

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Thaiane Cardoso Rodrigues

**APLICAÇÃO DE IA MULTIMODAL NA INSPEÇÃO DA ACESSIBILIDADE DE
CALÇADAS: Desempenho do GPT-4o na Verificação dos Parâmetros da NBR
9050**

Juiz de Fora
2026

Thiane Cardoso Rodrigues

**APLICAÇÃO DE IA MULTIMODAL NA INSPEÇÃO DA ACESSIBILIDADE DE
CALÇADAS: Desempenho do GPT-4o na Verificação dos Parâmetros da NBR 9050**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Ambiente Construído da
Universidade Federal de Juiz de
Fora, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em
Ambiente construído

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Barroso Castañon

Coorientadora: Dr. Bárbara Arantes de Paula

Juiz de Fora

2026

Thaiane Cardoso Rodrigues

**APLICAÇÃO DE IA MULTIMODAL NA INSPEÇÃO DA ACESSIBILIDADE DE
CALÇADAS: Desempenho do GPT-4o na Verificação dos Parâmetros da NBR 9050**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ambiente Construído.

Aprovada em () de () de ()

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Alberto Barroso Castañon – Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Bárbara Arantes de Paula - Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Tatiana Tavares Rodriguez-
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Leonardo Sanches
Centro Universitário Academia - UniAcademia

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cardoso Rodrigues, Thaianne.

APLICAÇÃO DE IA MULTIMODAL NA INSPEÇÃO DA ACESSIBILIDADE DE CALÇADAS : Desempenho do GPT-4o na Verificação dos Parâmetros da NBR 9050 / Thaianne Cardoso Rodrigues. -- 2026.

158 p.

Orientador: José Alberto Barroso Castañon

Coorientadora: Bárbara Arantes de Paula

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2026.

1. Calçadas. 2. Acessibilidade. 3. Visão computacional. 4. Grande Modelo de Linguagem Multimodal. I. Barroso Castañon, José Alberto, orient. II. Arantes de Paula, Bárbara, coorient. III. Título.

THAIANE CARDOSO RODRIGUES

APLICAÇÃO DE IA MULTIMODAL NA INSPEÇÃO DA
ACESSIBILIDADE DE CALÇADAS: Desempenho do ChatGPT-4o na Verificação dos Parâmetros da NBR 9050

Dissertação apresentada ao PPG Ambiente Construído, ou Programa da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Ambiente Construído.

Aprovada em 26 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof Dr José Alberto Barroso Castañon- Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr(a) Bárbara Arantes de Paula - Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof(a) Dr(a) Tatiana Tavares Rodriguez - Membro Interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof Dr Leonardo Sanches - Membro Externo
Uniacademia

Juiz de Fora, 19/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Alberto Barroso Castanon, Coordenador(a)**, em 26/03/2026, às 19:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Tavares Rodriguez, Professor(a)**, em 26/03/2026, às 19:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Sanches, Usuário Externo**, em 26/03/2026, às 19:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bárbara Arantes de Paula, Usuário Externo**, em 27/03/2026, às 09:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2911568** e o código CRC **629F5469**.

Agradecimento

Agradeço à minha família e aos amigos, em especial a Lucilene Cardoso, Hildo Rodrigues, Diego Cardoso e Larissa Cardoso, pelo apoio constante ao longo desta trajetória e pela confiança depositada em meus passos. A Miguelângelo Rocha, meu companheiro, com quem compartilho os desafios diários dessa caminhada. Àqueles que possibilitaram a conciliação entre as demandas profissionais e a conclusão do mestrado. Aos orientadores José Castañon e Bárbara Arantes, pelo direcionamento, pelas contribuições e pela troca de experiências, fundamentais para a qualidade e o rigor acadêmico desta dissertação.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo investigar a viabilidade da utilização de visão computacional e processamento por LLM para a auditoria de acessibilidade de calçadas com base na norma NBR 9050:2020. Utilizando-se uma metodologia de validação comparativa, entre um levantamento in loco e um levantamento realizado por visão computacional. Para a coleta de dados foram escolhidas 46 imagens representativas de calçadas de Juiz de Fora com características variadas. O desenvolvimento dos testes resultou em uma ferramenta “Sidewalk Analyzer” que combina o processamento por GPT4.1 com modelos de extração de geometria monocular. A pesquisa identificou que o uso isolado das LLMs não foi suficiente para uma auditoria técnica plenamente confiável, porém a combinação dessas com modelos auxiliares para extração geométrica apresentou potencial significativo para apoio à fiscalização pública. Além da verificação da acurácia do modelo testado, a pesquisa propõe uma arquitetura metodológica replicável que pode evoluir com o avanço tecnológico.

Palavras-chave: Calçadas; Acessibilidade; Visão computacional; Grande Modelo de Linguagem Multimodal.

ABSTRACT

This research investigated the feasibility of using computer vision and LLM-based processing to audit sidewalk accessibility in accordance with the NBR 9050:2020 standard, using a comparative validation methodology comparing on-site and computer-vision-based surveys. For data collection, 46 representative images of sidewalks in Juiz de Fora with varying characteristics were chosen. The development of the tests resulted in the “Sidewalk Analyzer” tool that combines GPT-4.1 processing with monocular geometry-extraction models. The research found that the isolated use of LLMs was insufficient for a fully reliable technical audit, but combining them with auxiliary models for geometric extraction showed significant potential to support public inspection. In addition to verifying the accuracy of the tested model, the research proposes a replicable methodological architecture that can evolve with technological advances.

Keywords: Sidewalk; Accessibility; Multimodal Large Language Model; Computational vision.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Inteligência visual urbana.....	30
Figura 2 - Distribuição espacial de edificações tradicionais em Pequim	35
Figura 3: Análise de desempenho por parâmetro avaliado por BABYVISION.....	38
Figura 4 - Ponto 1 em 360° obtido da API Google Street View Static	41
Figura 5 - População brasileira segmentada por idade entre 1980 e 2022	46
Figura 6 - Mapa de declividade de Juiz de Fora.....	51
Figura 7 - Mapeamento das pessoas com deficiência no município de Juiz de Fora	52
Figura 8 - Pavimentação na Rua Santo Antônio pelo Programa Nova Juiz de Fora .	53
Figura 9 - Desnível e inclinação inadequada na faixa livre da Rua Santo Antônio....	54
Figura 10 - Dimensões e caracterização de calçadas conforme NBR 9050.....	68
Figura 11 - Acomodação de acessos de veículos, vista superior (ABNT NBR 9050)	70
Figuras 12 e 13 - Cunhas na faixa de acesso e na faixa livre	71
Figura 14 - Rampa de rebaixamento	72
Figura 15 - Rampa de rebaixamento numa calçada estreita.....	73
Figuras 16 e 17 - Rebaixamento de todo o nível na esquina e uso de canteiros	73
Figura 18 - Uso de balizadores nas esquinas rebaixadas.....	74
Figura 19 - Tratamento de calçadas em vias com elevada inclinação	75
Figura 20: Revestimentos recomendados para calçadas	77
Figura 21 - Escadas em calçadas com inclinações superiores a 25%	78
Figura 22 - Sugestões para requalificações em situações reais.	79
Figura 23 - Calçadas mais largas e a possibilidade de inserção de mobiliários urbanos	80
Figura 24 - Etapas do experimento	90
Figura 25 - Pontos coletados na região central.....	92
Figura 26 - Pontos coletados no bairro Santa Luzia.....	93
Figura 27 - Guias de composição	95
Figura 28 - Imagem analisada.....	102
Quadro 1 - Versão estruturada do prompt (V2.0).....	104
Figura 29 - Ponto JF 37	105

Figura 30: Imagem JF02b.....	106
Figura 31 - Ponto JF13.....	108
Figura 32 - Segmentação semântica da imagem.....	113
Figura 33 - Mapas de profundidade gerados pelo MoGe2.....	114
Figura 32 - Aba de configuração do experimento Sidewalk Analyzer.....	117
Figura 33 - Aba de inserção das imagens.....	118
Figura 34 - Aba de resultados.....	118
Figura 35 - Relatório gerado pelo Sidewalk Analyzer.....	119
Quadro 2 - Contexto do sistema para Versão 03 e Versão 07:.....	119
Figura 36 - Imagem JF29b.....	124
Tabela 19 - Limitações e desafios da versão 6.0.....	125
Tabela 20 - Medições qualitativas da versão 6.0.....	125
Figura 37 - Correlação das dimensões de largura da calçada.....	135
Figura 38 - Gráfico de acurácia para a seção 2 - Medições qualitativas.....	140
Figura 39 - Gráfico de acurácia da seção 3 - Obstáculos e Objetos.....	141
Figura 40 - Gráfico de acurácia da seção 4 - Elementos adicionais.....	142
Figura 41 - Acurácia das perguntas binárias representativas.....	142
Figura 42 - Acurácia da seção de medição quantitativa avaliada pela LLM as judge.....	143
Figura 43 - Acurácia da seção de medição quantitativa quanto à LLM as judge.....	144
Figura 44 - Avaliação global.....	144
Tabela 26 - Análise realizada pelo Sidewalk Analyzer para a imagem JF16b.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de estilos arquitetônicos e suas características.....	33
Tabela 2 - Licenças e condicionantes do processo edilício em Juiz de Fora.....	55
Tabela 3 - Linha do tempo das leis de acessibilidade em Juiz de Fora	57
Tabela 4 - Estrutura funcional da calçada e desafios de aplicação prática	62
Tabela 5 - Parâmetros normativos e condições típicas de topografia acentuada	63
Tabela 6: Sugestão de fluxo de trabalho estruturado da aplicação de LLMs	84
Tabela 7 - Proporção por bairros da população de pessoas com deficiência e transtorno de autismo em relação à população total dos bairros	91
Tabela 8 - Métodos de verificação	94
Tabela 9 - Seção 1: Identificação dos pontos.....	97
Tabela 10 - Seção 2: Elemento adicional.....	99
Tabela 11 - Seção 3: Medições quantitativas.....	99
Tabela 12 - Seção 4: Medições qualitativas.....	100
Tabela 13 - Seção 5: Objetos e obstáculos.....	100
Tabela 14 - Seção 6: Avaliação geral	101
Tabela 15 - Seção 7: Envio da fotografia	101
Tabela 16 - Resposta do prompt refinado (V2.0) ao ponto JF37.....	105
Tabela 17 - Variação dos resultados com as mesmas configurações.	107
Tabela 18 - Comparação entre estimativas do ChatGPT-4o e medições em campo (V3.0)	109
Tabela 16 - Integração de um objeto de referência (V3.1)	110
Tabela 17- Implementação da ferramenta OpenCV (V4.0)	110
Tabela 18 - Integração com UniDepth (V5.0).....	111
Tabela 15 - Perguntas enviadas ao sistema e correspondência ao levantamento:	121
Tabela 16 - Formato das respostas	121
Tabela 17 - Exemplo de estrutura de registro	122
Tabela 18 - Perguntas enviadas ao Sidewalk Analyzer para a versão 7.0	122
Tabela 21 - Obstáculos e objetos na versão 6.0	126
Tabela 22 - Formato da tabela-mestra.....	129
Tabela 23 - Exemplo de uma análise da imagem JF04c.....	136
Tabela 24 - Arquivos de saída da etapa de Medição da imagem JF04c	137

Tabela 25 - Arquivos de saída da etapa de Medição da imagem JF45b	138
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAF	CAF <i>Banco de desarrollo de América Latina y El Caribe</i>
CoT	<i>Chain of Thoughts</i>
DCNN	Redes convolucionais profundas
Faster RCNN	<i>Faster Region-based Convolutional Neural Network</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GPT	<i>Generative Pre-trained Transformer</i>
GSV	<i>Google Street View</i>
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LLM	<i>Large Language Model</i>
Pal	Program Aided Model
PcD	Pessoa com Deficiência
Mask RCNN	<i>Mask Region-based Convolutional Neural Network</i>
NBR	Norma Brasileira
PSPNet	<i>Pyramid Scene Parsing Network</i>
ResNet	Rede Residual
SISURB	Sistema Municipal de Informações para o Desenvolvimento Territorial
TEA	Transtorno do Espectro Autista
YOLO	<i>"You Only Look Once"</i> - Detecta objetos e localizações em alta velocidade

SUMÁRIO

RESUMO	18
ABSTRACT	19
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	20
LISTA DE TABELAS	22
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	24
1 INTRODUÇÃO	26
2 REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1. Inteligência Artificial aplicada à análise urbana	28
2.1.1. Visão computacional e aprendizado profundo	32
2.1.2. Modelos de linguagem multimodal de grande porte	36
2.1.3. Limitações dos LLMs na interpretação de imagens	37
2.1.4. Aplicações anteriores de IA em auditoria urbana	40
2.2. Acessibilidade e mobilidade urbana	42
2.2.1. O direito à cidade e o desenho universal	44
2.2.2. Evolução da legislação brasileira sobre acessibilidade	47
2.2.3. Legislação e aplicação da acessibilidade em Juiz de Fora	50
2.2.4. NBR 9050: Princípios e parâmetros aplicados a calçadas	61
2.2.5. Experiências internacionais em auditoria de acessibilidade por meio de tecnologias digitais	64
2.3. Calçadas como infraestrutura urbana	66
2.3.1. Funções, dimensões e elementos construtivos das calçadas	67
2.3.2. Condições críticas: rampas, declives, obstáculos e materiais de superfície	69
2.3.3. Impacto da topografia em cidades montanhosas	75
2.3.4. Revestimentos	76
2.3.5. Padrões urbanos e melhores práticas para requalificação de calçadas	77
2.3.6. Políticas municipais e desafios de implementação	81
2.3.7. O papel da Inteligência Artificial no apoio à inspeção pública	83
2.4. Estudos comparativos sobre mecanismos de gestão de calçadas	84
3 METODOLOGIA	88
3.1.1. Tipo de pesquisa e abordagem	88
3.1.2. Estrutura do experimento	89
3.1.3. Universo amostral	90
3.2. Coleta de dados	94
3.2.1. Etapa da coleta de imagens urbanas	95

3.2.2. Levantamento de campo	96
3.2.3. Instrumentos e equipamentos utilizados	96
3.2.4. Formulário de inspeção padronizado	97
3.3. Engenharia de prompt no desenvolvimento do Sidewalk Analyzer	101
3.4. Processamento computacional - Sidewalk Analyzer	112
3.4.1. Preparação da imagem	116
3.4.2. Aplicação do Sidewalk Analyzer	116
3.5. Validação e análise comparativa	127
3.5.1. Tabela de correspondência entre medições de campo e respostas do modelo	128
3.5.2. Critérios de precisão e erro	133
3.5.3. Limitações do modelo e ajustes metodológicos	134
3.6. Considerações éticas e legais	139
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	140
4.1.1. Precisão geral e específica por categoria	140
4.1.2. Análise de erros: causas e padrões recorrentes	145
4.1.3. Relação entre a especificidade do estímulo e a precisão da resposta	151
4.2. Interpretação teórica dos resultados	151
4.2.1. Desafios éticos, técnicos e regulamentares	152
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	153
5.1. Limitações do estudo	153
5.2. Recomendações para pesquisas futuras	154
6 REFERÊNCIAS	156
ANEXO I - VERSÃO 3 UTILIZANDO O MODELO GPT-4O COM TEMPERATURA 0	166

1 INTRODUÇÃO

A regulamentação da acessibilidade consolidada pela NBR9050, pela Lei de inclusão Brasileira e um vasto arcabouço legal que sucederam essas regulamentações são resultados de uma expressiva movimentação popular que busca a efetivação dos direitos da pessoa com deficiência de participar com autonomia de todos os atos da vida pública (Santos, 2016).

Embora diversos avanços tenham sido alcançados, esta população enfrenta diariamente diversas barreiras físicas e comportamentais para o pleno exercício de seus direitos e, neste estudo, daremos especial atenção às barreiras físicas no espaço urbano na garantia da acessibilidade de calçadas e mobilidade, que frequentemente dificultam disponibilizar serviços públicos e privados a esta parcela da população (Gadelha *et al*, 2022).

Jan Gehl e Birgitte Svarre (2013) destacam que, nas cidades de países em desenvolvimento, a infraestrutura voltada ao pedestre compete por espaço com automóveis e, ao se somar aos desafios urbanos das rápidas transformações com grandes restrições orçamentárias, a infraestrutura voltada ao pedestre acaba sendo suprimida e raramente atende às especificações normativas. Neste estudo iremos investigar as causas para esta distância entre o que é regulamentado e o que é efetivamente construído.

Juiz de Fora é uma cidade de topografia desafiadora, com população com deficiência superior a 16 mil pessoas distribuídas por toda a mancha urbana (SISURB, 2024). Durante a elaboração do referencial teórico, foi observado que na cidade de Juiz de Fora há desafios de integração institucional, falta de manuais gráficos, de mapeamento das condições dos passeios, das áreas consolidadas e a atualização progressiva destes dados. Esses desafios, em conjunto, comprometem a consolidação de processos decisórios orientados por dados.

Além destes, a política pública voltada à acessibilidade das calçadas em curso limita-se ao uso de métodos tradicionais e à inspeção visual para a fiscalização, o que não proporciona a precisão necessária para garantir que todos os parâmetros da norma sejam atendidos. Nesse contexto, o avanço de tecnologias de processamento de imagens através de inteligência artificial surge como uma alternativa para ampliar a precisão da auditoria das calçadas de maneira ágil. Por estes motivos esta pesquisa

possui o objetivo de avaliar a precisão do ChatGPT-4o para monitoramento e vistoria de acessibilidade de calçadas através de processamento visual com IA e técnicas de engenharia de prompts e verificar a viabilidade do seu uso para o serviço público

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos. Inicialmente é elaborado o referencial teórico, no qual se contextualizam as aplicações contemporâneas da visão computacional no âmbito da política urbana e em seguida é descrita a política pública voltada às calçadas no município de Juiz de Fora, com ênfase em seus instrumentos, limitações e desafios somado a exemplos de gestão encontrados em outras cidades brasileiras e no exterior. Posteriormente, é descrita a metodologia proposta para avaliar a precisão do uso da visão computacional na auditoria de calçadas, acompanhada da apresentação e análise dos resultados, que culminou no desenvolvimento da ferramenta “Sidewalk Analyzer” o qual apresentou resultados sólidos quanto aos parâmetros qualitativos e resultados promissores para parâmetros quantitativos avaliados. Por fim, são apresentadas as conclusões da pesquisa e as recomendações para investigações futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico que fundamenta esta pesquisa articula três eixos centrais do debate contemporâneo: os avanços da inteligência artificial aplicada à análise urbana, a evolução dos princípios de acessibilidade e mobilidade no planejamento das cidades e o papel das calçadas como infraestrutura essencial para a circulação e a inclusão social. Inicialmente, são apresentadas as principais abordagens tecnológicas, incluindo visão computacional, aprendizado profundo, modelos de linguagem multimodal de grande porte e suas limitações cognitivas e espaciais, bem como aplicações anteriores de Inteligência Artificial - IA voltadas à auditoria do ambiente construído. Em seguida, o texto examina os marcos conceituais e legais da acessibilidade no Brasil e em Juiz de Fora, com atenção aos princípios do desenho universal, às diretrizes da NBR 9050 e às experiências internacionais que utilizam tecnologias digitais para avaliar condições de mobilidade urbana. Por fim, são discutidas as dimensões técnicas das calçadas, seus elementos construtivos, suas condições críticas e as melhores práticas de requalificação, além dos instrumentos institucionais de fiscalização e governança, destacando como a inteligência artificial pode apoiar a inspeção pública e ampliar a efetividade dos mecanismos municipais de monitoramento. A seleção desses temas decorre do objetivo central da pesquisa, que exige a articulação entre fundamentos tecnológicos, normativos e espaciais. Assim, o recorte privilegia conceitos diretamente relacionados à verificação técnica da acessibilidade em calçadas, excluindo abordagens que não dialogam com esse escopo analítico.

