", if(W0_W1 = 1.3,
 "W0_W1_1_30", if(W0_W1 = 1.31, "W0_W1_1_31", if(W0_W1 = 1.32,
 "W0_W1_1_32", if(W0_W1 = 1.33, "W0_W1_1_33", if(W0_W1 = 1.34,
 "W0_W1_1_34", if(W0_W1 = 1.35, "W0_W1_1_35", if(W0_W1 = 1.36,
 "W0_W1_1_36", if(W0_W1 = 1.37, "W0_W1_1_37", if(W0_W1 = 1.38,
 "W0_W1_1_38", if(W0_W1 = 1.39, "W0_W1_1_39", if(W0_W1 = 1.4,
 "W0_W1_1_40", if(W0_W1 = 1.41, "W0_W1_1_41", if(W0_W1 = 1.42,
 "W0_W1_1_42", if(W0_W1 = 1.43, "W0_W1_1_43", if(W0_W1 = 1.44,
 "W0_W1_1_44", if(W0_W1 = 1.45, "W0_W1_1_45", if(W0_W1 = 1.46,
 "W0_W1_1_46", if(W0_W1 = 1.47, "W0_W1_1_47", if(W0_W1 = 1.48,
 "W0_W1_1_48", if(W0_W1 = 1.49, "W0_W1_1_49", if(W0_W1 = 1.5,
 "W0_W1_1_50", if(W0_W1 = 1.51, "W0_W1_1_51", if(W0_W1 = 1.52,
 "W0_W1_1_52", if(W0_W1 = 1.53, "W0_W1_1_53", if(W0_W1 = 1.54,
 "W0_W1_1_54", if(W0_W1 = 1.55, "W0_W1_1_55", if(W0_W1 = 1.56,
 "W0_W1_1_56", if(W0_W1 = 1.57, "W0_W1_1_57", if(W0_W1 = 1.58,
 "W0_W1_1_58", if(W0_W1 = 1.59, "W0_W1_1_59", if(W0_W1 = 1.6,
 "W0_W1_1_60", if(W0_W1 = 1.61, "W0_W1_1_61", if(W0_W1 = 1.62,
 "W0_W1_1_62", if(W0_W1 = 1.63, "W0_W1_1_63", if(W0_W1 = 1.64,

