

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Otimização do Escoamento do Vento na Faculdade do Gama da UnB: Um Estudo Computacional

Autor: Giovanna Fujimura Soares
Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noleto

Brasília, DF
2022



Giovanna Fujimura Soares

Otimização do escoamento do Vento na Faculdade do Gama da UnB: Um Estudo Computacional

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF

2022

Giovanna Fujimura Soares

Otimização do Escoamento do Vento na Faculdade do Gama da UnB: Um
Estudo Computacional/ Giovanna Fujimura Soares. – Brasília, DF, 2022-
79 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noleto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Análise de Fluido Computacional. 2. Escoamento do Vento. I. Prof. Dr.
Luciano Gonçalves Noleto. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB
Gama. IV. Otimização do Escoamento do Vento na Faculdade do Gama da UnB:
Um Estudo Computacional

CDU 02:141:005.6

Giovanna Fujimura Soares

Otimização do Escoamento do Vento na Faculdade do Gama da UnB: Um Estudo Computacional

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 15 de fevereiro de 2023:

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto
Orientador

**Prof. Dr. Rafael Castilho Faria
Mendes**
Convidado 1

Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha
Convidado 2

Brasília, DF
2022

*Para todos aqueles que já duvidaram do seu potencial.
Você consegue também.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que permitiu que eu chegasse até aqui e me sustenta todos os dias.

Aos meus pais, José Roberto e Marisa, que nunca mediram esforços pra que meus sonhos fossem alcançados. E ao meu irmão, Matheus, que sempre foi uma fonte de inspiração. Sem o apoio e o exemplo de vocês eu não estaria aqui hoje.

Ao meu noivo, Gustavo, pelas palavras de motivação, pelo incentivo e paciência, por sonhar esses sonhos junto comigo. E a meus sogros, que juntamente me apoiaram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Noletto, por me confiar este trabalho e me mostrar que ele não precisa ser um monstro de sete cabeças.

A todos aqueles, amigos e familiares, que torceram por mim de longe e acreditaram na minha capacidade.

Aos professores que marcaram minha jornada e me formaram na pessoa que sou hoje.

Obrigada.

*“Conheça todas as teorias,
domine todas as técnicas,
mas ao tocar uma alma humana,
seja apenas outra alma humana.”
(Carl G. Jung)*

Resumo

O vento é um fenômeno natural que influencia diversos aspectos do nosso cotidiano, ainda que, por vezes, sua ação passe despercebida. Quando analisamos seus efeitos em conjunto com a presença de construções, os resultados podem variar drasticamente - as áreas com geração de vórtices e turbulências geradas pela presença de corpos imersos no escoamento impacta diretamente no conforto e segurança da comunidade ali presente, além de afetar atividades dependente do vento, como voo de drones, levantamento de balões e até mesmo movimentação de pássaros. Desta maneira, o presente trabalho consiste em analisar o domínio da Faculdade do Gama (FGA) da Universidade de Brasília e as influências que o mesmo sofre devido à ação dos ventos do local. Para tal, foi utilizado o método da Fluidodinâmica Computacional (CFD). Atualmente, este é um dos métodos mais utilizados para a análise de escoamento de fluidos, visto que permite uma visualização detalhada de seu comportamento. Além disso, procura-se apontar as áreas de maior turbulência no *campus*, com a finalidade de sugerir propostas de otimização do fluxo através de modificações da geometria dos prédios. Foi possível notar que as três propostas colocadas no projeto (ampliação das paredes, geometria de cantos e utilização de *spoilers*) permitem atender ao propósito do projeto de modos diferentes, sendo necessária uma análise mais profunda para a determinação do método mais adequado.

Palavras-chaves: ação do vento sobre edifícios; otimização do vento; fluidodinâmica computacional.

Abstract

The wind is a natural phenomenon that influences various aspects of our daily life, even though, sometimes, its consequence goes unnoticed. When we analyze its effects along with the presence of buildings, the results may vary drastically – areas with a formation of vortex and turbulence generated due to the presence of disturbing bodies inside the flow directly impacts the comfort and safety of the community, further, it affects activities that are dependent on the wind flow, such as drone flight, lifting of balloons as well as bird migration. Thus, the present work consists in evaluating the domain which encapsules Faculdade do Gama (FGA) from Universidade de Brasília and the influences it suffers due to the actions of local wind. Therefore, the method of Computational Fluid Dynamics (CFD) was utilized, which is, nowadays, one of the most applied methods in analyses concerning fluid flow, considering it allows a detailed visualization of the flow behavior. Furthermore, we expect to accentuate the areas where greater turbulence exists on campus, with the intent of recommending flow optimization methods through modification of building geometry. We were able to notice that the suggestions presented here (extension of walls, corner geometry and application of spoilers) allow for the fulfillment of the project in distinct ways, granting that a more in-depth analysis is needed in order to determine the most appropriate method.

Key-words: wind action in buildings; optimization of wind; computational fluid dynamics.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Resultados para coeficientes de pressão com a utilização de parapeitos porosos. Fonte: (SURRY; LIN, 1995)	35
Figura 2 – Visualização do fluxo sobre beirais arredondados (esquerda) e angulosos (direita). Fonte: (ROBERTSON, 1991)	36
Figura 3 – Princípio de ação dos dispositivos perturbadores. Fonte: (WU; SARKAR; MEHTA, 2001)	38
Figura 4 – Disposição dos <i>spoilers</i> do tipo E. Fonte: (LI; GAN; LI, 2018)	38
Figura 5 – Domínio computacional a ser considerado.	39
Figura 6 – Detalhe dos edifícios a serem considerados na simulação.	40
Figura 7 – Vista aérea da localização das linhas de análise.	41
Figura 8 – Vista em perspectiva da localização das linhas de análise.	41
Figura 9 – Localização do domínio em relação ao eixo do plano xy	42
Figura 10 – Ilustração da malha utilizada.	42
Figura 11 – Detalhamento da malha nas proximidades dos prédios.	43
Figura 12 – Detalhamento da malha próxima ao LDTEA.	43
Figura 13 – Qualidade ortogonal da malha.	44
Figura 14 – Assimetria da malha.	44
Figura 15 – Região de entrada para as primeiras condições de contorno.	45
Figura 16 – Região de entrada para as segundas condições de contorno.	45
Figura 17 – Ilustração do LDTEA sem modificação na geometria.	48
Figura 18 – Ilustração do LDTEA com a modificação de cantos chanfrados.	48
Figura 19 – Ilustração do LDTEA com a modificação de cantos arredondados de raio $2,5m$	49
Figura 20 – Ilustração do LDTEA com a modificação de cantos arredondados de raio $3,5m$	49
Figura 21 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito contínuo maciço.	50
Figura 22 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito descontínuo maciço.	51
Figura 23 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito contínuo poroso.	51
Figura 24 – Detalhe do parapeito contínuo poroso.	52
Figura 25 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito descontínuo poroso.	52
Figura 26 – Detalhe do parapeito descontínuo poroso.	53
Figura 27 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 1.	53
Figura 28 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 2.	54
Figura 29 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 3.	55

Figura 30 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 4.	55
Figura 31 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 5.	56
Figura 32 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 6.	57
Figura 33 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 7.	57
Figura 34 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 8.	58
Figura 35 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 9.	58
Figura 36 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 10.	59
Figura 37 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 11.	59
Figura 38 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 12.	60
Figura 39 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 1.	60
Figura 40 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 2.	61
Figura 41 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 3.	62
Figura 42 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 4.	62
Figura 43 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 5.	63
Figura 44 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 6.	64
Figura 45 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 7.	64
Figura 46 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 8.	65
Figura 47 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 9.	65
Figura 48 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 10.	66
Figura 49 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 11.	66
Figura 50 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 12.	67
Figura 51 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso sem modificação.	68
Figura 52 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso chanfrado.	68
Figura 53 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso com arredondamento de 3,5m.	69
Figura 54 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso com parapeito poroso descontínuo.	69
Figura 55 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso sem modificação.	70
Figura 56 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso chanfrado.	71
Figura 57 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso com arredondamento de 3,5m.	71
Figura 58 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso com parapeito poroso descontínuo.	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação dos resultados de forças com variações na geometria para o caso FGA 1	72
Tabela 2 – Comparação dos resultados de forças com variações na geometria para o caso FGA 2	73

Lista de abreviaturas e siglas

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FGA	Faculdade do Gama
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LDTEA	Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas
MESP	Módulo de Serviços e Equipamentos Esportivos
SST	<i>Shear-Stress Transport</i>
UAC	Unidade Acadêmica
UED	Unidade de Ensino e Docência

Lista de símbolos

α	Constante de turbulência
β	Constante de turbulência
β'	Constante de turbulência
σ_k	Constante de turbulência
σ_ω	Constante de turbulência
k	Energia cinética de turbulência
ε	Dissipação turbulenta
ω	Dissipação por unidade de energia cinética turbulenta
ρ	Peso específico

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação	25
1.2	Otimização	25
1.3	Objetivo Geral	27
1.4	Objetivos Específicos	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	Efeitos do Vento Sobre Edifícios	29
2.1.1	Turbulência	30
2.2	Revisão Bibliográfica	31
2.3	Fluidodinâmica Computacional	31
2.3.1	Modelagem do escoamento	32
2.3.2	Modelos de Turbulência	33
3	PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO	35
3.1	Ampliação das paredes	35
3.2	Geometria de cantos	36
3.3	Utilização de <i>spoilers</i>	37
4	MODELAGEM DO PROBLEMA	39
4.1	Domínio Analisado	39
4.2	Linhas de Análise	40
4.3	Malha	42
4.4	Condições de Contorno	44
4.5	Solução	46
5	RESULTADOS	47
5.1	Modificações na geometria	47
5.1.1	Sem modificação da geometria	47
5.1.2	Cantos chanfrados	48
5.1.3	Cantos arredondados com raio $2,5m$	48
5.1.4	Cantos arredondados com raio $3,5m$	49
5.1.5	Parapeito contínuo maciço	49
5.1.6	Parapeito descontínuo maciço	50
5.1.7	Parapeito contínuo poroso	51
5.1.8	Parapeito descontínuo poroso	52

5.2	Resultados de perfil de velocidade	53
5.2.1	FGA 1	53
5.2.2	FGA 2	60
5.3	Resultados de linhas de velocidade	67
5.3.1	FGA 1	67
5.3.2	FGA 2	70
5.4	Resultados de força	72
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 Introdução

1.1 Motivação

O vento pode ser entendido como a movimentação que ocorre devido a diferenças de pressão nas massas de ar (BLESSMANN, 1995) e, ainda que seja um fenômeno natural, seus efeitos possuem consequências em diversos cenários. Neste trabalho, será levado em conta principalmente o efeito de ventos em construções, mais precisamente nas imediações que englobam o campus do Gama da Universidade de Brasília, e seus impactos nas edificações e na movimentação de drones.

Considerando o crescimento da utilização dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para fins profissionais, bem como dos drones para fins recreativos, é importante que o campus em questão – que comporta o curso de Engenharia Aeroespacial – colabore com o desenvolvimento dessa área do mercado. Deste modo, é relevante considerar a adequação dos espaços do campus para voos de tais equipamentos. Em seu trabalho, (SORBELLI et al., 2021) disserta sobre a influência do vento no consumo de energia durante um voo de drone. Considerando, por exemplo, drones utilizados atualmente nos serviços de entrega de empresas como *Amazon* (SINGIREDDY; DAIM, 2018), é de interesse de ambos a empresa e o consumidor que a entrega seja feita da maneira mais rápida possível, ou seja, o drone deve buscar o caminho de menor consumo de energia. Para calcular a rota a ser feita, o aparelho leva em conta variáveis como a distância a ser percorrida, a velocidade e o peso de carga; entretanto, variáveis externas não previsíveis, tal como pode ser o vento, gera afastamento da rota ideal e diminuição da bateria além do previsto (PALAZZETTI, 2021)(SORBELLI et al., 2021). Ademais, estudos de (HWANG; CHA; JUNG, 2018) demonstram que condições adversas de vento podem influenciar grandemente a resistência do drone – ventos na direção vertical têm efeito similar ao causado pela mudança de carga paga em drones de serviços de entrega. Isto posto, é evidente a importância do estudo das condições de vento mediante voos de drones, bem como da otimização de um fluxo controlado.

1.2 Otimização

De acordo com os trabalhos realizados (MACEDO, 2021), foi possível observar a presença de regiões de recirculação que podem ser turbulentas na Faculdade do Gama, de modo que algumas áreas específicas sofrem maior influência do vento do que outras. É possível destacar turbulências excessivas entre o MESP e o UAC por consequência da interferência de esteira; além disso, observam-se vórtices elevados na lateral do LDTEA.

Levando em consideração os pontos constatados, é fácil notar que o vento no campus pode gerar desconforto para os discentes e docentes da faculdade, bem como interfere na dispersão de poeira e levantamento de voo de drones.

Diante destes fatos, levantou-se como primeira proposta de otimização da dispersão do vento na faculdade a ampliação das paredes envoltórias ao redor dos prédios UAC e UED da faculdade – isto pode ser analisado de maneira semelhante à utilização de um parapeito. De acordo com (KOPP; MANS; SURRY, 2005), a inserção de um parapeito no edifício tem a intenção de elevar os vórtices criados nos cantos da parede a fim de que eles não mais afetem o telhado de maneira excessiva. A colocação de um parapeito pode diminuir a pressão de sucção em mais de 50% - contudo, quanto maior o parapeito, maior a carga estrutural suportada pelo edifício, portanto para os objetivos propostos pretende-se aumentar a parede envoltória em pequena escala.

De acordo com estudos (CHING; ONOUE; ZUBERBUHLER, 2009), os efeitos da pressão sobre um corpo podem ser modificados de acordo com o seu formato – corpos arredondados (ou com os denominados “perfis aerodinâmicos”) provocam um escoamento mais uniforme ao redor de si, minimizando o aparecimento de turbulências. Isto considerado, avalia-se como uma outra proposta de otimização a adaptação dos cantos retos das paredes para formatos arredondados através da utilização de chanfros, arredondamentos ou inclinações. Em seu trabalho, (ALY; BRESOWAR, 2016) relata que cantos chanfrados podem levar à redução do arrasto sofrido pela construção inteira quando construídos na devida proporção de tamanho; entretanto, os resultados mostrados indicam que o arredondamento dos cantos não é recomendado em nenhuma escala uma vez que apresentam aumento nas forças de sustentação, ainda que relativa diminuição no arrasto.

Estudos mais recentes propõem a utilização de dispositivos mitigadores de pressão conhecidos como spoilers. De acordo com (BIANCHIN, 2021), spoilers são dispositivos aerodinâmicos cuja principal função é perturbar o fluxo, impedindo que vórtices sejam gerados. O uso de spoilers é amplamente difundido no meio automotivo, em especial em automóveis de corrida, onde possuem o mesmo objetivo de desviar fluxo de ar desfavorável, dispersando a turbulência e beneficiando o carro aerodinamicamente (IPILAKYAA; TULEUN; KEKUNG, 2018)(SAGAR et al., 2010). Para os fins desejados do presente trabalho, sugere-se a utilização dos spoilers nos cantos do telhado dos edifícios da faculdade, de maneira que o modelo de dispositivo ideal deve ser analisado levando em conta as características geométricas do local a ser instalado. Em seu trabalho, (LI; GAN; LI, 2018) conclui que o melhor efeito de mitigação com a utilização de spoilers ocorre quando eles são colocados nos beirais ou nas paredes frontais, uma vez que estes são locais onde ocorre maior formação de vórtices. Ainda, descreve que as dimensões recomendadas para spoilers com efeito de mitigação é uma largura de 1/20 da largura do prédio e altura entre 0,2 e 0,6 metros.

Em seu trabalho, (BIANCHIN, 2021) levanta a proposta de aprimoramento da utilização desses spoilers através da implementação de algoritmos de controle para a modificação do ângulo dos mesmos. Tal modificação seria feita de maneira automática, baseando-se na capacidade do spoiler de sentir diferentes intensidades do fluxo; contudo, tal método de controle está fora do escopo de estudo atual, e a análise será focada apenas em dispositivos de mitigação fixos.

1.3 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o escoamento do vento no campus do Gama da Universidade de Brasília, propondo métodos de otimizar o escoamento e abordando brevemente como o comportamento do vento pode influenciar o voo de drones.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho envolvem os tópicos de:

- Identificar áreas de maior geração de turbulência nas simulações já realizadas no domínio computacional da FGA;
- Realizar simulações para análise do comportamento atual do vento;
- Levantar propostas de redirecionamento do vento através de modificações nos prédios;
- Constatar os diferentes efeitos produzidos por diferentes modificações.

2 Referencial Teórico

2.1 Efeitos do Vento Sobre Edifícios

Quando há a presença de obstáculos de qualquer natureza dentro da camada limite atmosférica, há interferência mútua entre a trajetória do vento e as estruturas dos obstáculos – no caso de edificações, esta interferência pode gerar efeitos consideráveis e permanentes na integridade da estrutura. Como define (LIMA; SANTOS, 2019), o vento pode ser interpretado como um carregamento do tipo dinâmico, isto é, a intensidade da carga imposta pelo vento pode ser tomada como variante no tempo; deste modo, o impacto dinâmico do vento pode ser modelado através de alguns efeitos (LIMA; SANTOS, 2019) (BLESSMANN, 1995):

- **Energia cinética das rajadas:** (LIMA; SANTOS, 2019) relata que rajadas de vento não possuem comportamento periódico, muito menos duração constante. Isto quer dizer que a força do vento não possui necessariamente poder ressonante, entretanto, pode provocar ressonância se a maior parte de sua energia corresponde à frequência natural de vibração da estrutura;
- **Martelamento:** se relaciona com a excitação da estrutura proveniente das flutuações de velocidade que estão presentes no vento;
- **Desprendimento de vórtices:** estruturas não aerodinâmicas – angulosas ou muito rombudas – provocam o descolamento dos vórtices ao longo do escoamento, gerando forças;
- **Aerodinâmica por galope:** oscilações de instabilidade que aumentam com a velocidade do vento, característico de estruturas leves e flexíveis.

A presença de edifícios em meio a um escoamento de vento não gera consequências apenas na construção diretamente impactada pelo mesmo, mas também ocorrem mudanças no regime de escoamento em regiões próximas – chamados de efeitos de vizinhança, podem ser divididos de acordo com a (ABNT, 1988) como:

- **Efeito Venturi:** quando ocorre o afunilamento do escoamento do vento aliado ao aumento da velocidade devido à proximidade de construções;
- **Deflexão do vento na direção vertical:** aparece quando construções altas defletem para baixo parte do escoamento que chega à barlavento, alcançando velocidades elevadas próximo ao solo e afetando construções baixas nas proximidades;

- **Turbulência de esteira:** efeito sentido por construções à sotavento¹ de outras, onde a turbulência de esteira provoca mudanças de pressão.

2.1.1 Turbulência

A turbulência é, talvez, um dos tópicos de mais complexa análise no estudo dos fluidos. É um comportamento que contrasta com o comportamento laminar do escoamento – neste, observa-se a predominância da ordenação do movimento, enquanto comportamentos turbulentos são altamente desordenados (RIBEIRO, 2020). É crucial destacar que não existe uma teoria pura de turbulência, o que existe é a análise de respostas aplicáveis obtidas pela observação empírica de escoamento turbulentos, como relata (ANDERSON, 2011). Isto posto, identifica-se um escoamento turbulento através de algumas características perceptíveis, como detalhado por (NOLETO, 2016).

A primeira característica é a irregularidade, que diz respeito a desorganização do escoamento turbulento acompanhada de dificuldade de modelagem matemática, aparecimento de soluções não lineares e necessidade de uma avaliação estatística. Isto compromete a utilização de modelos de fácil análise, visto que não é possível antecipar o comportamento de um escoamento turbulento – o que nos leva a uma segunda característica: dificuldade de previsão. Além da turbulência ser caracterizada por interações não lineares, ela é altamente dependente das condições iniciais. Esta dependência amplifica os efeitos não lineares presentes, tornando a turbulência um fenômeno praticamente imprevisível.

Outra característica é a difusividade – flutuações de velocidade provocam difusão de massa, energia e movimento no escoamento, o que acarreta em elevados gradientes de potenciais. Além disso, há a presença de rotacionalidade e tridimensionalidade: a turbulência sempre acompanha a rotacionalidade no escoamento, uma vez que ela possui relação com a geração de vorticidade. Podemos destacar também que a turbulência possui um aspecto dissipativo – devido à elevação nas tensões cisalhantes presentes no escoamento, há a transformação da energia cinética do escoamento em aquecimento através da dissipação viscosa.

Por fim, é imprescindível ressaltar a presença de múltiplas escalas no escoamento turbulento. Esse atributo apoia-se no conceito de cascata de energia – significa que cada uma das instabilidades do escoamento possui uma instabilidade menor dentro de si, que por sua vez, possui uma menor ainda, e assim sucessivamente. Recebe o nome de cascata pois as escalas maiores possuem mais energia (produtoras), energia esta que é transferida para as escalas menores (dissipadoras).

¹ Face oposta à face de incidência do vento

2.2 Revisão Bibliográfica

Trabalhos que analisaram a otimização de voos de drones de entrega ([PALAZZETTI, 2021](#)) apontam que a consideração da direção e intensidade do vento é essencial na determinação do trajeto de drones. Visto que o vento impacta diretamente no consumo de bateria dos aparelhos, é vantajoso que os mesmos procurem trajetos em que o vento está favorável ao invés de contrário, a fim de minimizar o gasto de bateria.

Em sua tese, ([BIANCHIN, 2021](#)) realiza uma análise numérica computacional da ventilação em edifícios baixos e sem aberturas a fim de investigar os efeitos do vento na geração de cargas estruturais. Além disso, sugere a utilização de *spoilers* com controle PID na mitigação destas cargas geradas, fazendo uma revisão bibliográfica de diversos métodos de atenuação do vento estudados previamente. Verificou-se que os *spoilers* com rotação no sentido anti-horário em relação ao telhado obtiveram resultados satisfatórios no redirecionamento dos vórtices gerados na cobertura dos edifícios.

Em estudos recentes, ([MACEDO, 2021](#)) disserta a respeito do regime de escoamento ao redor da Faculdade do Gama da Universidade de Brasília, mediante análise computacional de fluidodinâmica. Foi possível observar elevada geração de turbulência na lateral do prédio LDTEA, como também entre os prédios UAC e MESP. Além disso, foi possível notar também que interferências na continuidade do escoamento do vento no interior do prédio UAC foi responsável pelo aparecimento de turbilhões nesse local.

2.3 Fluidodinâmica Computacional

A resolução de problemas de difícil modelagem analítica se tornou mais fácil com a criação e refinamento de softwares especializados em tais tarefas – um dos métodos mais utilizados atualmente é a análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*) ou Fluidodinâmica Computacional. De acordo com ([HU, 2012](#)), CFD é uma ciência que auxilia na previsão e análise de comportamentos de fluidos baseando-se nas leis físicas que os governam, tais como a conservação de massa, momento e energia. Ainda segundo ([HU, 2012](#)), por mais que o método citado seja altamente confiável, alguns erros podem se fazer presentes, sendo os mais comuns:

- **Erro de discretização:** se faz presente devido à mudança de um domínio contínuo (real) para um discreto (computadorizado);
- **Erro de dados de entrada:** acontece devido ao fato que os dados inseridos são apenas aproximações dos valores reais;
- **Erro de condições iniciais e de contorno:** erros devido à imprecisão de informações;

- **Erro de modelagem:** deriva da dificuldade de modelagem de alguns fenômenos físicos, como por exemplo a turbulência.

Isto posto, a análise CFD ainda é o método mais indicado para cumprir os objetivos propostos. Este tipo de análise pode ser dividido em quatro etapas, como define (NOLETO, 2016). A primeira etapa é a modelagem, onde ocorre a definição do problema, dos objetivos, os requisitos da solução, levantamento das hipóteses simplificadoras e definição da precisão requerida para o projeto. Em seguida, passa-se para a etapa de pré-processamento - esta etapa engloba a análise das configurações do projeto, como a decisão do nível de detalhamento esperado do projeto, refino do modelo geométrico e da malha utilizada, escolha do método de análise e dos dados de entrada. Segue-se para o processamento, fase esta que ocorre a observação dos passos realizados pela simulação, verificação da convergência dos resultados, do tempo de processamento, e se os resultados estão em dimensões aceitáveis. Por fim, a quarta e última etapa é a de pós-processamento, onde é feita a investigação dos resultados da simulação, se são coerentes com os esperados pela teoria e avalia-se a necessidade de reestruturação do problema.