2.1. Inteligência Artificial aplicada à análise urbana

Desde o princípio dos estudos urbanos, pesquisadores como Lynch e Jacobs destacaram a centralidade da dimensão visual na compreensão das cidades. Lynch (2011) analisava a legibilidade urbana por meio da forma, dos percursos e da capacidade de orientação dos usuários, enquanto Jacobs (2011) examinava a vitalidade das ruas a partir da observação direta do uso cotidiano e das interações sociais. Nos últimos anos, o desenvolvimento da Inteligência Artificial (IA) e o enorme volume de dados gerados pela nossa interação com as ferramentas, bancos de dados com *crowdsourcing*, além de dados produzidos por instituições e empresas transformam a maneira como as pessoas vivenciam o ambiente urbano Howe *et al.*

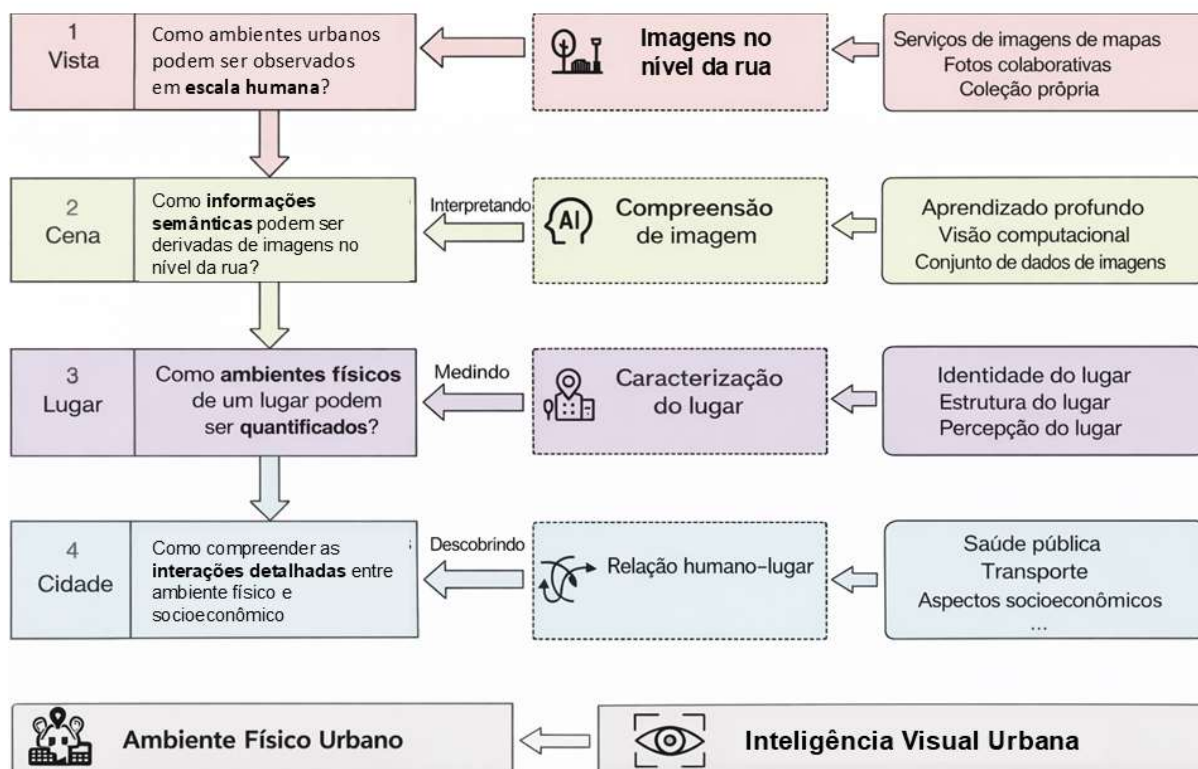
(2022) discutem como técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina aplicadas a imagens urbanas em larga escala permitem transformar a observação visual, tradicionalmente qualitativa e localizada, em um processo sistemático, quantitativo e replicável, ampliando a capacidade de diagnóstico do ambiente construído. Segundo os autores, esse tipo de abordagem possibilita a análise de padrões espaciais e condições de infraestrutura urbana de forma contínua e escalável, superando limitações da observação humana isolada.

O processo de urbanização nos países em desenvolvimento caracteriza-se por dinâmicas aceleradas e frequentemente desordenadas, gerando desafios estruturais específicos. Os recursos limitados para planejamento e fiscalização regulatória, combinados à rápida expansão urbana, tornam necessário o desenvolvimento de métodos mais eficientes para apoiar a gestão e a implementação dessas atividades Gehl (2013a).

Embora os urbanistas tenham tradicionalmente utilizado recursos visuais e a fotografia para extrair atributos como “forma, proporção, ritmo, escala, complexidade, cor, ordem e hierarquia de elementos” (Zhang *et al.*, 2023, p. 3), a integração desses instrumentos com a inteligência artificial amplia significativamente essas capacidades. A IA permite analisar, comparar, identificar padrões e objetos, além de sobrepor camadas adicionais de informação, transformando uma tecnologia portátil e ubíqua em uma ferramenta de planejamento urbano com alcance e escala antes inalcançáveis.

Pesquisas recentes, como a de Zhang *et al.* (2023), têm demonstrado como o avanço do *big data* e das tecnologias de IA de sensoriamento híbrido possibilitam novas abordagens para o estudo da vida urbana. Esses métodos permitem extrair dados e medidas quantificáveis do ambiente construído e de suas características socioeconômicas em larga escala, além de analisar interações espaciais e temporais associadas ao comportamento humano. Os autores desenvolveram uma estrutura para caracterizar as aplicações recentes da visão computacional em estudos urbanos, organizando-as em uma hierarquia que distingue diferentes abordagens e níveis de análise, conforme a Figura 1 a seguir:

Figura 1 - Inteligência visual urbana



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2023) p.6

No primeiro nível, os autores reúnem o conjunto de técnicas que utilizam imagens no nível da rua, permitindo observar o ambiente físico na escala da experiência humana. Essas abordagens têm se mostrado fontes de dados particularmente valiosas devido ao uso disseminado de serviços de mapeamento, à coleta colaborativa via *crowdsourcing* e à disponibilidade de coleções especializadas de imagens.

As imagens ao nível da rua são particularmente valiosas para os estudos urbanos, dado o amplo espectro de análises que possibilitam. Elas vêm sendo aplicadas desde a estimativa de preços de habitação e da idade dos edifícios (Li *et al.*, 2018), assim como de sua altura (Ning *et al.*, 2022), até à identificação de características de um bairro, incluindo a presença de passarelas e passeios, tipologia das edificações, vegetação urbana e a sua relação com indicadores de saúde pública (Nguyen *et al.*, 2018). Também permitem quantificar o estilo arquitetônico de regiões (Zhang *et al.*, 2020), avaliar e auditar a infraestrutura construída (Mooney *et al.*, 2020),

estimar o uso de energia em vias urbanas (Liu *et al.*, 2019) e mensurar o impacto da vegetação de rua sobre o valor imobiliário (Yang *et al.*, 2021)

No segundo nível da hierarquia, situa-se a compreensão de cena, na qual os pesquisadores extraem informações semânticas a partir das imagens. Conceitos subjetivos, como a identidade arquitetônica de uma vizinhança, sua relação com outras áreas adjacentes e a própria estrutura urbana, à primeira vista podem parecer inatingíveis pelo processamento computacional de imagens. No entanto, há pesquisas consistentes explorando exatamente esses campos, que constituem o terceiro nível da aplicação. Além disso, quantificar e medir a percepção humana de um lugar amplia substancialmente as possibilidades de um estudo de campo, uma vez que as imagens carregam símbolos, marcas culturais e referências sociais. Um exemplo é o trabalho de Zhang *et al.* (2020), que conseguiu quantificar e mapear a distribuição espacial de edifícios de estilo chinês utilizando visão computacional baseada em redes neurais convolucionais profundas (do inglês, *Deep Convolutional Neural Networks* ou DCNNs) que consiste no processamento de múltiplas camadas de dados das imagens que possibilita obter representações com variados níveis de abstração, frequentemente utilizado em tarefas de categorização e visão computacional(Le Cun *et al.*, 2015).

Obter informações socioeconômicas a partir de identificação de padrões presentes no ambiente físico corresponde ao quarto nível da estrutura. Nesse nível, os autores descrevem três áreas principais nas quais as imagens do *Google Street View* podem ser aplicadas: saúde pública, transporte e ambiente socioeconômico dos locais (Zhang *et al.*, 2023). Pliakas *et al.* (2017) concluíram que as auditorias do *Google Street View* são confiáveis para observar características do ambiente construído conhecidas por impactar fatores de saúde. Entre esses atributos estão a presença de cruzamentos, pontos de ônibus, vegetação, calçadas, qualidade do pavimento, meios-fios rebaixados, largura das calçadas, tráfego de pedestres, uso e conectividade das vias, inclinação, uso predominante do solo. No estudo, pesquisadores de campo treinados realizaram auditorias remotas dessas características para avaliar comportamentos de saúde de idosos, demonstrando a viabilidade do método.

Gehl e Svarre (2013b) sintetizaram um conjunto robusto de ferramentas e técnicas para estudar o espaço urbano e avaliar como ele pode atender às necessidades das pessoas. Os autores anteciparam que os métodos de registro automatizados desempenhariam um papel importante no futuro, por permitirem o

processamento de grandes volumes de informações e reduzirem a necessidade de mão de obra. No entanto, observaram que a avaliação dos dados coletados pode ser demorada e que o desenvolvimento dessas tecnologias exigiria investimentos elevados. Seu trabalho concentrou-se sobretudo na observação das interações entre o espaço público e as pessoas, demonstrando como anotar, formular perguntas e desenhar podem fornecer evidências significativas para compreender a vida nas cidades e orientar decisões de gestão.

Os avanços tecnológicos em IA desencadearam uma nova corrida global de investimentos, com impactos em múltiplas áreas. Nos últimos anos, o acesso a essas tecnologias tornou-se mais amplo graças à atuação de empresas como a OpenAI, o que contribuiu para superar parte das barreiras iniciais apontadas pelos autores.

Os métodos tradicionais de verificação da acessibilidade exigem um nível de precisão que demanda mais tempo, maior número de profissionais e investimentos elevados. Isso limita de maneira significativa a capacidade das equipes de atender a todos os parâmetros que compõem a acessibilidade das calçadas, questão que será aprofundada na seção 2.2. Assim, a adoção de um método mais ágil pode ampliar a eficiência e a efetividade das ações de fiscalização.

2.1.1. Visão computacional e aprendizado profundo

Modelos de aprendizado profundo também conhecido como *Deep Learning* se inspiram na estrutura do sistema nervoso humano para processar informações (Sacramento et al., 2018). Assim como utilizamos representações de conceitos para nos comunicarmos, as linguagens computacionais organizam representações matemáticas e formais que podem ser interpretadas pelas máquinas (Gang, 2018).

A linguagem natural também inspira a organização hierárquica dessas representações, que podem ser estruturadas em palavras, frases, sentenças e textos. Cada unidade é localizada estatisticamente numa matriz por meio de um vetor espacial. Este descreve a proximidade semântica entre as palavras, o que Gang (2018) descreve como incorporação de palavras.

O aumento das capacidades de processamento computacional ampliou as possibilidades de aplicações destas abordagens, que antes se restringiam à extração de informações, em resumo, à análise de texto, à categorização de textos, e que hoje também são empregadas na análise e geração de imagens e vídeos artificiais.

Na última década, o treinamento contínuo de redes neurais convolucionais profundas (DCNNs) resultou em melhorias significativas na precisão do reconhecimento e da identificação de objetos em uma cena. Alguns modelos se concentram na classificação de cenas, como ResNet e GooLeNet, enquanto outros, como Faster R-CNN e YOLO, são voltados sobretudo à detecção de objetos. Já arquiteturas como PSPNet e Mask RCNN são amplamente utilizadas na segmentação de imagens, etapa em que uma máscara pixel a pixel é gerada a partir das imagens de entrada (Zhang *et al.*, 2023), (IBRAHIM *et al.*, 2020).

O processamento de imagens urbanas permite obter informações sobre a expansão da cidade. Enquanto Li *et al.* (2018) se propuseram a estimar a idade das edificações a partir de características arquitetônicas comuns associadas a diferentes épocas, Zhang *et al.* (2020) quantificaram a distribuição espacial de estilos arquitetônicos tradicionais e modernos. Isso pode ser observado na Tabela 1, que apresenta imagens representativas de construções tradicionais e não tradicionais utilizadas no treinamento do modelo de inteligência artificial. As imagens são obtidas do *Google Street View* (GSV), gerando quatro vistas que compõem uma perspectiva de 360° de cada ponto. O treinamento resultou na produção de uma máscara que realiza a segmentação automática das imagens, por meio de uma rede neural convolucional baseada em arquitetura residual (ResNet-CNN), permitindo quantificar a distribuição dos estilos, como ilustrado na Figura 2:

Tabela 1 - Análise de estilos arquitetônicos e suas características

Categoria	Características	Edificações representativas
Estilo oficial	A edificação possui grande escala e um estilo luxuoso e elegante, com telhas esmaltadas, colunas vermelhas e pinturas coloridas. As cores predominantes do edifício são vermelho, amarelo, verde e azul.	

Estilo não tradicional

Formas simples e geométricas, formas retangulares, elementos lineares e rejeição de ornamentos, especialmente com o uso de vidro, aço e concreto armado.

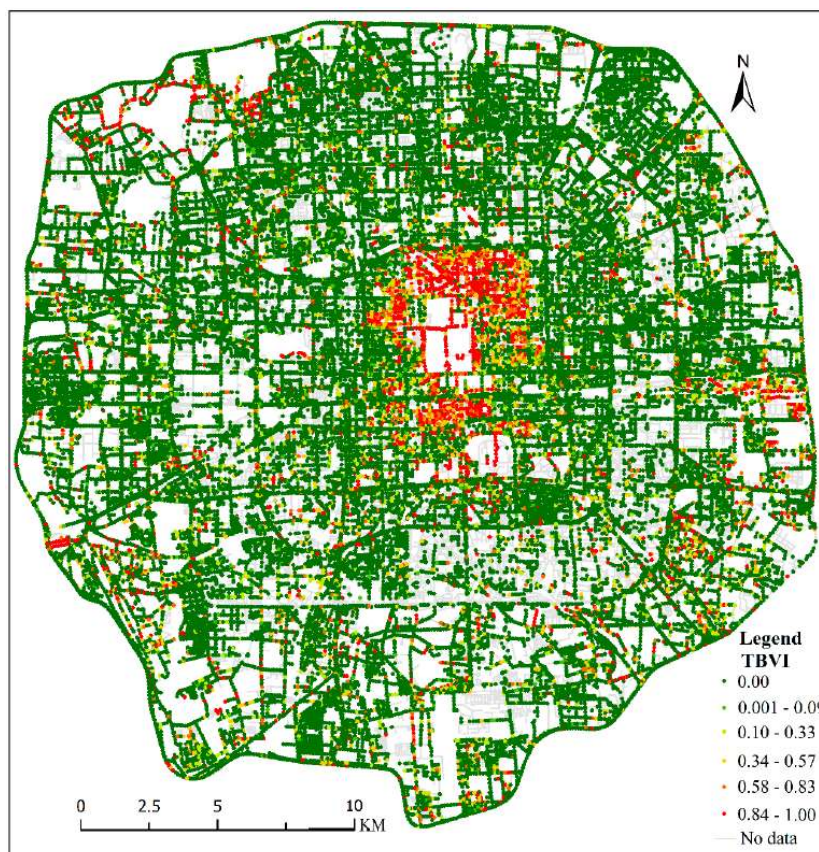


Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2020, p. 5)

A identificação de padrões construtivos nas imagens representa grande potencial para futuras aplicações, uma vez que a mesma metodologia pode ser utilizada em escala para a obtenção de informações de como a cidade se expande e combinado a outras bases de dados é possível obter informações sobre renda, previsões de tendências de mercado e da aplicação de parâmetros urbanísticos.

O mapeamento resultante do modelo, ilustrado na Figura 2, evidencia como os estilos arquitetônicos se distribuem na malha urbana de Pequim. Observa-se uma forte concentração de tipologias tradicionais no núcleo histórico, contrastando com a predominância de estilos modernos nas regiões periféricas. Essa distinção espacial reforça o potencial da visão computacional para identificar padrões morfológicos e culturais em larga escala.

Figura 2 - Distribuição espacial de edificações tradicionais em Pequim



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020, p. 11)

Visando ampliar a segurança para crianças no entorno de escolas de Nova York, Mooney *et al.* (2020) utilizaram imagens do GSV para avaliar a segurança em cruzamentos em um raio de até 700 metros dessas instituições, aprimorando o modelo CANVAS. Esse modelo verifica a qualidade dos elementos do espaço construído, como a iluminação, a necessidade de reparos na pintura viária e a inclusão de quebra-molas. Os resultados indicaram que o método é confiável e reduz parcialmente tanto a necessidade de verificações presenciais quanto a quantidade de profissionais envolvidos nessa tarefa.

O processo de aprendizagem de um modelo para tarefas específicas pode ser realizado por meio da técnica de *fine-tuning*, na qual o modelo é exposto a um conjunto adicional de dados rotulados, alinhados à tarefa desejada e às suas variações em gradiente. No entanto, a construção de bases de dados rotuladas confiáveis para cada aplicação ainda constitui um dos principais fatores limitantes desse processo.

Em síntese, os avanços em visão computacional e aprendizado profundo consolidaram um arcabouço capaz de extrair, classificar e interpretar informações

urbanas em larga escala, ampliando decisivamente o escopo analítico disponível para os estudos urbanos.

2.1.2. Modelos de linguagem multimodal de grande porte

O Generative Pre-trained Transformer (GPT) é um grande modelo de aprendizagem pré-treinado com um volume massivo de dados não rotulados. Ele emprega a arquitetura *Transformer*, que aprimora sua capacidade de executar uma ampla gama de tarefas de Processamento de Linguagem Natural (NPL) com menor demanda de memória e maior eficiência computacional (Vaswani *et al.*, 2017; Hariri, 2023).

Embora cada versão do GPT tenha introduzido avanços específicos, o GPT-4o, cujo nome faz referência ao termo *omni*, apresenta capacidades particularmente robustas. Como observa Hariri (2023), o modelo consegue processar entradas em múltiplos formatos, como texto, vídeo, imagem e áudio, e de gerar saídas em texto, imagem ou áudio. Sua competência na interpretação de conteúdos visuais também representa um avanço significativo em relação às versões anteriores. Além da OpenAI, outras empresas vêm desenvolvendo modelos multimodais que apresentam avanços em visão computacional, como a Anthropic com o Claude Opus4 e a Google, com o Gemini 3pro (Chen *et al.*, 2026).

Conforme descrito anteriormente, os modelos de redes neurais convolucionais profundas utilizados em computação visual atendem a diversas demandas, mas permanecem incomparáveis aos resultados alcançados pelo GPT-4o. Enquanto modelos tradicionais de visão computacional conseguem descrever imagens concisamente e responder a perguntas simples, Gao *et al.* (2023) demonstram que o GPT-4o apresenta uma capacidade superior de processar *prompts* complexos e multimodais, fornecendo interpretações mais matizadas e contextuais do conteúdo visual.

Ao projetar um *prompt* para tarefas complexas, recomenda-se começar por uma abordagem simples, utilizando a técnica de zero-shot prompting. Como explicam Brown *et al.* (2020), nessa configuração, o modelo baseia-se exclusivamente em seu conhecimento pré-treinado, sem exemplos adicionais com instruções baseadas apenas na linguagem natural. A eficácia desse *prompt* inicial pode então ser testada

e refinada, incorporando exemplos e maior contextualização em iterações subsequentes.

O uso de linguagem clara e descritiva, especificando a ação, o formato da resposta, o estilo de escrita e a extensão desejada, tende a gerar resultados mais eficazes. A qualidade das respostas também pode ser aprimorada por meio da simplificação das instruções e da inclusão de exemplos da tarefa. Quando apenas um exemplo é apresentado, a técnica é denominada *one-shot prompt*; quando múltiplos exemplos são fornecidos, trata-se de *few-shot prompt*. Como demonstram Brown et al. (2020) e a documentação da OpenAI (2024), ambas as abordagens permitem que modelos de linguagem desenvolvam um aprendizado contextual que orienta a execução da tarefa com maior precisão.

Tomados em perspectiva, os elementos apresentados neste tópico indicam que os modelos de linguagem multimodal de grande porte, como o GPT-4.5, Gemini 3 Pro e Claude Opus 4.5, representam uma inflexão relevante nas possibilidades de análise urbana automatizada. Apesar dos avanços expressivos em visão computacional e das contribuições trazidas pelas técnicas de *prompting*, o potencial mais transformador desses modelos permanece amplamente inexplorado: sua capacidade de articular raciocínio contextual complexo a partir de múltiplas modalidades de entrada. Essa competência permite não apenas identificar elementos do ambiente construído, mas também interpretar suas relações, contradições e implicações normativas, abrindo caminho para auditorias técnicas urbanas mais abrangentes e sensíveis ao contexto. Assim, os LLMs deslocam a discussão do mero reconhecimento visual para um patamar analítico capaz de apoiar decisões públicas com maior precisão, escala e profundidade interpretativa.