"W1_W0_0_84", if(W1_W0 = 0.85, "W1_W0_0_85", if(W1_W0 = 0.86,
 "W1_W0_0_86", if(W1_W0 = 0.87, "W1_W0_0_87", if(W1_W0 = 0.88,
 "W1_W0_0_88", if(W1_W0 = 0.89, "W1_W0_0_89", if(W1_W0 = 0.9,
 "W1_W0_0_90", if(W1_W0 = 0.91, "W1_W0_0_91", if(W1_W0 = 0.92,
 "W1_W0_0_92", if(W1_W0 = 0.93, "W1_W0_0_93", if(W1_W0 = 0.94,
 "W1_W0_0_94", if(W1_W0 = 0.95, "W1_W0_0_95", if(W1_W0 = 0.96,
 "W1_W0_0_96", if(W1_W0 = 0.97, "W1_W0_0_97", if(W1_W0 = 0.98,
 "W1_W0_0_98", if(W1_W0 = 0.99, "W1_W0_0_99", if(W1_W0 = 1,
 "W1_W0_1_00", if(W1_W0 = 1.01, "W1_W0_1_01", if(W1_W0 = 1.02,
 "W1_W0_1_02", if(W1_W0 = 1.03, "W1_W0_1_03", if(W1_W0 = 1.04,
 "W1_W0_1_04", if(W1_W0 = 1.05, "W1_W0_1_05", if(W1_W0 = 1.06,
 "W1_W0_1_06", if(W1_W0 = 1.07, "W1_W0_1_07", if(W1_W0 = 1.08,
 "W1_W0_1_08", if(W1_W0 = 1.09, "W1_W0_1_09", if(W1_W0 = 1.1,
 "W1_W0_1_10", if(W1_W0 = 1.11, "W1_W0_1_11", if(W1_W0 = 1.12,
 "W1_W0_1_12", if(W1_W0 = 1.13, "W1_W0_1_13", if(W1_W0 = 1.14,
 "W1_W0_1_14", if(W1_W0 = 1.15, "W1_W0_1_15", if(W1_W0 = 1.16,
 "W1_W0_1_16", if(W1_W0 = 1.17, "W1_W0_1_17", if(W1_W0 = 1.18,
 "W1_W0_1_18", if(W1_W0 = 1.19, "W1_W0_1_19", if(W1_W0 = 1.2,
 "W1_W0_1_20", if(W1_W0 = 1.21, "W1_W0_1_21", if(W1_W0 = 1.22,
 "W1_W0_1_22", if(W1_W0 = 1.23, "W1_W0_1_23", if(W1_W0 = 1.24,
 "W1_W0_1_24", if(W1_W0 = 1.25, "W1_W0_1_25", if(W1_W0 = 1.26,
 "W1_W0_1_26", if(W1_W0 = 1.27, "W1_W0_1_27", if(W1_W0 = 1.28,
 "W1_W0_1_28", if(W1_W0 = 1.29, "W1_W0_1_29", if(W1_W0 = 1.3,
 "W1_W0_1_30", if(W1_W0 = 1.31, "W1_W0_1_31", if(W1_W0 = 1.32,
 "W1_W0_1_32", if(W1_W0 = 1.33, "W1_W0_1_33", if(W1_W0 = 1.34,
 "W1_W0_1_34", if(W1_W0 = 1.35, "W1_W0_1_35", if(W1_W0 = 1.36,
 "W1_W0_1_36", if(W1_W0 = 1.37, "W1_W0_1_37", if(W1_W0 = 1.38,
 "W1_W0_1_38", if(W1_W0 = 1.39, "W1_W0_1_39", if(W1_W0 = 1.4,
 "W1_W0_1_40", if(W1_W0 = 1.41, "W1_W0_1_41", if(W1_W0 = 1.42,
 "W1_W0_1_42", if(W1_W0 = 1.43, "W1_W0_1_43", if(W1_W0 = 1.44,
 "W1_W0_1_44", if(W1_W0 = 1.45, "W1_W0_1_45", if(W1_W0 = 1.46,
 "W1_W0_1_46", if(W1_W0 = 1.47, "W1_W0_1_47", if(W1_W0 = 1.48,
 "W1_W0_1_48", if(W1_W0 = 1.49, "W1_W0_1_49", if(W1_W0 = 1.5,
 "W1_W0_1_50", if(W1_W0 = 1.51, "W1_W0_1_51", if(W1_W0 = 1.52,

Fórmulas para os parâmetros de perda de carga para a **transição retangular**:

- NOTA 1 = "Para fornecimento de ar, área A1 = entrada do fluxo; para ar de exaustão/retorno, área A1 = saída do fluxo."
- NOTA 2 = "Usar caixa 'Inverter fluxo' de ar conforme NOTA 1"
- Status = if(Pressão atmosférica = 0 Pa, "Erro ao calcular o parâmetro Pressão atmosférica. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Densidade do ar = 0 kg/m³, "Erro ao calcular o parâmetro de Densidade do ar. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Co = -1, "Os parâmetros geométricos não compõem o intervalo da base de dados. Verifique os parâmetros geométricos da sua curva. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or([Umidade relativa do ar (%) < 0, or([Umidade relativa do ar (%) > 100])), "O valor da umidade relativa do ar deve compreender o intervalo de 0 a 100. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", "Valor de perda de carga encontrado!"))))
- Ar de Exaustão/Retorno = not(Ar de fornecimento)
- A1 = if(Inverter fluxo de ar, Area_conector_2, Area_conector_1)
- A0 = if(Inverter fluxo de ar, Area_conector_1, Area_conector_2)
- Pressão atmosférica = $101325 \text{ Pa} * (1 - 2.25577 * (10^{-5}) * (\text{Altitude} / 1 \text{ m}))^5.2559$
- Densidade do ar = $(1 \text{ kg/m}^3 + (0.622 \text{ kg/m}^3 * ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa}) / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa}))) / ((287.058 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / (\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa})) * (1 + 1.6079 * (0.622 * ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-$

$$5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa} / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar } (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa}))))))$$