2.3.1 Modelagem do Escoamento

Os modelos de turbulência utilizados em *softwares* de simulação são baseados na modelagem dos fluidos em situações reais. Assim, as equações fundamentais que governam o comportamento de fluidos - assumindo que a condição de fluido como meio contínuo seja verdadeira - são conhecidas como as equações de Navier-Stokes. Para um escoamento fluido, pode-se escrever Navier-Stokes na forma:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \frac{1}{3} \mu \nabla(\nabla \cdot) + \rho g \quad (2.1)$$

cujos termos engloba os termos transiente, convectivo, de pressão, difusivo, de compressibilidade e de forças de campo, na ordem em que aparecem (NOLETO, 2016).

A segunda equação necessária para descrever um escoamento é a equação da continuidade, que pode ser escrita na forma:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (2.2)$$

A resolução por simulação numérica leva em conta a utilização das equações 2.1 e 2.2, contudo, os modelos mais básicos - tais como $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ - consideram uma simplificação das mesmas, interessando-se na modelagem da turbulência através da consideração de valores médios. Uma discussão mais detalhada sobre esses modelos será abordada no próximo tópico.

2.3.2 Modelos de Turbulência

Dentro da análise computacional, podemos fazer a escolha de vários modelos de análise que se adequam a diferentes contextos e objetivos de projeto. Dado o problema em questão, o mais adequado é utilizar um modelo de turbulência de alta precisão.

Como descreve (NOLETO, 2016), o modelo $k - \varepsilon$ é um modelo a duas equações, sendo ambas equações de transporte constitutivas, uma para a energia cinética de turbulência (k) e outra para a dissipação turbulenta (ε). Já o modelo $k - \omega$, como retratado por (WILCOX, 2006) e inicialmente desenvolvido por (SPALDING et al., 1991) engloba também a energia cinética de turbulência k associada ao segundo parâmetro, a dissipação por unidade de energia cinética turbulenta (ω).

Fundamentado em trabalhos anteriores, (MENTER, 1994) desenvolveu o modelo de turbulência SST (*Shear-Stress Transport*), que engloba características de ambos os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$. Como explicado em seu trabalho, (MENTER, 1994) seleciona o modelo $k - \omega$ como escolha no interior da camada limite, uma vez que o mesmo permite escolha de condições de contorno simples – condições de Dirichlet – o que confere para o modelo uma maior estabilidade numérica. Afastando-se da camada limite, se torna mais adequada a utilização do modelo $k - \varepsilon$, uma vez que, diferente do modelo $k - \omega$, ele não possui alta sensibilidade às condições impostas na corrente livre (MENTER, 1994)(NOLETO, 2016). As equações de transporte que descrevem o modelo são:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_k - \beta' k \omega \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (2.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) = \alpha \rho S^2 + \beta \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} + \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.4)$$

dado que ε é a dissipação turbulenta, ω a frequência turbulenta, β , β' , σ_k , σ_ω e α são as constantes empíricas dos modelos de turbulência (MACEDO, 2021)(NOLETO, 2016). A viscosidade turbulenta é definida levando em conta o transporte das tensões cisalhantes principais turbulentas (NOLETO, 2016), de modo que temos:

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, (S_{ij} S_{ij})^{1/2} F_2)} \quad (2.5)$$

onde $(S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ é uma medida invariante do tensor da taxa de deformação.

Observe que na formulação foram utilizadas duas funções de mistura, F_1 e F_2 , onde ambas são definidas conforme a distância até a parede e variáveis do escoamento, e seus valores são responsáveis por modificarem as equações de transporte. A primeira função de mistura (F_1) tem, na Eq. 2.5, o papel de fazer a troca de modelos, bem como de determinar as constantes do modelo. Ela possui valor igual a zero na área distante

da parede (modelagem $k - \varepsilon$) e valor igual a 1 no interior da camada limite (modelagem $k - \omega$). A função F_1 é dada por:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2.6)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \quad (2.7)$$

$$CD_{k\omega} = \max(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega, 1, 0.10^{-10}) \quad (2.8)$$

A segunda função de mistura (F_2) possui a função de troca de modelos na formulação da viscosidade turbulenta, e é dada por:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2.9)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (2.10)$$

Por fim, utilizamos um limitador de produção de energia cinética de turbulência, a fim de impedir o crescimento de turbulência nas regiões de estagnação. Este limitador é dado pela fórmula:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.11)$$

$$\tilde{P}_k = \max(P_k, 10 \cdot \rho \beta^* k \omega) \quad (2.12)$$

3 Propostas de Otimização

Como proposta de aprimoramento do escoamento do vento na Faculdade do Gama através da diminuição de vórtices e áreas de turbilhões levanta-se três soluções possíveis que se adequam ao problema, que estão detalhadas a seguir.

3.1 Ampliação das paredes

A primeira solução proposta sugere o prolongamento das paredes que envolvem os prédios da FGA – mediante observação dos prédios, é possível notar que os envoltórios da faculdade são “telas” de metal vazadas, deste modo, é possível analisar seu efeito comparando-se à adição de parapeitos porosos. Em análises (SURRY; LIN, 1995), estudos demonstraram que a utilização de parapeitos porosos reduz a sucção nos telhados de maneira mais significativa que outros métodos analisados – eles entregaram uma diminuição de cerca de 70% no pico de pressão próximo aos cantos do telhado, além de permitir uma distribuição relativamente uniforme ao longo do comprimento do mesmo. A Figura 1 ilustra resultados de simulações para coeficientes de pressão no telhado utilizando parapeitos porosos.

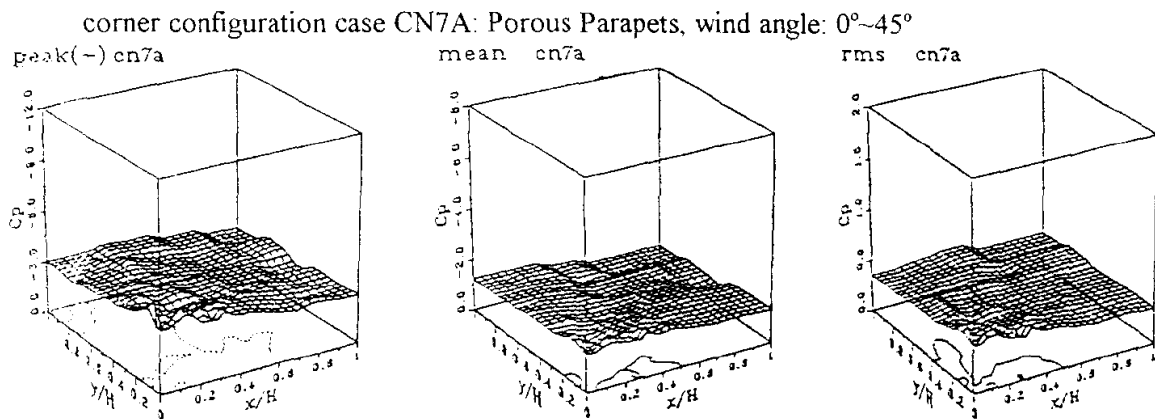


Fig. 6c. Continued.

Figura 1 – Resultados para coeficientes de pressão com a utilização de parapeitos porosos.
Fonte: (SURRY; LIN, 1995)

Essa diminuição nos picos se dá principalmente devido a três efeitos do envoltório: a interrupção da formação de vórtices gerados nos cantos do telhado, a absorção de parte da energia do fluxo pelo envoltório e o afastamento de eventuais vórtices gerados.

Contudo, trabalhos já realizados (STATHOPOULOS, 1984) declaram que os parapeitos não provocam mudanças significativas nas cargas de pressão para prédios baixos

e, em casos particulares, sua presença pode até mesmo aumentar as cargas. Todavia, investigações mais recentes conduzidas por (KOPP; MANS; SURRY, 2005) detalham que a utilização de parapeitos de fato diminui as cargas no telhado, contanto que os parapeitos utilizados sejam do tipo poroso.

3.2 Geometria de cantos

Corpos com formas aerodinâmicas e arredondadas são conhecidos por conduzir de maneira mais branda fluxos que interagem com os mesmos, ou seja, permitem que o escoamento flua de maneira mais uniforme e com menor índice de turbulências (CHING; ONOUE; ZUBERBUHLER, 2009). Isto posto, outro método de abrandamento do fluxo de vento é a substituição dos cantos angulosos dos telhados dos prédios da FGA por cantos arredondados ou chanfrados.

Com estudos realizados comparando-se o comportamento do fluxo em uma construção para beirais angulosos e arredondados (ROBERTSON, 1991), observou-se que, em termos gerais, o beiral arredondado foi capaz de diminuir em 40% as cargas de pressão sobre o telhado – contudo, o efeito é contrário próximo às extremidades. Além disso, pela visualização do escoamento do fluido notou-se que o mesmo escoava de maneira mais alinhada no caso de beirais com cantos arredondados do que em beirais angulosos (Fig. 2), onde ocorre o desprendimento do fluxo e geração de vórtices, bem como de uma zona de recirculação.

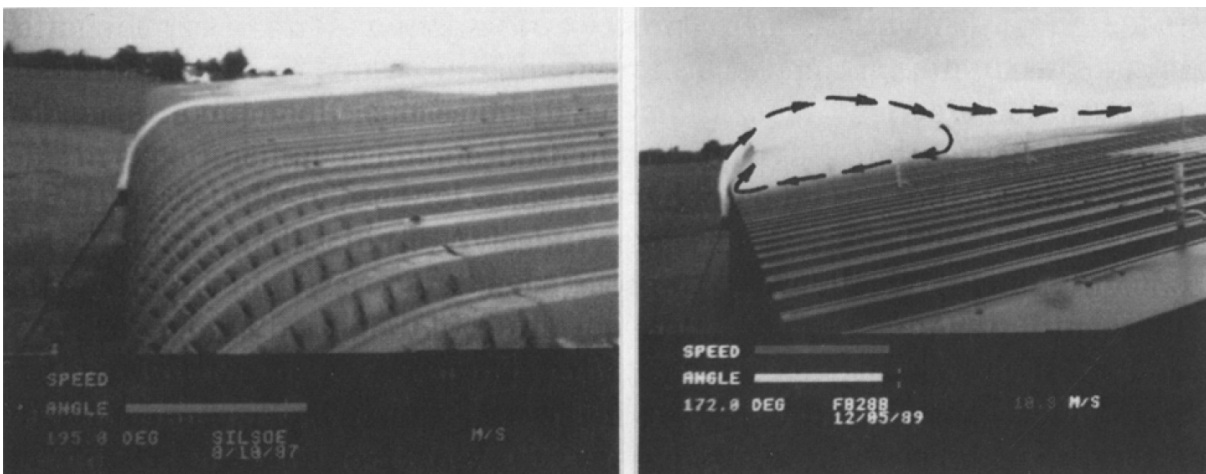


Figura 2 – Visualização do fluxo sobre beirais arredondados (esquerda) e angulosos (direita). Fonte: (ROBERTSON, 1991)

Todavia, estudos mais recentes realizados por (ALY; BRESOWAR, 2016) demonstram que, para edifícios baixos, o arredondamento de cantos não é recomendado, visto que os resultados demonstram que há o aumento das cargas de elevação, o que pode resultar no desprendimento dos telhados. Os autores enfatizam que os melhores métodos de

modificação de beirais para diminuição de cargas aerodinâmicas no telhado é a utilização de chanfros ou cantos recuados.

Assim sendo, analisamos os resultados para modificação por cantos chanfrados (BLACKMORE, 1988), onde observou-se que um beiral chanfrado de angulação de 30° foi capaz de reduzir as cargas no telhado em 34% quando comparado com beirais retos. Esta diminuição se deve a dois principais fatos: o primeiro é que a presença de angulação nos cantos diminui a velocidade de subida do fluxo e também seu deslocamento angular, isto é, a separação entre a superfície e o fluxo de vento é mais branda em cantos chanfrados, diminuindo as cargas aplicadas. O segundo fato é que a presença dos chanfros impede a formação de vórtices no canto de barlavento, capacidade que se relaciona com os conceitos de descolamento da camada limite e aparecimento de turbulência.

3.3 Utilização de *spoilers*

Um dos métodos mais atuais propostos para a otimização do fluxo de vento é a utilização de *spoilers*, cuja principal função é mitigar as pressões geradas pela ação do vento (BIANCHIN, 2021). Algumas técnicas de atenuação de pressões através de modificação geométrica foram apresentadas nos tópicos anteriores – o método apresentado nesta seção consiste na utilização de dispositivos perturbadores do fluxo (LI; GAN; LI, 2018).

O princípio de funcionamento dos *spoilers* baseia-se no advento da perturbação de vórtices (WU; SARKAR; MEHTA, 2001) – o mecanismo é ilustrado na Fig. 3. O procedimento acontece da seguinte maneira: quando o fluxo de ar chega no canto do teto, ocorre o descolamento da camada de vento, antes aderida à parede, devido à presença do próprio canto. Abaixo desta camada descolada, aparece uma zona de recirculação de fluxo – uma “bolha” com geração de vórtices e gradientes de pressão negativos. A função do *spoiler* é inserir um fluxo de ar dentro desta bolha, de modo que os efeitos de separação sejam amenizados, além de contrapor o vórtice gerado nesta área. As análises realizadas com diversas configurações de *spoilers* (WU; SARKAR; MEHTA, 2001) demonstraram que perto dos cantos, as pressões de sucção médias podem ser reduzidas em até 90%, enquanto os valores máximos podem ter diminuição de até 80%.

A fim de considerar as cargas de elevação sofridas pelo *spoiler* em si, estudos foram conduzidos para um teto com inclinação de 30° para diferentes configurações (LI; GAN; LI, 2018). Os resultados nos mostram que a melhor configuração de *spoilers* para mitigação de pressões no telhado é a do tipo E, ilustrado na Figura 4, sendo capaz de diminuir as pressões em até 71%. Referindo-se às características geométricas dos dispositivos, dados obtidos nos indicam que a redução de pressão não é dependente da largura do *spoiler* – contudo, recomenda-se a implementação de 5% da largura do edifício para fins práticos de construção. Além disso, para manter a estabilidade dos dispositivos recomenda-se uma

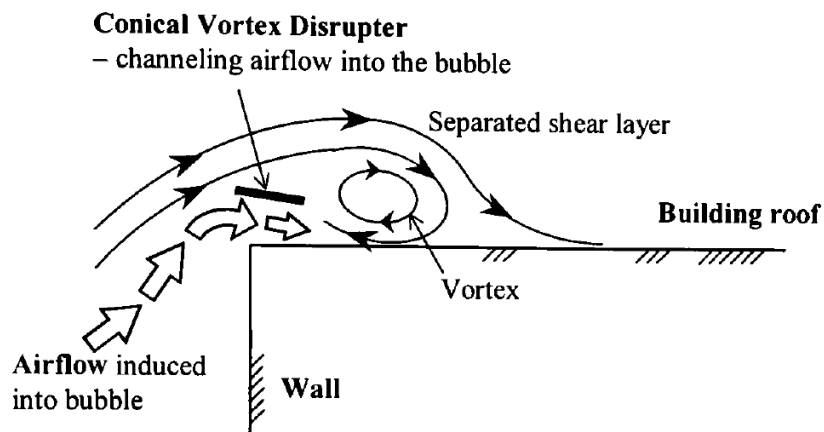


Figura 3 – Princípio de ação dos dispositivos perturbadores. Fonte: (WU; SARKAR; MEHTA, 2001)

altura entre 0,2 e 0,6 metros. Ademais, notou-se que os *spoilers* devem ser considerados durante a etapa de planejamento do telhado e fixados diretamente na alvenaria pois, quando instalados posteriormente, podem provocar aumento nas cargas de elevação no telhado.

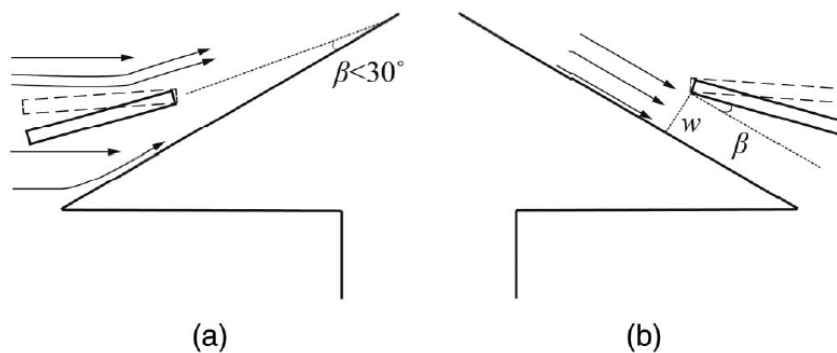


Figura 4 – Disposição dos *spoilers* do tipo E. Fonte: (LI; GAN; LI, 2018)

4 Modelagem do Problema

4.1 Domínio Analisado

A região analisada neste trabalho compreende as imediações da Faculdade do Gama, que é uma extensão da Universidade de Brasília localizada no setor Leste da região administrativa do Gama, no Distrito Federal.

Para a modelagem computacional da região foi construído um domínio octogonal através do *software* ANSYS 2022 R2 Student. Optou-se pela utilização de um domínio octogonal para facilitar a imposição das condições de contorno, além de permitir também uma visualização dos acontecimentos levando em conta determinadas direções.

Note que o domínio compreende os edifícios que representam a Unidade Acadêmica (UAC), a Unidade de Ensino e Docência (UED), o Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas (LDTEA) e o Módulo de Serviços e Equipamentos Esportivos (MESP). O domínio que será utilizado na análise se encontra na Figura 5, e uma vista aproximada dos edifícios considerados encontra-se na Figura 6.

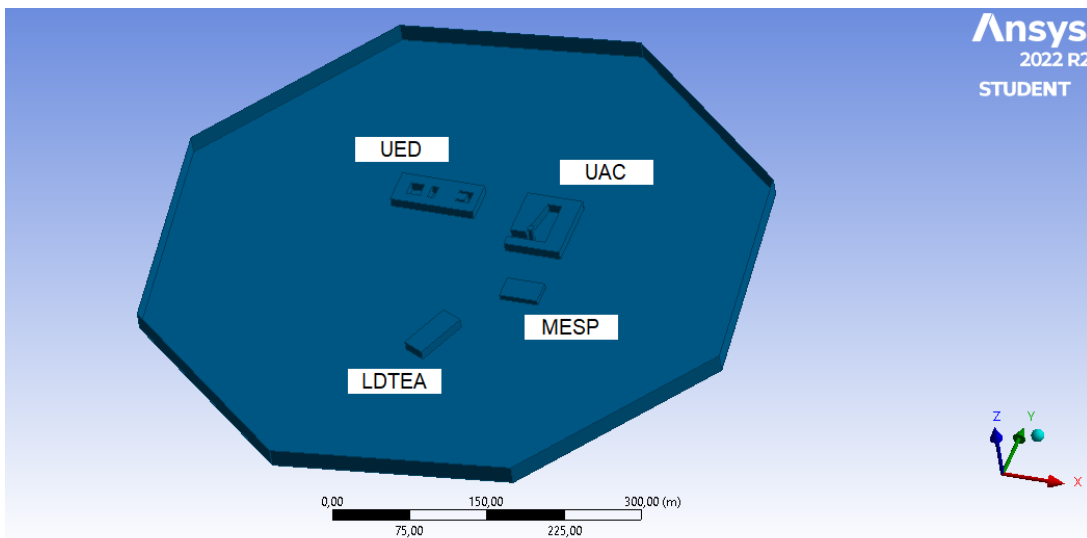


Figura 5 – Domínio computacional a ser considerado.

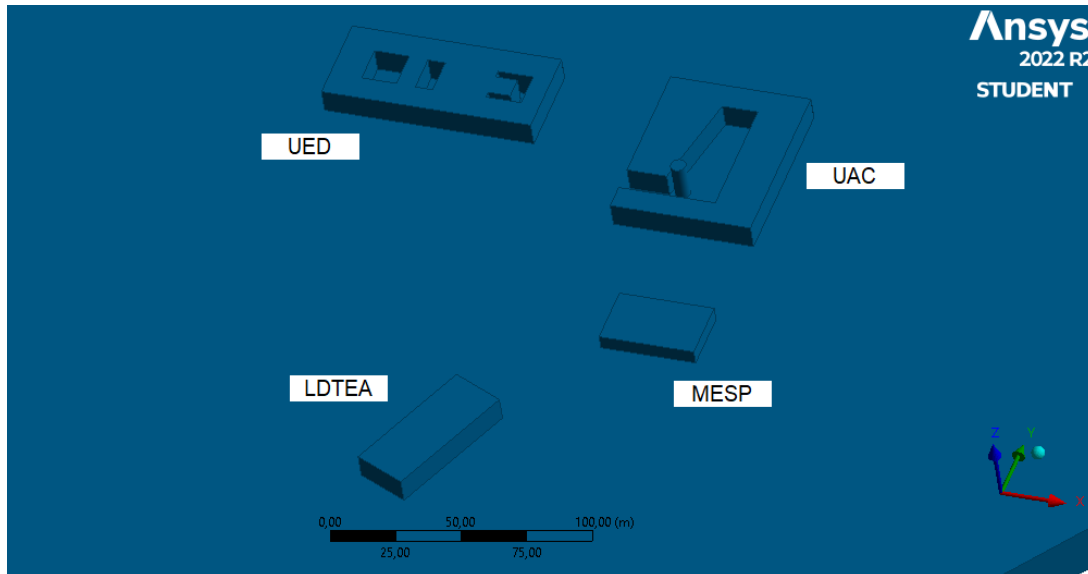


Figura 6 – Detalhe dos edifícios a serem considerados na simulação.

4.2 Linhas de Análise

Foram criadas linhas de análise para facilitar a visualização da diferença nas propriedades, que foram identificadas como descrito abaixo. As coordenadas dos pontos inicial e final de cada linha nos eixos x , y e z - respectivamente - podem também ser observadas.

- Linha 1 - linha externa ao UAC - coordenadas $(-42; -60; 9)$, $(-1; -60; 9)$;
- Linha 2 - linha interna ao UAC - coordenadas $(32; -11,2; 5)$, $(36; -60; 5)$;
- Linha 3 - linha entre o UAC e o MESP - coordenadas $(26,5; -7,; 0,35)$, $(33,3; -109; 0,36)$;
- Linha 4 - linha horizontal entre o UAC e o MESP - coordenadas $(13,65; -97,7; 3)$, $(51,65; -96,8; 3)$;
- Linha 5 - linha entre o UAC e o UED - coordenadas $(-42; -13; 9)$, $(-1; -13; 9)$;
- Linha 6 - linha entre o UED e o LDTEA - coordenadas $(-50; -36,5; 0,29)$, $(-35; -178,3; 0,29)$;
- Linha 7 - linha vertical entre o UAC e o MESP - coordenadas $(26; -90; 0,2)$, $(26; -90; 15)$;
- Linhas 8-12 - linhas verticais na lateral do UED - coordenadas $(-70; -50; 0,2)$, $(-70; -50; 15)$ a $(-110; -50; 0,2)$, $(-110; -50; 15)$.

Uma ilustração das linhas de análise vistas de cima encontra-se na Figura 7, enquanto uma vista em perspectiva para visualização da localização das linhas na direção z encontra-se

na Figura 8. É possível notar que as linhas foram posicionadas em diferentes alturas na direção z do domínio.