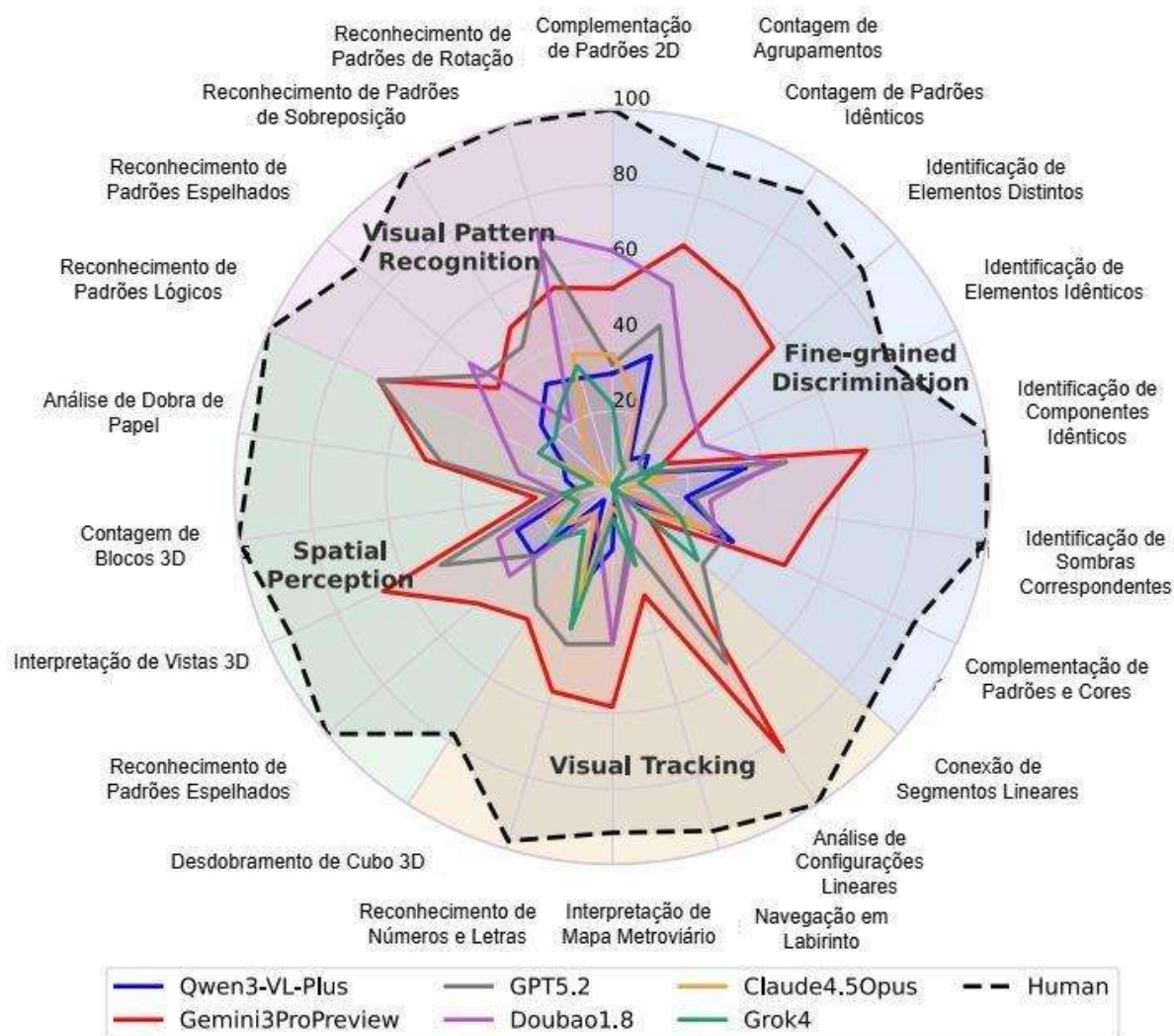
2.1.3. Limitações dos LLMs na interpretação de imagens

A funcionalidade de visão computacional do GPT 4.5, Gemini 3 Pro e Claude Opus 4.5 traz grandes potencialidades de uso dos modelos, porém, como toda ferramenta, possui limitações que devem ser consideradas.

Enquanto estes modelos apresentam grande desempenho em tarefas de raciocínio lógico, reconhecimento de lugares e rostos além de áreas que demandam repertório de conhecimento, Chen *et al.* (2026) desenvolveram uma metodologia de comparação de competências cognitivas visuais não-gramaticais, como compreensão

espacial, e identificação de padrões e contagem de objetos e identificaram que em tarefas com pouca ou nenhuma mediação por linguagem, os modelos apresentam resultados limitados, equiparáveis à de uma criança de 3 a 12 anos. O gráfico contido na Figura 3 compara o desempenho das principais LLMs disponíveis no mercado com o desempenho humano para competências visuais não-gramaticais.

Figura 3: Análise de desempenho por parâmetro avaliado por BABYVISION.



Fonte: Chen *et al.*, 2026, p.2

Dentre os modelos avaliados, o Gemini3ProPreview apresentou maior desempenho, seguido pelo GPT 5.2 e, das habilidades espaciais, a interpretação de vistas tridimensionais é a que apresentou maior avanço (Chen *et al.*, 2026). Quanto às aplicações para o uso de imagens do ambiente construído, há limitações de raciocínio espacial, por exemplo, para identificar, numa imagem, a posição relativa de peças de

xadrez. Para este estudo, foi observado que pode haver objetos como mobiliário urbano identificados sobre as calçadas, mas estes somente representam obstáculos quando interrompem a faixa livre para circulação, portanto, é um item crítico para a investigação.

Para que o modelo interprete corretamente as imagens, estas devem estar adequadamente orientadas, pois imagens rotacionadas podem ser mal compreendidas. Estas também devem ser limitadas ao tamanho de 50Mb por solicitação ou limitadas a 500 imagens menores e também devem ser claras o suficiente para uma pessoa poder ler, portanto, imagens borradas e com baixa qualidade podem gerar resultados imprecisos, da mesma forma que imagens panorâmicas ou geradas em lente olho de peixe onde há grande distorção das formas. Tais características são importantes para ampliar a escalabilidade do uso da ferramenta.

A empresa OpenAI esclarece que o modelo pode gerar descrições imprecisas em determinados cenários. Alansari et al. (2025) exploram as causas, formas de identificar e estratégias de mitigação de alucinações geradas por LLMs. Foi identificado que as respostas geradas podem aparentar coerência, linguagem fluida e racional, porém imprecisas e equivocadas ao comparar-se com os fatos, o que pode impor limitações para as aplicações dos modelos para finalidades jurídicas, médicas, financeiras e educativas.

As principais causas das alucinações podem surgir em diferentes estágios do treinamento. Partindo da seleção dos dados para o treinamento, que podem estar desatualizados, conter preconceitos ou lacunas. Também podem ser gerados por escolhas na arquitetura do modelo, no qual o mecanismo de processamento favorece a execução de tarefas específicas em detrimento de outras. Na fase que antecede o treinamento do modelo, há um forte direcionamento para que este identifique as respostas corretas e a falta de exemplos negativos também pode influenciar o resultado através do viés de exposição (Alansari et al., 2025).

Durante o treinamento do modelo, há o processo de fine-tuning, no qual o aprendizado é reforçado e avaliado por feedback humano, no qual foi identificado aprimoramento na qualidade dos resultados; porém, é fundamental que este esteja devidamente alinhado aos objetivos do treinamento. E há finalmente a avaliação do modelo, quando a veracidade das informações é verificada. Em cada uma dessas

fases, há limitações quanto ao tamanho e à qualidade do banco de dados e aos vieses geográficos das pessoas envolvidas no processo de validação das respostas.

Após todas as fases de treinamento e todas as etapas de verificação, quando o modelo é disponibilizado para interação com os usuários, ainda há grande risco de alucinações, especialmente em situações em que o modelo é exposto a solicitações ambíguas, desafios lógicos ou quando há limitações à sua capacidade de processamento. Portanto, é importante que as solicitações sejam objetivas e claras, com a definição do formato de resposta, de modo a reduzir o risco de respostas inconsistentes.

Diante das limitações para construir bancos de dados diversos e amplos, surgem avanços tecnológicos para a execução de tarefas específicas. Enquanto GPT-4o demonstra ampla capacidade de interpretação da imagem e linguagem natural (Hariri, 2023), portanto o modelo demonstrou capacidade de identificar objetos, porém falha em compreender se estes representam obstáculos e a precisão em relação à , o Modelo Meta Segment Anything 2 (SAM-2) se destaca na segmentação precisa das imagens estáticas, nas quais o modelo recorta objetos com precisão de imagens e vídeos, partindo de instruções em linguagem natural (Ravi *et al.*, 2024), e o MoGe-2, um modelo desenvolvido para estimação geométrica monocular, que gera um mapa de pontos a partir de uma única imagem, que permite em seguida, extrair dados precisos de proporções relativas, um mapa de profundidade e a distância focal da câmera.

Os modelos complementares apoiam a ferramenta para identificar as dimensões e proporções dos objetos na imagem e sua posição relativa à calçada de maneira a traçar a faixa livre e classificá-la como acessível ou não acessível.

2.1.4. Aplicações anteriores de IA em auditoria urbana

O impacto do ambiente construído na saúde populacional vem sendo objeto de diversas pesquisas. A revisão sistemática de Rzotkiewicz *et al.* (2018) destaca o uso do *Google Street View* na verificação de características do ambiente que impactam em comportamentos alimentares e atividades físicas da população, na verificação de distâncias a estes equipamentos, na proporção de áreas verdes numa região, e a presença de calçadas, parques e atividades, sido observado que as auditorias realizadas virtualmente apresentavam resultados equiparáveis com os resultados

obtidos no local. O *Google Street View* se consolidou como uma ferramenta confiável para verificação de características diversas por ter uma ampla cobertura, por ser periodicamente atualizado com imagens que mantêm as definições de altura, resolução e amplitude em diversas regiões geográficas.

Mooney (2020) verificou que a manutenção de faixas de pedestres e dos postes de iluminação pública e a execução de quebra-molas no entorno de escolas tiveram impacto na segurança dos estudantes. As auditorias realizadas através do *Google Street View* foram eficazes na verificação destes componentes da infraestrutura voltada à segurança dos pedestres, reduzindo a quantidade de pessoas necessárias para a atividade.

Entretanto, a disponibilidade e a qualidade dos dados provenientes do *Google Street View* não são homogêneas globalmente e, em países localizados em regiões em desenvolvimento, podem apresentar limitações quanto à resolução das imagens e à periodicidade das atualizações, o que representa um desafio adicional para áreas de rápido crescimento urbano.

Outra particularidade da plataforma refere-se às próprias características técnicas do modo de captura de imagens, que, embora apresentem grande potencial para uso em larga escala na auditoria da infraestrutura para o pedestre, são obtidas a partir do eixo da via, o que acentua distorções nas áreas periféricas da imagem e limita sua aplicação para a avaliação de determinados parâmetros de acessibilidade, como largura e inclinação. Tais deformações podem ser observadas na Figura 4, apresentada a seguir, evidenciando as limitações decorrentes da posição de captura das imagens:

Figura 4 - Ponto 1 em 360° obtido da API *Google Street View Static*



Fonte: API Google Street View Static (2024).

A Figura 4 foi obtida através da API do *Google Street View Static*, gerando uma composição de 4 imagens orientadas aos pontos cardeais, a primeira é orientada para o Norte a 0° , a segunda para Leste a 90° , a terceira a sul em 180° e a quarta a oeste em 270° . A composição resultante permite identificar a existência de calçadas ao longo da via, além de elementos urbanos como postes, balizadores, canteiros e árvores, bem como rampas de rebaixamento e acessos veiculares; entretanto, as distorções inerentes à imagem limitam a extração precisa de dados referentes a inclinações, distâncias e larguras. Essas distorções comprometem a leitura geométrica precisa do espaço e podem induzir interpretações ambíguas por modelos de linguagem multimodais, como o GPT, especialmente na avaliação de parâmetros quantitativos de acessibilidade.

2.2. Acessibilidade e mobilidade urbana

A acessibilidade e a mobilidade urbana constituem dimensões centrais do planejamento contemporâneo, ao determinarem não apenas a circulação cotidiana das pessoas, mas também a qualidade de vida, a inclusão social e a vitalidade dos espaços públicos. Esses temas ganham relevância crescente diante dos desafios impostos pelo crescimento urbano acelerado, pela priorização histórica do automóvel e pelas desigualdades de acesso ao espaço urbano. Assim, compreender sua evolução conceitual e política é fundamental para avaliar como diferentes abordagens de planejamento moldaram e continuam a moldar as condições de caminhabilidade, segurança e uso da cidade.

Jan Gehl e Birgitte Svarre (2013b) descrevem a evolução da filosofia do planejamento urbano, destacando como, após a Segunda Guerra Mundial, muitas cidades passaram a priorizar os automóveis em detrimento dos pedestres. Essa mudança consolidou padrões de desenvolvimento suburbano que marginalizaram as necessidades de quem caminha. Gehl e Svarre (2013b) observam, no entanto, que desde a publicação da obra seminal de Jane Jacobs em 1961, *The Death and Life of Great American Cities (A morte e a vida das grandes cidades americanas)*, diversas iniciativas ao redor do mundo têm buscado reorientar o planejamento urbano para atender às demandas dos pedestres e fortalecer a vida nas cidades.

Seguindo essa tendência global, a Política Nacional de Mobilidade Urbana fez contribuições significativas ao favorecer a mobilidade ativa nas hierarquias de transporte urbano. Como estabelece o artigo 6º da Lei Nacional 12.587/2012, a prioridade deve ser dada “aos meios de transporte não motorizados sobre os motorizados e ao transporte público sobre o individual”, diretriz que orienta o desenvolvimento urbano no país (Brasil, 2012).

A importância da infraestrutura destinada aos pedestres torna-se ainda mais crítica ao considerar as necessidades de acessibilidade. Em 2010, quase 24% da população brasileira apresentava algum tipo de deficiência, segundo o IBGE (2010). Desse total, cerca de 6,89% enfrentavam níveis mais severos de limitação funcional dentre as deficiências coletadas, sendo estas visuais, auditivas, motoras e mentais. A deficiência motora com grandes limitações representava 2,32% da população em 2010 e em 2022 passou a ser 2,69%. O censo de 2022 obteve o dado de que 7,3% da população possui alguma limitação grave em alguma das deficiências investigadas.

Para esse grupo, as características espaciais urbanas têm um impacto ainda mais significativo nas experiências de mobilidade, uma vez que os obstáculos físicos impõem desafios adicionais, reduzem a velocidade de deslocamento e ampliam o desconforto durante a locomoção. Como destacam Gehl e Svarre (2013b), a forma como o espaço urbano é estruturado influencia diretamente a capacidade de participação das pessoas na vida cotidiana da cidade.

A convergência desses fatores complementares, que inclui o movimento global em direção ao design centrado no pedestre, o compromisso legislativo do Brasil com a prioridade do transporte não motorizado e a expressiva parcela da população com desafios de mobilidade, evidencia a necessidade de uma avaliação abrangente da acessibilidade das calçadas. Os métodos tradicionais de inspeção visual nem sempre conseguem captar a complexidade dos requisitos técnicos envolvidos na promoção de uma mobilidade urbana equitativa. Esse cenário estabelece as condições para a exploração de abordagens inovadoras capazes de identificar sistematicamente barreiras no ambiente construído e apoiar a criação de espaços urbanos mais inclusivos.

Castro *et al.* (2020) relatam os desafios enfrentados por mães de crianças com deficiência em sua rotina diária e destacam como a ausência de rampas, a presença de lombadas e buracos nas calçadas e a baixa qualidade dos materiais constituem os principais obstáculos à mobilidade em cadeiras de rodas.

A fiscalização e vistoria das calçadas podem ser feitas de várias maneiras, a fotogrametria feita por voo de drone ou automóvel equipado com câmeras já está disponível em Juiz de Fora, mas seu custo impõe limitações ao registro periódico. Diante da expressiva parcela da população afetada e das limitações dos métodos tradicionais de fiscalização, evidencia-se a necessidade de abordagens que conciliem o rigor técnico e a escala territorial, capazes de transformar a acessibilidade urbana de um princípio normativo em uma condição efetiva da experiência urbana.

2.2.1. O direito à cidade e o desenho universal

A cidade manifesta a disputa entre necessidades opostas e complementares, conforme Lefebvre (2008) descreve as contradições da vida cotidiana, que demandam descanso, lazer, previsibilidade, segurança e certezas, concomitantemente com o imediatismo, a necessidade de autonomia, abertura e aventura.

Além dessas, o espaço da cidade é intrinsecamente artificial, produzido para acomodar as atividades humanas, sejam estas o trabalho, o estudo, o lazer, assim como as trocas que acabam sendo sobrepostas pelo valor de troca e pelo imperativo do lucro, os quais passam a orientar as disputas sobre o espaço como um “produto cultural” para ser consumido.

Os valores e escolhas de cada tempo vão transformando o espaço urbano, entendido como um objeto que não está determinado, ainda que haja espaços com características definidas; a cidade guarda em si possibilidades que dependem das escolhas e valores dos indivíduos que atuam sobre seu território. As estruturas que compõem o ambiente construído de uma cidade revelam sistemas de relações e ideologias de grupos dominantes e a realização de projetos de reforma urbana requer transformações que afetam desde relações individuais até a relação das instituições e indivíduos que realizaram tais reformas (Lefebvre, 2008).

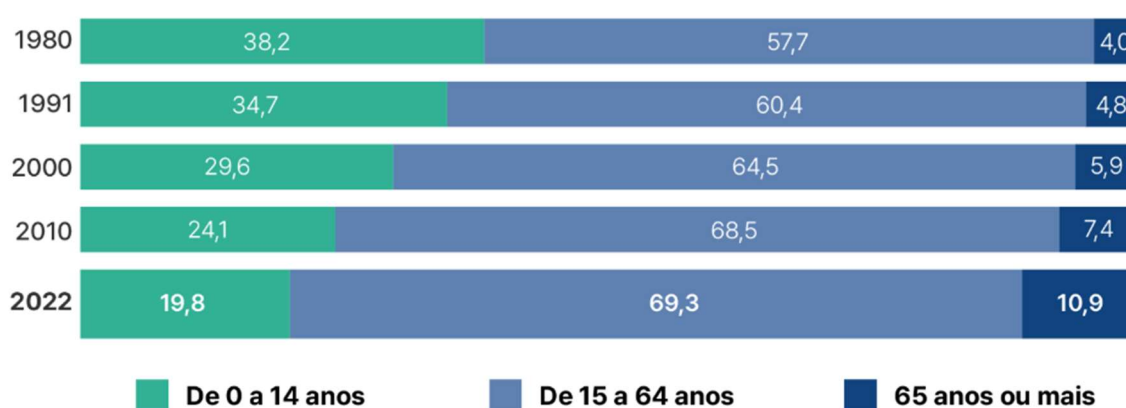
Como respostas às pressões e conflitos de cada momento histórico, surge a necessidade de estabelecer e defender direitos diversos, sejam eles direcionados a grupos populacionais, às condições dignas de trabalho, entre outros entendidos que passam a ser incorporados pela cultura seguidas de atos institucionais como os direitos à “educação, a saúde, a alimentação, o trabalho, o lazer, a segurança, a previdência social, a proteção à maternidade e à infância, a assistência aos desamparados” (Brasil, 1988, art. 6º). Harvey (2005), Gehl (2013a) e Jacobs (2011) defendem também o direito à vida urbana que depende de fatores como moradia, transporte, espaços públicos de qualidade, além da forma como estes estão dispostos sobre o território.

À Constituição Federal de 1988, em seu artigo 6º, foram incorporados novos direitos sociais ao longo do tempo por meio de emendas constitucionais. O direito ao lazer foi incluído pela Emenda Constitucional n.º 26, de 2000; o direito à moradia, pela Emenda Constitucional n.º 64, de 2010; e, posteriormente, em 2015, o direito ao transporte passou a integrar o rol dos direitos sociais fundamentais no ordenamento jurídico brasileiro.

Adicionar moradia, lazer e transportes aos direitos sociais brasileiros é um ponto de partida para buscar estratégias, políticas públicas, incentivos financeiros e regulamentação institucional para enfrentar alguns dos grandes desafios atuais, em que 87% da população brasileira se concentra nas cidades (IBGE, 2022). Esta população também passa por uma grande transformação na composição

populacional, conforme demonstrado na Figura 5, que tende a ter uma maior proporção de idosos do que nunca verificada anteriormente em nosso território. Por este motivo, implementar os princípios do desenho universal nos serviços e infraestrutura das cidades é uma iniciativa que beneficia a todos, mas impacta grupos cada vez maiores de pessoas. Esses princípios determinam que os espaços devem poder ser utilizados por todas as pessoas de maneira que as suas dimensões possibilitem o uso equiparável e de maneira confortável sem que seja necessário adaptações adicionais.

Figura 5 - População brasileira segmentada por idade entre 1980 e 2022



Fonte: IBGE (2025)

As transformações no Código Civil reconhecem os direitos da pessoa com deficiência, possibilitando a esta exercer a sua autonomia e que seja incluída em todos os atos comuns da vida, o que é um conceito inquestionável. Todavia, sua efetivação ainda é um desafio, pois as barreiras físicas e comportamentais dificultam o acesso aos serviços, espaços e atividades nas cidades (Castro et al., 2020). A efetivação destes direitos requer investimentos e políticas públicas voltadas a este grupo.