- Velocidade = Vazão / A0
- Pressão dinâmica = (Densidade do ar * (Vazão / A0) ^ 2) / 2
- Perda de Carga = ((Densidade do ar * (Vazão / A0) ^ 2) / 2) * Co
- Co = if(and(Largura do duto 1 = Largura do duto 2, Num5 = Num6), if(Ar de fornecimento, size_lookup("TransicaoSimetrica_Fornecimento", NomeColunaCo, -1, round((A0 / A1) * 10 ^ 2) / 10 ^ 2), size_lookup("TransicaoSimetrica_Retorno", NomeColunaCo, -1, round((A0 / A1) * 10 ^ 2) / 10 ^ 2)), if(Ar de fornecimento, size_lookup("TransicaoPiramidal_Fornecimento", NomeColunaCo, -1, round((A0 / A1) * 10 ^ 2) / 10 ^ 2), size_lookup("TransicaoPiramidal_Retorno", NomeColunaCo, -1, round((A0 / A1) * 10 ^ 2) / 10 ^ 2)))
- Area_conector_1 = Largura do duto 1 * Altura do duto 1
- Area_conector_2 = Largura do duto 2 * Altura do duto 2
- NomeColunaCo = if(Ângulo = 10°, "Co_10deg", if(Ângulo = 15°, "Co_15deg", if(Ângulo = 20°, "Co_20deg", if(Ângulo = 30°, "Co_30deg", if(Ângulo = 45°, "Co_45deg", if(Ângulo = 60°, "Co_60deg", if(Ângulo = 90°, "Co_90deg", if(Ângulo = 120°, "Co_120deg", if(Ângulo = 150°, "Co_150deg", if(Ângulo = 180°, "Co_180deg", "INVALIDO")))))))))))
- Razao_A0_A1 = A0 / A1

Fórmulas para os parâmetros de perda de carga para o **tê retangular reto**:

- Status = if(and([Ar de Exaustão/Retorno], Altura do duto principal = Altura do ramal), "Inputs fora da base de dados. Verifique o tipo de sistema selecionado ou o valor de cada largura do tê. A perda de carga não pôde ser calculada

corretamente.", if(and(not(Altura do duto principal = Altura do ramal), not(Ar de fornecimento), not(Area_ramal_div_Area_principal = 0.5)), "Para o caso de larguras diferentes e sistema de Ar de Exaustão/Retorno, a sua geometria deve obedecer a relação [Área ramal / Área duto principal = 0.50]. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Pressão atmosférica = 0 Pa, "Erro ao calcular o parâmetro Pressão atmosférica. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(Densidade do ar = 0 kg/m³, "Erro ao calcular o parâmetro de Densidade do ar. Verifique seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or(Cs = -1, or(Cb = -1)), "Os parâmetros geométricos não compõem o intervalo da base de dados. Verifique a sua geometria de Tê. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or([Umidade relativa do ar (%) < 0, or([Umidade relativa do ar (%) > 100)), "O valor da umidade relativa do ar deve compreender o intervalo de 0 a 100. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", "Valor de perda de carga encontrado!"))))))