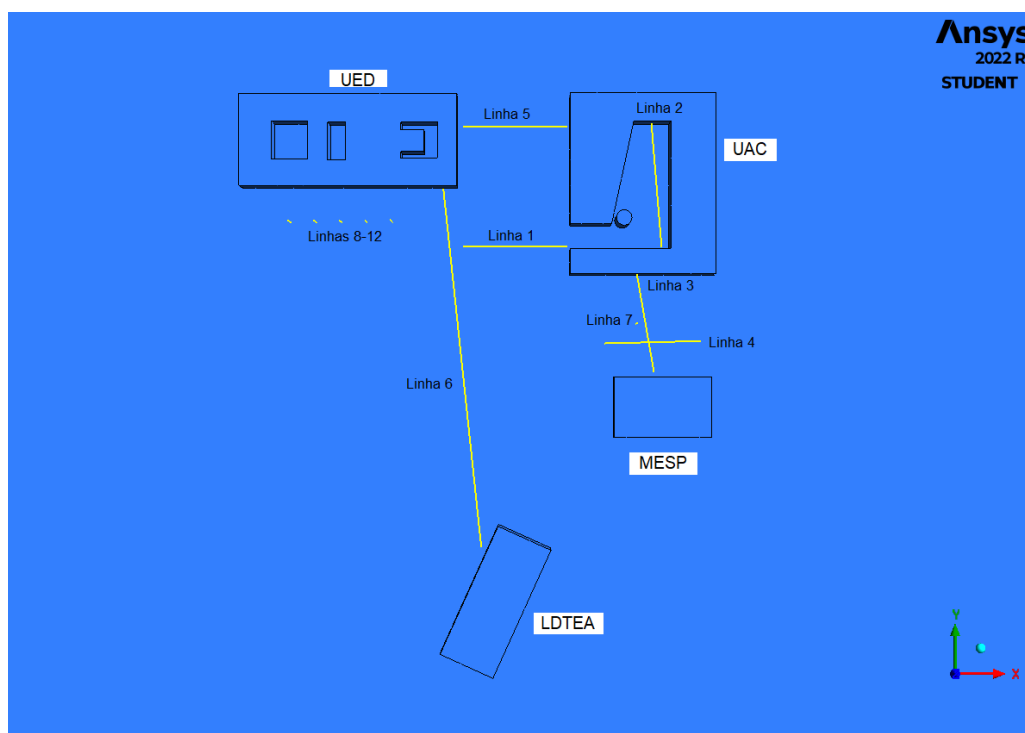


Figura 7 – Vista aérea da localização das linhas de análise.

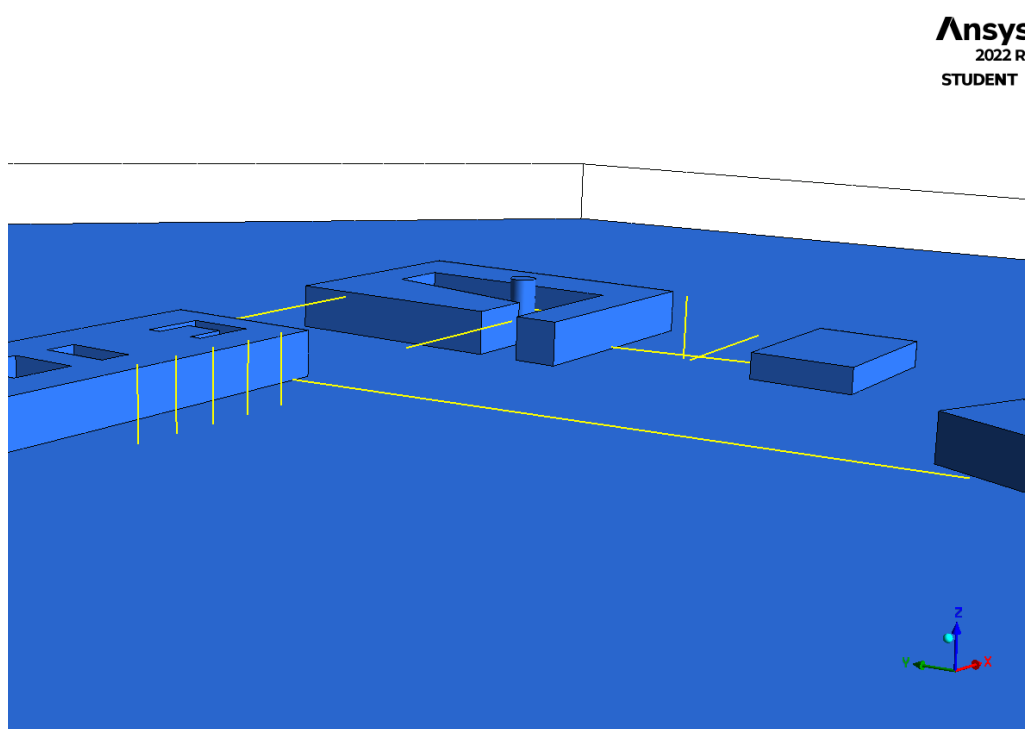


Figura 8 – Vista em perspectiva da localização das linhas de análise.

Para compreender melhor a localização das linhas ao longo do domínio, uma ilustração de seu posicionamento em relação ao eixo do plano xy encontra-se na Figura 9. Observe que a origem localiza-se em um dos cantos do UAC.

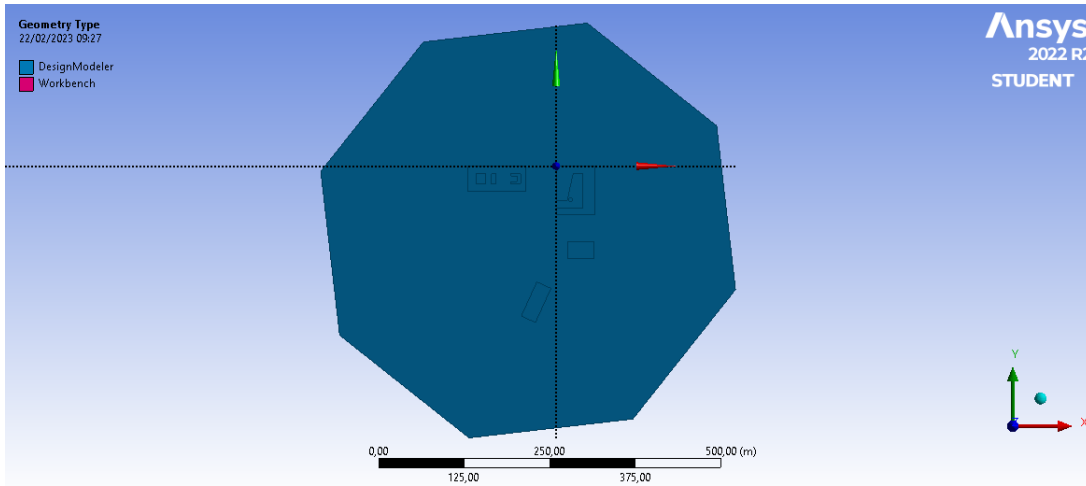


Figura 9 – Localização do domínio em relação ao eixo do plano xy .

4.3 Malha

Utilizou-se uma malha não estruturada com elementos tetraédricos de $5m$, resultando em 64603 nós e 307864 elementos. Uma ilustração da malha encontra-se na Figura 10. O corpo destacado em laranja na Figura é o prédio objeto de estudo, o LDTEA.

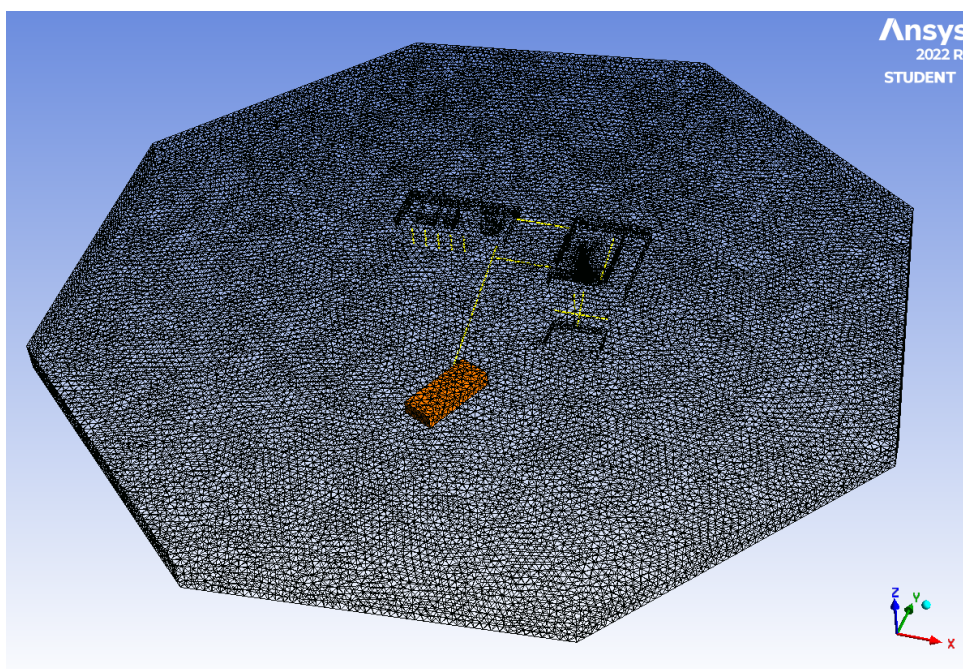


Figura 10 – Ilustração da malha utilizada.

Uma aproximação para a melhor visualização da malha nas proximidades dos prédios encontra-se na Figura 11, enquanto um detalhamento da malha próxima ao LDTEA encontra-se na Figura 12. Nota-se que a mesma densidade de malha foi utilizada ao longo de todo o domínio, apenas com uma concentração evidente no interior do UAC devido à presença de uma coluna.

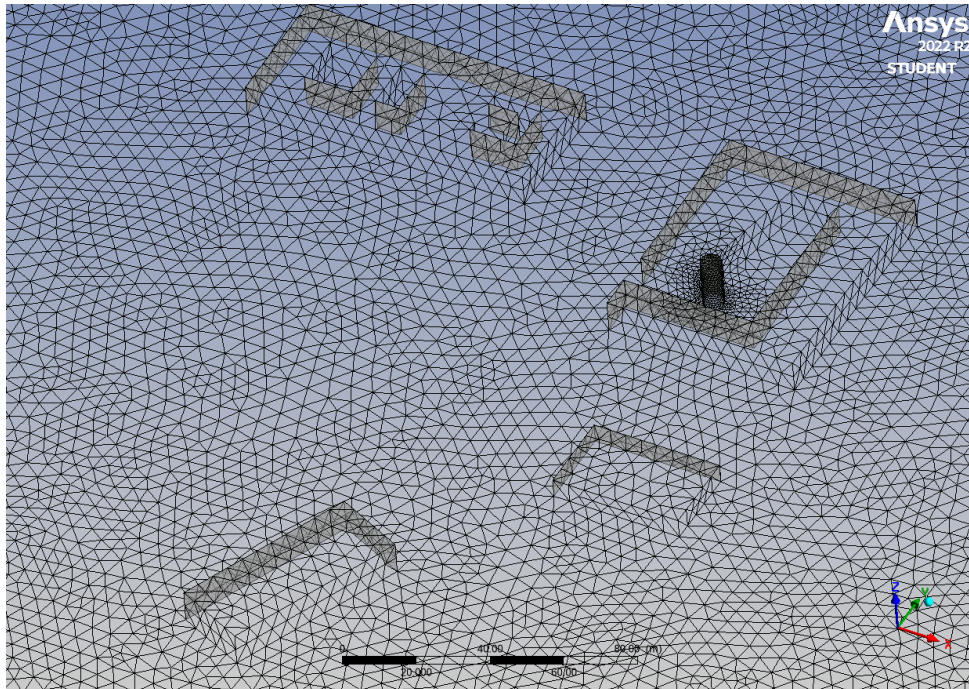


Figura 11 – Detalhamento da malha nas proximidades dos prédios.

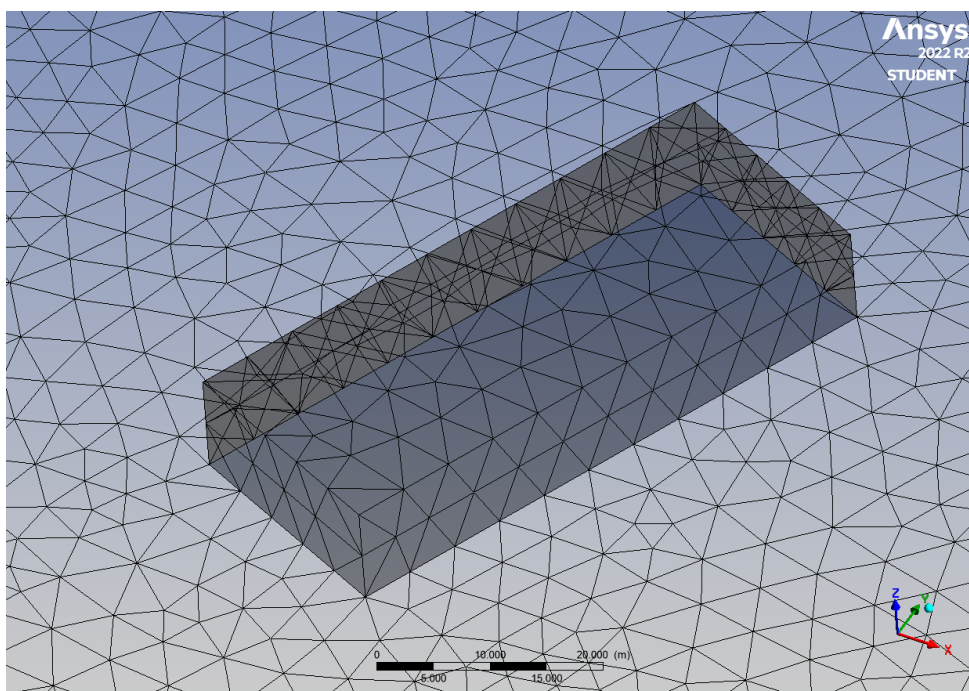


Figura 12 – Detalhamento da malha próxima ao LDTEA.

As métricas de qualidade da malha para ortogonalidade e assimetria encontram-se nas Figuras 13 e 14 respectivamente. Para análises de fluidodinâmica computacional, valores de ortogonalidade entre 0,15 – 0,2 já são aceitáveis, enquanto que valores acima de 0,7 estão entre muito bons e excelentes, sendo 1 o ideal (ANSYS, 2015). Tratando-se de assimetria, valores entre 0,8 – 0,94 já são aceitáveis, sendo valores abaixo de 0,5 de muito bons a excelentes, sendo zero o ideal (ANSYS, 2009). Desta maneira, os valores encontrados são adequados para os fins propostos.

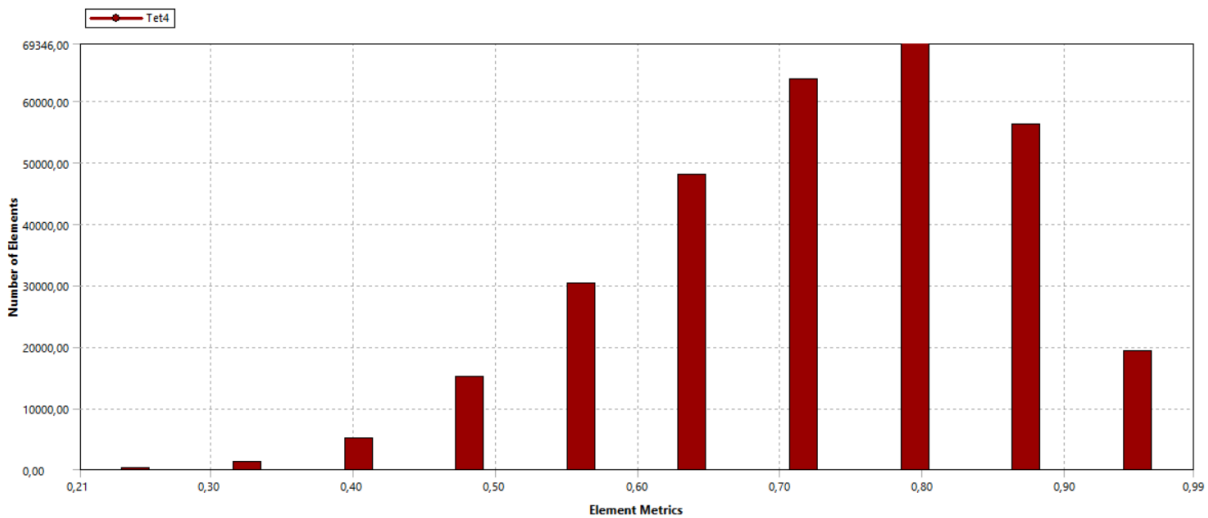


Figura 13 – Qualidade ortogonal da malha.

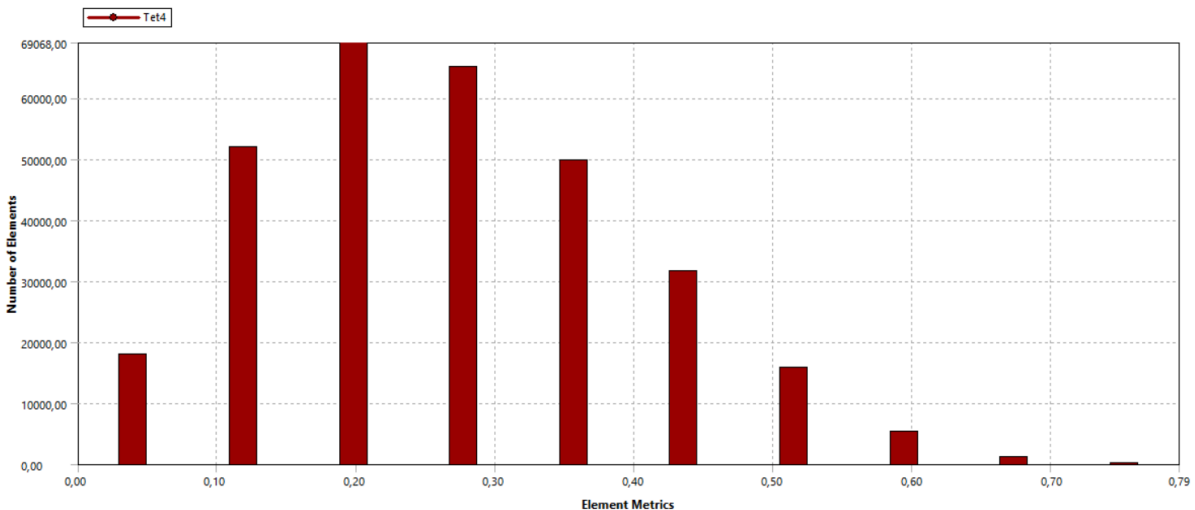


Figura 14 – Assimetria da malha.

4.4 Condições de Contorno

Através de dados obtidos pelo INMET (INMET, 2022), considerando o período do primeiro semestre de 2022, foi possível notar que os ventos nessa região incidem, principalmente, da região sudeste, como mostrado na Figura 15. O cálculo foi feito analisando-se

uma tabela de dados do *software* Excel obtida no site do INMET e observando os registros de direção de incidência do vento, nos entregando uma maior ocorrência na direção aproximada de 330° . Ainda pela mesma análise, foi possível obter a condição de velocidade, encontrando o valor de médio de $4,77m/s$.

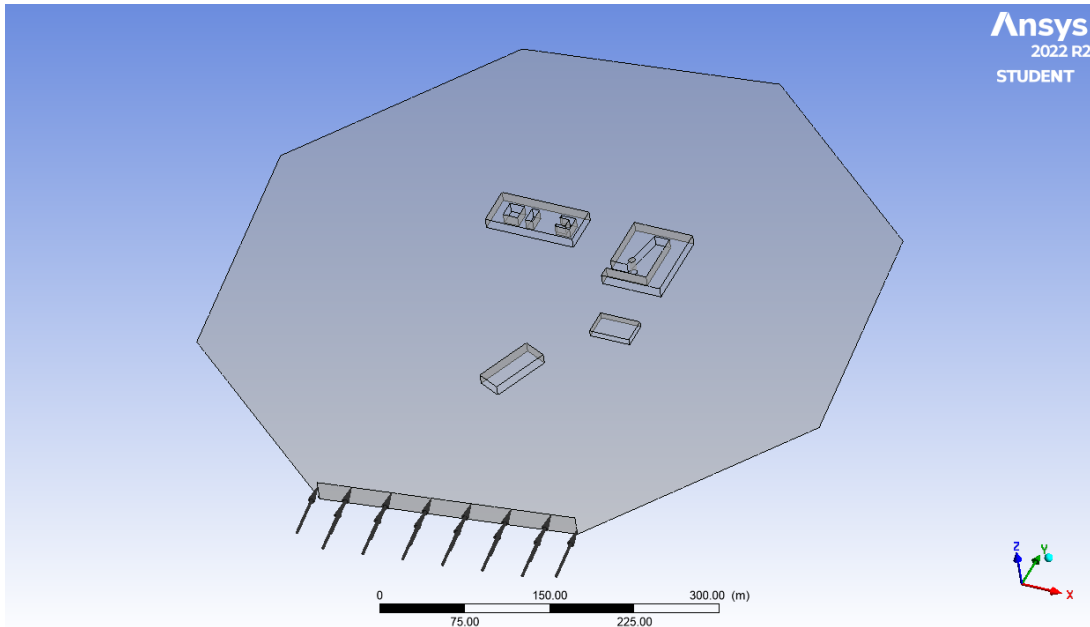


Figura 15 – Região de entrada para as primeiras condições de contorno.

A fim de enriquecer nossos estudos, foram consideradas também variações nas condições de contorno. Os valores escolhidos foram os avaliados por uma das referências utilizadas (MACEDO, 2021) - entrada pelas regiões sul e sudeste e velocidade média de $3,6m/s$, como visto na Figura 16.

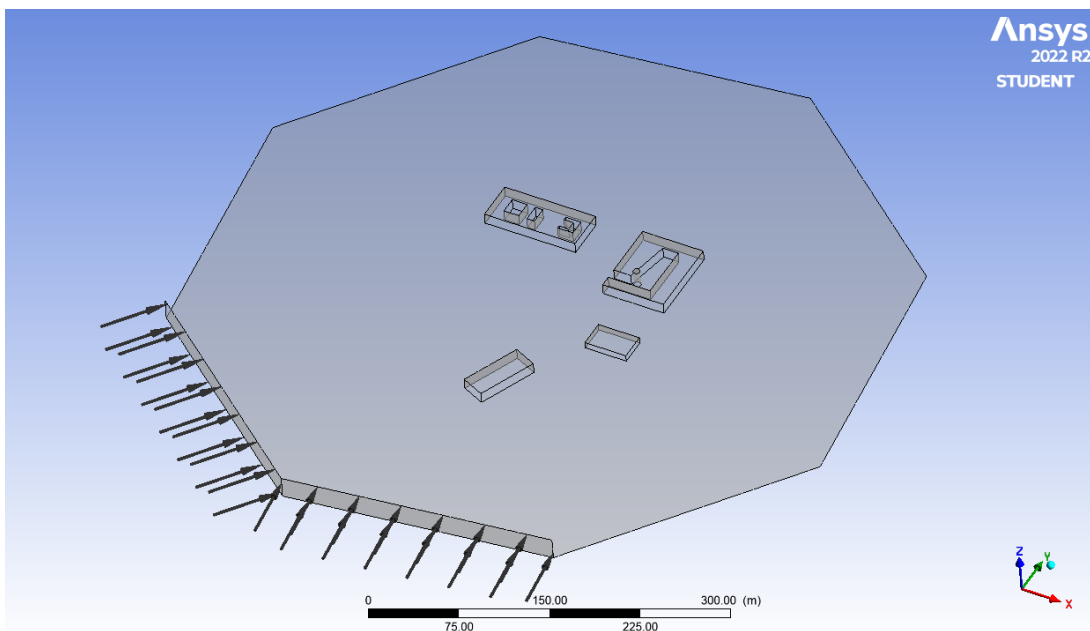


Figura 16 – Região de entrada para as segundas condições de contorno.

4.5 Solução

A simulação foi realizada em regime permanente, visto que não há o conhecimento da aparição de fenômenos que dependam do tempo no escoamento em questão. Tais análises extrapolam o escopo do projeto.

O tipo do domínio foi definido como domínio fluido, com a morfologia de fluido contínuo, e, visto que será realizada uma análise de vento, o material foi estabelecido como ar a 25°C. O modelo de turbulência utilizado foi o *Shear Stress Transport* (SST), modelo que foi amplamente abordado anteriormente.

Para a entrada definiu-se um regime subsônico com turbulência de média intensidade (5%). Para o prédio estudado, definiu-se o tipo de fronteira como parede sem escorregamento (*no-slip condition*), que afirma que a velocidade de um fluido é zero no seu ponto de encontro com um corpo sólido (RAPP, 2017). Esta escolha justifica-se pela presença da consideração do fluido como contínuo, isto é, a rugosidade da superfície é maior que a distância entre as moléculas do fluido (RICHARDSON, 1973). Realizou-se 1000 iterações, com o critério de convergência dos residuais definido na magnitude de 10^{-6} (TU; YEOH; LIU, 2018).