Neste contexto, deve-se reconhecer que a infraestrutura mais acessível aos pedestres e cadeirantes é também uma estratégia para tornar o transporte nas cidades mais eficiente, uma vez que incentivar o transporte não motorizado tem impacto num setor responsável por 11,9% das emissões de gases do efeito estufa (GE et al., 2020). Promover a infraestrutura destinada ao pedestre, assegurando maior segurança, conforto e acessibilidade para que este possa incorporar deslocamentos a pé em seu itinerário cotidiano, contribui para a redução das desigualdades, uma vez

que se trata da forma mais democrática de locomoção. Tal perspectiva é imprescindível para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, aos quais o Brasil é signatário, especialmente aqueles voltados à promoção de cidades e comunidades mais sustentáveis.

Jacobs (2011) identifica que a configuração espacial das cidades pode reforçar papéis de gênero desfavoráveis às mulheres, a medida em que modelos urbanos orientados ao transporte motorizado, caracterizados por baixo adensamento, longas distâncias entre áreas residenciais e centros comerciais e pouca diversidade de usos, tendem a produzir padrões distintos de mobilidade. Nesses contextos, observa-se que os homens realizam predominantemente deslocamentos pendulares entre casa e trabalho, frequentemente por meio do automóvel, enquanto as mulheres, que ainda concentram grande parte das atividades domésticas e de cuidado em nossa cultura, realizam maior número de pequenos deslocamentos intra urbanos, majoritariamente a pé (Jacobs, 1961). Assim, o investimento na infraestrutura destinada ao pedestre configura-se como um fator relevante para a promoção de maior equidade de gênero no espaço urbano.

2.2.2. Evolução da legislação brasileira sobre acessibilidade

A legislação brasileira sobre acessibilidade consolidou-se gradualmente, acompanhando transformações sociais, pressões por inclusão e a necessidade de padronizar critérios técnicos aplicáveis ao ambiente construído. Nesse processo, a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência, instituída pela Lei 13.146/2015, estabelece que os planos diretores, códigos de construção, planos de transporte e tráfego, planos de mobilidade urbana e planos de preservação de locais históricos devem, quando elaborados ou revisados, estar conformidade com as normas técnicas e a legislação vigente, especialmente a Lei 10.257/2001, que institui o Estatuto da Cidade, e a Lei 10.098/2000, que define critérios gerais de acessibilidade. Enquanto a Lei Brasileira 10.098/2000 estabelece parâmetros nacionais amplos e princípios estruturantes, cabe aos regulamentos municipais e aos manuais técnicos detalhar orientações específicas, ajustadas às características urbanas locais e às necessidades dos usuários.

Desenha-se, assim, uma arquitetura regulatória hierárquica que articula diretrizes gerais de alcance nacional com normas de implementação local,

responsáveis por operacionalizar a acessibilidade no ambiente construído. A implementação da Lei Brasileira de Inclusão 13.146/2015 representa um marco regulatório importante, fruto de um processo coletivo e contínuo, que visa romper um longo histórico de exclusão e marginalidade imposto às pessoas com deficiência no Brasil e assegurar a efetivação dos direitos e garantias contemplados pela Convenção sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência, adotada em Nova York em 2006 (ONU,2006; Brasil, 2009).

Uma das contribuições mais relevantes foi a modificação do Código Civil (Brasil, 2002), que passou a considerar como absolutamente incapazes apenas os menores de 16 anos e, para os demais casos, vinculou o exercício da autonomia à noção de capacidade relativa. Essa mudança possibilitou a inclusão da pessoa com deficiência nos atos da vida civil, reconhecendo sua legitimidade para contrair matrimônio, exercer sua vida sexual, preservar sua privacidade, acessar o trabalho e participar da educação, promovendo seu reconhecimento como sujeito de direitos e integrante pleno da sociedade. Tais alterações refletem transformações culturais significativas, nas quais a sociedade que passa a compreender que a deficiência não torna a pessoa incapaz, ao contrário, são as barreiras presentes no ambiente físico, social e atitudinal, que produzem limitações mais severas do que a própria condição corporal que caracteriza a deficiência (Castro *et al.*, 2022).

Castro *et al.* (2022) reconhecem a necessidade de ampliar investimentos e fortalecer políticas públicas que assegurem o cumprimento dos direitos determinados pela Lei 13.146/2015. Além dos avanços já observados nas áreas da saúde, educação e assistência social, a mobilidade urbana também deve ser contemplada. É perceptível que o tema é amplamente regulamentado, porém, a aplicação de seus fundamentos ainda enfrenta desafios persistentes, especialmente no que diz respeito à fiscalização da acessibilidade no ambiente construído. As barreiras que dificultam o acesso de pessoas com deficiência exigem processos de inspeção minuciosos, aumentando a demanda por recursos humanos e investimentos financeiros. Esse cenário evidencia a necessidade de métodos mais eficientes e escaláveis, capazes de ampliar a precisão e a abrangência das verificações. É nesse contexto que a presente pesquisa se insere, ao explorar o uso da visão computacional por meio de técnicas de Inteligência Artificial para analisar o ambiente construído com base nos parâmetros de acessibilidade estabelecidos pelas normas brasileiras.

A Lei 13.146/2015 também promove alterações relevantes no Estatuto da Cidade, ao introduzir a obrigatoriedade de elaboração de planos de rotas acessíveis para todos os municípios sujeitos à formulação de plano diretor. Essa inclusão representa um avanço significativo na articulação entre planejamento urbano e direitos das pessoas com deficiência, ao estabelecer a necessidade de identificar, implantar e qualificar os passeios públicos essenciais para a circulação segura e autônoma. O dispositivo legal reforça a compreensão de que a acessibilidade deve ser tratada como infraestrutura urbana fundamental, orientando o poder público a estruturar intervenções que contemplem áreas estratégicas e articulem mobilidade ativa e transporte coletivo:

§ 3º As cidades de que trata o **caput** deste artigo devem elaborar plano de rotas acessíveis, compatível com o plano diretor no qual está inserido, que disponha sobre os passeios públicos a serem implantados ou reformados pelo poder público, com vistas a garantir acessibilidade da pessoa com deficiência ou com mobilidade reduzida a todas as rotas e vias existentes, inclusive as que concentrem os focos geradores de maior circulação de pedestres, como os órgãos públicos e os locais de prestação de serviços públicos e privados de saúde, educação, assistência social, esporte, cultura, correios e telégrafos, bancos, entre outros, sempre que possível de maneira integrada com os sistemas de transporte coletivo de passageiros. [\(Incluído pela Lei n.º 13.146, de 2015\)](#)

(Brasil 2015, 2002, art.113.)

Esse dispositivo reforça a centralidade das calçadas como elemento estruturador da mobilidade urbana e orienta os municípios à construção de redes acessíveis e contínuas que atendam às demandas cotidianas da população.

Embora o Código Civil considere as calçadas como bens de uso comum do povo (Brasil, 2002) e o Código de Trânsito (Brasil, 1997) as classifique como parte integrante da via, a Lei Brasileira de Inclusão introduziu alterações no Estatuto da Cidade que atribuem ao poder público a responsabilidade de planejar e implantar melhorias em calçadas e passeios públicos. Ainda assim, muitos municípios continuam a transferir aos proprietários lindeiros a responsabilidade pela construção e manutenção das calçadas, como ocorre em Juiz de Fora, produzindo um descompasso entre o marco legal contemporâneo e as práticas administrativas locais.

Nesse contexto, a formulação de rotas acessíveis em áreas estratégicas, especialmente em trechos com alta circulação de pedestres, forte presença de equipamentos urbanos e grandes geradores de viagens, abre espaço para estudos sobre a viabilidade, priorização e sustentabilidade das obras de implantação e

requalificação desses espaços, orientando o poder público na definição de intervenções com maior retorno social.

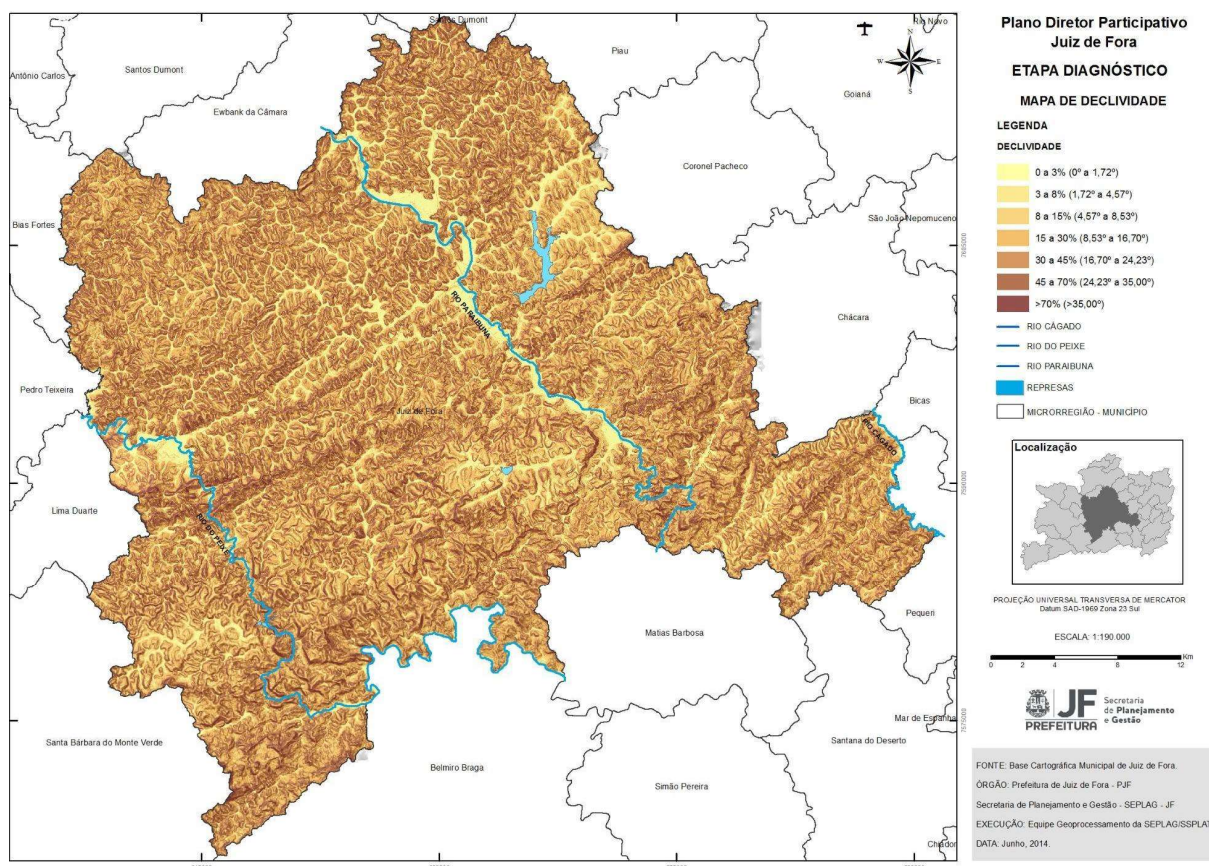
Diante desse quadro de avanços normativos e desafios persistentes na implementação, torna-se essencial examinar como essas diretrizes se materializam no nível local, especialmente no contexto de Juiz de Fora, onde a legislação e a prática municipal revelam tensões estruturais importantes para a análise da acessibilidade urbana.

2.2.3. Legislação e aplicação da acessibilidade em Juiz de Fora

Juiz de Fora está localizada em um domínio geomorfológico denominado por Ab Sáber (2021) de “mares de morros”, caracterizado por uma topografia acidentada, historicamente desafiadora para os processos de antropização. Nesse contexto, verificaram-se dificuldades para a implantação de grandes parques industriais e para a consolidação de centros urbanos, em função das próprias características físicas do relevo.

Na Figura 6, essa condição geomorfológica se expressa claramente, ao evidenciar que as áreas com declividade entre 0% e 8%, representadas em amarelo, são escassas em relação à área total do município. As inclinações entre 8% e 15% e entre 15% e 30% aparecem em tons de laranja e correspondem a porções do território amplamente ocupadas, indicando uma presença expressiva da urbanização nessas faixas de declividade. Do ponto de vista da acessibilidade, a expansão urbana extrapola as áreas planas e avança sobre os morros, onde as glebas podem ser loteadas em terrenos com até 30% de inclinação e as vias não devem ultrapassar 20%, conforme estabelece a Lei n.º 6.908/1986 para novos loteamentos. Contudo, em áreas mais antigas da cidade, esse limite é frequentemente superado. As cores em tons alaranjados e marrons indicam inclinações entre 8% e 15%, em laranja-claro, e entre 15% e 30%, em laranja-escuro. Já as áreas com inclinação superior a 30%, representadas em marrom, não são passíveis de parcelamento legal, embora sejam comumente ocupadas irregularmente.

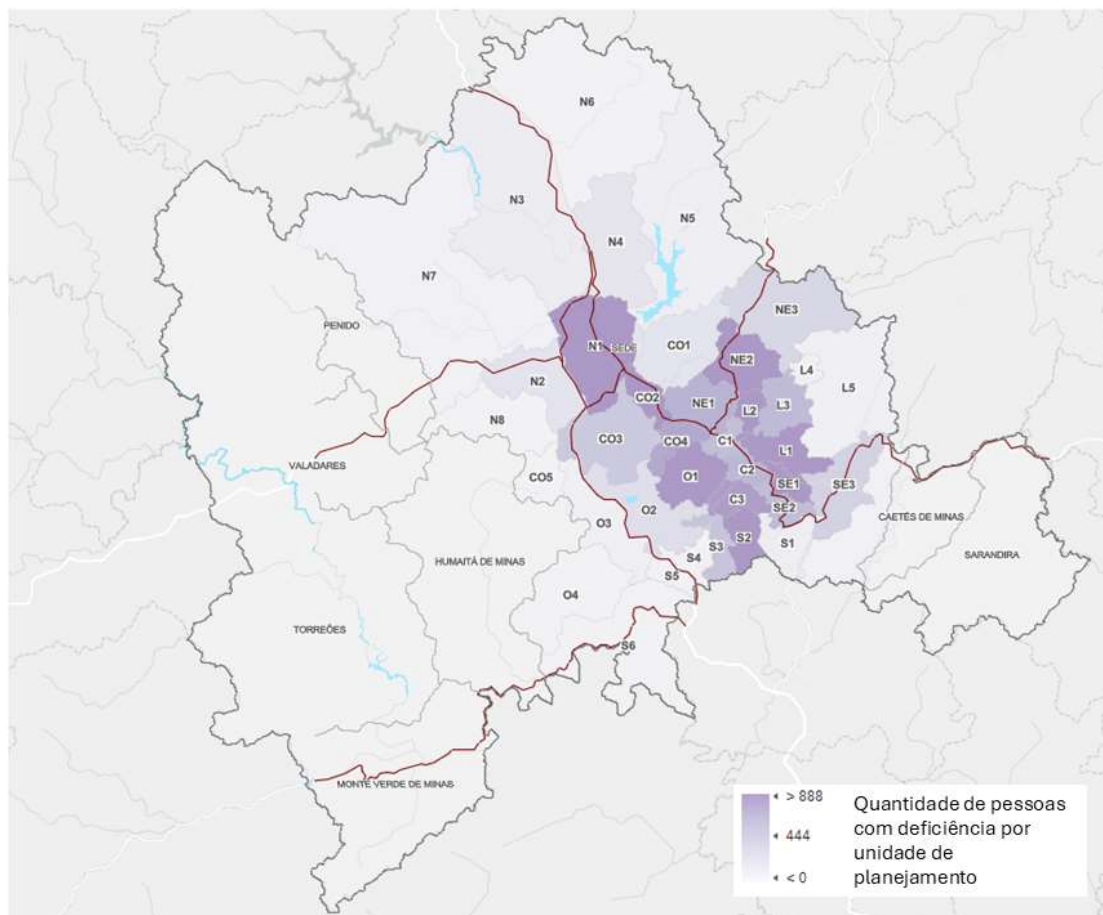
Figura 6 - Mapa de declividade de Juiz de Fora



Fonte: Base Cartográfica Municipal de Juiz de Fora (2014)

Os desafios para a expansão urbana não impediram que o município chegasse em 2022 a uma população total de 557.777 pessoas, das quais cerca de 16,4 mil pessoas possuem alguma deficiência grave. Na Figura 7, as unidades de planejamento foram preenchidas por tons de roxo e lilás mais intensos conforme maior quantidade de pessoas com deficiência ou transtorno do espectro autista residentes nas mesmas, e é possível observar que há ampla distribuição pelo o território urbano com concentração maior nas áreas periféricas. Esse levantamento integra um esforço de mapeamento voltado à identificação de áreas prioritárias para intervenção. Considerando este contexto, garantir o direito à mobilidade e autonomia impõe desafios específicos.

Figura 7 - Mapeamento das pessoas com deficiência por região de planejamento



Fonte: Mapeamento geoespacial das pessoas com deficiência/TEA por região de planejamento (Juiz de Fora, 2024)

Considerando-se esta distribuição, a atenção à infraestrutura das calçadas não pode se concentrar apenas em áreas centrais e de maior interesse econômico. Atualmente, a política pública municipal que regulamenta as calçadas condiciona a emissão da licença de uso de edificações à execução adequada da calçada, procedimento que se articula com a atuação do departamento de fiscalização. Em ambos os casos, a verificação dos parâmetros das calçadas é realizada essencialmente por meio de observação visual. Embora esse procedimento atenda às exigências normativas para o registro formal da conformidade, torna-se evidente que tal método é insuficiente para validar os requisitos técnicos de acessibilidade, dada a complexidade dos parâmetros envolvidos e a necessidade de precisão mensurável (ABNT, 2020; Juiz de Fora, 2006a, 2007).

Em 2010, o Programa Nova Juiz de Fora financiou a revitalização de trechos de vias centrais da cidade, abrangendo obras de infraestrutura e drenagem, além da

requalificação das calçadas. O fato de todo o projeto ter sido desenvolvido por um consórcio contratado pelo poder público evidencia um ponto relevante: mesmo intervenções planejadas e executadas por equipes técnicas especializadas podem apresentar inconformidades que não são facilmente identificáveis por inspeção visual isolada, mas que se tornam evidentes quando submetidas a medições precisas por meio de ferramentas adequadas. Essa situação é ilustrada nas Figuras 8 e 9, nas quais pequenas variações geométricas, imperceptíveis a olho nu, revelam-se incompatíveis com os parâmetros técnicos exigidos para acessibilidade.

Figura 8 - Pavimentação na Rua Santo Antônio pelo Programa Nova Juiz de Fora



Fonte: (Prefeitura Municipal De Juiz De Fora, 2011)

As obras de requalificação de calçadas abrangem a Rua Santo Antônio, Avenida Barão do Rio Branco, Avenida Andradas, Avenida Independência - atual Avenida Itamar Franco - e a Avenida Getúlio Vargas. Na Figura 8, apresentada acima, destaca-se um trecho da Rua Santo Antônio, importante via central e majoritariamente plana, no qual foram realizadas medições que identificaram a presença de recortes na calçada para acesso de veículos, estreitamentos, rebaixamentos de nível com inclinações e dimensões inadequadas, além de inclinação transversal fora dos parâmetros normativos (Câmara Municipal, 2010). Esses elementos, frequentemente ignorados em avaliações visuais, provocam significativo desconforto e comprometem a mobilidade de pessoas usuárias de cadeiras de rodas.

Figura 9 - Desnível e inclinação inadequada na faixa livre da Rua Santo Antônio



Fonte: Autoria própria (2025)

O setor público dispõe de diversos instrumentos para promover o cumprimento das normas urbanísticas e de acessibilidade, entre eles, a vinculação da emissão de licenças de construção e dos certificados de ocupação ao atendimento das exigências regulamentares pertinentes (Juiz de Fora, 2003, 2006b, 2012a). A Tabela 2 a seguir representa o fluxo de documentos, autorizações e licenças necessários a partir do momento em que um proprietário solicita permissão para iniciar uma obra. Observa-se que, embora a acessibilidade seja exigida na fase de projeto, essa verificação permanece restrita ao interior do lote (Juiz de Fora, 2015, 2003). As calçadas são mencionadas apenas no momento da expedição do alvará, que informa que, para a obtenção do habite-se, o passeio deve estar executado em conformidade com a NBR 9050.