- Ar de Exaustão/Retorno = not(Ar de fornecimento)
- Pressão atmosférica (Pa) = $101325 \text{ Pa} * (1 - 2.25577 * (10^{-5}) * (\text{Altitude} / 1 \text{ m}))^5$
- Vazão principal de saída = if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal)
- Densidade do ar = $(1 \text{ kg/m}^3 + (0.622 \text{ kg/m}^3 * ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa}) / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa}))) / ((287.058 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / (\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa})) * (1 + 1.6079 * (0.622 * ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa})))$

$$273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa}) / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar } (\%)]) / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar } (^{\circ}\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa}) / 1 \text{ Pa}))))))$$

- Área duto principal = Largura do duto principal * Altura do duto principal
- Área ramal = Largura do ramal * Altura do ramal
- Velocidade principal de entrada = Vazão principal de entrada / Área duto principal
- Velocidade principal de saída = if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal) / Área duto principal
- Velocidade ramal = Vazão ramal / Área ramal
- Pressão dinâmica principal = Densidade do ar * (if(Ar de fornecimento, (Vazão principal de entrada / Área duto principal), if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal) / Área duto principal)) ^ 2 / 2
- Pressão dinâmica ramal = Densidade do ar * (Vazão ramal / Área ramal) ^ 2 / 2
- Perda de carga principal = Pressão dinâmica principal * Cs
- Perda de carga ramal = Pressão dinâmica ramal * Cb
- Cs = if(and(Altura do duto principal = Altura do ramal, Ar de fornecimento), size_lookup("Cs_te_reto_igual_div", "Cs_igual_div", -1, Qs_Qc_div), if(and(not(Altura do duto principal = Altura do ramal), Ar de fornecimento), size_lookup("Cs_te_reto_dif_div", "Cs_dif_div", -1, Vs_Vc_div), if(and(not(Altura do duto principal = Altura do ramal), not(Ar de fornecimento)), size_lookup("Cs_te_reto_dif_conv", "Cs_dif_conv", -1, Qs_Qc_conv), -1)))
- Cb = if(and(Altura do duto principal = Altura do ramal, Ar de fornecimento), size_lookup("Cb_te_reto_igual_div", NomeColunaCb_igual_div, -1, Ab_Ac_div), if(and(not(Altura do duto principal = Altura do ramal), Ar de fornecimento), size_lookup("Cb_te_reto_dif_div", NomeColunaCb_dif_div, -1,

Vb_Vc_div), if(and(not(Altura do duto principal = Altura do ramal), not(Ar de fornecimento)), size_lookup("Cb_te_reto_dif_conv", NomeColunaCb_dif_conv, -1, Qb_Qc_conv), -1)))