5 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela simulação realizada através do *software* ANSYS 2022 R2. As simulações foram realizadas considerando dois modelos da FGA idênticos, porém com variação nas condições de contorno, como descrito anteriormente. Para o caso que será chamado de FGA 1, considerou-se a entrada do fluxo pela região sudeste do domínio, com a velocidade de vento de $4,77m/s$. Para o caso que será chamado FGA 2, considerou-se a entrada do fluxo pelas regiões sul e sudeste do domínio, com a velocidade de vento de $3,6m/s$.

Levando em conta os métodos de otimização caracterizados anteriormente, para o presente trabalho será realizada a análise dos efeitos da geometria de cantos com diferentes configurações, bem como os efeitos da adição de parapeitos maciços e porosos. Foram realizadas simulações considerando variadas alterações na geometria, a fim de determinar qual a maneira mais eficaz na diminuição de forças causadas pelo vento. Os resultados obtidos foram para os casos sem modificação da geometria, utilização de chanfros, arredondamento dos cantos com dois raios diferentes, e construção de parapeitos contínuos e descontínuos maciços e porosos. Optou-se por focar na modificação do prédio LDTEA, visto que devido à sua localização mais afastada da maior movimentação de pessoas da FGA, seus arredores são mais propensos para a prática do voo de drones e semelhantes; além disso, se localiza muito próximo da entrada do vento, afetando o escoamento de maneira mais significativa.

5.1 Modificações na geometria

No presente tópico serão apresentadas as diferentes geometrias utilizadas nas simulações, bem como justificativas das escolhas feitas para suas dimensões.

5.1.1 Sem modificação da geometria

Uma figura ilustrativa do edifício do LDTEA sem modificação da geometria encontra-se na Figura 17.

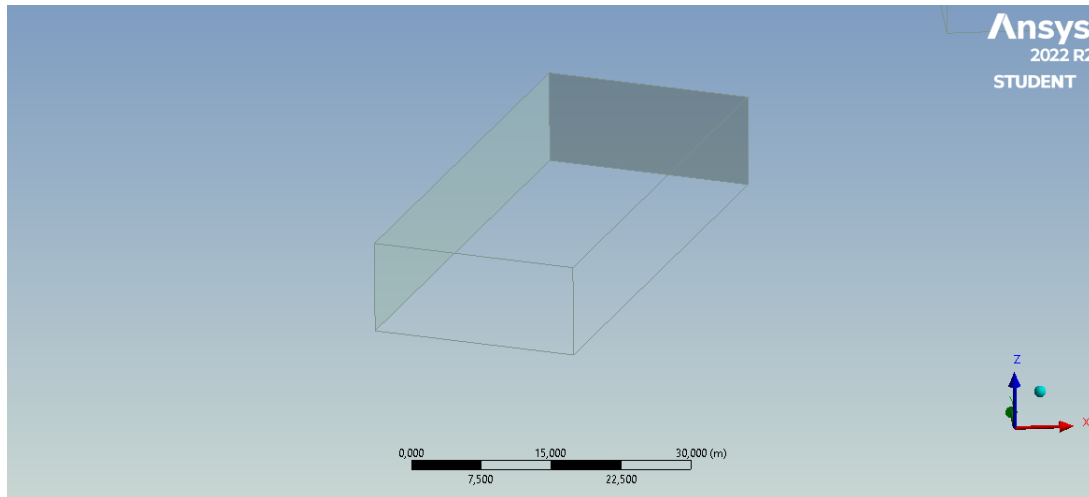


Figura 17 – Ilustração do LDTEA sem modificação na geometria.

5.1.2 Cantos chanfrados

De acordo com (BLACKMORE, 1988), a utilização de chanfros é otimizada quando os mesmos possuem ângulos de 30° . Ainda neste mesmo trabalho, optou-se pela utilização de um chanfro com 25% do tamanho da altura do prédio analisado – deste modo, adaptando ao caso analisado, utilizou-se um chanfro com angulação de 30° e $2,5m$. Uma ilustração da geometria com cantos chanfrados encontra-se na Figura 18.

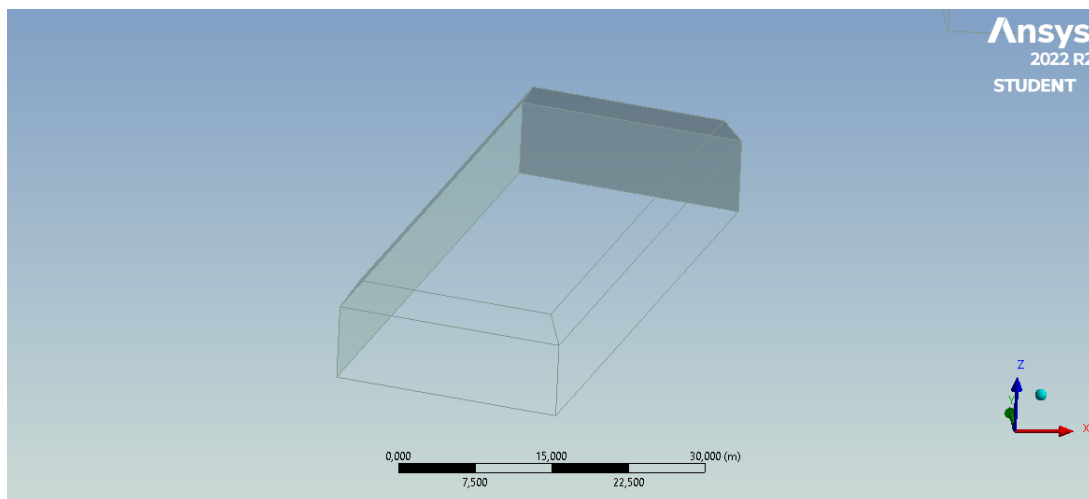


Figura 18 – Ilustração do LDTEA com a modificação de cantos chanfrados.

5.1.3 Cantos arredondados com raio $2,5m$

Para fins comparativos, foi utilizado inicialmente o arredondamento dos cantos com raio também de $2,5m$. Uma figura ilustrativa da geometria modificada encontra-se na Figura 19.

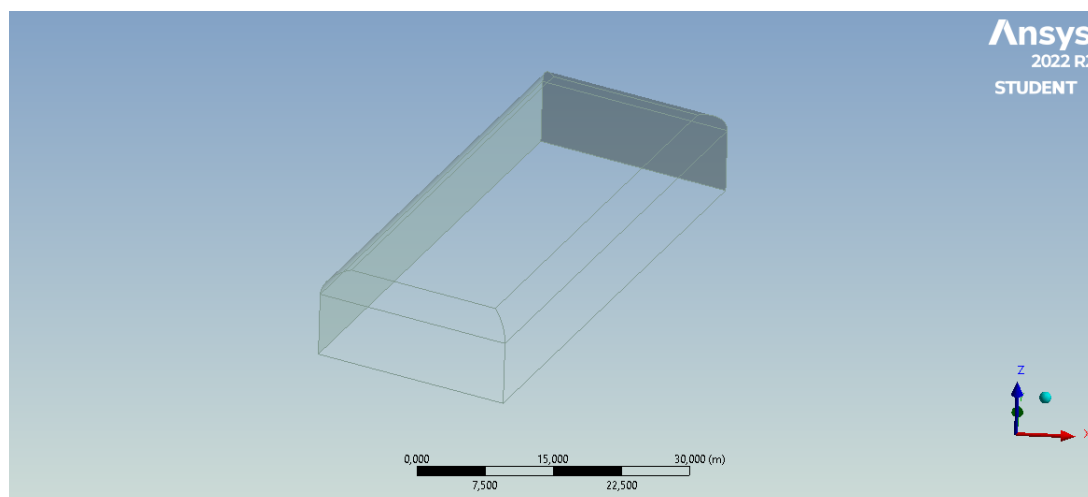


Figura 19 – Ilustração do LDTEA com a modificação de cantos arredondados de raio 2,5m.

5.1.4 Cantos arredondados com raio 3,5m

Para a segunda análise com cantos arredondados optou-se por utilizar raios de 3,5m, com o objetivo de analisar se há diferença significativa com o aumento do raio. Uma figura ilustrativa da geometria modificada encontra-se na Figura 20.

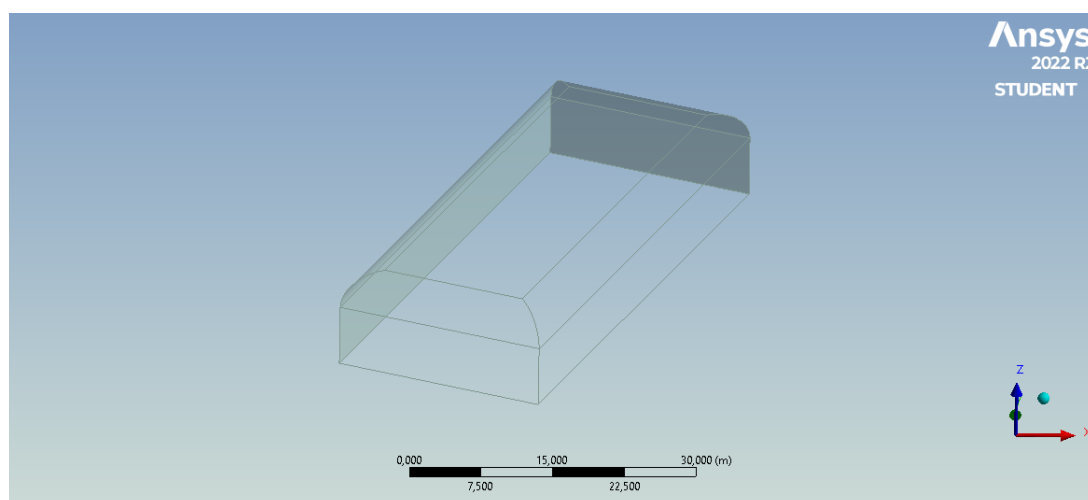


Figura 20 – Ilustração do LDTEA com a modificação de cantos arredondados de raio 3,5m.

5.1.5 Parapeito contínuo maciço

Os parapeitos foram projetados baseados na configuração de parapeito definida por (SURRY; LIN, 1995). De acordo com a configuração 7 da referência, a razão entre a altura do parapeito (h_p) e a do edifício (H) é dada por:

$$\frac{h_p}{H} = 0,064 \quad (5.1)$$

Portanto, para o presente caso, a altura do parapeito foi definida como sendo $h_p = 0,64$. A espessura (t) segue a razão – também utilizada por (SURRY; LIN, 1995) de:

$$t = \frac{h_p}{10} \quad (5.2)$$

Deste modo, utilizou-se uma espessura de $t = 0,064m$. Uma figura ilustrativa da geometria com parapeito contínuo encontra-se na Figura 21.

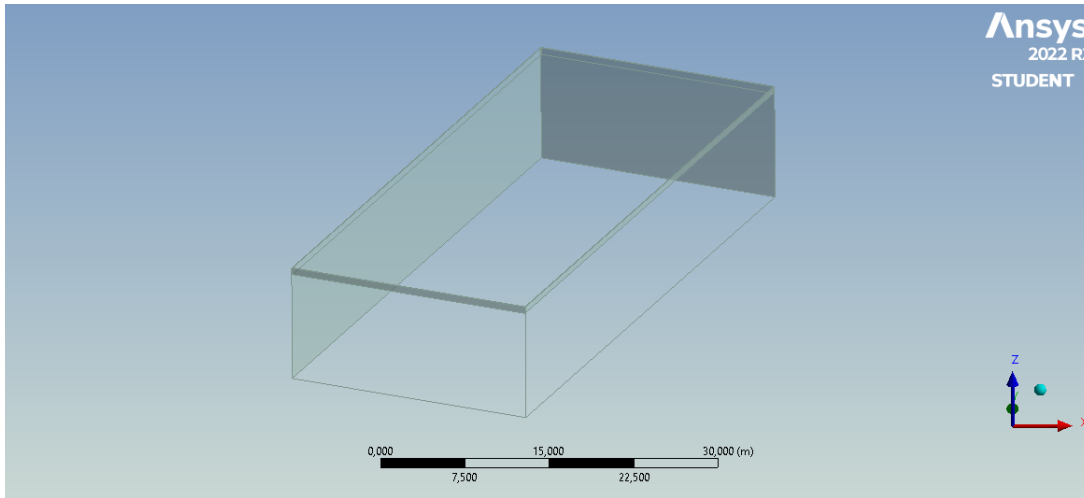


Figura 21 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito contínuo maciço.

5.1.6 Parapeito descontínuo maciço

Em seguida, considerou-se a utilização de parapeitos com as mesmas dimensões definidas anteriormente – porém, neste caso, os parapeitos não são contínuos. O comprimento (l) dos parapeitos como definido por (SURRY; LIN, 1995) segue a razão:

$$\frac{l}{h_p} = 16 \quad (5.3)$$

Deste modo, no projeto em questão, o comprimento do parapeito seria de $10,24m$. Para adequar-se melhor às dimensões do edifício, foram considerados parapeitos com metade deste comprimento, ou seja, $l = 5,12m$. Uma figura ilustrativa da geometria encontra-se na Figura 22.

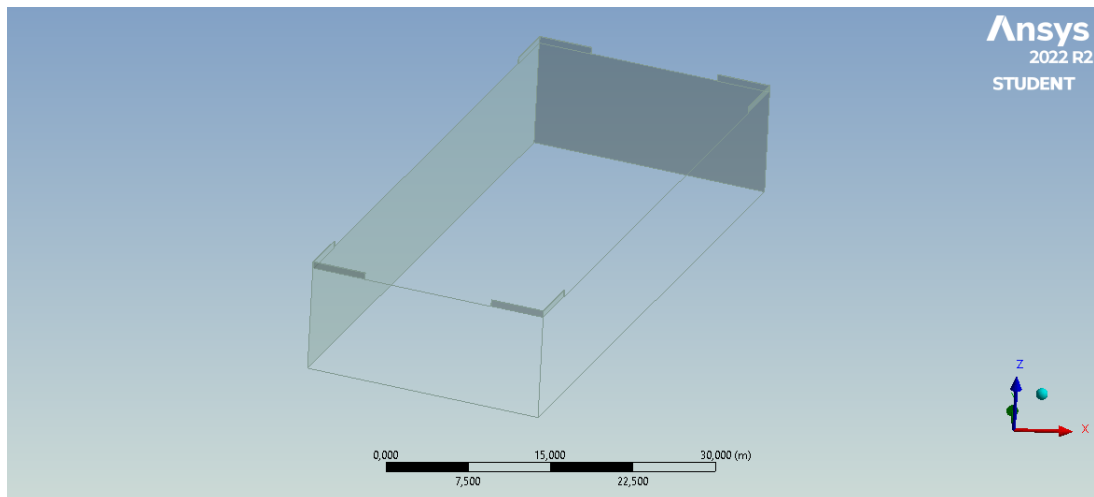


Figura 22 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito descontínuo maciço.

5.1.7 Parapeito contínuo poroso

Para o caso poroso levou-se em conta os cálculos de altura do parapeito realizados anteriormente, contudo, a altura total foi arredondada para $0,7m$ por questões de praticidade. As hastes do parapeito possuem altura de $0,1m$ cada com espaçamentos iguais também de $0,1m$, totalizando quatro hastes. Inseriu-se uma haste vertical em cada canto do prédio para auxiliar na estabilidade. Uma figura ilustrativa da geometria modificada encontra-se na Figura 23, com um detalhamento do parapeito ilustrado na Figura 24.

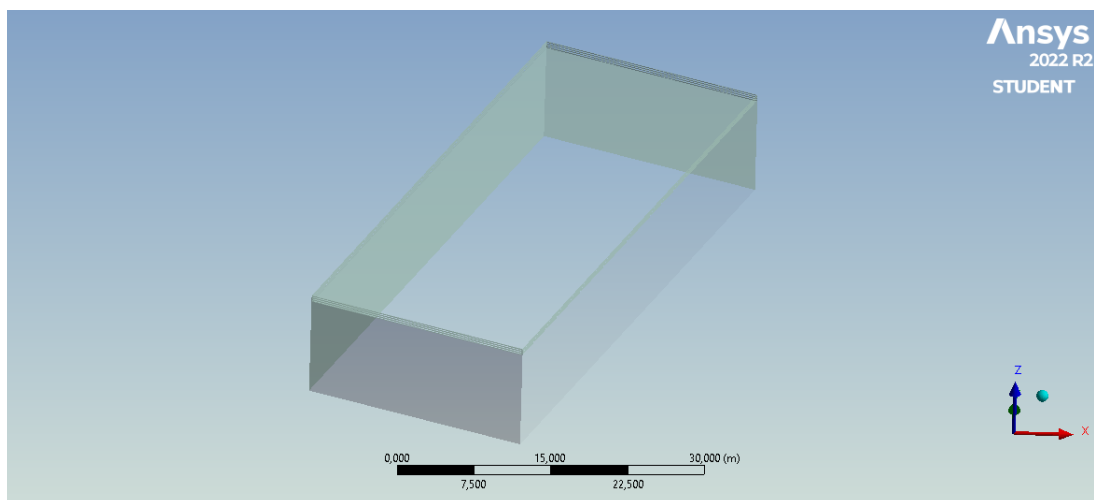


Figura 23 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito contínuo poroso.

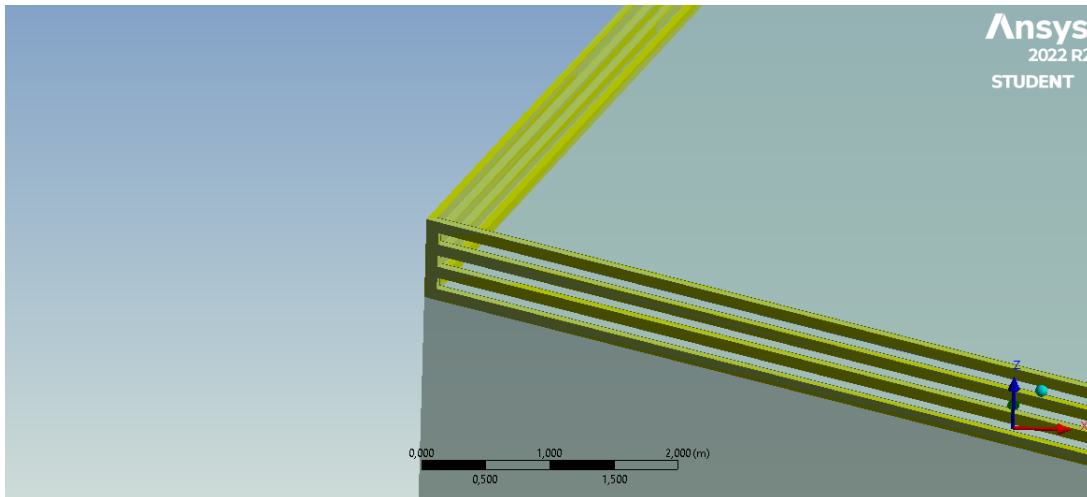


Figura 24 – Detalhe do parapeito contínuo poroso.

5.1.8 Parapeito descontínuo poroso

Para o último caso, combinou-se os cálculos de dimensão realizados para parapeitos descontínuos e de parapeitos porosos. Uma figura ilustrativa da geometria encontra-se na Figura 25, com um detalhamento do parapeito na Figura 26.

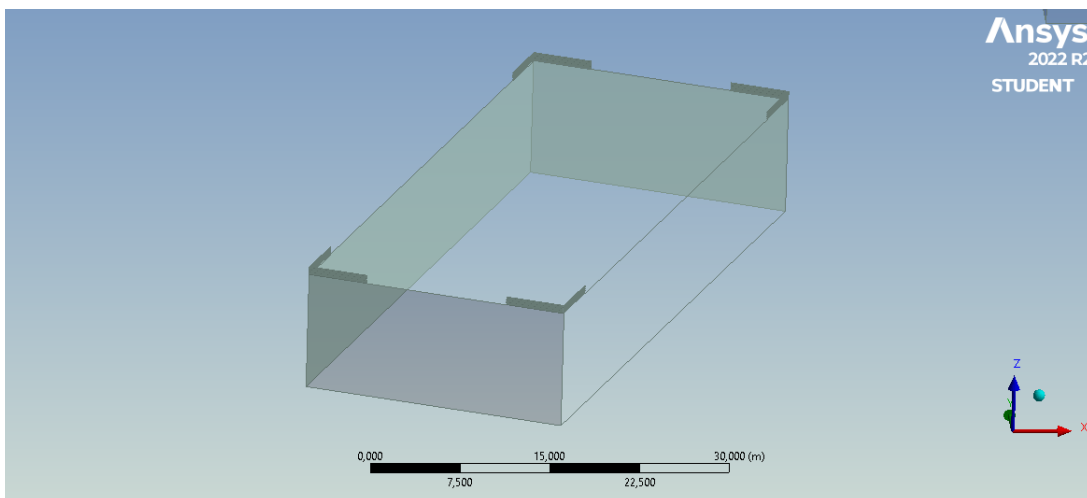


Figura 25 – Ilustração do LDTEA com a modificação de parapeito descontínuo poroso.

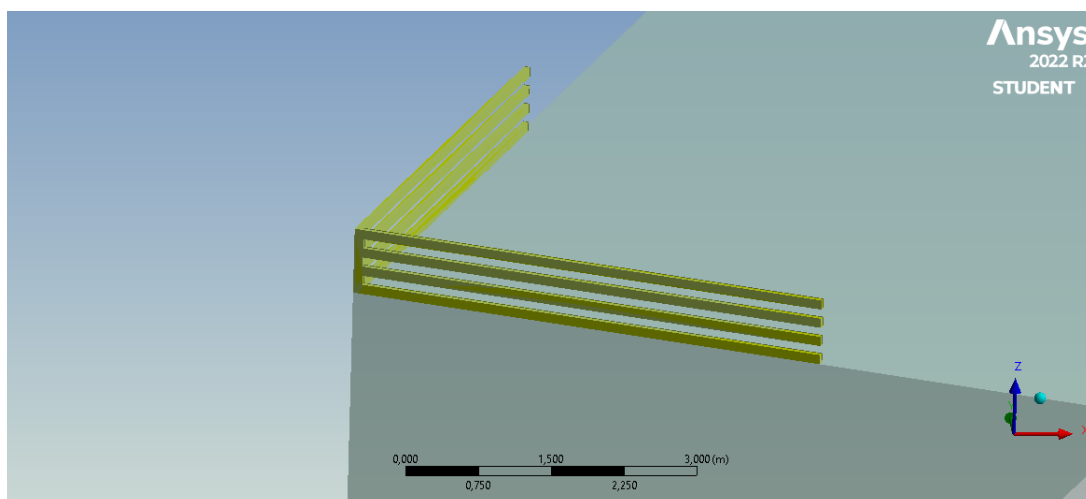


Figura 26 – Detalhe do parapeito descontínuo poroso.

5.2 Resultados de perfil de velocidade

Nesta seção serão ilustrados e discutidos os perfis de velocidade obtidos nas linhas de análise definidas anteriormente.

5.2.1 FGA 1

A Figura 27 ilustra os perfis de velocidade na linha 1. Pode-se notar que as modificações de chanfrado e arredondamentos possuem velocidades médias mais altas que no caso sem modificação, enquanto para as outras geometrias, as velocidades são menores.