Tabela 2 - Licenças e condicionantes do processo edilício em Juiz de Fora

Etapa	Documentação / Serviço	Condicionantes à emissão dos documentos	Instrumentos de fiscalização e controle
1	Informações básicas	Informações ao público externo sobre características oficiais do terreno, restrições de uso e parâmetros construtivos	—
2	Aprovação do projeto de construção	Verificação da acessibilidade no projeto	—
		Autorização para construção no entorno do aeroporto, adjacências a rodovias, em área de APP, no entorno e em bens tombados ou em áreas de risco	—
		Autorização para corte de árvores	—
		Estudo de impacto de vizinhança	—
		Autorização da vigilância sanitária	—
		Verificação de conflitos de propriedade	—
		Verificação dos demais parâmetros urbanísticos	—
3	Emissão de alvará	Acompanhamento de profissional responsável pela execução da obra	—
4	Aceite de obra e numeração oficial	Verificação se a calçada foi construída conforme a NBR 9050	Fiscalização ativa ou por denúncia
		Verificação se a construção foi realizada em conformidade com o projeto	—
5	Habite-se	Verificação documental e tributária das novas unidades geradas	Alvará de funcionamento
		Auto de vistoria do Corpo de Bombeiros	—

Fonte: Juiz de Fora 1986a,1986b, 2003,2006,2015,2024

As calçadas públicas, por sua vez, podem ser objeto de fiscalização ativa, que tende a priorizar áreas de maior circulação de pedestres e novos loteamentos, ou de fiscalização reativa, acionada por denúncias encaminhadas por qualquer cidadão por meio do portal eletrônico da prefeitura. Essa combinação de instrumentos evidencia uma abordagem predominantemente documental e visual, que limita a capacidade de aferir com precisão os parâmetros técnicos de acessibilidade estabelecidos pela norma.

A Tabela 3 apresenta um registro temporal das legislações relacionadas à acessibilidade promulgadas em Juiz de Fora nas últimas duas décadas. Observa-se, ao longo dessas normas, um movimento que alternaria entre medidas que fortalecem

a promoção da acessibilidade e dispositivos que respondem a pressões do setor da construção civil e de outros segmentos econômicos, resultando em isenções ou na flexibilização de requisitos originalmente mais rigorosos (Juiz de Fora, 2003, 2006b, 2012a, 2012b, 2018, 2021, 2022a, 2022b, 2024a, 2024b). Esse padrão oscilante evidencia a tensão permanente entre a defesa dos direitos das pessoas com deficiência e os interesses de desenvolvimento urbano, tensão que atravessa a formulação da política municipal de acessibilidade. A linha do tempo das leis promulgadas entre 2003 e 2024, apresentada na Figura 9, oferece uma síntese de seu conteúdo e das principais observações relevantes para a análise.

Tabela 3 - Linha do tempo das leis de acessibilidade em Juiz de Fora

Data	Título e número da lei	Situação	Síntese do conteúdo
04 jun. 1986	Parcelamento de solo Lei 6908/1986	Em vigor	Estabelece regras para o parcelamento do solo no município, definindo critérios de aprovação, exigência de infraestrutura mínima, limitações para áreas com declividade ou restrições ambientais e obrigatoriedade de destinação de áreas para uso público, orientando o ordenamento urbano e a expansão territorial.
31 mai. 1986	Código de obras Lei 6909/1986	Em vigor	Estabelece normas para projetar, licenciar, construir, reformar e regularizar edificações no município, definindo requisitos de segurança, documentação obrigatória, aprovação de projetos, responsabilidades de proprietários e profissionais, além de regras de fiscalização, sanções e emissão de alvarás e habite-se.
31 mai. 1986	Uso e Ocupação do Solo Lei 6910/1986	Em vigor	Estabelece diretrizes para o uso e ocupação do solo em Juiz de Fora, definindo a divisão territorial entre áreas urbanas e rurais, o zoneamento em categorias residenciais, comerciais, industriais e de uso múltiplo, além da criação de zonas especiais. Regula o parcelamento do solo, modelos de ocupação e limitações urbanísticas como altura, taxas, afastamentos e vagas. Também define os procedimentos de licenciamento, fiscalização, sanções e as atribuições da comissão.
20 mar. 2003	Lei Orgânica Lei nº 10.410/2003	Em vigor	Estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, e dá outras providências.
16 dez. 2004	Lei 10.851/2004	Em vigor	Possibilita a liberação de alvará de funcionamento, em caráter excepcional, sem a comprovação de regularidade do imóvel. Dispensa que empreendimentos regularizem seus imóveis para obterem a autorização para seu funcionamento por 1 ano.
03 ago. 2006	Código de Posturas Lei nº 11.197/2006	Em vigor	Estabelece regras para a fiscalização de condutas em diversas áreas. Menciona que a construção e reforma de calçadas deverão seguir as normas de acessibilidade.
19 abr. 2012	Lei nº 12.530/2012	Substituída pela Lei Complementar nº 88/2018	Estabelece diretrizes para a regularização de construções, reformas, modificações ou ampliações de edificações realizadas sem prévia licença da Prefeitura de Juiz de Fora. A regularização de imóveis visa conceder o habite-se a edificações existentes com condições mínimas de uso que não atendem totalmente aos parâmetros determinados pelas leis do município para novas edificações
21 set. 2012	Decreto nº 11.342/2012	Em vigor	Regulamenta a Lei nº 10.410, de 20 de março de 2003, que dispõe sobre as normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida no Município de Juiz de Fora/MG. O decreto trás parâmetros adicionais e maior clareza na aplicação da lei. Hoje encontra-se um pouco defasado em relação à NBR9050
21 fev. 2017	Lei nº 13.4962/2017	Em vigor	Dispõe sobre reserva de vagas para pessoa com deficiência com comprometimento de mobilidade, em todas as áreas de estacionamento aberto ao público, de uso público ou privado de uso coletivo, em vias públicas no Município de Juiz de Fora.

			Determina uma quantidade mínima de vagas para pessoas com deficiência e também introduz o conceito de pessoa com mobilidade reduzida e uma proporção de vagas para este público.
26 jul. 2018	Decreto Federal nº 9.451/2018	Em vigor	Regulamenta o art. 58 da Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015, que institui a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência - Estatuto da Pessoa com Deficiência. Trás parâmetros para edificações residenciais multifamiliares em todo o território nacional. Torna obrigatório que as áreas comuns sejam acessíveis, além de parâmetros para unidades adaptáveis e a obrigatoriedade de vagas acessíveis no condomínio.
03 dez. 2018	Lei Complementar nº 88/2018	Substituída pela Lei complementar 164/2022	Dispõe sobre a regularização de construções, reformas, modificações ou ampliações de edificações realizadas sem prévia licença da Prefeitura de Juiz de Fora. Apesar de lançada 15 anos após a primeira lei de acessibilidade do município não menciona sanções ao não atendimento dos parâmetros de acessibilidade
16 jan. 2020	Lei nº 14.003/2020	Em vigor	Dispõe sobre a reserva de vagas de estacionamento de shopping centers, centros comerciais e hipermercados para gestantes e lactantes, no âmbito do Município de Juiz de Fora. Amplia a quantidade de vagas prioritárias, incluindo vagas para gestantes e lactantes em hipermercados.
13 abr. 2021	Decreto nº 14.480/2021	Substituído pelo Decreto 15.003/2022	Regulamenta as Atividades Dispensadas de Atos Públicos de Liberação da Atividade Econômica no âmbito do Município de Juiz de Fora e dá outras providências. O dispositivo dispensa a necessidade de qualquer ato público do executivo: permissões, alvarás, a tal medida porém dispensa que empreendimentos de baixo impacto tenha habite-se
02 fev. 2022	Decreto nº 15.003/2022	Em vigor	Define a classificação de atividades de acordo com o risco e regulamenta a concessão das inscrições e das licenças para funcionamento provisórias no âmbito do Município de Juiz de Fora e dá outras providências. Estabelece que "a dispensa de atos públicos para a liberação de atividade econômica não dispensa ou substitui os procedimentos relacionados ao licenciamento e autorizações de construção e regularização edilícia"
30 mai. 2022	Lei Complementar nº 164/2022	Atualizada pela Lei complementar 268/2025.	Dispõe sobre a regularização de construções, reformas, modificações ou ampliações de edificações realizadas sem prévia licença da Prefeitura de Juiz de Fora. A atualização da lei de regularização mantém o texto anterior sem menção aos parâmetros de acessibilidade nem a previsão de sanções, ou multas mesmo após 19 anos da emissão da primeira lei de acessibilidade.
05 jul. 2024	Lei Complementar nº 245/2024		Dispensa a solicitação de alvará de licença e estabelece normas para execução de pequenas reformas. A emissão do alvará de pequenas reformas condicionava que estabelecimentos incluíssem algumas adaptações em suas obras e informava sobre as calçadas.
09 ago. 2024	Lei Complementar nº 247/2024		Altera o artigo 68-A da Lei 6.909, de 31 de maio de 1986. Condiciona a ocupação da construção à aceitação da obra e estabelece critérios para a vistoria.
22 set. 2025	Decreto nº 17.467/2025		Institui o Plano Municipal de Políticas para Pessoas com Deficiência de Juiz de Fora.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

As leis de parcelamento, uso e ocupação do solo e o código de obras inauguram os principais instrumentos legais disponíveis e ainda vigentes no município. Embora estabelecessem diretrizes para a execução de escadas, elevadores e sua ventilação, não contemplavam uma política específica de acessibilidade, inexistindo regulamentação sobre rotas de fuga acessíveis, áreas comuns e outros elementos essenciais à acessibilidade universal.

A partir de 2003, leis subsequentes passaram a consolidar instrumentos mais robustos voltados à acessibilidade. A Lei nº 10.410, de 2003, estabelece critérios básicos para a promoção da acessibilidade. A promulgação desta lei antes mesmo da convenção de Nova York e da Lei Brasileira de Inclusão, em 2015, denota o pioneirismo do município, ainda que persistam desafios significativos para sua efetiva aplicação. A norma foi posteriormente regulamentada em 2011, por meio do Decreto Municipal nº 11.342. Esse decreto define critérios para a construção e reforma de elementos urbanísticos, para edificações coletivas e para a execução de calçadas, cujos parâmetros passam a ser exigidos na aprovação de novos loteamentos, embora sua implementação ocorra apenas na fase final das obras. O decreto detalha parâmetros geométricos, isenta da adequação situações consolidadas com largura inferior a 1,20 m, prevendo que, nesses casos, a calçada deva ser integralmente destinada à circulação de pedestres e mantida livre de obstáculos. Além disso, o decreto estabelece que calçadas, passeios e vias de pedestres com inclinação superior a 8,33% não integram as rotas acessíveis.

A Lei brasileira de inclusão prevê que as cidades obrigadas a executar o plano diretor, nos parâmetros do artigo 41, deverão também elaborar um plano de rotas acessíveis, destinado a orientar a implantação e a reforma de passeios públicos pelo poder público, de modo a garantir o acesso da pessoa com deficiência ou mobilidade reduzida a todas as rotas e vias que concentram focos geradores de maior circulação de pedestres e locais de prestação de serviços públicos e privados, de forma integrada aos sistemas de transporte público. Esse nível de detalhamento, no entanto, não é contemplado pelo Decreto nº 11.345, de 2011.

Outras leis complementares sucederam-se, prevendo a disponibilidade de vagas em estacionamentos coletivos para pessoas com deficiência e pessoas com mobilidade reduzida. Em articulação com essas normas, o Código de Posturas regulamenta a atuação da fiscalização em 2006, mencionando a obrigatoriedade de atendimento aos critérios de acessibilidade das calçadas.

A legislação municipal assegura ao poder público a prerrogativa de regulamentar práticas voltadas à convivência social, mas a trajetória normativa relativa às calçadas revela uma persistente transferência de responsabilidades aos proprietários lindeiros, como já observado na determinação de que “os proprietários ou possuidores de imóveis [...] são obrigados a construir e manter as respectivas calçadas” (Juiz de Fora, 1997, art. 29). Essa opção regulatória, reiterada ao longo das décadas, identificadas na linha do tempo, sustenta um quadro no qual a execução e manutenção das calçadas permanecem fragmentadas, dependentes de capacidades individuais e pouco articuladas com diretrizes urbanísticas de escala sistêmica.

A fiscalização, por sua vez, enfrenta limitações estruturais significativas. Baseada majoritariamente em inspeção visual, permanece um método trabalhoso, pouco preciso e de baixa escalabilidade, insuficiente para responder às demandas contemporâneas de verificação dos parâmetros de acessibilidade, conforme já apontado por Howe *et al.* (2022). A ampliação de dispositivos de dispensa e flexibilização, como as Leis nº 10.851/2004 e nº 15.003/2022, que autorizam o funcionamento provisório de empreendimentos em edificações irregulares, contribui para a aceleração de processos econômicos, mas reduz a capacidade do Estado de assegurar o cumprimento efetivo dos direitos e princípios urbanísticos. Embora tais dispositivos prevejam a regularização posterior para a emissão do habite-se, na prática ampliam o intervalo temporal no qual a fiscalização não incide plenamente sobre as condições urbanas externas, incluindo a execução e a conformidade das calçadas.

As leis de regularização edilícia promulgadas ao longo dos anos (Juiz de Fora, 2012, 2018, 2022, 2024) não incorporam parâmetros explícitos de acessibilidade, reforçando a lacuna normativa já evidenciada na linha do tempo apresentada. Ainda que o Código de Posturas de 2006 e a Lei nº 247/2024 estabeleçam que os passeios devem atender aos parâmetros da NBR 9050, a ausência de sanções específicas e a manutenção de procedimentos de inspeção exclusivamente visuais enfraquecem o potencial regulatório dessas exigências. A própria Lei nº 247/2024 determina que os passeios lindeiros estejam concluídos e acessíveis previamente ao aceite de obras, mas não define critérios nem procedimentos objetivos de verificação, perpetuando o caráter predominantemente declaratório da norma.

Como resultado, a produção de acessibilidade no território municipal permanece majoritariamente restrita às novas edificações e aos novos parcelamentos,

perpetuando o desafio de intervir em áreas consolidadas, onde as barreiras físicas já se encontram enraizadas e a descontinuidade entre trechos acessíveis e inacessíveis persiste. A obrigatoriedade do habite-se, embora relevante, apresenta efeitos limitados, uma vez que as adaptações são exigidas pontualmente e não promovem continuidade espacial entre imóveis vizinhos, condição agravada pela fragmentação dos instrumentos legais e pela atuação segmentada dos diferentes setores da administração pública..

Nesse contexto, métodos de inspeção visual assistidos por técnicas de processamento de imagens e de inteligência artificial emergem como alternativas promissoras. Além de ampliar a precisão e agilidade das análises, esses métodos oferecem potencial de escalabilidade e padronização, possibilitando diagnósticos abrangentes e orientados por dados, capazes de subsidiar políticas públicas mais consistentes e equitativas voltadas à melhoria das calçadas e à efetivação da acessibilidade no município.

2.2.4. NBR 9050: Princípios e parâmetros aplicados a calçadas

A ABNT NBR 9050:2015 constitui o principal instrumento técnico para orientar a acessibilidade no espaço urbano brasileiro e estabelece critérios que buscam garantir o uso autônomo, independente e seguro do ambiente construído por pessoas com diferentes condições de mobilidade e percepção. A norma define parâmetros que abrangem desde dimensões corporais de referência até diretrizes para circulação, uso e implantação de mobiliário e infraestrutura. No entanto, quando aplicada ao contexto das calçadas, suas disposições normativas entram em tensão com as condições reais de produção e manutenção do espaço urbano, especialmente em cidades cuja morfologia apresenta limitações estruturais e operacionais relevantes. Compreender essa relação entre parâmetros técnicos e realidade material é essencial para esta pesquisa, que investiga a possibilidade de utilizar Inteligência Artificial para fortalecer a fiscalização de acessibilidade.

A organização funcional das calçadas proposta pela NBR 9050 estrutura o passeio em três faixas com funções claramente definidas. A Tabela 4 sintetiza esses elementos, articulando definição normativa, parâmetros dimensionais e problemas recorrentes observados na prática cotidiana.

Tabela 4 - Estrutura funcional da calçada e desafios de aplicação prática

Elemento	Definição normativa	Largura mín.	Função principal	Problemas na prática
Faixa de serviço	Área destinada a mobiliário urbano, canteiros, postes e sinalização	0,70 m	Manter obstáculos fora da área de circulação	Ocupação irregular, raízes invadindo o passeio, rampas veiculares instaladas indevidamente
Faixa livre	Zona contínua para circulação desobstruída de pedestres	1,20 m e altura livre de 2,10 m	Garantir circulação segura e contínua	Degraus entre lotes, rampas veiculares que invadem a faixa, materiais irregulares e superfície não contínua
Faixa de acesso	Transição entre lote e via pública em calçadas mais largas	Para calçadas > 2,00 m	Acomodar elementos de acesso ao lote	Uso indevido em calçadas estreitas, conflitos com a faixa livre

Fonte: Elaborada pela autora (2025)

A leitura crítica dessa estrutura evidencia a distância frequente entre o arranjo normativo ideal e as práticas de execução e manutenção observadas nas cidades brasileiras. Embora a divisão funcional estabeleça uma lógica espacial capaz de assegurar circulação segura, sua implementação é prejudicada por fatores como ocupação irregular do espaço público, ausência de padronização entre lotes, rampas veiculares mal executadas e intervenções que ignoram a continuidade da faixa livre. A responsabilização da construção das calçadas por proprietários lindeiros reforça a fragmentação, gerando corredores descontínuos que inviabilizam a experiência acessível prevista pela norma. Nesse cenário, a pesquisa propõe que o uso de modelos de visão computacional pode contribuir para identificar padrões de não conformidade e auxiliar a gestão pública a planejar intervenções de forma sistemática e baseada em evidências.

As dificuldades de aplicação tornam-se ainda mais evidentes ao comparar os parâmetros técnicos de inclinação e superfície com as condições geométricas de cidades montanhosas, como Juiz de Fora. A parte expressiva de suas ruas excede a inclinação longitudinal permitida antes que o passeio seja classificado como rampa, o que exigiria a implantação de patamares nem sempre possíveis no espaço existente. A norma estabelece limites importantes para segurança e autonomia, mas muitas vezes não dialoga com realidades urbanas consolidadas. A Tabela 5 organiza esse confronto entre parâmetros normativos e limitações físicas recorrentes.

Tabela 5 - Parâmetros normativos e condições típicas de topografia acentuada

Parâmetro NBR 9050	Exigência normativa	Condição típica em cidades montanhosas	Consequência prática	Implicações para fiscalização
Inclinação longitudinal	Inclinação acima de 5% caracteriza rampa e exige patamares	Grande parte das vias supera 6% a 12%	Execução de patamares torna-se inviável; rotas acessíveis ficam fragmentadas	Necessidade de diretrizes locais complementares
Inclinação transversal	Máximo de 3% na faixa livre	Difícil manutenção dessa regularidade em execução informal	Aumento de esforço físico e risco de tombamento	Requer medições precisas e sistemáticas
Superfície e revestimento	Regular, firme, antiderrapante, não trepidante	Intervenções improvisadas, materiais heterogêneos	Acessibilidade prejudicada; risco de quedas	Inspeção visual torna-se insuficiente para avaliar padrões
Desníveis	Até 5 mm sem tratamento; até 20 mm com rampa	Desníveis entre lotes frequentemente superiores	Interrupção da rota acessível	Necessidade de identificação contínua e detalhada

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A consolidação dessas evidências demonstra que, embora a NBR 9050 ofereça diretrizes essenciais para a produção de ambientes acessíveis, sua aplicabilidade é limitada por fatores estruturais, como a topografia, e operacionais, como a falta de padronização na execução das calçadas, a ausência de orientação geométrica municipal e a baixa capacidade de fiscalização. A inspeção tradicional depende de avaliações minuciosas e presença constante em campo, o que implica alta demanda de recursos humanos e financeiros. Em muitos municípios, as vistorias se resumem à verificação visual, insuficiente para captar nuances técnicas como inclinações, micro desníveis e irregularidades de superfície.

Diante dessas limitações, o estudo argumenta que tecnologias baseadas em Inteligência Artificial podem oferecer suporte efetivo ao processo de fiscalização, não substituindo o papel humano, mas fortalecendo a capacidade institucional de monitorar grandes áreas, identificar trechos críticos e orientar investimentos de forma objetiva e transparente. A potencial integração entre parâmetros normativos precisos e modelos computacionais capazes de transformar imagens urbanas em diagnósticos

sistematizados constitui uma oportunidade inédita para aproximar a prática da acessibilidade das exigências legais e dos direitos das pessoas com deficiência.