- $\text{Area_ramal_Div_Area_principal} = \text{round}((\text{Área ramal} / \text{Área duto principal}) * 100) / 100$
- $\text{Qs_Qc_div} = \text{round}((\text{Vazão principal de saída} / \text{Vazão principal de entrada}) * 100) / 100$
- $\text{Ab_Ac_div} = \text{round}((\text{Área ramal} / \text{Área duto principal}) * 100) / 100$
- $\text{Qb_Qc_div} = \text{round}((\text{Vazão ramal} / \text{Vazão principal de entrada}) * 100) / 100$
- $\text{Vs_Vc_div} = \text{round}((\text{Velocidade principal de saída} / \text{Velocidade principal de entrada}) * 100) / 100$
- $\text{Vb_Vc_div} = \text{round}((\text{Velocidade ramal} / \text{Velocidade principal de entrada}) * 100) / 100$
- $\text{Qs_Qc_conv} = \text{round}((\text{Vazão principal de entrada} / \text{Vazão principal de saída}) * 100) / 100$
- $\text{Qb_Qc_conv} = \text{round}((\text{Vazão ramal} / \text{Vazão principal de saída}) * 100) / 100$
- $\text{Vc_conv} = \text{round}((\text{Velocidade principal de saída} / 1 \text{ m/s}) * 100) / 100$
- $\text{NomeColunaCs} = \text{if}(\text{and}(\text{Altura do duto principal} = \text{Altura do ramal}, \text{Ar de fornecimento}), \text{"Cs_igual_div"}, \text{if}(\text{and}(\text{not}(\text{Altura do duto principal} = \text{Altura do ramal}), \text{Ar de fornecimento}), \text{"Cs_dif_div"}, \text{if}(\text{and}(\text{not}(\text{Altura do duto principal} = \text{Altura do ramal}), \text{not}(\text{Ar de fornecimento})), \text{"Cs_dif_conv"}, \text{"INVALIDO"})))$
- $\text{NomeColunaCb_igual_div} = \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.1, \text{"Qb_Qc_div_0_10"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.11, \text{"Qb_Qc_div_0_11"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.12, \text{"Qb_Qc_div_0_12"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.13, \text{"Qb_Qc_div_0_13"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.14, \text{"Qb_Qc_div_0_14"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.15, \text{"Qb_Qc_div_0_15"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.16, \text{"Qb_Qc_div_0_16"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.17, \text{"Qb_Qc_div_0_17"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.18, \text{"Qb_Qc_div_0_18"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.19, \text{"Qb_Qc_div_0_19"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.2, \text{"Qb_Qc_div_0_20"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.21, \text{"Qb_Qc_div_0_21"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.22, \text{"Qb_Qc_div_0_22"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.23, \text{"Qb_Qc_div_0_23"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.24, \text{"Qb_Qc_div_0_24"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.25, \text{"Qb_Qc_div_0_25"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.26, \text{"Qb_Qc_div_0_26"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.27, \text{"Qb_Qc_div_0_27"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} = 0.28, \text{"Qb_Qc_div_0_28"}, \text{if}(\text{Qb_Qc_div} =$