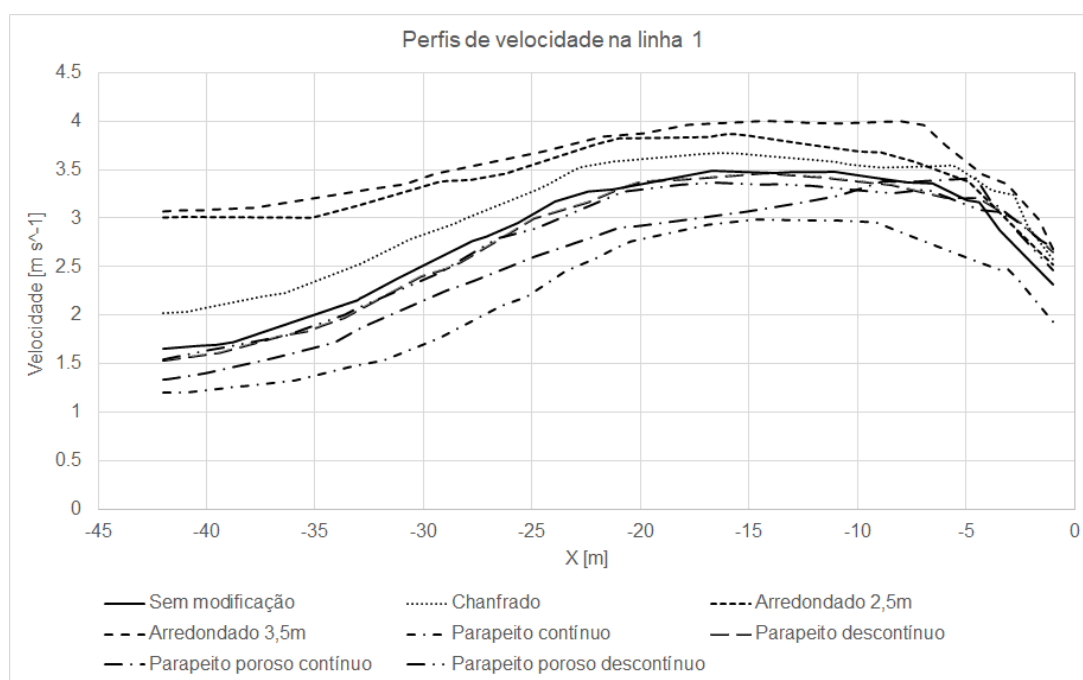


Figura 27 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 1.

Para o caso da linha 2, ilustrada na Figura 28, observa-se inicialmente velocidade

mais baixas para todos os casos modificados. Contudo, próximo aos 33,5 metros há um aumento da velocidade para os casos arredondados, chanfrado, e com parapeito descontínuo maciço. As demais modificações permanecem abaixo ou próximas do caso original.

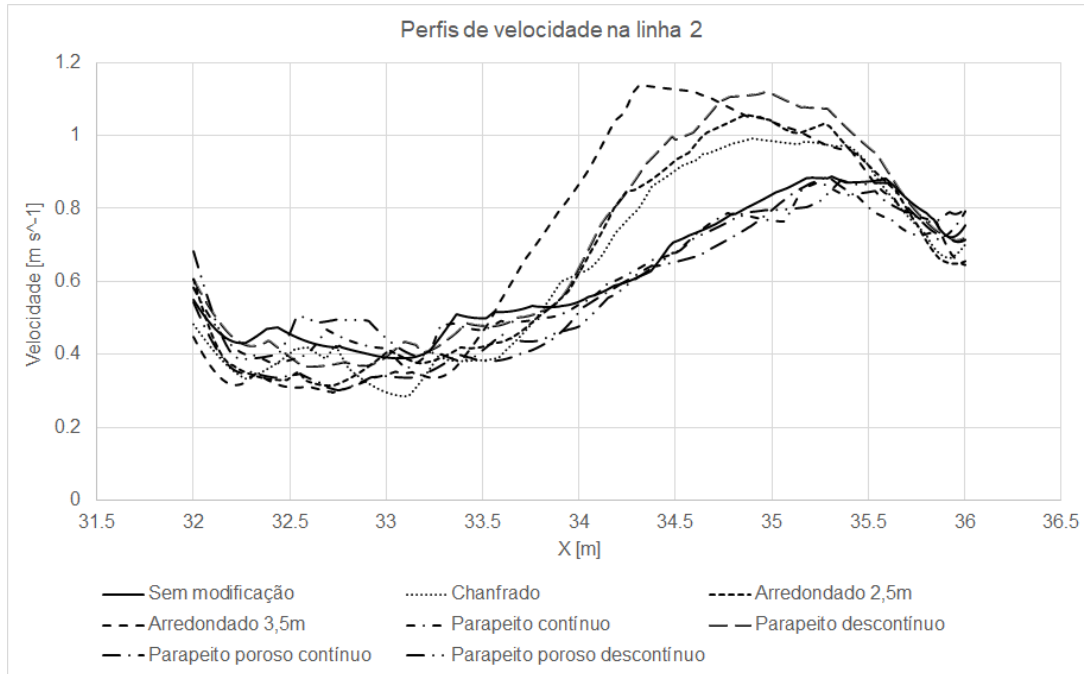


Figura 28 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 2.

Na linha 3, ilustrada na Figura 29, as velocidades iniciais são menores para todos os casos modificados. Há um aumento próximo aos 28 metros, onde todas as modificações possuem velocidades mais altas que a configuração original. Em seguida, os valores de velocidade flutuam, fazendo com que as modificações fiquem abaixo ou muito próximas do valor da configuração original.

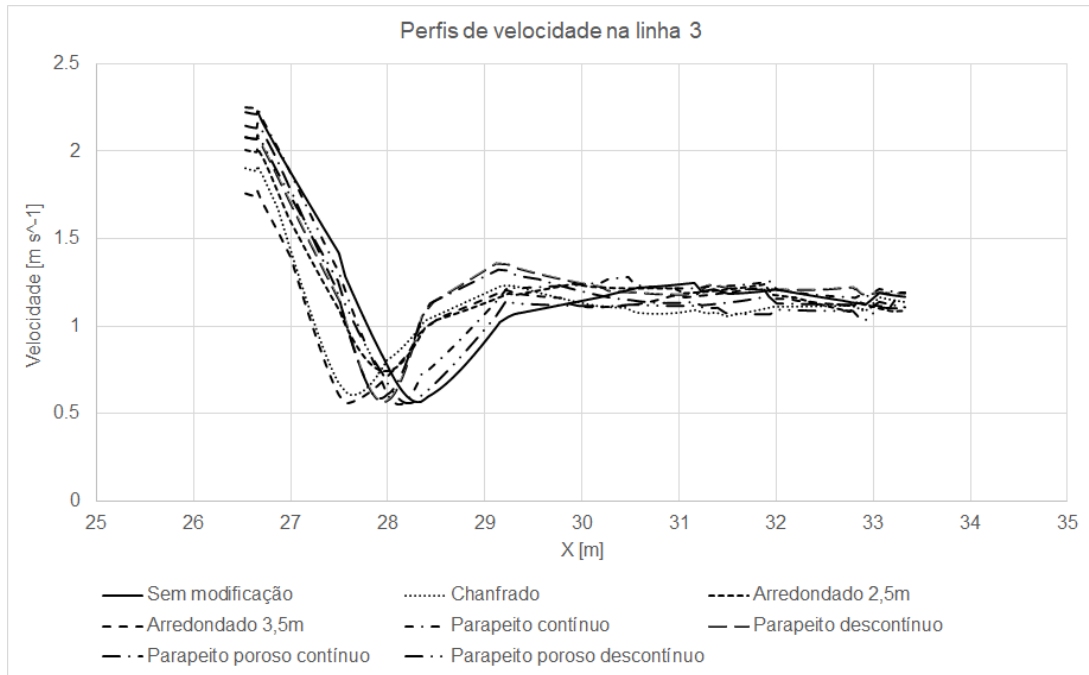


Figura 29 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 3.

Para as velocidades na linha 4, ilustradas na Figura 30, pode-se observar que nos valores entre aproximadamente 22 a 42 metros, todos os perfis modificados possuem velocidades mais altas que o caso sem modificação. No caso das velocidades iniciais e finais, os valores modificados são próximos do valor original da velocidade.

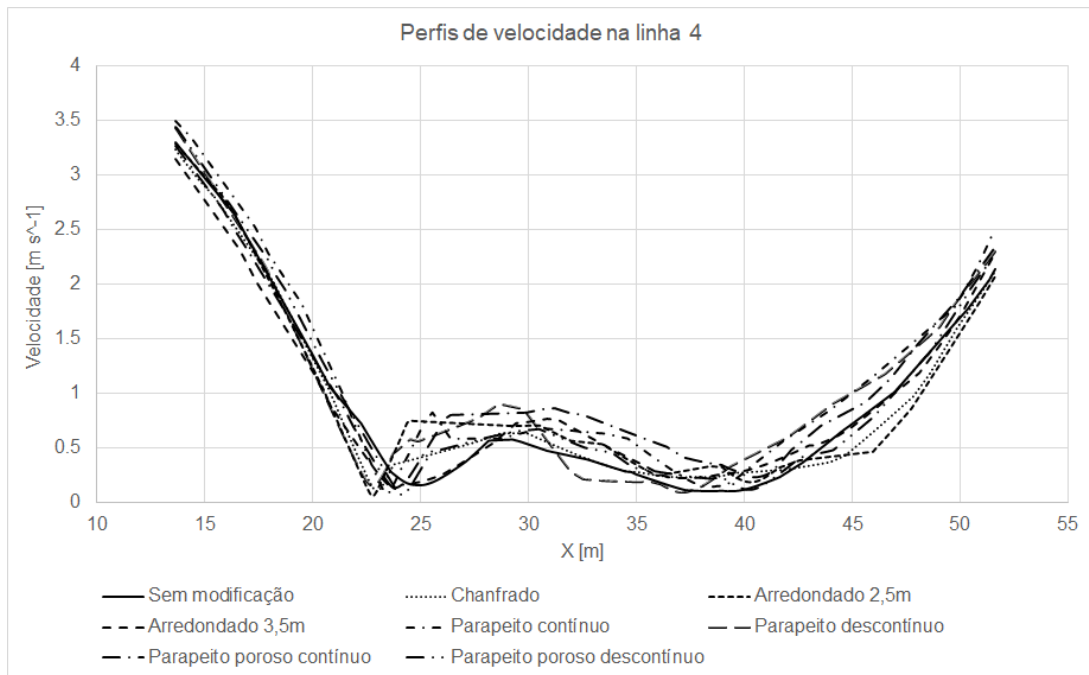


Figura 30 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 4.

Para a linha 5, ilustrada na Figura 31, é possível notar que as velocidades para os perfis arredondados possuem valores bem acima das outras modificações, inclusive da

configuração original; a modificação de chanfrado possui valores ligeiramente maiores, e as demais configurações, valores menores.

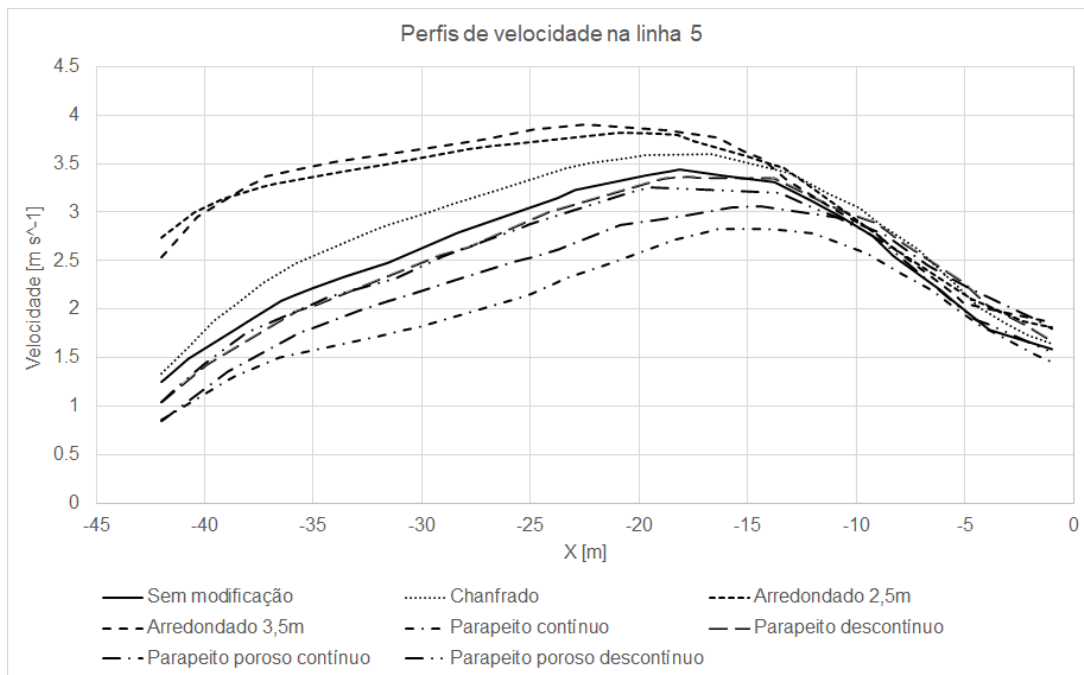


Figura 31 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 5.

Observando a Figura 32, que ilustra as velocidades na linha 6, é possível notar que, mais uma vez, os perfis arredondados e chanfrado possuem velocidades médias com valores acima da configuração original e de outras modificações, sendo os casos arredondados aqueles com maiores valores. As demais modificações possuem valores de velocidade abaixo dos valores da configuração original.

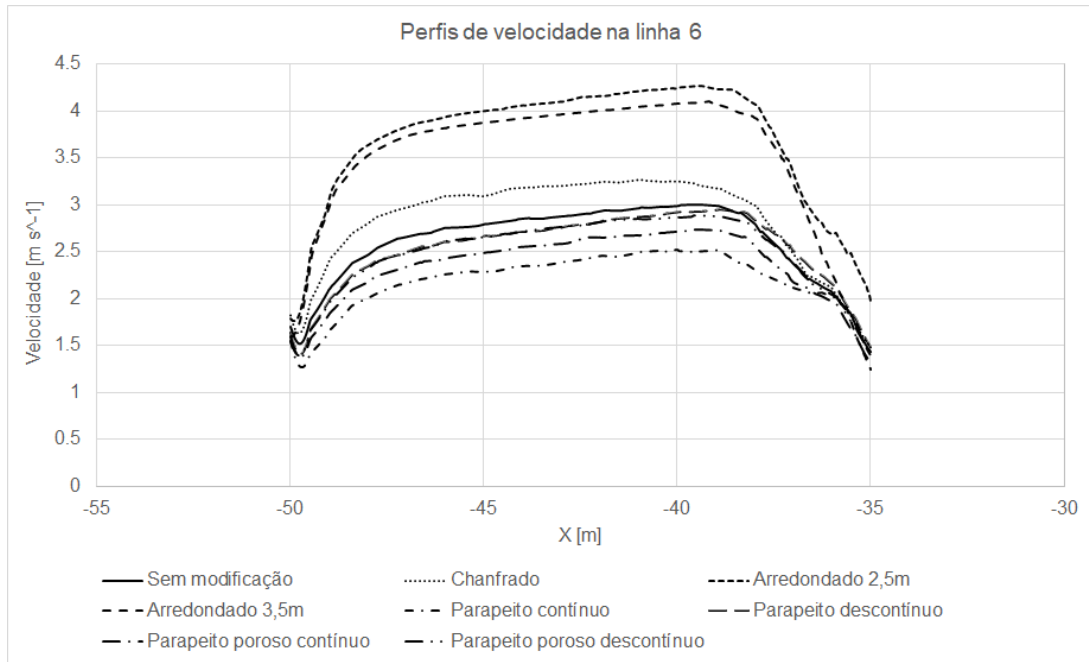


Figura 32 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 6.

Para a linha 7, com seus perfis de velocidade ilustrados na Figura 33, inicia-se as análises nas linhas verticais, sendo a velocidade tomada no eixo z . Deste modo, nota-se que os perfis são muito semelhantes, com ligeiras variações entre as diferentes geometrias. Em média, as velocidades iniciais da configuração original são menores, e se tornam maiores em aproximadamente 6 metros.

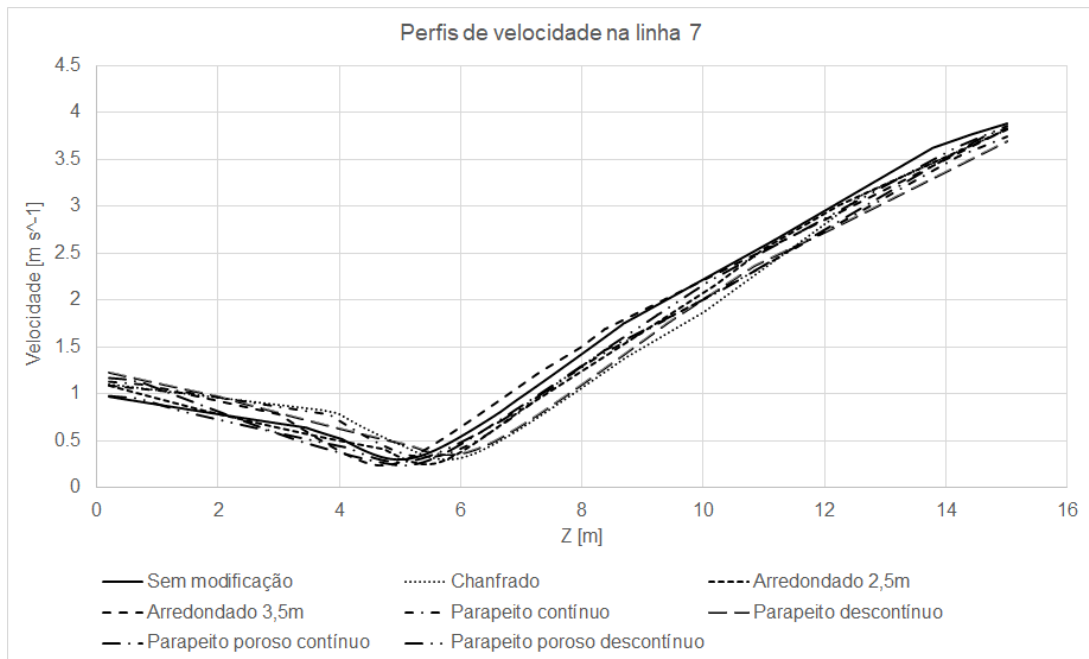


Figura 33 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 7.

Pelos perfis ilustrados na Figura 34 para a linha 8, nota-se que os valores de velocidade são maiores para os casos chanfrado e arredondamento de 2,5m. Para as demais

modificações, as velocidades são menores que para o caso original.

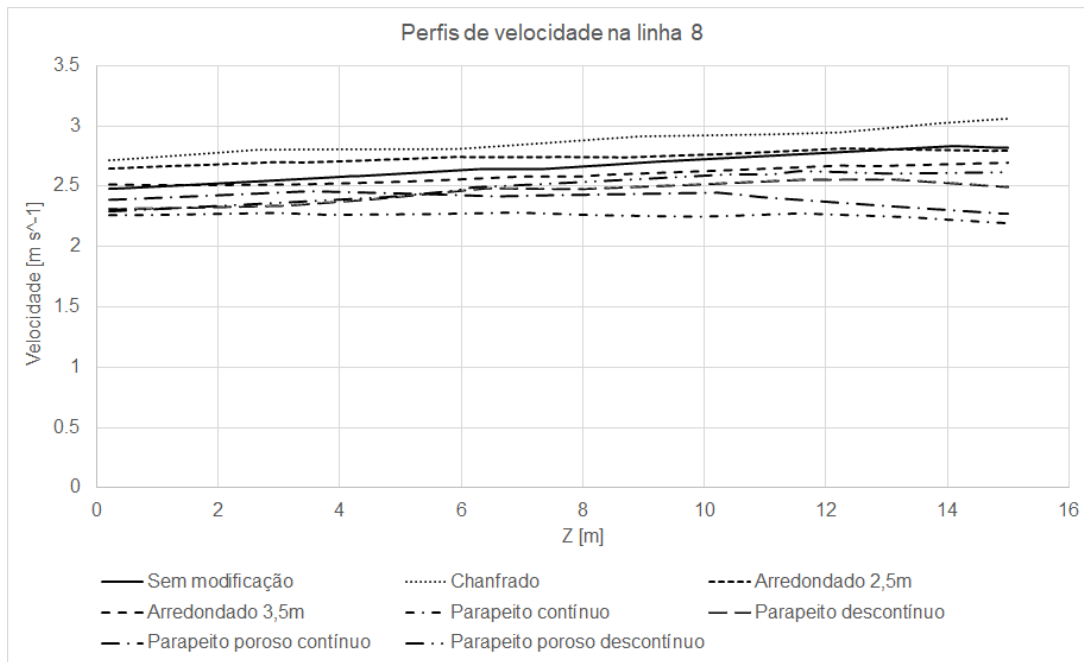


Figura 34 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 8.

Para os perfis da linha 9, ilustrados na Figura 35, é possível perceber que apenas a geometria de chanfro possui valores ligeiramente maiores que a configuração original. Para todos os outros casos modificados, as velocidades possuem valores menores.

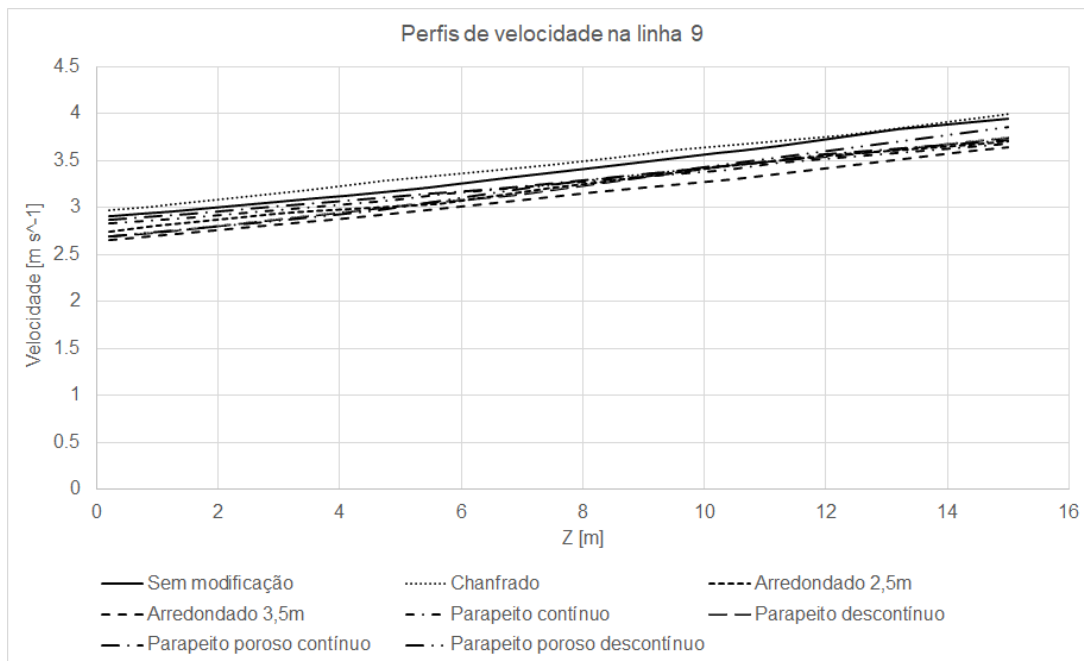


Figura 35 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 9.

Para os perfis ilustrados nas Figuras 36, 37 e 38 (linhas 10, 11 e 12), as diferenças entre as modificações e o caso original são mínimas, não gerando efeitos significativos.

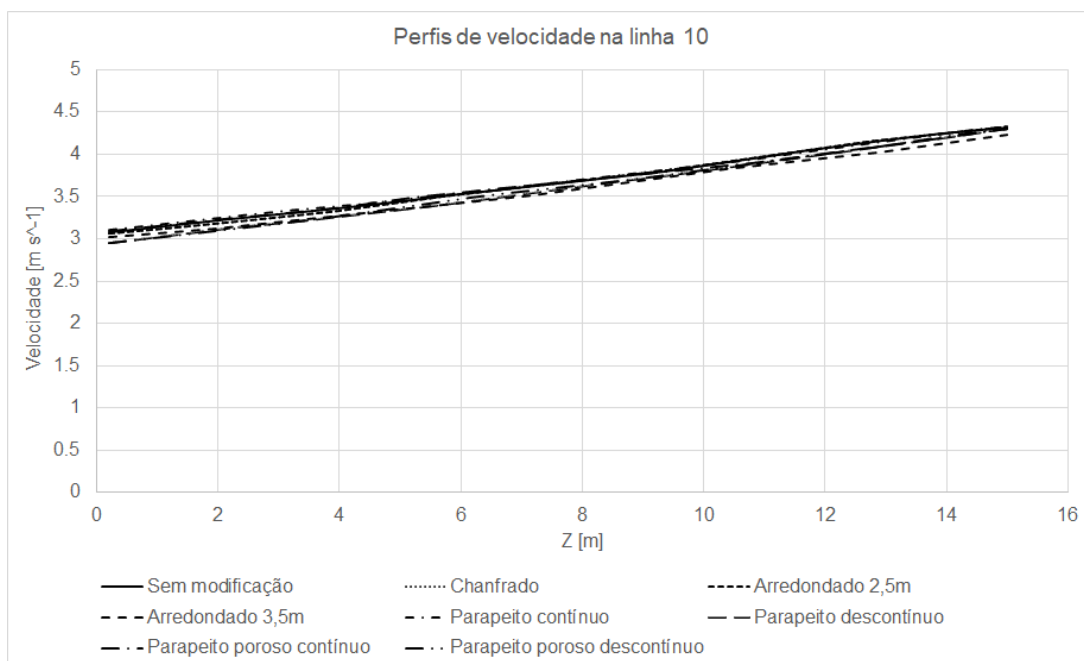


Figura 36 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 10.