2.2.5. Experiências internacionais em auditoria de acessibilidade por meio de tecnologias digitais

A Universidade de Washington abriga um laboratório de Inteligência Artificial dedicado à interseção entre aprendizado de máquinas, acessibilidade e estudos urbanos, desenvolvendo pesquisas que exploram o uso de tecnologias digitais para a análise do ambiente construído. Entre as iniciativas desenvolvidas nesse contexto, destaca-se o *Project Sidewalk*, que atua em duas frentes complementares: a coleta de dados sobre calçadas por meio da integração de bases colaborativas, técnicas de visão computacional e imagens provenientes de plataformas de mapas online, e a utilização desses conjuntos de dados para o desenvolvimento, avaliação e proposição de soluções voltadas à acessibilidade e à navegação urbana. Trata-se de uma das experiências mais consolidadas de auditoria digital da infraestrutura do pedestre, com foco na identificação sistemática de barreiras físicas e na priorização de intervenções (Makeability Lab, 2025).

Outra iniciativa relevante é o aplicativo *AccessMap*, que propõe a oferta de informações personalizadas a partir do compartilhamento de experiências entre pessoas usuárias de cadeiras de rodas em parques e trilhas. O projeto emerge da constatação de que mapeamentos oficiais de acessibilidade tendem a adotar parâmetros genéricos, desconsiderando a diversidade de dispositivos de mobilidade assistida existentes, como cadeiras de rodas elétricas com maior capacidade de vencer inclinações acentuadas ou superfícies irregulares (AccessMap, 2025). Ao incorporar dados baseados na experiência real dos usuários, o *AccessMap* amplia as possibilidades de uso do espaço urbano e natural, especialmente no âmbito do lazer, evidenciando o potencial das abordagens participativas para complementar avaliações técnicas tradicionais (AccessMap, 2025).

Em linha semelhante, a iniciativa *Wheelmap* realiza o mapeamento colaborativo da acessibilidade de estabelecimentos e espaços públicos, classificando-os como totalmente acessíveis, parcialmente acessíveis ou não acessíveis para cadeiras de rodas. A plataforma permite contribuições abertas e consultas gratuitas, constituindo uma base de dados amplamente utilizada em cidades da Europa e dos Estados Unidos. No entanto, observa-se que, no contexto brasileiro, a plataforma apresenta

baixa ou inexistente cobertura, evidenciando tanto a dependência dessas ferramentas em relação ao engajamento contínuo da sociedade civil quanto às desigualdades territoriais na produção e atualização de dados urbanos acessíveis (Wheelmap, 2010).

Apesar dos avanços representados por essas experiências internacionais, observa-se que grande parte das iniciativas baseia-se em modelos de classificação relativamente simples ou em dados autorreferidos, com limitada integração a normas técnicas específicas e pouca articulação com os instrumentos formais de fiscalização urbana. Além disso, abordagens fortemente dependentes da participação voluntária enfrentam desafios relacionados à confiabilidade, à atualização periódica das informações e à escalabilidade em contextos urbanos extensos e heterogêneos. Esses limites tornam-se particularmente relevantes em países em desenvolvimento, onde a resolução das imagens disponíveis, a frequência de atualização dos dados e a capacidade institucional de integração entre plataformas digitais e políticas públicas tendem a ser mais restritas.

No contexto brasileiro, essas limitações se aprofundam diante da ausência de ferramentas sistemáticas de auditoria digital que incorporem de forma explícita os parâmetros técnicos da legislação nacional, como a NBR 9050, e dialoguem com as práticas de fiscalização municipal. As iniciativas existentes permanecem pontuais, fragmentadas e, em geral, desvinculadas dos processos decisórios do poder público, dificultando sua incorporação como instrumentos permanentes de gestão urbana. Soma-se a esse cenário a complexidade morfológica das cidades brasileiras, frequentemente marcadas por topografias acidentadas e áreas consolidadas, que demandam análises mais refinadas do que aquelas oferecidas por soluções genéricas.

Nesse sentido, identifica-se um potencial ainda pouco explorado no uso de modelos de linguagem multimodal de grande porte, capazes de articular processamento visual, interpretação semântica e raciocínio contextual. Diferentemente das abordagens baseadas apenas em detecção ou classificação de objetos, esses modelos possibilitam a análise integrada de imagens à luz de parâmetros normativos, oferecendo novas perspectivas para a auditoria técnica da acessibilidade em calçadas. A exploração desse potencial, especialmente aplicada ao contexto brasileiro e às especificidades da NBR 9050, configura uma lacuna relevante na literatura e fundamenta a proposta desta dissertação, que busca avançar na

construção de métodos mais precisos, escaláveis e alinhados às exigências legais para a promoção da acessibilidade urbana.

2.3. Calçadas como infraestrutura urbana

O pós-guerra marca uma inflexão na relação das sociedades com o espaço urbano. O entusiasmo pela máquina redefine padrões de mobilidade, reorienta prioridades dos gestores públicos e altera os critérios que guiam as escolhas cotidianas dos cidadãos. As políticas implementadas ao longo de oito décadas favoreceram a expansão horizontal das cidades, consolidando arranjos de baixa densidade e um modelo espacial que se revela ineficiente no uso da infraestrutura urbana. Esse paradigma produziu, como observa Gehl (2013a), congestionamentos recorrentes, dispersão das atividades e uma diminuição significativa da qualidade da vida pública.

Nesse contexto, as calçadas passam a ser tratadas como espaços residuais. Recebem dimensões insuficientes, sofrem interrupções constantes e são frequentemente apropriadas por elementos que não são destinados ao pedestre, como o estacionamento de automóveis, bancas de jornal, barracas de comércio informal e dispositivos essenciais à operação urbana, como postes de iluminação e sinalização. A disputa pelo espaço urbano torna as calçadas ora um obstáculo a ser superado, ora uma infraestrutura capaz de qualificar encontros e ampliar oportunidades sociais, dependendo de como são projetadas, mantidas e fiscalizadas (Gehl, 2013a).

O levantamento aerofotogramétrico realizado em Juiz de Fora entre 26 de junho e 3 de julho de 2022 evidencia essa condição estrutural. Embora o mosaico tenha sido elaborado com alta precisão e inclua camadas detalhadas de arborização, sistema viário, lotes, edificações, altimetria e equipamentos urbanos, as calçadas surgem apenas como o espaço restante entre o viário e os lotes (JUIZ DE FORA - Dita, 2024). Essa ausência de tratamento explícito confirma a maneira como o ambiente construído tem historicamente relegado as calçadas ao estatuto de remanescente cartográfico, reproduzindo a forma como são negligenciadas no planejamento e na gestão cotidiana.

A requalificação da infraestrutura do pedestre, entretanto, tem se afirmado internacionalmente como eixo estratégico para reverter esse quadro. Cidades como Veneza, Copenhague e Melbourne demonstram que intervenções relativamente

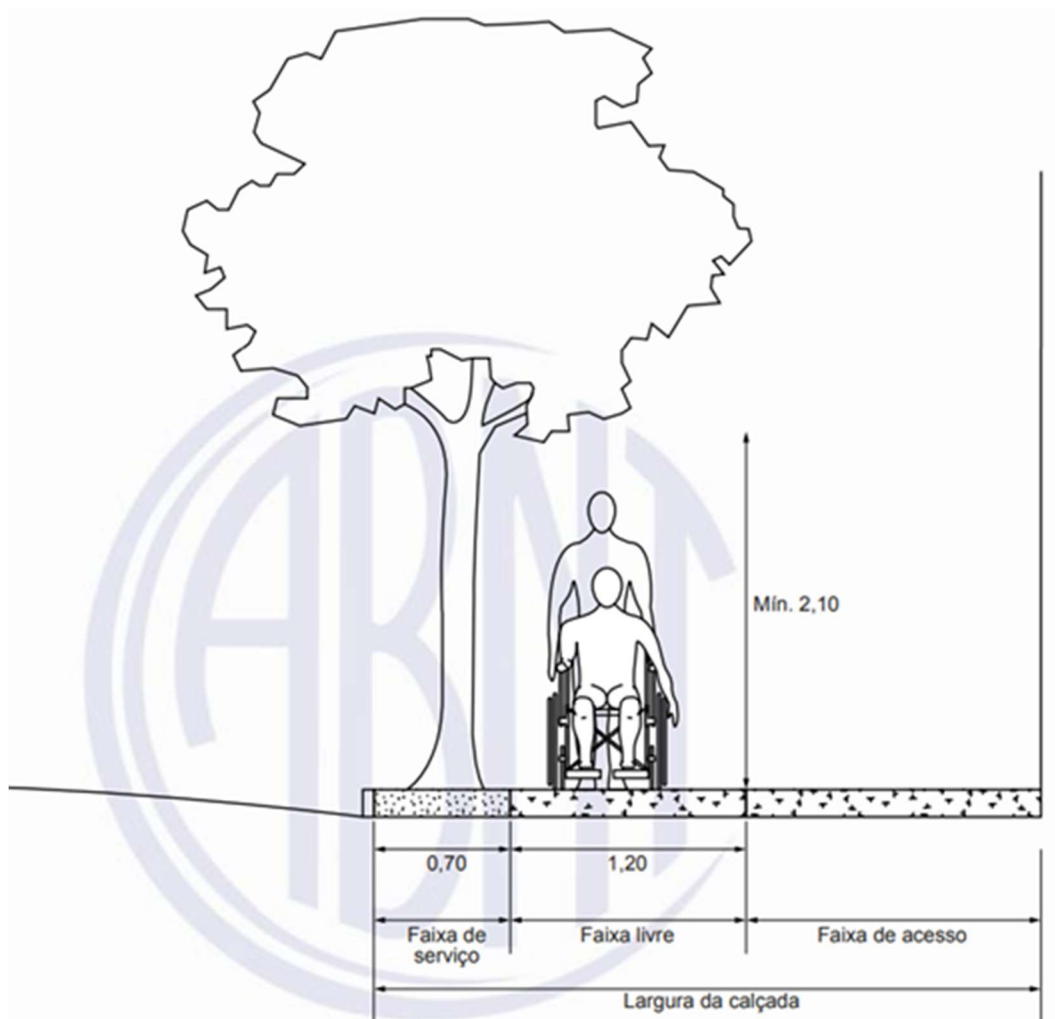
simples, como ruas exclusivas para pedestres, conversão de vagas de estacionamento em áreas de convivência, reposicionamento do mobiliário urbano, plantio de árvores e ampliação das calçadas em pontos estratégicos, produzem impactos documentados na vitalidade urbana, na saúde pública, na segurança, na valorização imobiliária e na economia local. Como conclui Gehl (2013a), a presença de pessoas no espaço público é um indicador e, ao mesmo tempo, um motor da qualidade urbana.

No caso de Juiz de Fora, a atribuição legal das calçadas permanece concentrada no proprietário lindeiro (JUIZ DE FORA, 2006) , e a fiscalização municipal, embora prevista, é limitada pelos métodos tradicionais de inspeção visual. A recomendação de que as calçadas sejam executadas conforme a NBR 9050 convive com lacunas importantes, sobretudo diante da topografia íngreme que caracteriza grande parte do território municipal. A inexistência de um manual técnico de calçadas adaptado à realidade geomorfológica local restringe a atuação do Estado e perpetua dúvidas operacionais que dificultam tanto a execução quanto a fiscalização. Em consequência, as calçadas se mantêm como um campo onde a política urbana, a técnica e o cotidiano se encontram de forma assimétrica, produzindo uma infraestrutura fragmentada e pouco acessível.

2.3.1. Funções, dimensões e elementos construtivos das calçadas

Mesmo que a segmentação dos materiais de pavimentação seja recomendada para a eficiência da manutenção, o mobiliário urbano deve ser posicionado mais próximo da via e a dimensão total da calçada deve proporcionar espaço suficiente para garantir que os postes de sinalização, postes de iluminação, lixeiras e outras infraestruturas públicas essenciais não obstruam a circulação de pedestres, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Dimensões e caracterização de calçadas conforme NBR 9050



Fonte: ABNT, 2020. p.75

A faixa livre constitui o principal espaço de circulação de pedestres no projeto da calçada, dedicada exclusivamente à circulação sem obstáculos dos pedestres. Essa zona deve manter uma largura mínima de 1,20 metro para acomodar o fluxo confortável de pedestres, incluindo indivíduos que utilizam dispositivos de mobilidade, como cadeiras de rodas ou andadores.

Para garantir a conformidade com as normas de acessibilidade, a faixa livre requer uma inclinação transversal máxima de 3% para evitar dificuldades excessivas para usuários com limitações de mobilidade, mantendo uma altura livre mínima de 2,10 metros para evitar quaisquer obstáculos suspensos que possam impedir ou colocar em risco os pedestres. Essa configuração garante que a faixa livre cumpra

seu objetivo fundamental de proporcionar uma circulação segura, acessível e eficiente para pedestres em todo o ambiente urbano.

A faixa de serviço funciona como zona intermediária entre a via e a faixa livre para pedestres, acomodando toda a infraestrutura urbana e elementos viários que sustentam a funcionalidade da cidade. Essa zona deve abrigar o mobiliário urbano, incluindo bancos e pontos de ônibus, árvores e elementos paisagísticos, como canteiros de flores, infraestrutura de serviços públicos, como postes de iluminação e sinalização, e outras comodidades urbanas. Ao concentrar esses elementos na faixa de serviço, o projeto protege a integridade do espaço livre para circulação de pedestres, garantindo que os serviços urbanos essenciais permaneçam acessíveis para manutenção e uso público. A largura mínima recomendada para a faixa de serviço é de 0,70 metros, embora essa dimensão possa ser ajustada com base nos requisitos específicos de infraestrutura e na densidade dos elementos a serem acomodados. Essa organização estratégica dos elementos urbanos cria uma hierarquia clara de uso do espaço que aumenta tanto a segurança dos pedestres quanto a funcionalidade urbana.

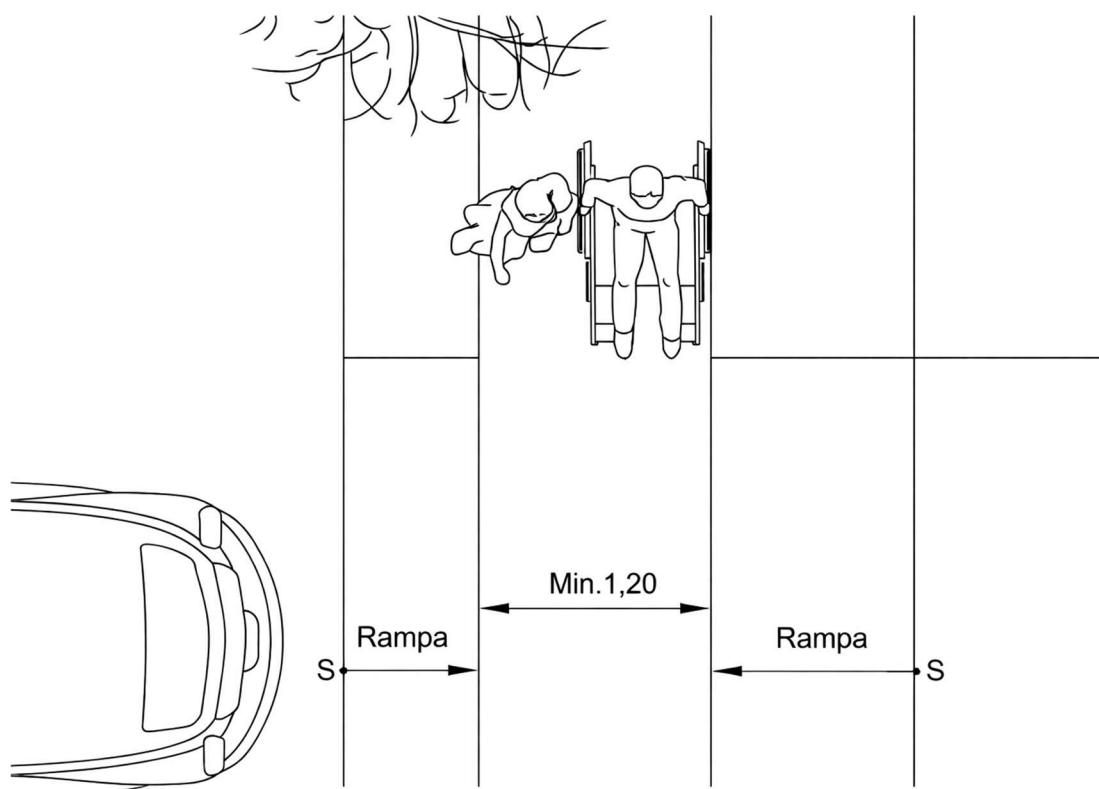
A faixa de acesso representa uma zona funcional adicional incorporada em projetos de calçadas mais largas, com largura total superior a 2,00 metros. Posicionada entre a faixa livre para pedestres e os lotes adjacentes, essa área de transição acomoda rampas de acesso que conectam a calçada pública a lotes privados ou edifícios existentes. A faixa de acesso oferece várias soluções de acesso, incluindo rampas acessíveis para cadeiras de rodas, entradas com degraus e outros elementos de transição que cumprem as normas de acessibilidade. Ao designar esta área específica para acesso à propriedade, o projeto evita a interferência com o fluxo de pedestres da faixa livre, garantindo ao mesmo tempo que as entradas dos edifícios permaneçam funcionais e em conformidade com os códigos. A faixa de acesso equilibra assim as necessidades dos pedestres com os requisitos de acessibilidade da propriedade privada.

2.3.2. Condições críticas: rampas, declives, obstáculos e materiais de superfície

As rampas de acesso de veículos aos edifícios nunca devem interromper a faixa livre, nem aumentar a inclinação transversal dessa faixa. A inclinação transversal máxima para calçadas, especialmente na faixa livre, é de 3%. A inclinação transversal

pode exceder esse limite nas faixas de acesso e serviço, conforme exemplificado na Figura 11. Embora Juiz de Fora (2003, 2007, 2012a) mencione que as calçadas devem ser construídas de acordo com a NBR 9050, faltam instruções geométricas mais detalhadas para lidar com as diversas situações presentes nas condições reais do território.

Figura 11 - Acomodação de acessos de veículos, vista superior (ABNT NBR 9050)



Fonte: ABNT 9050, 2022, p.76

A cunha designa um degrau com seção triangular que surge nas calçadas quando a acomodação da rampa de acesso de veículos não é executada inteiramente no interior do terreno, como exemplificado nas Figuras 12 e 13. Em vias com até 2,00 m de largura, é admitida a execução de rampas na faixa de serviço; em vias com largura superior a 2,00 m, a faixa de acesso também poderá ser inclinada, desde que seja garantido o mínimo de 1,20 m livres. Quanto às larguras e inclinações, na Figura 12, a calçada possui largura superior a 2,00 m, em que a faixa livre possui mais do que 1,20 m, em que uma rampa de acesso contínua poderia ser implantada adequadamente, porém as cunhas segmentadas representam obstáculos. Na Figura

13, a rampa de acesso de veículos atravessa a faixa livre com inclinação transversal de 28,55%, gerando um obstáculo.

Figuras 12 e 13 - Cunhas na faixa de acesso e na faixa livre



Fonte: Coleção da autora (2024)

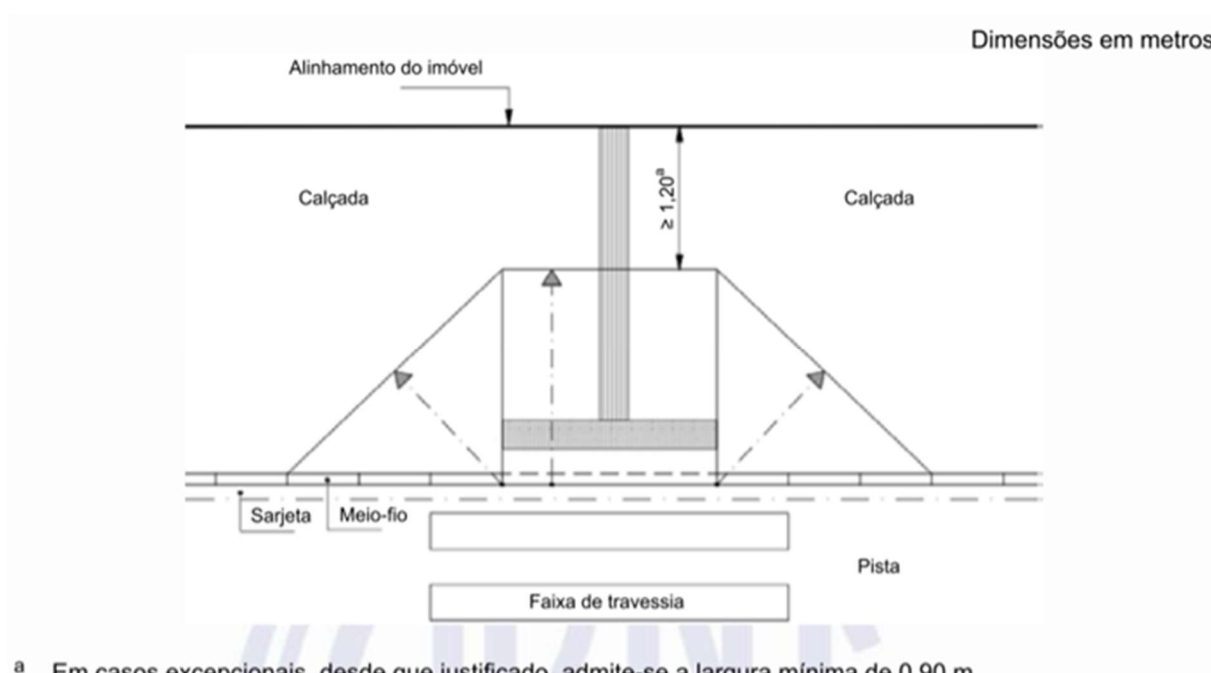
Apesar da norma nacional de acessibilidade não mencionar o tratamento do acesso de veículos em ruas com declives acentuados, manuais locais, como o de Belo Horizonte, propõem alternativas para enfrentar esse desafio. Essas soluções demonstram a necessidade de abordagens que adaptem as normas nacionais de acessibilidade às condições topográficas regionais, fornecendo orientações práticas para municípios que enfrentam restrições de terreno semelhantes.