0.29, "Qb_Qc_div_0_29", if(Qb_Qc_div = 0.3, "Qb_Qc_div_0_30",
 if(Qb_Qc_div = 0.31, "Qb_Qc_div_0_31", if(Qb_Qc_div = 0.32,
 "Qb_Qc_div_0_32", if(Qb_Qc_div = 0.33, "Qb_Qc_div_0_33", if(Qb_Qc_div =
 0.34, "Qb_Qc_div_0_34", if(Qb_Qc_div = 0.35, "Qb_Qc_div_0_35",
 if(Qb_Qc_div = 0.36, "Qb_Qc_div_0_36", if(Qb_Qc_div = 0.37,
 "Qb_Qc_div_0_37", if(Qb_Qc_div = 0.38, "Qb_Qc_div_0_38", if(Qb_Qc_div =
 0.39, "Qb_Qc_div_0_39", if(Qb_Qc_div = 0.4, "Qb_Qc_div_0_40",
 if(Qb_Qc_div = 0.41, "Qb_Qc_div_0_41", if(Qb_Qc_div = 0.42,
 "Qb_Qc_div_0_42", if(Qb_Qc_div = 0.43, "Qb_Qc_div_0_43", if(Qb_Qc_div =
 0.44, "Qb_Qc_div_0_44", if(Qb_Qc_div = 0.45, "Qb_Qc_div_0_45",
 if(Qb_Qc_div = 0.46, "Qb_Qc_div_0_46", if(Qb_Qc_div = 0.47,
 "Qb_Qc_div_0_47", if(Qb_Qc_div = 0.48, "Qb_Qc_div_0_48", if(Qb_Qc_div =
 0.49, "Qb_Qc_div_0_49", if(Qb_Qc_div = 0.5, "Qb_Qc_div_0_50",
 if(Qb_Qc_div = 0.51, "Qb_Qc_div_0_51", if(Qb_Qc_div = 0.52,
 "Qb_Qc_div_0_52", if(Qb_Qc_div = 0.53, "Qb_Qc_div_0_53", if(Qb_Qc_div =
 0.54, "Qb_Qc_div_0_54", if(Qb_Qc_div = 0.55, "Qb_Qc_div_0_55",
 if(Qb_Qc_div = 0.56, "Qb_Qc_div_0_56", if(Qb_Qc_div = 0.57,
 "Qb_Qc_div_0_57", if(Qb_Qc_div = 0.58, "Qb_Qc_div_0_58", if(Qb_Qc_div =
 0.59, "Qb_Qc_div_0_59", if(Qb_Qc_div = 0.6, "Qb_Qc_div_0_60",
 if(Qb_Qc_div = 0.61, "Qb_Qc_div_0_61", if(Qb_Qc_div = 0.62,
 "Qb_Qc_div_0_62", if(Qb_Qc_div = 0.63, "Qb_Qc_div_0_63", if(Qb_Qc_div =
 0.64, "Qb_Qc_div_0_64", if(Qb_Qc_div = 0.65, "Qb_Qc_div_0_65",
 if(Qb_Qc_div = 0.66, "Qb_Qc_div_0_66", if(Qb_Qc_div = 0.67,
 "Qb_Qc_div_0_67", if(Qb_Qc_div = 0.68, "Qb_Qc_div_0_68", if(Qb_Qc_div =
 0.69, "Qb_Qc_div_0_69", if(Qb_Qc_div = 0.7, "Qb_Qc_div_0_70",
 if(Qb_Qc_div = 0.71, "Qb_Qc_div_0_71", if(Qb_Qc_div = 0.72,
 "Qb_Qc_div_0_72", if(Qb_Qc_div = 0.73, "Qb_Qc_div_0_73", if(Qb_Qc_div =
 0.74, "Qb_Qc_div_0_74", if(Qb_Qc_div = 0.75, "Qb_Qc_div_0_75",
 if(Qb_Qc_div = 0.76, "Qb_Qc_div_0_76", if(Qb_Qc_div = 0.77,
 "Qb_Qc_div_0_77", if(Qb_Qc_div = 0.78, "Qb_Qc_div_0_78", if(Qb_Qc_div =
 0.79, "Qb_Qc_div_0_79", if(Qb_Qc_div = 0.8, "Qb_Qc_div_0_80",
 if(Qb_Qc_div = 0.81, "Qb_Qc_div_0_81", if(Qb_Qc_div = 0.82,
 "Qb_Qc_div_0_82", if(Qb_Qc_div = 0.83, "Qb_Qc_div_0_83", if(Qb_Qc_div =
 0.84, "Qb_Qc_div_0_84", if(Qb_Qc_div = 0.85, "Qb_Qc_div_0_85",

seus valores de entrada. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or(Cs = -1, Cb = -1), "Os parâmetros geométricos não compõem o intervalo da base de dados. Verifique a sua geometria de Tê. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", if(or([Umidade relativa do ar (%) < 0, or([Umidade relativa do ar (%) > 100)), "O valor da umidade relativa do ar deve compreender o intervalo de 0 a 100. A perda de carga não pôde ser calculada corretamente.", "Valor de perda de carga encontrado!"))))

- Ar de Exaustão/Retorno = not(Ar de fornecimento)
- Pressão atmosférica = $101325 \text{ Pa} * (1 - 2.25577 * (10^{-5}) * (\text{Altitude} / 1 \text{ m}))^5.2559$
- Vazão principal de saída = if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal)
- Densidade do ar = $(1 \text{ kg/m}^3 + (0.622 \text{ kg/m}^3 * ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa})) / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa}))) / ((287.058 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / (\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa})) * (1 + 1.6079 * (0.622 * ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa})) / ((\text{Pressão atmosférica} / 1 \text{ Pa}) - ((([\text{Umidade relativa do ar} (\%)] / 100) * (\exp(-5800.2206 / ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 1.391499 - 0.04864 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) + 0.000042 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^2 - 0 * ([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15)^3 + 6.545967 * (\log([\text{Temperatura do ar} (^\circ\text{C})] + 273.15) / 0.434294)) * 1 \text{ Pa})) / 1 \text{ Pa}))))))$