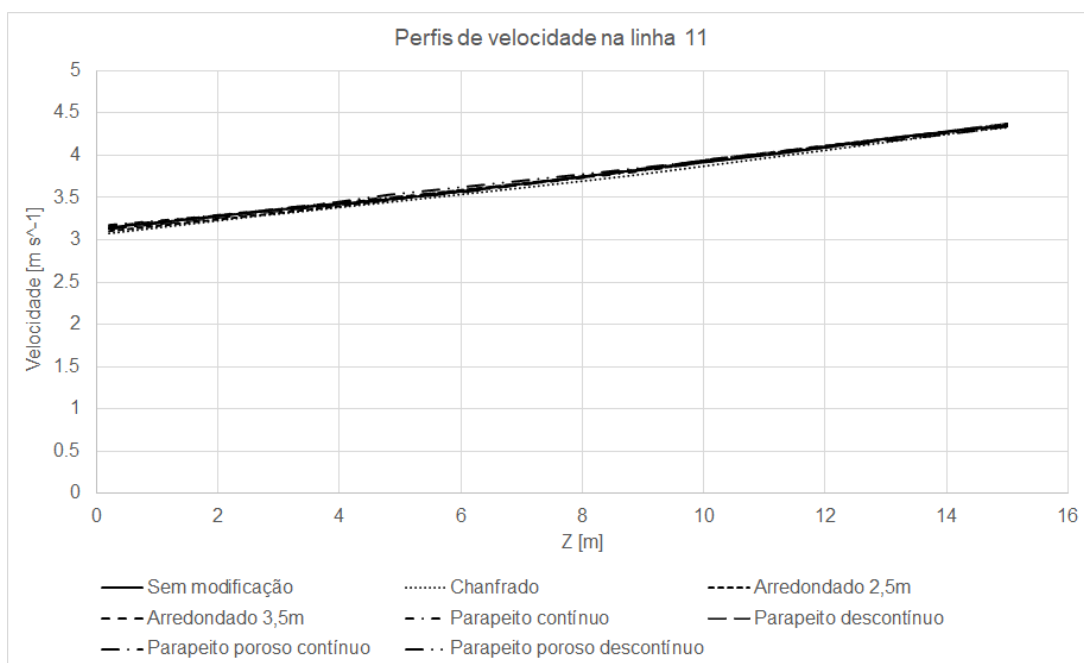


Figura 37 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 11.

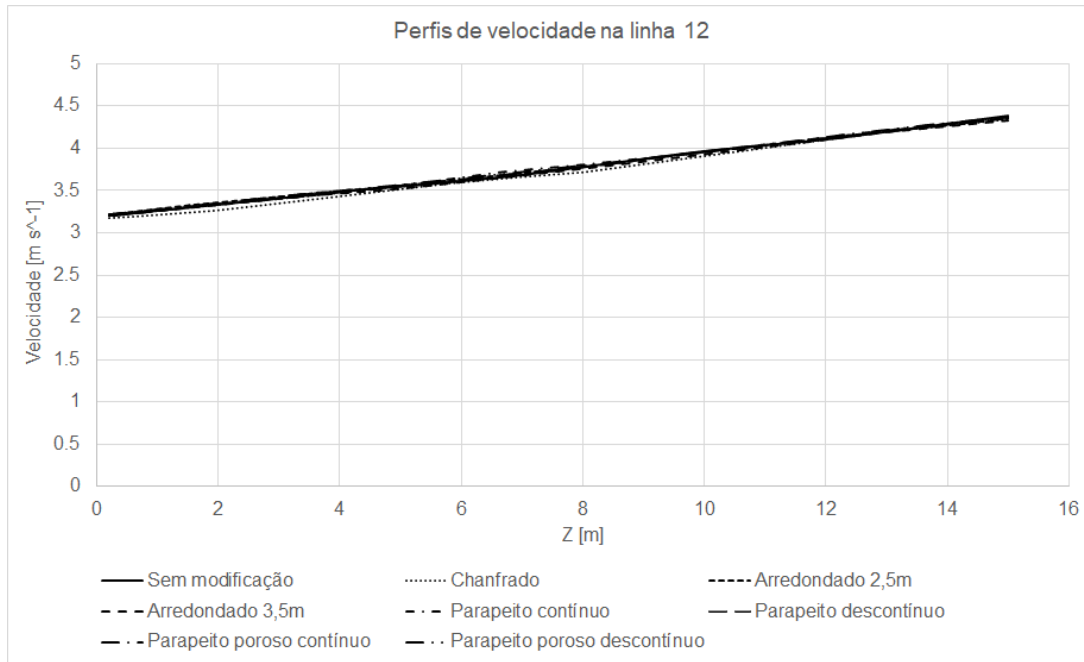


Figura 38 – Perfis de velocidade para a FGA 1 na linha de análise 12.

5.2.2 FGA 2

Para o caso da linha 1, ilustrado na Figura 39, é possível notar que as velocidades iniciais são muito próximas entre si. Em valores de aproximadamente -20 metros, as velocidades para os casos arredondados e chanfrados são maiores que o caso original, enquanto todos os outros possuem velocidades menores.

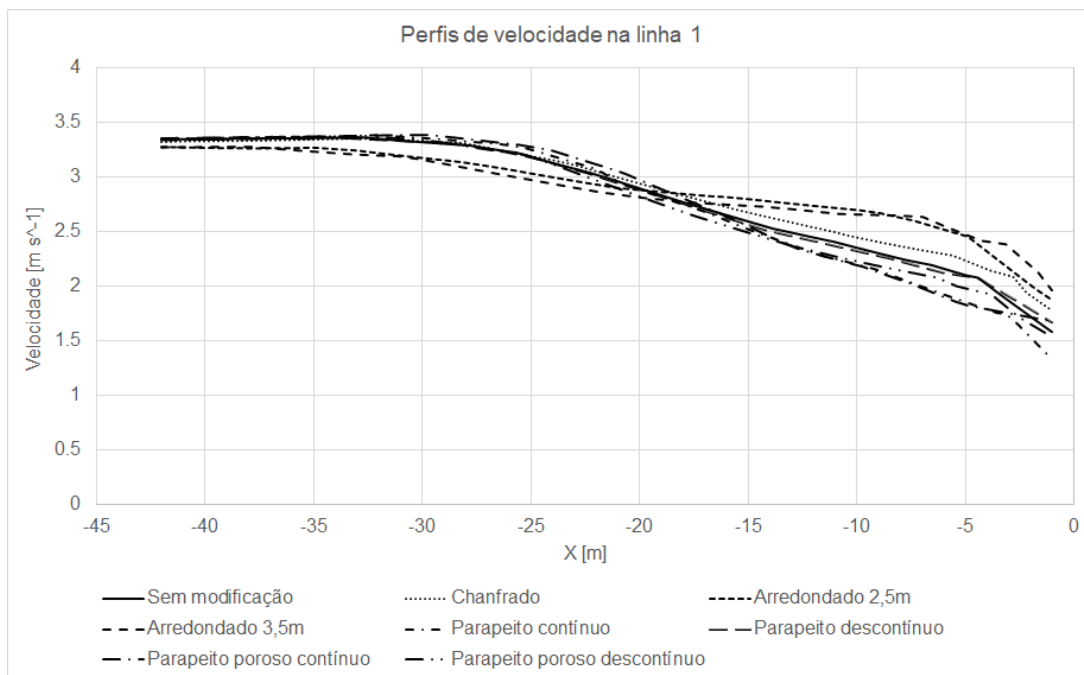


Figura 39 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 1.

Observando-se os perfis de velocidade da linha 2, ilustrados na Figura 40, é possível

notar que os casos arredondados possuem os maiores valores de velocidade em quase todos os momentos. As demais modificações variam - as velocidades iniciam menores que os valores da configuração inicial, tornando-se maiores em aproximadamente 34,5 metros e, em seguida, decaem para valores inferiores novamente.

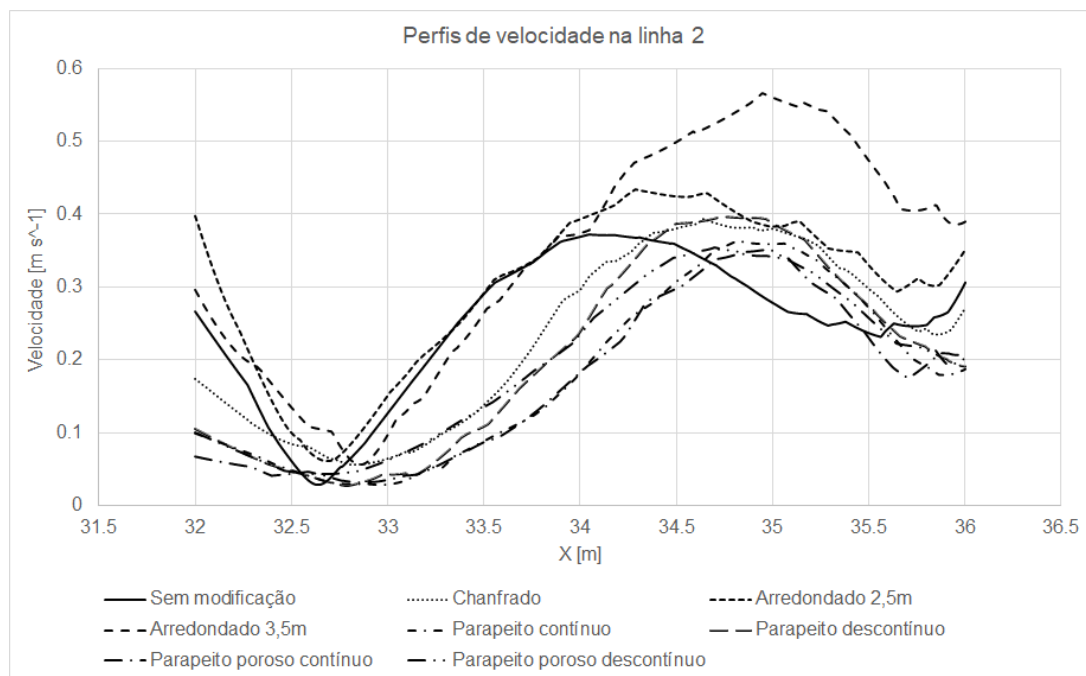


Figura 40 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 2.

Os valores de velocidade na linha 3 para todas as modificações iniciam-se menores que o caso original, como notado na Figura 41, tornando-se maiores em aproximadamente 28 metros. Decaem novamente ao redor de 31 metros, estabilizando em valores próximos aos valores da configuração original.

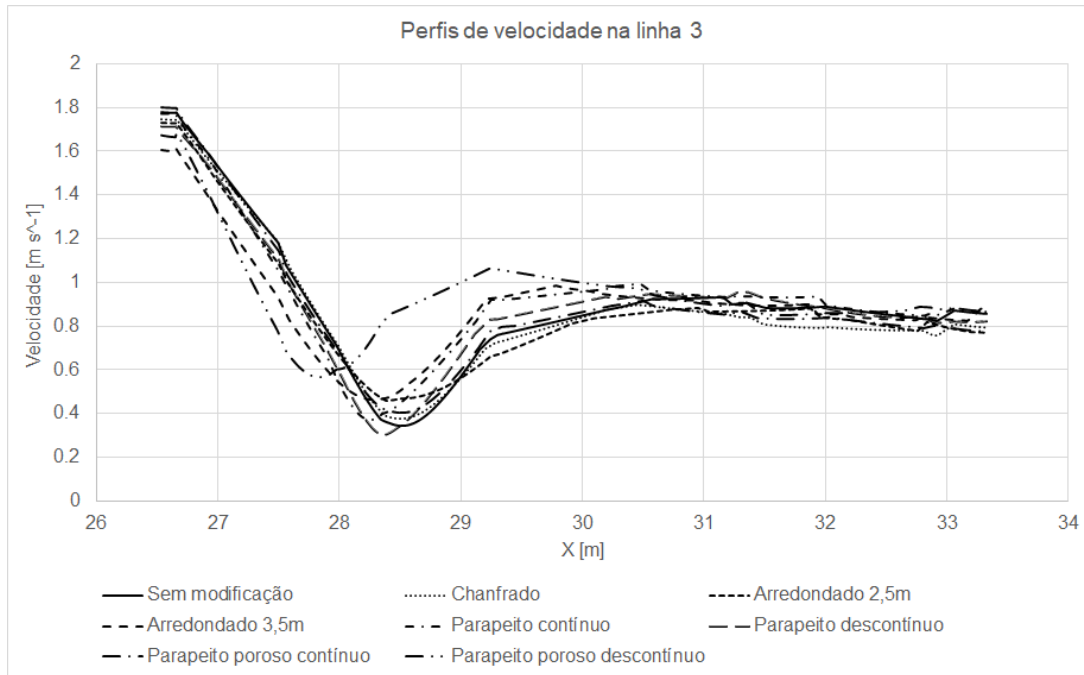


Figura 41 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 3.

Para as velocidades na linha 4, ilustradas na Figura 42, é possível observar que os valores iniciais e terminam em valores próximos entre si. Entre aproximadamente 25 e 40 metros, ocorre um aumento da velocidade de todas as modificações em relação ao modelo original, sendo o caso do parapeito poroso contínuo o que alcança os maiores valores.

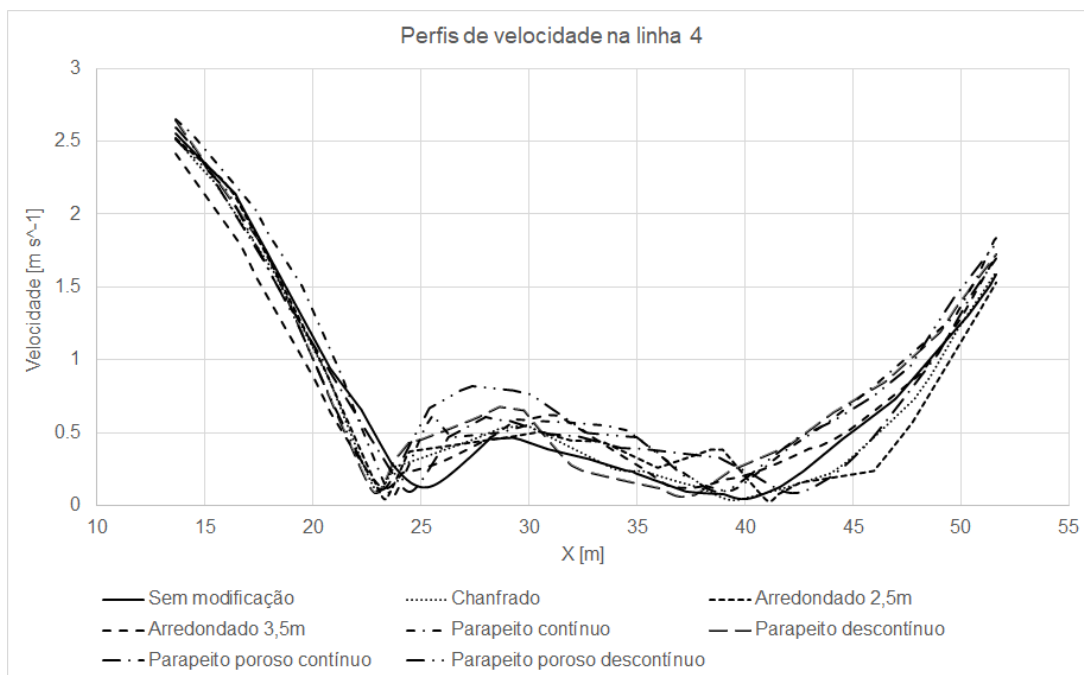


Figura 42 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 4.

Para a linha 5, ilustrada com seus perfis de velocidade na Figura 43, nota-se que as velocidades iniciais e terminam com valores próximos entre si, com os casos arredondados

possuindo velocidades finais ligeiramente menores. Em aproximadamente -30 metros, os casos arredondados alcançam valores maiores que o caso sem modificação, mantendo-se acima até aproximadamente -15 metros.

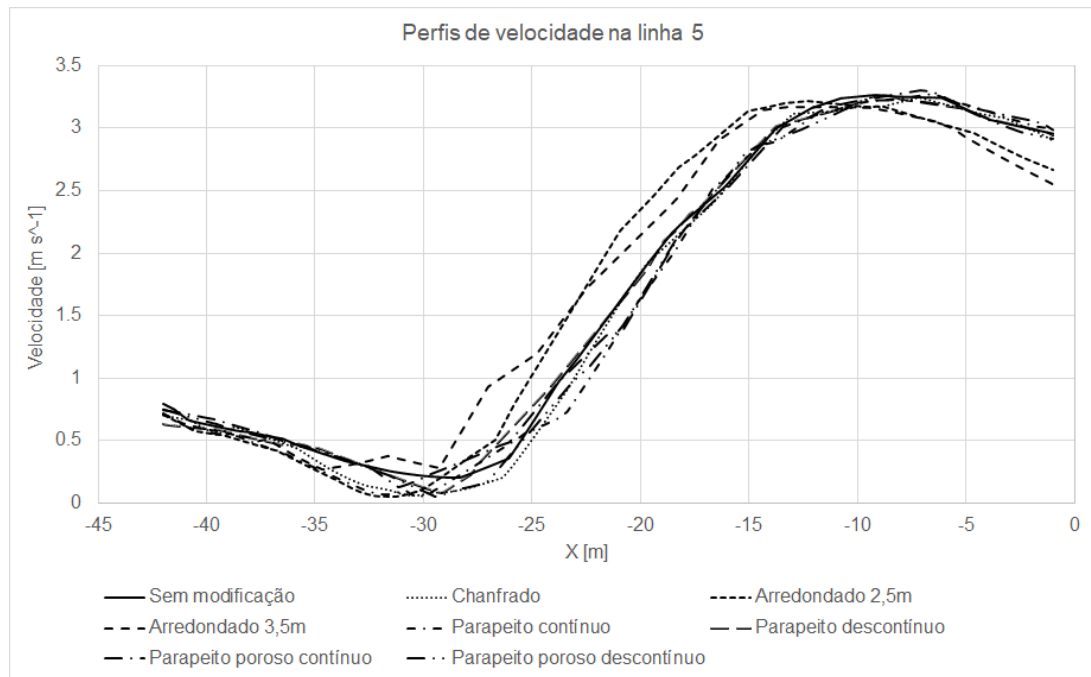


Figura 43 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 5.

Na linha 6, ilustrada na Figura 44, é possível observar que as velocidades iniciais possuem valores muito próximos, mantendo-se com relativa proximidade em até cerca de -39 metros. Os casos arredondados possuem, inicialmente, valores menores de velocidade que todos os outros casos, tornando-se maiores em aproximadamente -39 metros.

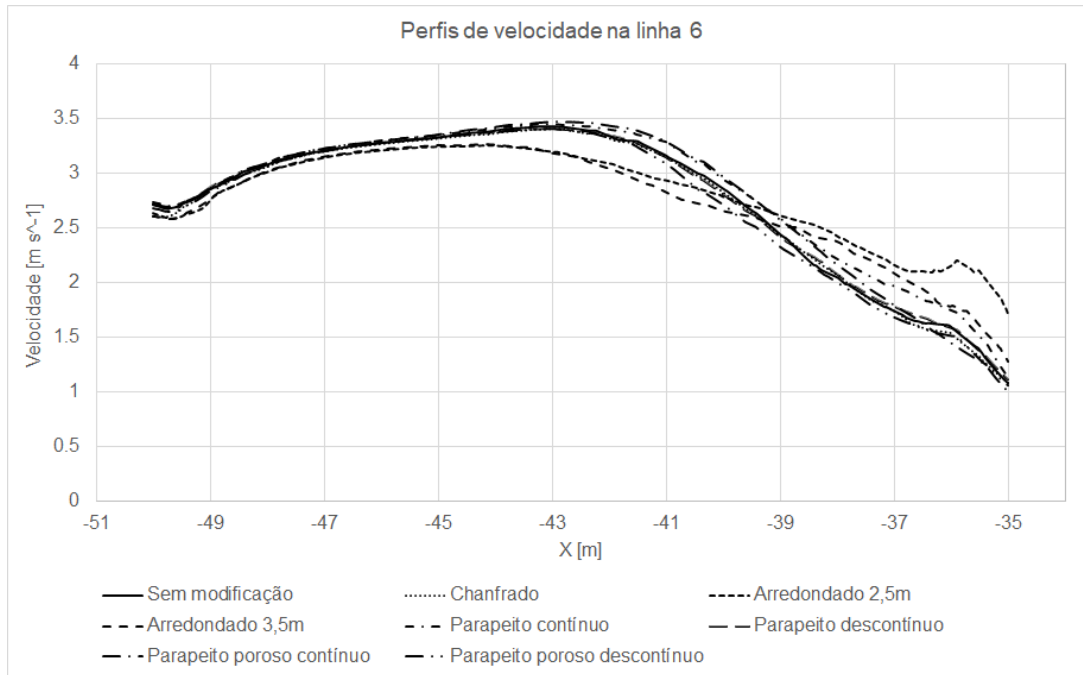


Figura 44 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 6.

Para as velocidades na linha 7, que podem ser observadas na Figura 45, observa-se que a velocidade inicial para o caso com arredondamento de 2,5m é menor que o caso original, enquanto que, para todas as outras modificações, as velocidades são maiores. Em aproximadamente 6 metros, a configuração original alcança valores de velocidade maiores que todos os outros casos.

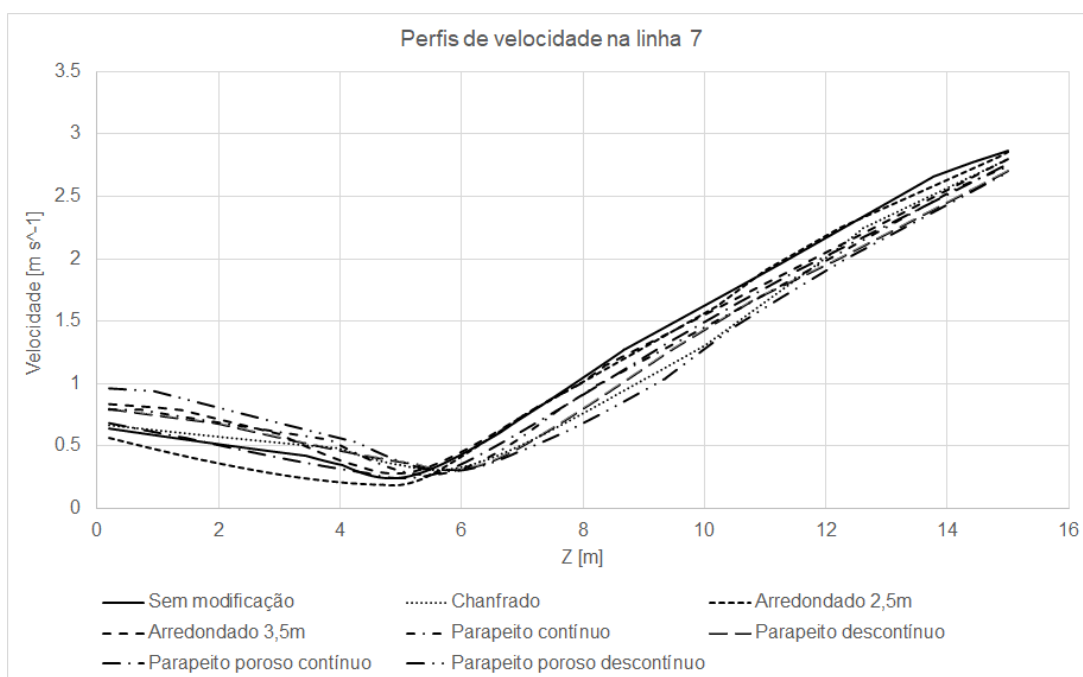


Figura 45 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 7.