A inclinação longitudinal da calçada da faixa livre deve ser a mesma da via alinhada a ela em toda a sua extensão. Juiz de Fora está localizada em uma região com relevo desafiador, onde a maioria das ruas ultrapassa a inclinação longitudinal de 6%, exigindo a execução de patamares. A falta de um manual para construção

Castro *et al.* (2020) identificaram a falta de rampas nas calçadas como o desafio de acessibilidade mais significativo relatado por mães de crianças com deficiência. O projeto adequado de rampas nas calçadas requer espaço mínimo entre o limite do

terreno e o início da rampa, conforme ilustrado na Figura 14. Além disso, o comprimento da rampa deve ser proporcional à altura do meio-fio para manter as proporções adequadas de inclinação. Em áreas urbanas consolidadas, onde as calçadas são excessivamente estreitas ou as diferenças de elevação são substanciais, a construção de rampas de meio-fio em conformidade com as normas NBR 9050 pode ser impraticável ou impossível. Essas restrições destacam os desafios de adaptar recursos de acessibilidade à infraestrutura urbana existente, particularmente em bairros históricos ou densamente construídos, onde as limitações espaciais entram em conflito com os requisitos de design universal.

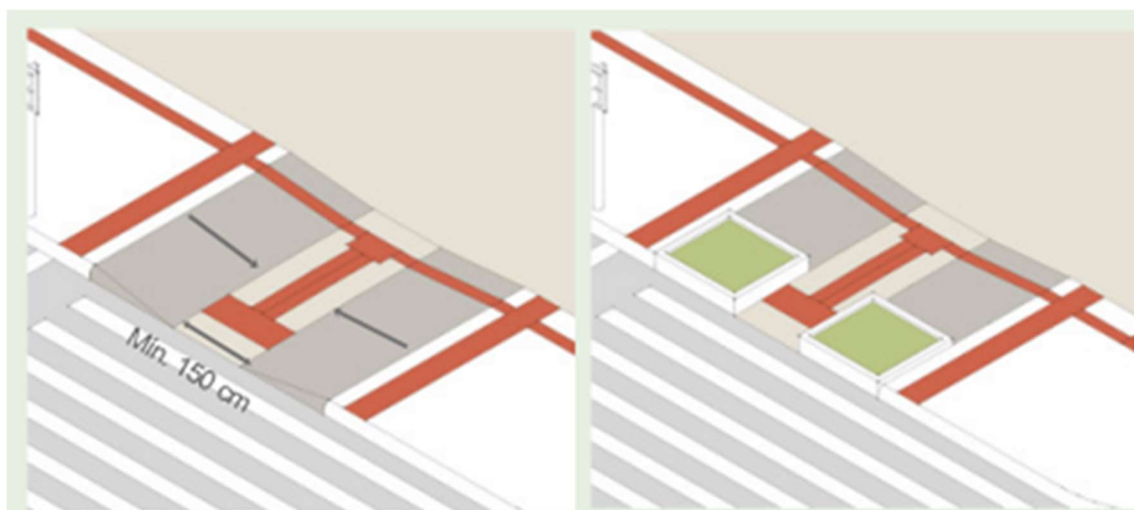
Figura 14 - Rampa de rebaixamento



Fonte: ABNT 9050, 2020, p.79

Abaixar o nível da calçada no trecho de travessias de pedestres é uma alternativa quando a largura insuficiente da calçada impede a construção de uma rampa transversal com inclinação adequada. Neste caso, é importante avaliar o impacto desta intervenção na drenagem da calçada, que pode ampliar os desafios para a acessibilidade em dias de chuva e dificultar a manutenção dela. O compromisso entre acomodar o acesso de cadeiras de rodas e gerenciar águas pluviais destaca a complexidade da implementação do design universal em ambientes urbanos restritos.

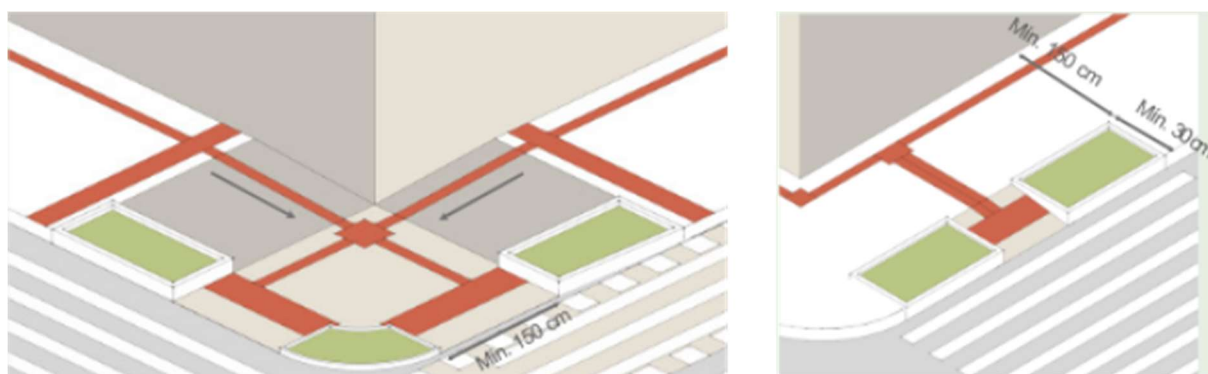
Figura 15 - Rampa de rebaixamento numa calçada estreita



Fonte: Belo Horizonte, 2020, p. 17

Além de sua contribuição estética, os canteiros de flores podem aumentar a segurança dos cruzamentos, canalizando o fluxo de pedestres e direcionando os usuários para as faixas de pedestres designadas. Embora os obstáculos na faixa livre devam ser geralmente evitados, para manter a acessibilidade, canteiros de flores posicionados estrategicamente podem servir como barreiras de proteção que desencorajam os pedestres a tentar travessias perigosas em locais inadequados, como demonstram as figuras 16 e 17.

Figuras 16 e 17 - Rebaixamento de todo o nível na esquina e uso de canteiros

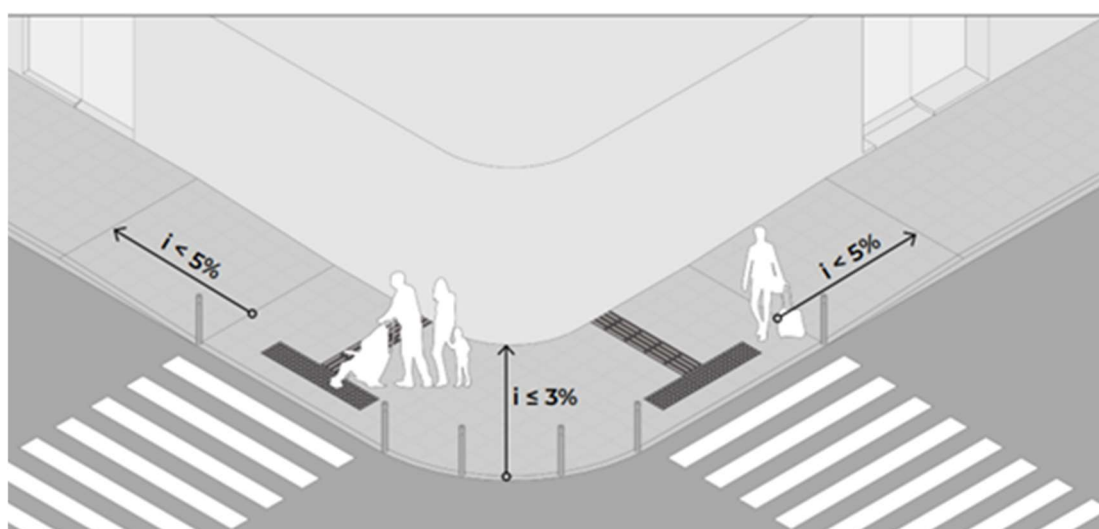


Fonte: Belo Horizonte, 2020, p. 17

A redução do nível de toda a calçada, conforme exemplificado nas Figuras 10 e 11, pode ser particularmente adequada para áreas com intenso fluxo de pedestres, ao eliminar barreiras verticais e cria um movimento mais fluido dos pedestres,

reduzindo ao mesmo tempo a poluição visual na paisagem urbana. No entanto, essa abordagem de projeto requer uma avaliação cuidadosa dos sistemas de drenagem para evitar o acúmulo de água e considerações de segurança para garantir a demarcação adequada entre os espaços para pedestres e veículos. A decisão de implementar essa solução deve equilibrar os benefícios da melhoria da circulação de pedestres com os riscos potenciais associados à redução da separação de níveis e aos desafios de gestão de águas pluviais.

Figura 18 - Uso de balizadores nas esquinas rebaixadas.



Fonte: Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Florianópolis, 2019, p. 21

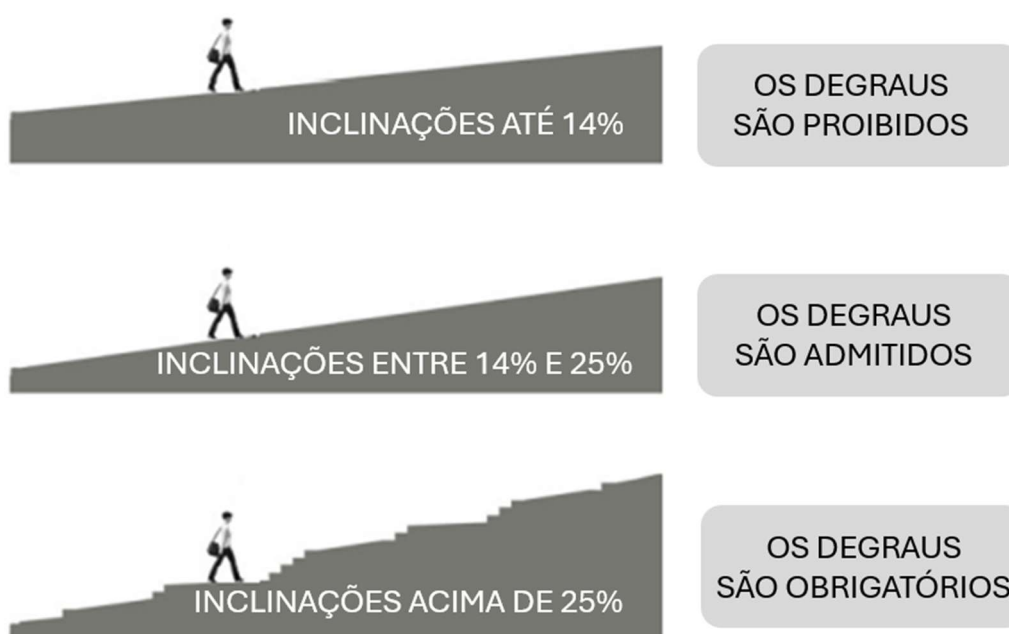
A escassez de espaço destinado à circulação de pedestres reflete a priorização histórica do tráfego veicular no planejamento urbano. Particularmente em áreas urbanas consolidadas, alcançar acessibilidade adequada pode exigir intervenções substanciais, como reconfigurar o traçado das vias e ajustar os níveis das ruas para garantir mobilidade equitativa para todos os usuários. Essas medidas transformadoras, embora potencialmente caras e complexas, representam uma mudança necessária em direção a um projeto urbano centrado nos pedestres, que reconhece a mobilidade como um direito fundamental, em vez de um privilégio dependente da capacidade física ou da posse de um veículo.

2.3.3. Impacto da topografia em cidades montanhosas

Em cidades com topografia desafiadora, como Juiz de Fora, o ambiente construído impõe desafios adicionais de acessibilidade, já que as ruas frequentemente

excedem inclinações de 8%, chegando frequentemente a 15% ou até 25%. Essas inclinações íngremes criam condições perigosas não apenas para usuários de cadeiras de rodas, mas também para pedestres em geral. Conseqüentemente, os regulamentos municipais de acessibilidade permitem introduzir degraus em inclinações superiores a 15% e os tornam obrigatórios quando as inclinações ultrapassam 25%, conforme ilustrado na Figura 19 (Belo Horizonte, 2020). Embora essas adaptações reconheçam as restrições topográficas, elas inevitavelmente criam barreiras para indivíduos com limitações de mobilidade, destacando a tensão entre os princípios de acessibilidade universal e a implementação prática em ambientes urbanos montanhosos. (BELO HORIZONTE, 2020).

Figura 19 - Tratamento de calçadas em vias com elevada inclinação



Fonte: Belo Horizonte, 2020, p.20

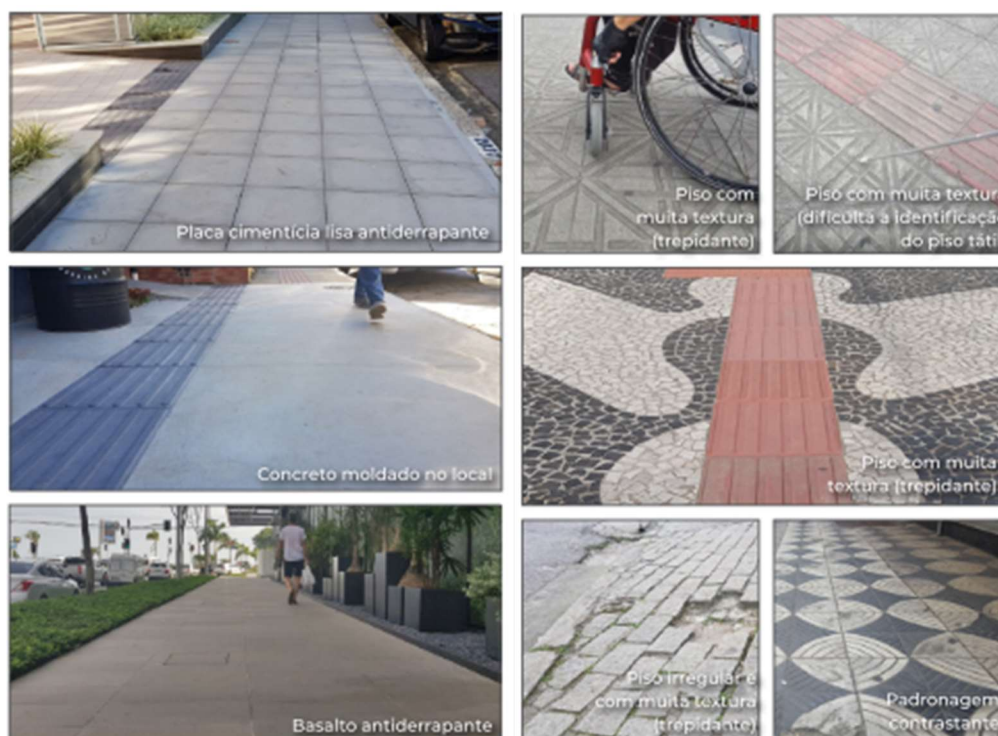
Por este motivo, uma regulamentação que não considere as peculiaridades de cada situação torna-se um desafio para a fiscalização, uma vez que aplicar a mesma regra para todas as situações pode trazer riscos ao uso e desafios executivos. A falta de um manual que possa ser facilmente consultado faz com que soluções irregulares se tornem a regra e cria insegurança para os fiscais.

2.3.4. Revestimentos

Quanto aos materiais a serem utilizados na pavimentação das circulações, a norma estabelece que a sua superfície deve ser “firme, estável e não trepidante para dispositivos com rodas e antiderrapantes, sob qualquer condição” (NBR 9050, 2020, p. 53). Também chama a atenção quanto ao contraste dos materiais e padrões que sugerem tridimensionalidade.

Apesar da norma não trazer exemplos específicos de materiais considerados trepidantes, alguns manuais locais trazem exemplos como o de Florianópolis, “Calçada Certa”, que propõe uma lista com os materiais aceitos, que seriam a placa cimentícia lisa, o concreto armado no local, piso drenante e blocos intertravados com a quina viva. O manual também estabelece que revestimentos com muita textura deverão ser evitados, como alguns tipos de placas cimentícias, assim como piso cerâmico liso por ser escorregadio, paralelepípedos e estampas contrastantes. Neste manual, a pedra portuguesa deverá ser evitada para a pavimentação de novas calçadas por ser considerada trepidante.

Figura 20: Revestimentos recomendados para calçadas



Fonte: Zandomeneco, 2019, p. 41.

O uso de pedra portuguesa para a pavimentação de passeios representa uma prática tradicional muito utilizada no século XX, no Brasil, com composições emblemáticas como o mosaico do Calçadão de Copacabana, que tornou-se um patrimônio em 1991 pelo Estado do Rio de Janeiro. O material apresenta grande flexibilidade de montagem, sendo composto por um mosaico de pedras irregulares com padrões decorativos.

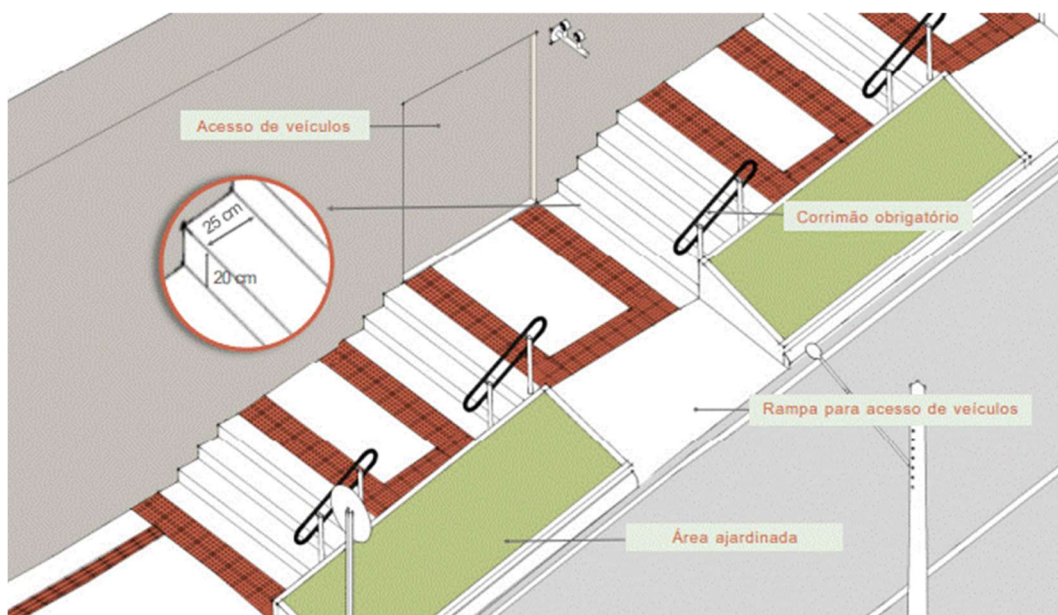
Em algumas cidades, como São Paulo e Lisboa, observou-se a demanda de moradores solicitando a substituição deste material por conta da sua baixa aderência e irregularidade, que podem causar sensação de insegurança quando molhado e desconforto aos usuários de cadeiras de rodas (Prefeitura de São Paulo, 2025).

2.3.5. Padrões urbanos e melhores práticas para requalificação de calçadas

Enquanto as normas apresentam parâmetros gerais, cartilhas e manuais locais se adaptam e se aproximam de características específicas locais. Analisamos como essas diferenças são expressas nos manuais de Florianópolis e Belo Horizonte.