- Área duto principal = Largura do duto principal * Altura do duto principal
- Área ramal = Largura do ramal * Altura do ramal
- Velocidade principal de entrada = Vazão principal de entrada / Área duto principal
- Velocidade principal de saída = if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal) / Área duto principal
- Velocidade ramal = Vazão ramal / Área ramal
- Pressão dinâmica principal = Densidade do ar * (if(Ar de fornecimento, (Vazão principal de entrada / Área duto principal), if(Ar de fornecimento, Vazão principal de entrada - Vazão ramal, Vazão principal de entrada + Vazão ramal) / Área duto principal)) ^ 2 / 2
- Pressão dinâmica ramal = Densidade do ar * (Vazão ramal / Área ramal) ^ 2 / 2
- Perda de carga principal = Pressão dinâmica principal * Cs
- Perda de carga ramal = Pressão dinâmica ramal * Cb
- Cs = if(Ar de fornecimento, size_lookup("Cs_te_45_dif_div", "Cs_dif_div", -1, Vs_Vc_div), if(not(Ar de fornecimento), size_lookup("Cs_te_45_dif_conv", "Cs_dif_conv", -1, Qs_Qc_conv), -1))
- Cb = if(Ar de fornecimento, size_lookup("Cb_te_45_dif_div", NomeColunaCb_dif_div, -1, Vb_Vc_div), if(not(Ar de fornecimento), size_lookup("Cb_te_45_dif_conv", NomeColunaCb_dif_conv, -1, Qb_Qc_conv), -1))
- Area_ramal_Div_Area_principal = round((Área ramal / Área duto principal) * 100) / 100
- Qb_Qs_div = round((Vazão ramal / Vazão principal de saída) * 100) / 100
- Vb_Vc_div = round((Velocidade ramal / Velocidade principal de entrada) * 100) / 100
- Vs_Vc_div = round((Velocidade principal de saída / Velocidade principal de entrada) * 100) / 100
- Qs_Qc_conv = round((Vazão principal de entrada / Vazão principal de saída) * 100) / 100
- Qb_Qc_conv = round((Vazão ramal / Vazão principal de saída) * 100) / 100