Como é possível perceber nas Figuras 46 a 50, que são os perfis de velocidade

nas linhas de 8 a 12, os valores são muito próximos, e não permitem uma análise muito detalhada de diferença nas velocidades.

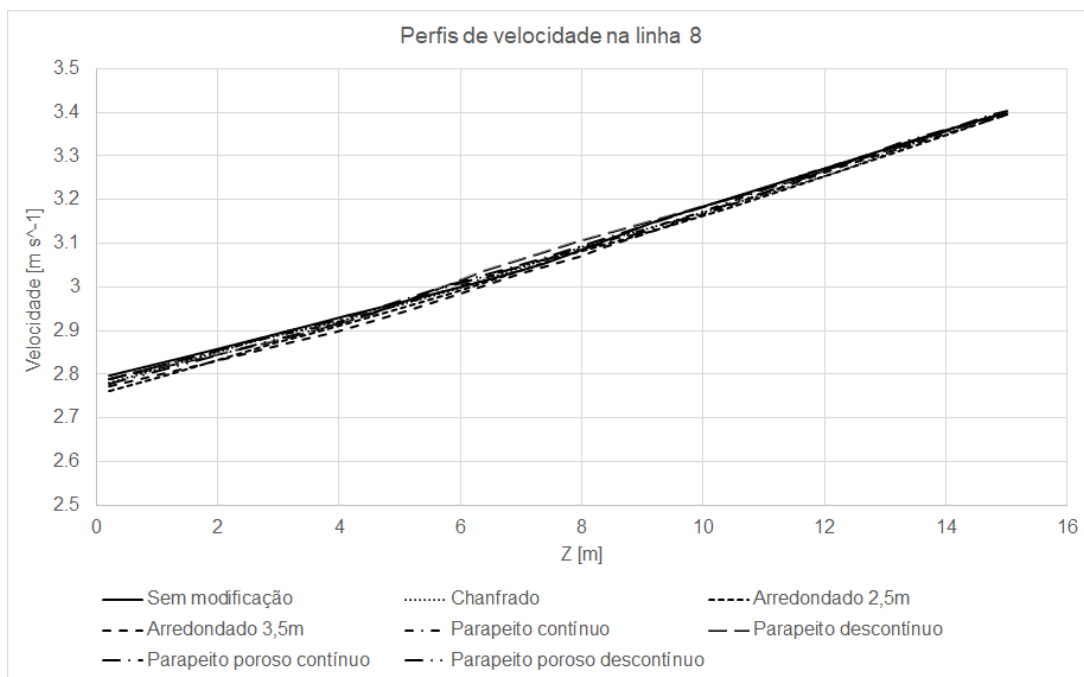


Figura 46 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 8.

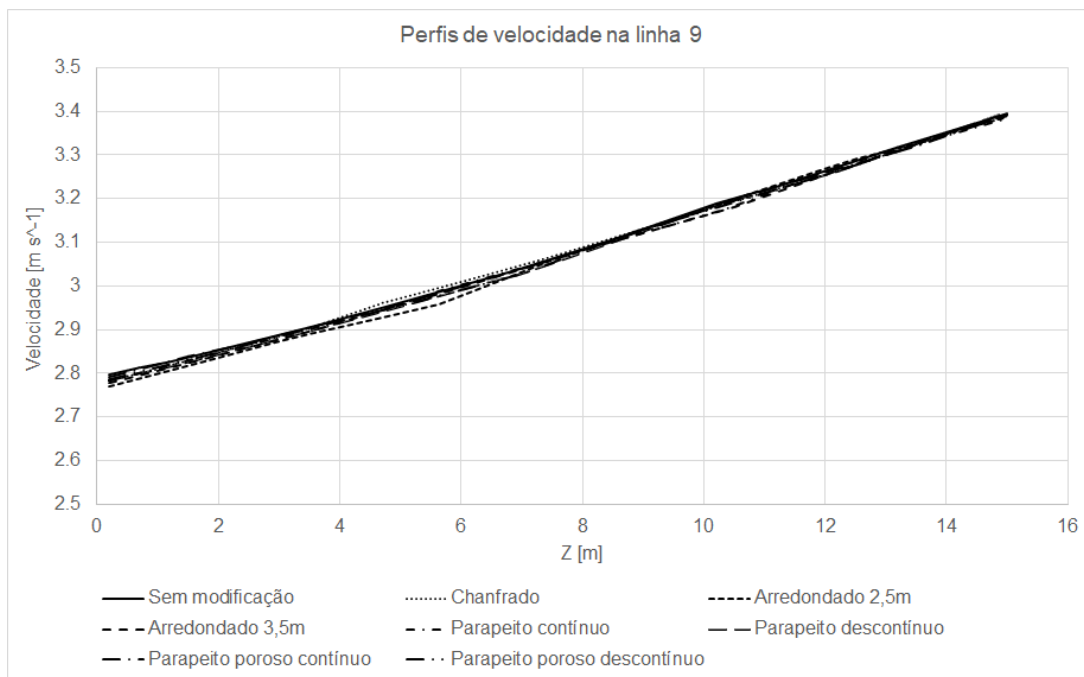


Figura 47 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 9.

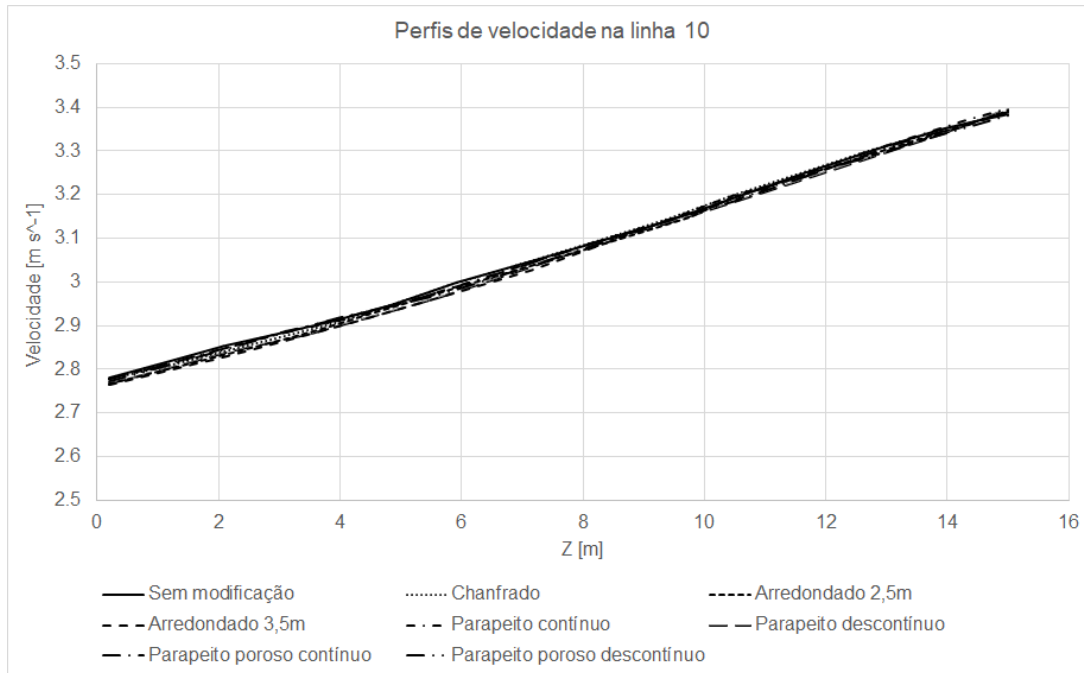


Figura 48 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 10.

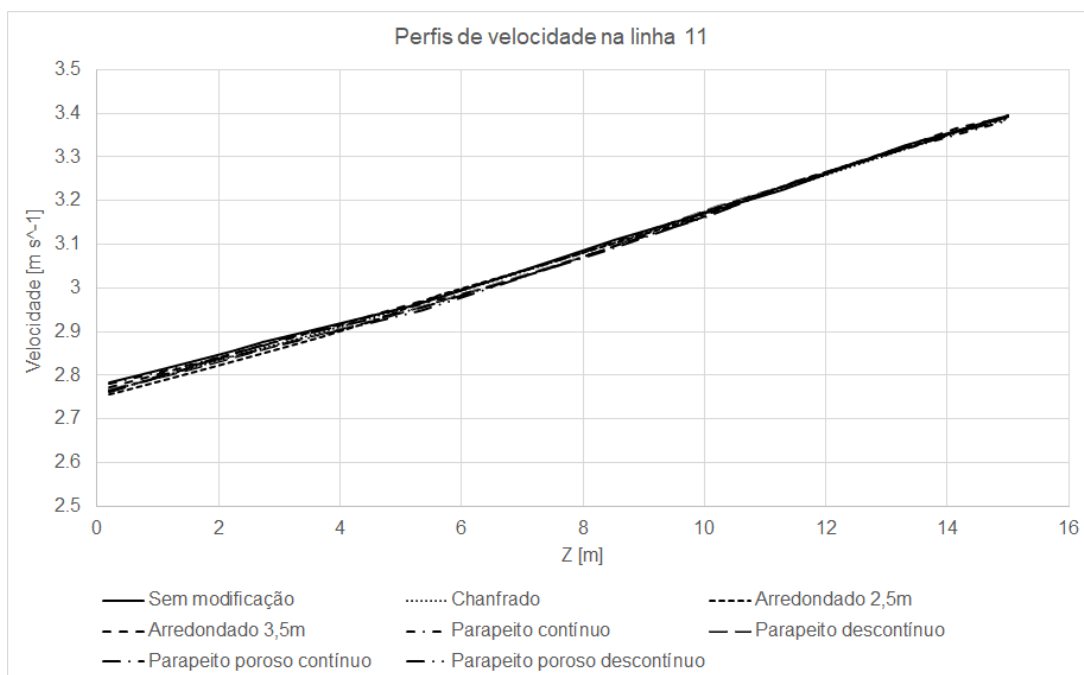


Figura 49 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 11.

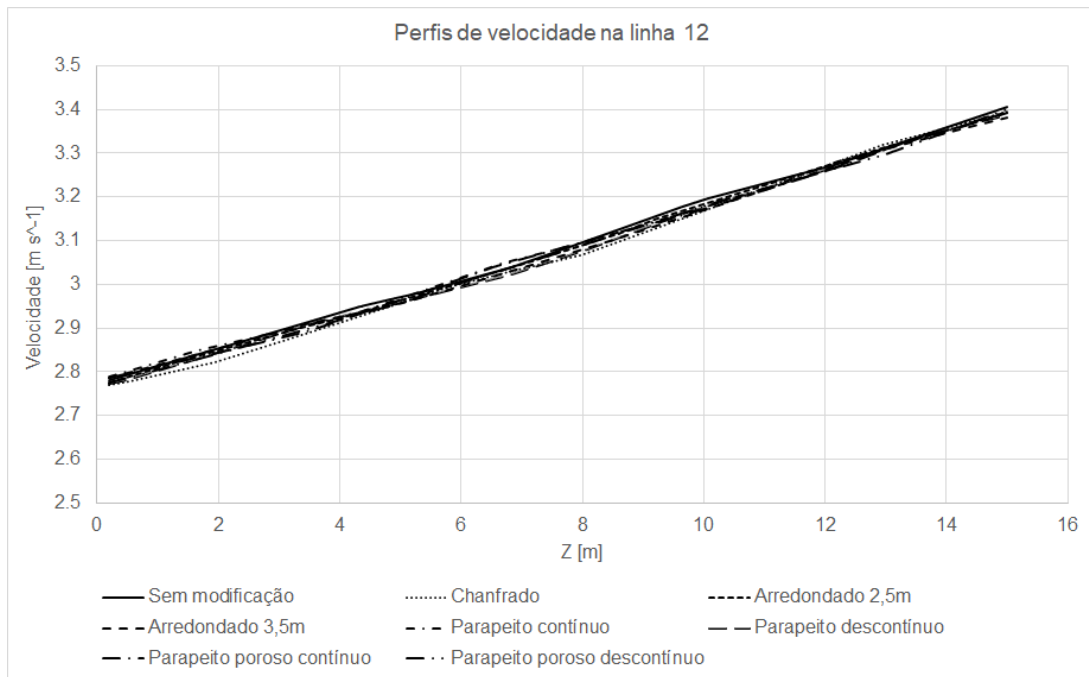


Figura 50 – Perfis de velocidade para a FGA 2 na linha de análise 12.

5.3 Resultados de linhas de velocidade

Foi possível obter resultados para linhas de corrente de velocidade, e optou-se por destacar os resultados para os casos sem modificação, chanfrado, arredondamento de 3,5m e parapeito poroso descontínuo, a fim de simplificar a visualização e representar todos os tipos de geometria.

5.3.1 FGA 1

Ilustrações das linhas de corrente para a FGA 1 nos casos descritos encontram-se nas Figuras 51 a 54. Observa-se que as maiores diferenças ocorrem na modificação do arredondamento (Fig. 53), sendo possível notar uma maior padronização do escoamento nos arredores dos prédios, isto é, as velocidades possuem valores mais uniformes na área analisada.

Contudo, é possível notar o aparecimento de uma zona de recirculação na lateral do prédio LDTEA, fenômeno que não ocorre de maneira tão evidente em outras modificações. Neste mesmo caso, observa-se também a modificação da zona de recirculação entre o UAC e o MESP, com o aparecimento de vórtices adicionais ao já existente.

Nas demais modificações, a diferença mais significativa é o desenvolvimento da zona de recirculação atrás do UAC. Verifica-se também modificação do comportamento do fluxo atrás do UED.

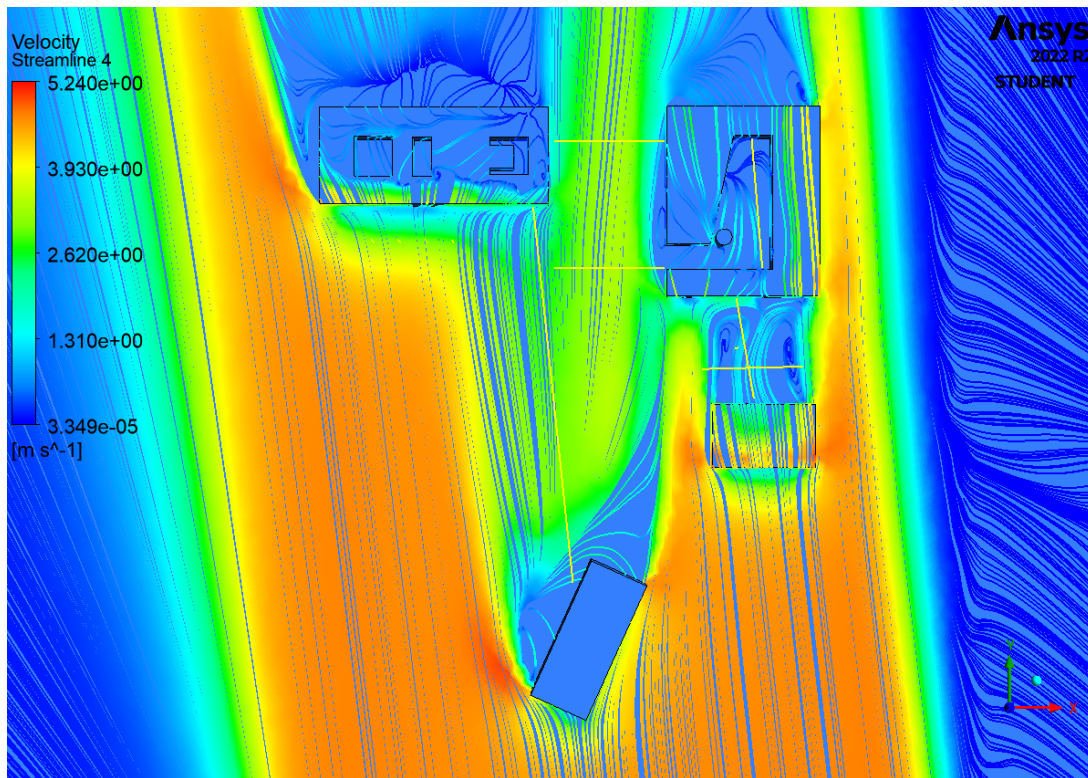


Figura 51 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso sem modificação.

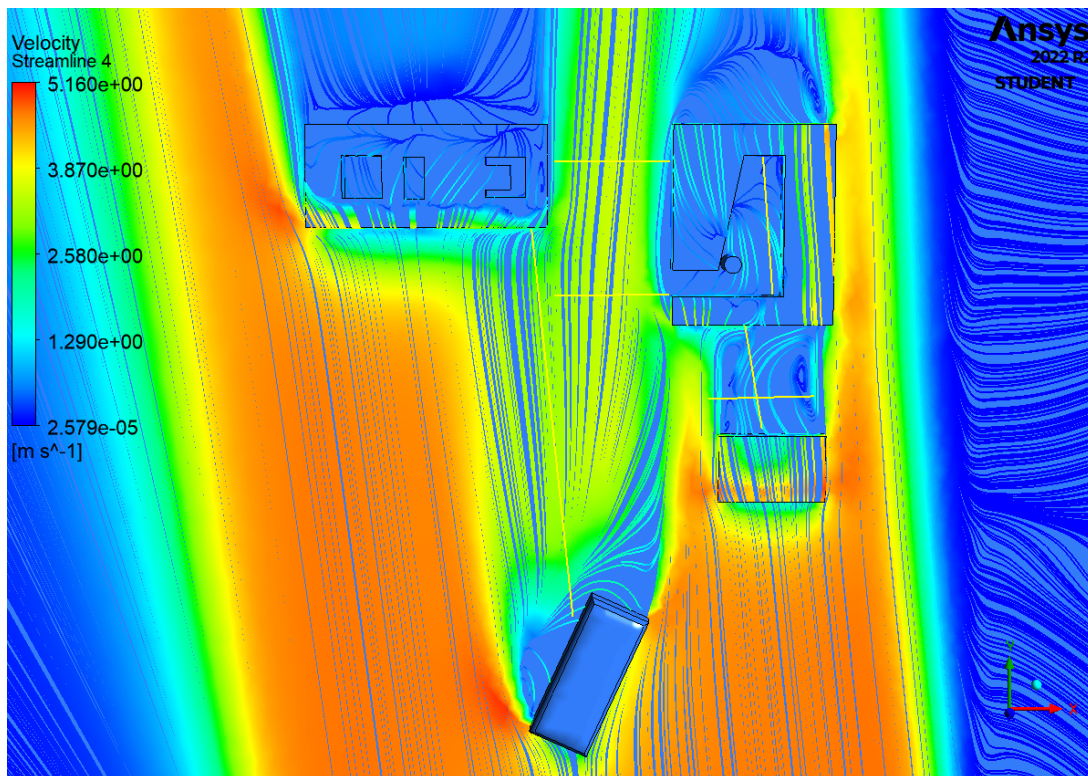


Figura 52 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso chanfrado.

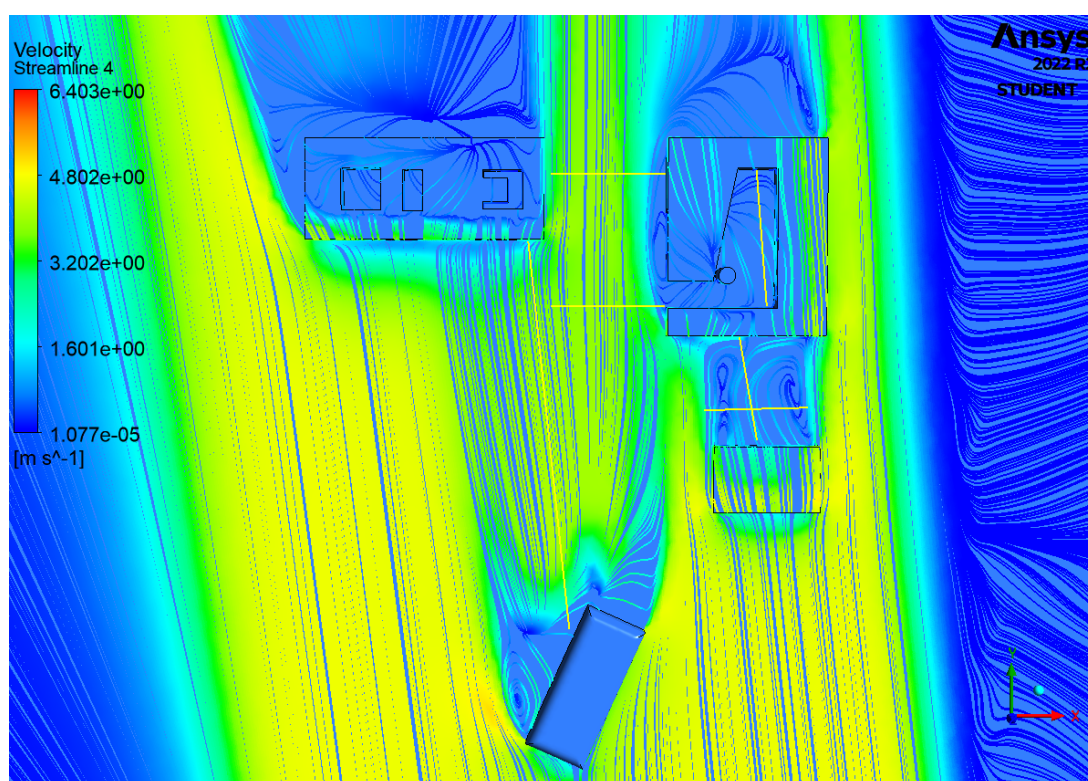


Figura 53 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso com arredondamento de $3,5m$.

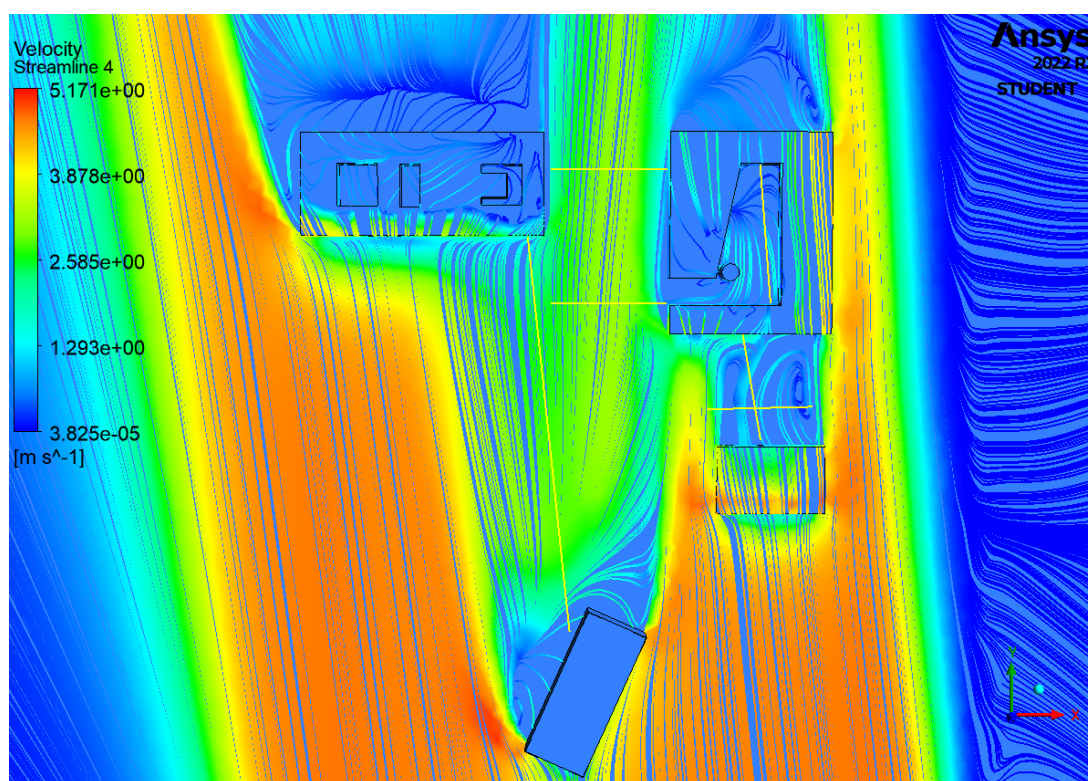


Figura 54 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 1 para o caso com parapeito poroso descontínuo.