- $Vc_conv = \text{round}((\text{Velocidade principal de saída} / 1 \text{ m/s}) * 100) / 100$
- $\text{NomeColunaCs} = \text{if}(\text{Ar de fornecimento}, "Cs_dif_div", \text{if}(\text{not}(\text{Ar de fornecimento}), "Cs_dif_conv", "INVALIDO"))$
- $\text{NomeColunaCb_dif_div} = \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.1, "Qb_Qs_div_0_10", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.11, "Qb_Qs_div_0_11", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.12, "Qb_Qs_div_0_12", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.13, "Qb_Qs_div_0_13", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.14, "Qb_Qs_div_0_14", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.15, "Qb_Qs_div_0_15", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.16, "Qb_Qs_div_0_16", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.17, "Qb_Qs_div_0_17", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.18, "Qb_Qs_div_0_18", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.19, "Qb_Qs_div_0_19", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.2, "Qb_Qs_div_0_20", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.21, "Qb_Qs_div_0_21", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.22, "Qb_Qs_div_0_22", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.23, "Qb_Qs_div_0_23", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.24, "Qb_Qs_div_0_24", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.25, "Qb_Qs_div_0_25", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.26, "Qb_Qs_div_0_26", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.27, "Qb_Qs_div_0_27", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.28, "Qb_Qs_div_0_28", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.29, "Qb_Qs_div_0_29", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.3, "Qb_Qs_div_0_30", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.31, "Qb_Qs_div_0_31", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.32, "Qb_Qs_div_0_32", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.33, "Qb_Qs_div_0_33", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.34, "Qb_Qs_div_0_34", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.35, "Qb_Qs_div_0_35", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.36, "Qb_Qs_div_0_36", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.37, "Qb_Qs_div_0_37", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.38, "Qb_Qs_div_0_38", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.39, "Qb_Qs_div_0_39", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.4, "Qb_Qs_div_0_40", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.41, "Qb_Qs_div_0_41", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.42, "Qb_Qs_div_0_42", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.43, "Qb_Qs_div_0_43", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.44, "Qb_Qs_div_0_44", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.45, "Qb_Qs_div_0_45", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.46, "Qb_Qs_div_0_46", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.47, "Qb_Qs_div_0_47", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.48, "Qb_Qs_div_0_48", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.49, "Qb_Qs_div_0_49", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.5, "Qb_Qs_div_0_50", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.51, "Qb_Qs_div_0_51", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.52, "Qb_Qs_div_0_52", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.53, "Qb_Qs_div_0_53", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.54, "Qb_Qs_div_0_54", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.55, "Qb_Qs_div_0_55", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.56, "Qb_Qs_div_0_56", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.57, "Qb_Qs_div_0_57", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.58, "Qb_Qs_div_0_58", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.59, "Qb_Qs_div_0_59", \text{if}(\text{Qb_Qs_div} = 0.6, "Qb_Qs_div_0_60",$

```

if(Qb_Qs_div = 0.61, "Qb_Qs_div_0_61", if(Qb_Qs_div = 0.62,
"Qb_Qs_div_0_62", if(Qb_Qs_div = 0.63, "Qb_Qs_div_0_63", if(Qb_Qs_div =
0.64, "Qb_Qs_div_0_64", if(Qb_Qs_div = 0.65, "Qb_Qs_div_0_65",
if(Qb_Qs_div = 0.66, "Qb_Qs_div_0_66", if(Qb_Qs_div = 0.67,
"Qb_Qs_div_0_67", if(Qb_Qs_div = 0.68, "Qb_Qs_div_0_68", if(Qb_Qs_div =
0.69, "Qb_Qs_div_0_69", if(Qb_Qs_div = 0.7, "Qb_Qs_div_0_70",
if(Qb_Qs_div = 0.71, "Qb_Qs_div_0_71", if(Qb_Qs_div = 0.72,
"Qb_Qs_div_0_72", if(Qb_Qs_div = 0.73, "Qb_Qs_div_0_73", if(Qb_Qs_div =
0.74, "Qb_Qs_div_0_74", if(Qb_Qs_div = 0.75, "Qb_Qs_div_0_75",
if(Qb_Qs_div = 0.76, "Qb_Qs_div_0_76", if(Qb_Qs_div = 0.77,
"Qb_Qs_div_0_77", if(Qb_Qs_div = 0.78, "Qb_Qs_div_0_78", if(Qb_Qs_div =
0.79, "Qb_Qs_div_0_79", if(Qb_Qs_div = 0.8, "Qb_Qs_div_0_80",
if(Qb_Qs_div = 0.81, "Qb_Qs_div_0_81", if(Qb_Qs_div = 0.82,
"Qb_Qs_div_0_82", if(Qb_Qs_div = 0.83, "Qb_Qs_div_0_83", if(Qb_Qs_div =
0.84, "Qb_Qs_div_0_84", if(Qb_Qs_div = 0.85, "Qb_Qs_div_0_85",
if(Qb_Qs_div = 0.86, "Qb_Qs_div_0_86", if(Qb_Qs_div = 0.87,
"Qb_Qs_div_0_87", if(Qb_Qs_div = 0.88, "Qb_Qs_div_0_88", if(Qb_Qs_div =
0.89, "Qb_Qs_div_0_89", if(Qb_Qs_div = 0.9, "Qb_Qs_div_0_90",
if(Qb_Qs_div = 1, "Qb_Qs_div_1_00", "INVA-
LIDO"))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))

```

- NomeColunaCb_dif_conv = if(Vc_conv < 6.096, "Vc_menor_1200", if(Vc_conv = 6.096, "Vc_maior_1200", "Vc_maior_1200"))