5.3.2 FGA 2

Agora, serão analisadas as linhas de corrente de velocidade para a FGA 2, ilustradas nas Figuras 55 a 58. Como pontuado anteriormente, as condições iniciais e de contorno utilizadas no caso FGA 2 foram retirados de uma das referências (MACEDO, 2021), onde foi utilizado um domínio retangular - por essa razão, a entrada de vento se deu pelos sentidos sul/sudeste. Com a mudança para um domínio octogonal, tornou-se possível a consideração de entrada como sendo apenas o sudeste, o que permitiu uma representação mais acurada do fluxo no domínio. Além disso, observa-se que as mudanças ocorridas para as condições de FGA 2 são ainda menos perceptíveis que no caso anterior.

Isto posto, observa-se que não há diferenças significativas entre o caso não modificado (Fig. 55) e a modificação do chanfro (Fig. 56). Para o caso arredondado (Fig. 57), a diferença mais perceptível é o aparecimento de uma zona de estagnação à frente do prédio LDTEA, o que dá indícios que uma zona de recirculação pode vir a se formar naquele local. Ademais, destaca-se que o fluxo para o caso do parapeito poroso descontínuo (Fig. 58) possui maior uniformidade.

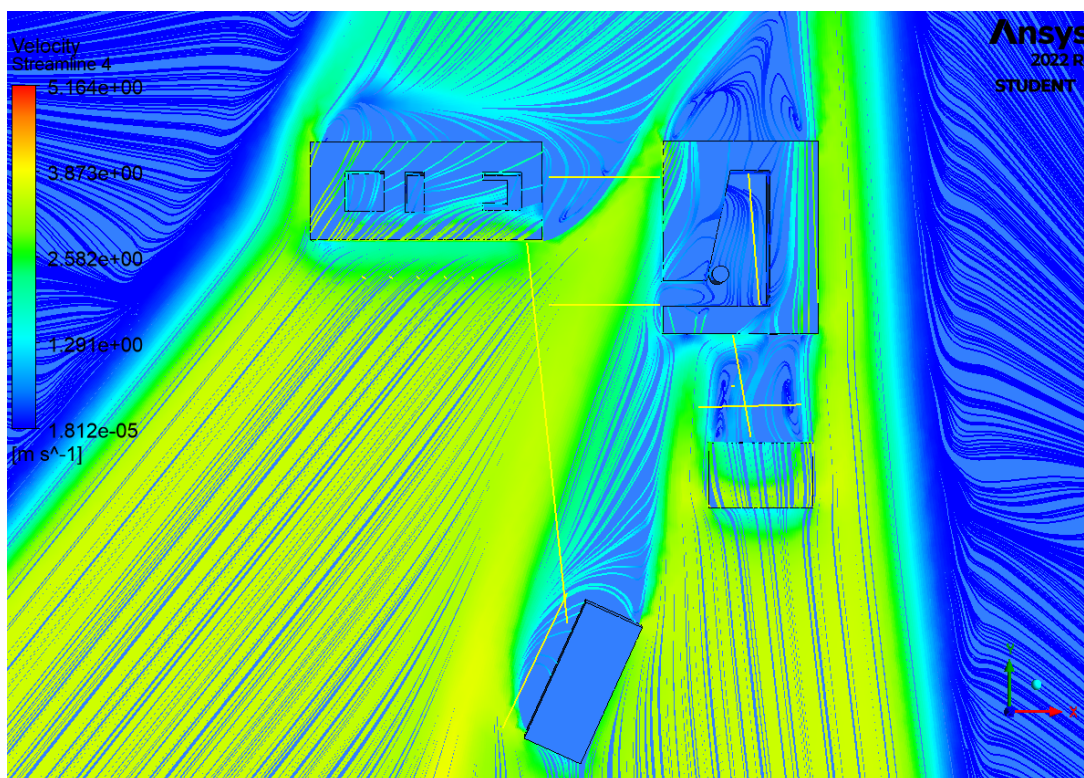


Figura 55 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso sem modificação.

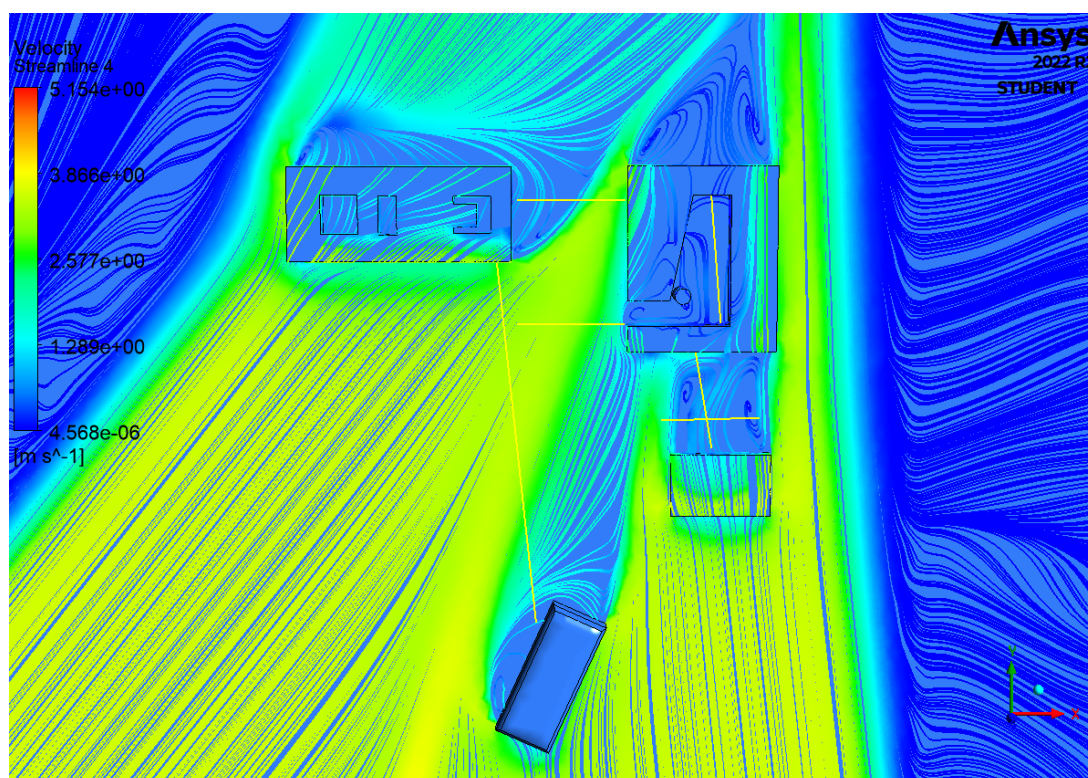


Figura 56 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso chanfrado.

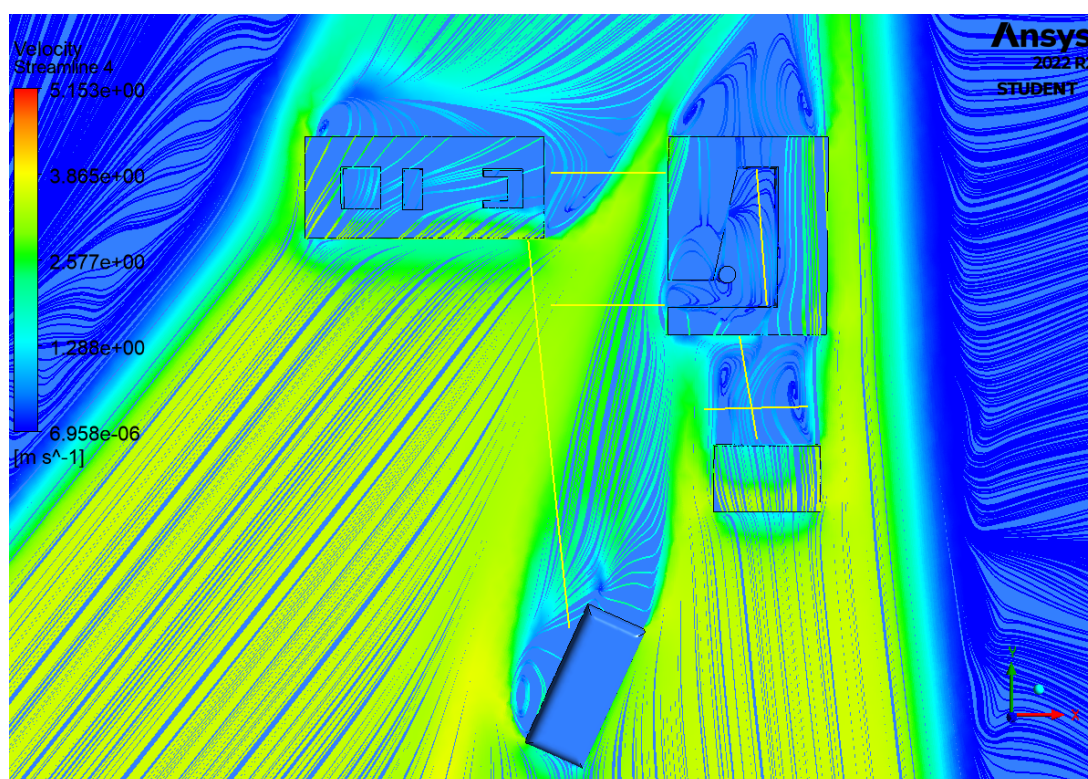


Figura 57 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso com arredondamento de 3,5m.

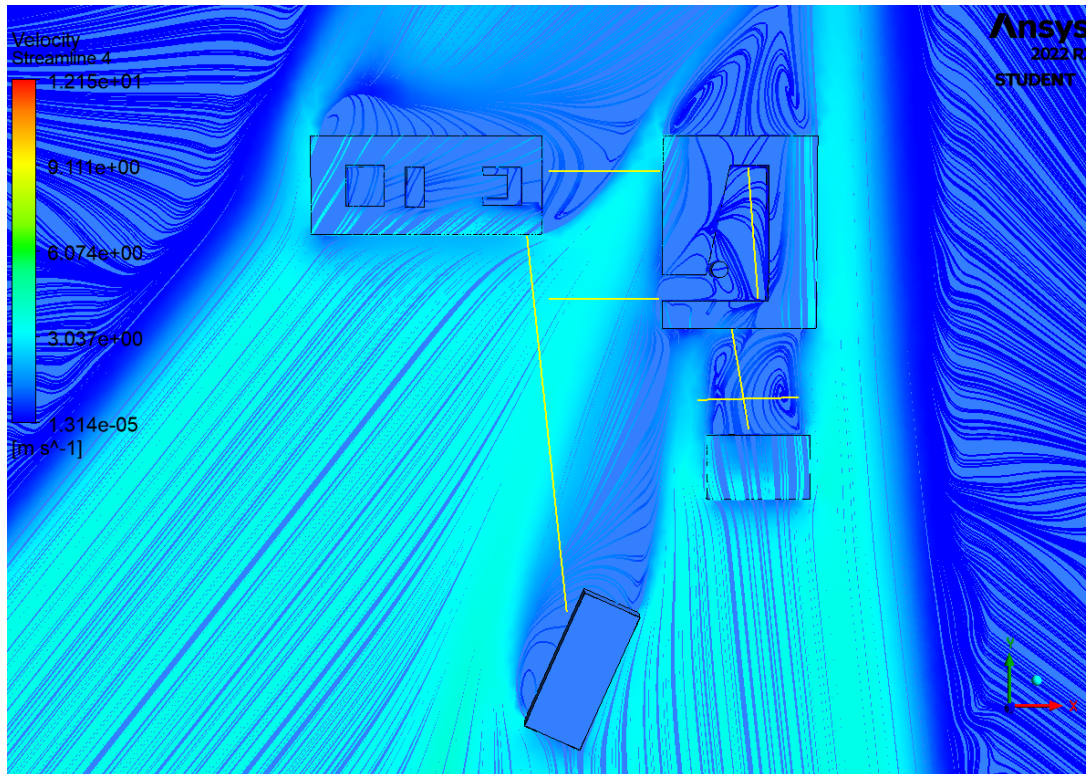


Figura 58 – Linhas de corrente de velocidade na FGA 2 para o caso com parapeito poroso descontínuo.

5.4 Resultados de força

Foi possível a obtenção de resultados de força em cada uma das direções (x , y e z) do domínio. Destaca-se que as forças em x e em y representam a força de arrasto em suas respectivas direções, enquanto a força em z pode ser entendida como análoga à sustentação, uma vez que é perpendicular às linhas de corrente (ANDERSON, 2015).

Uma tabela comparativa entre os resultados de força para o caso FGA 1 encontra-se na Tabela 1, e para o caso FGA 2 encontra-se na Tabela 2. Os valores são computados em Newtons (N).

Geometria	F_x	F_y	F_z
Sem modificação	-1818,99	3450,57	4314,55
Chanfros	-1783,87	3204,70	4612,65
Arredondamento 2, 5m	-1118,08	2763,33	6150,08
Arredondamento 3, 5m	-856,60	2721,59	6202,57
Parapeito contínuo maciço	-2231,58	3971,16	3761,60
Parapeito descontínuo maciço	-1860,37	3603,59	4346,72
Parapeito contínuo poroso	-2098,02	3759,99	3870,45
Parapeito descontínuo poroso	-1865,31	3661,90	4362,15

Tabela 1 – Comparação dos resultados de forças com variações na geometria para o caso FGA 1

Geometria	F_x	F_y	F_z
Sem modificação	-779,94	1865,00	2325,48
Chanfros	-741,94	1714,20	2463,87
Arredondamento 2, 5m	-387,74	1470,26	3316,81
Arredondamento 3, 5m	-250,34	1431,50	3305,83
Parapeito contínuo maciço	-1030,81	2199,20	2118,72
Parapeito descontínuo maciço	-786,79	1955,80	2373,26
Parapeito contínuo poroso	-936,30	2074,15	2084,95
Parapeito descontínuo poroso	-764,90	1963,91	2356,24

Tabela 2 – Comparação dos resultados de forças com variações na geometria para o caso FGA 2

É possível notar que para ambos os casos analisados, o arredondamento de cantos foi o que produziu menores valores, em módulo, de força nas direções x e y - que são as direções pertinentes à proposta do trabalho. Ressalta-se que menores forças em x e y resultam em maiores forças em z , o que pode ser explicado pelo desvio do fluxo de vento ocasionado por inserção de formas aerodinâmicas no domínio.

Comparando com o prédio sem modificações, o arredondamento com raio 3, 5m foi o que resultou em maior diminuição em módulo das forças - no caso da FGA1, alcançou uma diminuição de 52,90% em x e 21,01% em y ; enquanto na FGA2 as diminuições chegaram a 67,90% em x e 23,24% em y . A modificação que resultou nas segundas menores forças foi o arredondamento com raio 2, 5m, que, para o caso da FGA1, foi capaz de diminuir as forças em x em 38,53% e em y em 19,92%; na FGA2, as forças em x diminuíram em 50,28% e em y em 21,16%.

A modificação que produziu os terceiros menores valores foi a adição de chanfros - no caso da FGA1, reduziu em 1,93% as forças em x e 7,12% as forças em y ; no caso da FGA2, o valor foi reduzido em 4,87% em x e 8,08% em y . Observa-se que há uma diferença notável nas diminuições percentuais entre os primeiros e o terceiro caso.

Destaca-se que algumas modificações resultaram no aumento de forças - o que é contrário à proposta de otimização apresentada - como é o caso da adição de parapeito contínuo maciço. Na FGA1, esta adição provocou um aumento de 22,68% na direção x e 15,09% na direção y ; na FGA2, o aumento foi de 32,16% em x e de 17,92% em y .

Retomando uma das referências a respeito da influência do vento no voo de drones, (SORBELLI et al., 2021) declara que o empuxo calculado necessário para que o drone voe é uma soma do peso total do próprio drone e o arrasto sofrido pelo mesmo - desta maneira, é interessante que as forças de arrasto no campo de atuação do drone sejam minimizadas. O autor ainda relata que a influência da direção do vento em relação ao trajeto de voo do drone é maior que a influência da magnitude da velocidade, portanto, é de suma importância conhecer o comportamento do vento ao realizar o voo.

6 Conclusão

Foi possível obter resultados satisfatórios de perfis de velocidade, linhas de corrente de velocidade, e forças para diversas modificações do edifício. Levando em conta as análises realizadas e o objetivo de otimização do fluxo de vento na FGA, conclui-se que a melhor modificação para a diminuição de forças no *campus* é o arredondamento de cantos com raio 3,5m. As demais modificações (chanfros e parapeitos) diminuíram de maneira irrelevante as forças de arrasto, ou ainda, resultaram em valores maiores.

Contudo, é necessária uma análise mais detalhada do raio ótimo de arredondamento para um objetivo determinado - ainda que o raio de 3,5m tenha resultado em maiores diminuições do que o raio de 2,5m, o crescimento de zonas de recirculação nos arredores do prédio modificado proporcional ao aumento do raio pode ser um indicativo de que há um valor de raio ideal para diminuir forças e uniformizar o escoamento. Além disso, o presente trabalho se propôs a realizar a modificação apenas no prédio LDTEA, sendo possível modificações em quaisquer outros prédios da Faculdade, resultando em alterações significativas do fluxo de vento.

A fluidodinâmica computacional se mostrou um recurso importante na análise e visualização do comportamento do vento. A utilização de um domínio octogonal - em oposição a um domínio retangular - possibilitou uma maior acurácia na determinação dos locais de entrada do vento, permitindo uma consideração mais precisa dos acontecimentos reais na Faculdade. Para aprofundar os estudos pertinentes ao voo de drones, é necessária a investigação mais detalhada da direção do vento e como as modificações dos edifícios interferem nessa direção.

Para trabalhos futuros recomenda-se um maior refinamento de malha, de modo a capturar com maior precisão o comportamento do vento. Além disto, é importante mencionar a necessidade de revisão do modelo de turbulência e dos parâmetros de simulação a depender dos propósitos do trabalho, uma vez que existem parâmetros mais adequados para a realização de simulação em contextos urbanos. Ainda, o modelo SST pode não ser adequado se há a intenção de observar fenômenos que exijam simulações transientes.

Referências

- ABNT. *NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro - RJ, 1988. Citado na página 29.
- ALY, A. M.; BRESOWAR, J. Aerodynamic mitigation of wind-induced uplift forces on low-rise buildings: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 36.
- ANDERSON, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*. Fifth ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2011. Citado na página 30.
- ANDERSON, J. D. *Fundamentos de Engenharia Aeronáutica*. 7. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2015. Citado na página 72.
- ANSYS, I. *Mesh Quality*. 2009. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>: :text=The%20quality%20of%20the%20mesh,of%20your%20mesh%20is%20essential. Citado na página 44.
- ANSYS, I. *Lecture 7: Mesh Quality Advanced Topics: Introduction to ansys meshing*. 2015. https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro16.0L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf. Citado na página 44.
- BIANCHIN, G. P. *Análise Numérica da Ventilação e Mitigação de Cargas Aerodinâmicas em Edificações Baixas Usando Spoilers com Controle PID*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Maio 2021. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 31 e 37.
- BLACKMORE, P. Load reduction on flat roofs - the effect of edge profile. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 29, n. 1, p. 89–98, 1988. ISSN 0167-6105. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167610588901481>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 48.
- BLESSMANN, J. *O Vento na Engenharia Estrutural*. Segunda ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.
- CHING, F. D. K.; ONOUYE, B. S.; ZUBERBUHLER, D. *Sistemas Estruturais Ilustrados - Padrões, Sistemas e Projeto*. Porto Alegre, RS: Artmed Editora, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 36.
- HU, H. H. Computational fluid dynamics. In: _____. *Fluid Mechanics*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2012. cap. 10, p. 421–471. Citado na página 31.
- HWANG, M.-h.; CHA, H.-R.; JUNG, S. Y. Practical endurance estimation for minimizing energy consumption of multirotor unmanned aerial vehicles. *Energies*, v. 11, n. 9, 2018. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2221>>. Citado na página 25.
- INMET. *Dados Históricos Anuais - Ano 2022 (até 30-06-2022)*. 2022. <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 31-08-2022. Citado na página 44.

- IPILAKYAA, T.; TULEUN, L.; KEKUNG, M. Computational fluid dynamics modelling of an aerodynamic rear spoiler on cars. *Nigerian Journal of Technology*, v. 37, n. 4, p. 975–980, 2018. Citado na página 26.
- KOPP, G. A.; MANS, C.; SURRY, D. Wind effects of parapets on low buildings: Part 4. mitigation of corner loads with alternative geometries. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 93, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 36.
- LI, G.; GAN, S.; LI, H. Wind pressure mitigation on gable roofs for low-rise buildings using spoilers. *Journal of Structural Engineering*, v. 144, August 2018. Citado 4 vezes nas páginas 15, 26, 37 e 38.
- LIMA, F. A. R. D.; SANTOS, R. S. *Análise da Ação do Vento na Estrutura de Edificações*. Anápolis, GO, 2019. Citado na página 29.
- MACEDO, I. R. *Sobre a Ação do Vento no Campus Gama da UnB: Um Estudo Computacional*. Brasília, DF, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 25, 31, 33, 45 e 70.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, v. 32, August 1994. Citado na página 33.
- NOLETO, L. G. *Noções de Turbulência em Fluidos - Notas de Aula*. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 33.
- PALAZZETTI, L. Routing drones being aware of wind conditions: a case study. In: *2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 343–350. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 31.
- RAPP, B. E. Chapter 9 - fluids. In: RAPP, B. E. (Ed.). *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. Oxford: Elsevier, 2017, (Micro and Nano Technologies). p. 243–263. ISBN 978-1-4557-3141-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455731411500095>>. Citado na página 46.
- RIBEIRO, K. N. G. *Padrões de Escoamento do Fenômeno Holdup - Um Estudo Computacional*. Brasília, DF, 2020. Citado na página 30.
- RICHARDSON, S. On the no-slip boundary condition. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 59, n. 7, p. 707–719, 1973. Citado na página 46.
- ROBERTSON, A. Effect of eaves detail on wind pressures over an industrial building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 38, n. 2, p. 325–333, 1991. ISSN 0167-6105. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016761059190051W>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 36.
- SAGAR, D. et al. Aerodynamic effects of rear spoiler and vortex generators on passenger cars. In: *Proceedings of 5th International Conference on Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics (ICTACEM-2010)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 760–762. Citado na página 26.
- SINGIREDDY, S. R. R.; DAIM, T. U. Technology roadmap: Drone delivery – amazon prime air. In: _____. *Infrastructure and Technology Management: Contributions from the Energy, Healthcare and Transportation Sectors*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 387–412. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68987-6_13>. Citado na página 25.

SORBELLI, F. B. et al. Energy-constrained delivery of goods with drones under varying wind conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 22, n. 9, p. 6048–6060, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 73.

SPALDING, D. B. et al. Kolmogorov's two-equation model of turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, v. 434, n. 1890, p. 211–216, 1991. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1991.0089>>. Citado na página 33.

STATHOPOULOS, T. Wind loads on low-rise buildings: a review of the state of the art. *Engineering Structures*, v. 6, n. 2, p. 119–135, 1984. ISSN 0141-0296. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141029684900051>>. Citado na página 35.

SURRY, D.; LIN, J. The effect of surroundings and roof corner geometric modifications on roof pressures on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 58, n. 1, p. 113–138, 1995. ISSN 0167-6105. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016761059500016K>>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 35, 49 e 50.

TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. Chapter 6 - cfd solution analysis: Essentials. In: TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. (Ed.). *Computational Fluid Dynamics (Third Edition)*. Third edition. Butterworth-Heinemann, 2018. p. 211–253. ISBN 978-0-08-101127-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081011270000064>>. Citado na página 46.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. San Diego, California: DCW Industries, 2006. Citado na página 33.

WU, F.; SARKAR, P.; MEHTA, K. Full-scale study of conical vortices and roof corner pressures. *Wind and Structures*, v. 4, n. 2, p. 131–146, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 15, 37 e 38.