O manual da capital mineira reconhece que “Belo Horizonte é uma cidade com relevo acidentado, impondo desafios para a circulação de pedestres” e divide as regras para a inclinação das calçadas em inclinações longitudinais e transversais. Para as últimas, é permitida uma inclinação entre 1% e 3% em direção ao meio-fio. A inclinação longitudinal deve sempre seguir a inclinação da rua. Quando a inclinação da rua é inferior a 14%, é proibido criar degraus na calçada; para inclinações entre 14% e 25%, é permitida a existência de degraus na calçada; e acima de 25%, é obrigatório criar escadas e corrimãos na calçada, de modo que “os degraus devem ser regulares e recuados em relação à via nas calçadas com largura superior a 2,00 m” (Prefeitura de Belo Horizonte, 2018, p. 19). A altura máxima desses degraus deve ser de 20 cm e o piso mínimo estabelecido pelo livreto é de 25 cm (Belo Horizonte, 2020). A Figura 21 descreve parâmetros geométricos específicos para as escadas em calçadas com inclinações superiores a 25%, que prevê patamares para os acessos de veículos e como os pisos táteis irão ser instalados nesta escada,

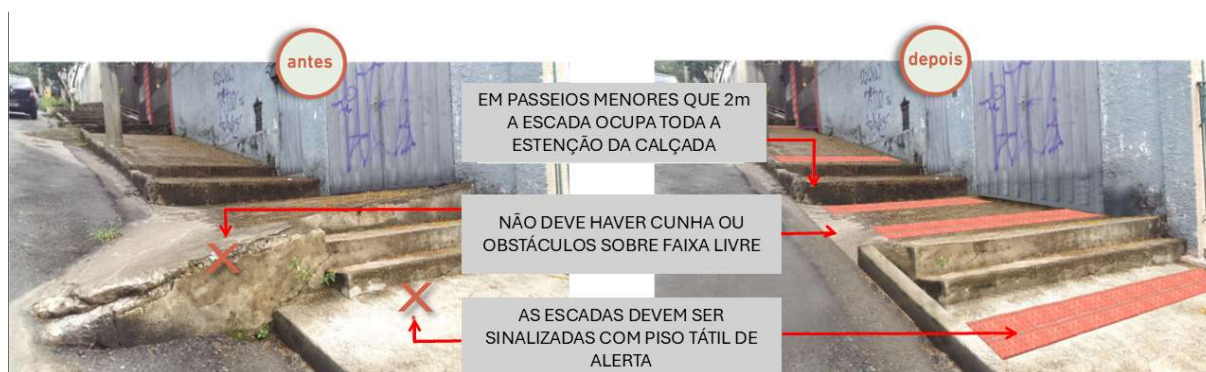
Figura 21 - Escadas em calçadas com inclinações superiores a 25%



Fonte: Belo Horizonte, 2020, p.20

Além de apresentar detalhes executivos com exemplos de aplicações em diversas situações, o manual apresenta exemplos de aplicações desses princípios em calçadas existentes, conforme a Figura 22. São executadas montagens gráficas de intervenções que poderiam requalificar tais calçadas conforme os parâmetros definidos, trazendo maior segurança para a população diante de características de terrenos mais desafiadores e maior clareza para fiscalizadores e vistoriadores.

Figura 22 - Sugestões para requalificações em situações reais.



Fonte: Belo Horizonte, 2020, p.23

O manual de Florianópolis menciona que o plano diretor da cidade estabelece uma largura mínima de calçadas de 3 m (Florianópolis, 2014), que também define as

larguras para cada tipo de via, com um mínimo de 3 m para vias locais, 4 m para vias coletoras e subcoletoras e 5 m para vias arteriais. A previsão de calçadas mais largas para novos loteamentos em relação ao mínimo exigido na ABNT NBR 9050 (2020) proporciona maior disponibilidade de espaço para inserir mobiliários urbanos, canteiros e acomodação das rampas de rebaixamento. Também se destaca o detalhamento dos pisos táteis conforme a norma ABNT NBR 16537 (2016), que traz novas definições quanto ao tamanho, relevo e cor dos pisos que não serão objeto deste estudo. Na Figura 23, é possível observar a inserção de vegetação rasteira, mobiliário associado a árvores, que trazem conforto ambiental para os transeuntes. O manual também aborda o uso de vegetação rasteira e canteiros como guia direcional para a orientação de pessoas com deficiência visual.

Figura 23 - Calçadas mais largas e a possibilidade de inserção de mobiliários urbanos



Fonte: Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Florianópolis, 2019, capa

O espaço público constitui o palco onde a vida urbana se realiza e, nesse sentido, parques, praças, passagens, caminhos e calçadas devem ser concebidos para acolher integralmente as múltiplas demandas que emergem das atividades

cotidianas da cidade (Gehl, 2013a). A requalificação das calçadas, portanto, exige uma abordagem sistêmica que considere não apenas o pavimento, mas também a drenagem, a iluminação pública, a arborização e a disposição do mobiliário urbano de maneira integrada, evitando conflitos espaciais e operacionais. Planos de arborização devem prever o espaço necessário para o desenvolvimento radicular e para os canteiros, bem como o impacto das copas sobre as redes de infraestrutura, assim como a inserção de mobiliário deve respeitar as áreas destinadas à circulação. Além disso, a participação social, especialmente a inclusão de pessoas com deficiência nos processos de diagnóstico, elaboração de manuais e formulação de legislações, é condição fundamental para a efetividade das intervenções.

Considerando as limitações técnicas, espaciais, políticas e financeiras que inviabilizam intervenções simultâneas em todo o território urbano, torna-se imprescindível estabelecer critérios de priorização baseados em diagnósticos consistentes. Nesse contexto, observa-se que os instrumentos atualmente disponíveis dependem majoritariamente de levantamentos manuais, pontuais e de difícil atualização, evidenciando a necessidade de ferramentas capazes de sistematizar a identificação de trechos críticos e subsidiar a tomada de decisão por parte dos municípios a partir de dados objetivos.

2.3.6. Políticas municipais e desafios de implementação

A efetividade da legislação de acessibilidade, notadamente a NBR 9050, está diretamente ligada ao modelo de gestão e fiscalização adotado pelos municípios. A calçada, enquanto infraestrutura urbana essencial para a circulação e inclusão social, exige um arcabouço regulatório e operacional que garanta sua conformidade com os princípios do Desenho Universal, não apenas em termos normativos, mas também na prática cotidiana de implementação (Bezerra, 2012).

O modelo brasileiro predominante de gestão de calçadas se caracteriza pela atribuição da responsabilidade de construção, conservação e manutenção aos proprietários dos lotes lindeiros. Esse arranjo, frequentemente denominado de fiscalização pública com responsabilidade privada, apresenta vantagens teóricas, como a redução de custos diretos para o poder público, mas revela desafios práticos significativos quando observado em escala urbana, sobretudo no que diz respeito à padronização, continuidade e fiscalização (Bezerra, 2012).

Em contraste, modelos alternativos observados internacionalmente ou em experiências pontuais no Brasil propõem uma maior intervenção do poder público. Em Medellín, por exemplo, o sistema de transporte público é tomado como um motor de transformação, atua de maneira integrada com o programa urbano de acessibilidade e a execução dos projetos urbanos integrais (CAF, 2014). Essas intervenções, implementadas desde 2004 prioritariamente em áreas mais vulneráveis, articulam melhorias viárias à implantação de equipamentos públicos, como praças, bibliotecas e terminais de ônibus, estimulando a mobilidade de pedestres por meio de uma coordenação interinstitucional e de uma gestão social consideradas centrais para o sucesso do modelo.

Para haver uma gestão pública integral, é necessário que o município assuma a responsabilidade total pela construção e pela manutenção, garantindo a padronização e a qualidade. Esse modelo, entretanto, implica elevados custos iniciais e recorrentes para o tesouro municipal, o que frequentemente limita sua adoção. Modelos mistos buscam um equilíbrio, onde o município define um padrão rigoroso e, em alguns casos, executa a obra, transferindo a responsabilidade da manutenção rotineira ao proprietário, ou vice-versa (Ling, 2026).

A transição de um modelo de responsabilidade privada para um ambiente urbano plenamente acessível esbarra em desafios de naturezas diversas, a começar por desafios de natureza política e econômica. O processo regulatório é constantemente pressionado por interesses do setor da construção civil, que frequentemente demandam flexibilizações, prazos reduzidos ou dispensas, sob o argumento de que custos regulatórios excessivos podem comprometer o desenvolvimento econômico. Essa tensão entre o fortalecimento dos direitos e as pressões do desenvolvimento mantém a perpetuação da exclusão de Pessoas com Deficiência (PcD) e pessoas com mobilidade reduzida, tornando a legislação uma "letra morta" sem fiscalização efetiva (Ling, 2026).

Há também desafios na coordenação intersetorial dos esforços dos diferentes setores, pois a calçada é uma interface complexa que exige a colaboração de múltiplos órgãos municipais, cada um com lógicas e prioridades próprias. A falta de integração entre setores públicos, licenciamento urbano, mobilidade, meio ambiente e patrimônio histórico gera conflitos e ineficiências. A acessibilidade, por ser transversal, demanda uma governança que transcenda as fronteiras departamentais.

Adicionalmente, a aplicação da NBR 9050 enfrenta dificuldades técnicas no ambiente construído, especialmente quando aplicada a reformas em áreas consolidadas. Nesses contextos, a adequação das calçadas pode esbarrar em limitações espaciais, interferências de infraestrutura subterrânea e custos elevados de adaptação (Ling, 2026). Em regiões com topografia mais acidentada, a gestão de inclinações longitudinais e transversais é complexa. Portanto, foi observada a existência de uma lacuna normativa, embora a NBR 9050 estabeleça os princípios e parâmetros de acessibilidade, carece de instruções geométricas mais detalhadas para lidar com a diversidade de situações reais. Essa lacuna transfere ao corpo técnico municipal a responsabilidade de interpretar e complementar a norma, reforçando a necessidade de elaboração de manuais locais mais específicos e operacionais.

2.3.7. O papel da Inteligência Artificial no apoio à inspeção pública

Conforme mencionado anteriormente, a aplicação de Modelos de Linguagem Multimodal de Grande Porte (LMMs), como o GPT-4o na auditoria urbana, representa um grande avanço em comparação com a verificação tradicional realizada manualmente, impõe grandes limitações, gerando uma cobertura territorial restrita, subjetividade inerente às avaliações humanas, custos elevados para a ampliação das equipes (Zhang *et al*, 2023).

Desta forma, foi identificado que o uso de visão computacional na inspeção e fiscalização de calçadas oferece vantagens estratégicas para a ampliação da cobertura, padronização dos critérios de verificação de acordo com a norma, que passaria a ser aplicada de maneira consistente e isonômica.

E, alinhada às práticas atuais em diversas áreas, há a possibilidade de priorizar as intervenções e ações baseadas em dados georreferenciados, que também podem ser mais facilmente atualizados conforme a cidade vai se transformando.

As LLMs multimodais também se mostraram mais eficientes do que as redes neurais convolucionais tradicionais, uma vez que estas são frequentemente focadas na detecção de objetos isolados, enquanto as LLMs multimodais apresentam uma compreensão contextual superior e maior flexibilidade para inclusão de novos parâmetros sem que seja necessário refazer um treinamento exaustivo, desta forma apresentando maior compreensão das cenas urbanas (Vaswani *et al.*, 2017; Hariri, 2023).

A implementação deste sistema exige requisitos técnicos como a disponibilidade de uma infraestrutura de tecnologia da informação com bancos de imagens, capacitação dos profissionais e regulamentação de seu uso. Também é necessário direcionar esforços para mitigar alguns riscos críticos, uma vez que modelos podem adquirir vieses de treinamento e reproduzir desigualdades espaciais ou tendências nos *prompts*. Também há limitações na precisão para medições milimétricas; desta forma, não substituindo a perícia técnica em casos limítrofes. Além destes, há a necessidade de se garantir a anonimização de rostos e placas de veículos em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais. Para que esta tecnologia possa ser adotada efetivamente, propõe-se um fluxo de trabalho estruturado em quatro fases principais (Tabela 6):

Tabela 6: Sugestão de fluxo de trabalho estruturado da aplicação de LLMs

Fase	Descrição	Papel da IA / Humano
1. Triagem Automatizada	Análise de imagens de street-level ou coletas sistemáticas.	IA: Classifica em conforme, não conforme ou requer análise detalhada.
2. Priorização	Ranqueamento das não conformidades por gravidade e evidência.	Algoritmo: Cruza dados de barreiras com fluxo de pessoas e equipamentos públicos.
3. Verificação Humana	Foco dos fiscais nos casos priorizados para análise técnica aprofundada.	Humano: Decisão final sobre notificações e validação técnica.
4. Monitoramento	Verificação pós-notificação para confirmar a execução de correções.	IA: Alimenta banco de dados de compliance com análise antes/depois.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A ferramenta visa tornar as análises mais eficientes, porém o risco de reprodução de vieses e preconceitos através dos algoritmos e prompts faz com que a avaliação humana não possa ser nunca substituída. Desta forma, esta pesquisa visa demonstrar a viabilidade técnica do uso de IA multimodal para a inspeção de calçadas, propondo um modelo de integração que potencialize a eficiência da gestão pública.

2.4. Estudos comparativos sobre mecanismos de gestão de calçadas

Apesar do Estatuto da Cidade brasileiro (Brasil, 2001) e da lei de parcelamento de solos (Brasil, 1979) considerarem que as vias, que englobam as calçadas e ruas, praças e espaços livres, são parte do patrimônio da união, que promover programas de construção e melhorias dessa infraestrutura também é parte de suas atribuições,

mas é frequentemente transferida para o proprietário, conforme mencionado anteriormente, verifica-se que em outros países há exemplos de modelos de gestão alternativos.

Em cidades com ordenamento viário em grelha e topografia plana, como Nova York e Washington DC, os manuais e padrões conseguem atender à maior parte das condições encontradas *in loco*. Além da disponibilização de cartilhas e manuais à população, é importante garantir a sustentabilidade financeira. Há cidades que contam com uma gestão compartilhada.

Nessas cidades, a responsabilidade pela manutenção e instalação é compartilhada de maneiras diferentes: enquanto em Nova York o proprietário é responsável pela construção e reparos, há também uma intensa fiscalização. Uma vez licenciado a construir a calçada, ele tem até 70 dias para executá-la, então pode ser notificado novamente e o departamento de transportes (DOT) deverá realizar o serviço através da empresa pública ou contratar um construtor licenciado para o serviço, e o valor da execução é cobrado ao proprietário. Reparos causados por raízes de árvores podem ser solicitados ao município sem custo ao proprietário (New York, 2026).

Em Washington, DC, o custo do reparo e da manutenção de danos causados por raízes de árvores é inteiramente coberto pelo Estado, assim como a construção de rampas de rebaixamento. Reparos ou requalificações julgados necessários por favorecerem a segurança, conforto ou saúde pública pela gestão municipal serão financiados em 50% pelo poder público e o restante é cobrado ao proprietário. São realizados uma avaliação e um orçamento das obras, publicados periodicamente, permitindo que o proprietário conteste o valor, os materiais utilizados ou a necessidade da obra (Washington, 2025).

Em Los Angeles, há um histórico de negligências por décadas com os passeios públicos, que causou uma ação coletiva em defesa dos direitos das pessoas com deficiência, que, em 2016, resultou em um acordo judicial que demanda que a cidade gasta US\$ 1,37 bilhões ao longo de 30 anos com reparos nas calçadas. Ainda assim, em 2021, o Controlador municipal (Galperin, 2021), responsável pela supervisão financeira dos departamentos, realizou uma auditoria que identificou mais de 1700 reclamações e 1020 processos contra o Estado em decorrência de lesões causadas por quedas nas calçadas, as quais custaram aos cofres públicos valor superior a US\$ 35 milhões em acordos judiciais. Em seu relatório, ele verifica que foi criado um

programa de reparos nas calçadas, mas que, dada a escala do problema, seria necessário revisar o orçamento destinado a estas demandas, uma vez que foram realizadas obras de reparos em mais de 2100 lugares, enquanto as solicitações de obras de acesso representam 3800 demandas e 4400 aplicações de retorno após a execução da obra.

Para solucionar essa discrepância, é recomendada uma série de ajustes à política pública, como intensificação da fiscalização, realização de um diagnóstico que identifique áreas de maior prioridade para a realização dos reparos e expansão do programa para reparos de curto prazo. Adicionalmente, há a política de “*Fix and Release*” ou consertar e liberar, adotada por muitas cidades no estado da Califórnia, que consiste no município realizar a obra completa uma vez, emitir um certificado para o proprietário do imóvel, com uma garantia do serviço de 2 anos. Expirado este prazo, o proprietário passa a ser responsável pela manutenção (Galperin, 2021).

Em 1962, quando foi realizado um projeto piloto em Copenhague de pedestrianização da rua principal da cidade Strøget, marca o início de uma política pública que se tornou referência mundial por apresentar resultados expressivos na vitalidade urbana, aumento de 35% do volume de pedestres no primeiro ano após a requalificação, mantido em 20% em média nos anos seguintes e trouxeram efeitos para a qualidade de vida dos moradores, além de ampliar a receita dos comércios locais. Tal iniciativa inaugura uma série de requalificações subsequentes focadas na pedestrianização de vias do centro histórico da cidade, financiadas integralmente pelo poder público (Global Designing Cities Initiative, 2026).

Medellín passou por um processo de desenvolvimento ambicioso que se iniciou em 1999 com a implementação de instrumentos previstos em seu Plano de Ordenamento Territorial, que contou com uma atuação em três principais eixos: intervenção física, coordenação interinstitucional e gestão social (CAF, 2014). A implementação de projetos urbanos integrais (PUI), como o PUI Comuna 13, parte de um diagnóstico cuidadoso junto à comunidade, treinamento de lideranças para monitoramento e avaliação contínuos do projeto, somado a estes, a coordenação dos diversos atores locais visa garantir a sustentabilidade dos projetos de intervenção física que visam incentivar a mobilidade ativa através da requalificação das vias, parques e equipamentos públicos.

Em São Paulo, as calçadas são responsabilidade dos proprietários lindeiros, porém, o município se comprometeu a executar e requalificar os passeios de imóveis

públicos, vias estruturais e focos geradores de tráfego, próximos a terminais de ônibus, escolas e hospitais. O município destinou um investimento de 140 milhões para a requalificação de calçadas, sua ampliação e ampliação da iluminação pública no período entre 2019 e 2020. Através do portal GeoSampa os cidadãos podem verificar as calçadas que receberam reparos na cidade as quais somam uma extensão de 1,6 milhão de m² viabilizados pelo Programa Emergencial de Calçadas (PEC) 2019 (Prefeitura de São Paulo, 2025), (Prefeitura de São Paulo, 2021).

Em Porto Alegre, há uma iniciativa de conscientização sobre os parâmetros e responsabilidades dos proprietários sobre as calçadas. O projeto Minha Calçada: Eu Cuido é executado progressivamente, atuando em até 2 bairros por mês, verificando-se as calçadas desse bairro, notificando-se os proprietários que têm até 60 dias para executar as obras. Caso verificado que os reparos não foram realizados, a prefeitura executa a construção, sendo cobrado ao proprietário o valor das despesas da obra com acréscimo de 30% de multa ao valor cobrado do IPTU do próximo mês (Prefeitura de Porto Alegre, 2013).

3 METODOLOGIA

Nesta pesquisa foi realizado um estudo empírico-experimental, com validação comparativa entre um levantamento conduzido *in loco*, utilizando métodos e ferramentas tradicionais, e um levantamento baseado em visão computacional, por meio do processamento por LLM, com o objetivo de verificar a precisão do GPT-4o na identificação e verificação dos parâmetros de acessibilidade aplicáveis às calçadas, conforme a NBR 9050.

Foi realizada a comparação sistemática entre as análises das respostas do modelo e as medições e observações realizadas em campo, em 46 pontos selecionados para representar as diferentes características analisadas.

A verificação dos parâmetros de acessibilidade no contexto municipal é realizada predominantemente por inspeção visual, método que apresenta limitações para a aferição de aspectos que demandam maior precisão, como larguras e inclinações. Considerando a observação direta como ferramenta central nos estudos urbanos (Gehl e Birgitte Svarre, 2013b), este estudo combinou medições e observação *in loco* com a análise de imagens assistida por inteligência artificial, explorando o potencial da visão computacional para complementar os métodos tradicionais. Com base na NBR 9050, foram avaliados parâmetros relacionados à largura, inclinações longitudinal e transversal, presença e posicionamento de obstáculos, interferências na faixa livre e condições da superfície, permitindo a validação comparativa da precisão das análises realizadas pelo modelo GPT-4o em relação às condições reais observadas, conforme sintetizado na Tabela 1.

A metodologia estrutura-se a partir do desenho experimental e da definição do universo amostral, seguida pelas etapas de coleta de dados e imagens, processamento computacional por meio do GPT-4o e validação comparativa dos resultados. Os subtópicos seguintes detalham cada etapa, os critérios de análise adotados e as considerações éticas e legais envolvidas.

3.1.1. Tipo de pesquisa e abordagem

A presente investigação enquadrou-se, quanto aos seus objetivos, como uma pesquisa de natureza exploratória-descritiva, conforme a classificação proposta por Gil (2017). O caráter exploratório justifica-se pela lacuna de conhecimento relacionada à aplicação de Modelos de Linguagem de Grande Porte (LLMs) multimodais, como o

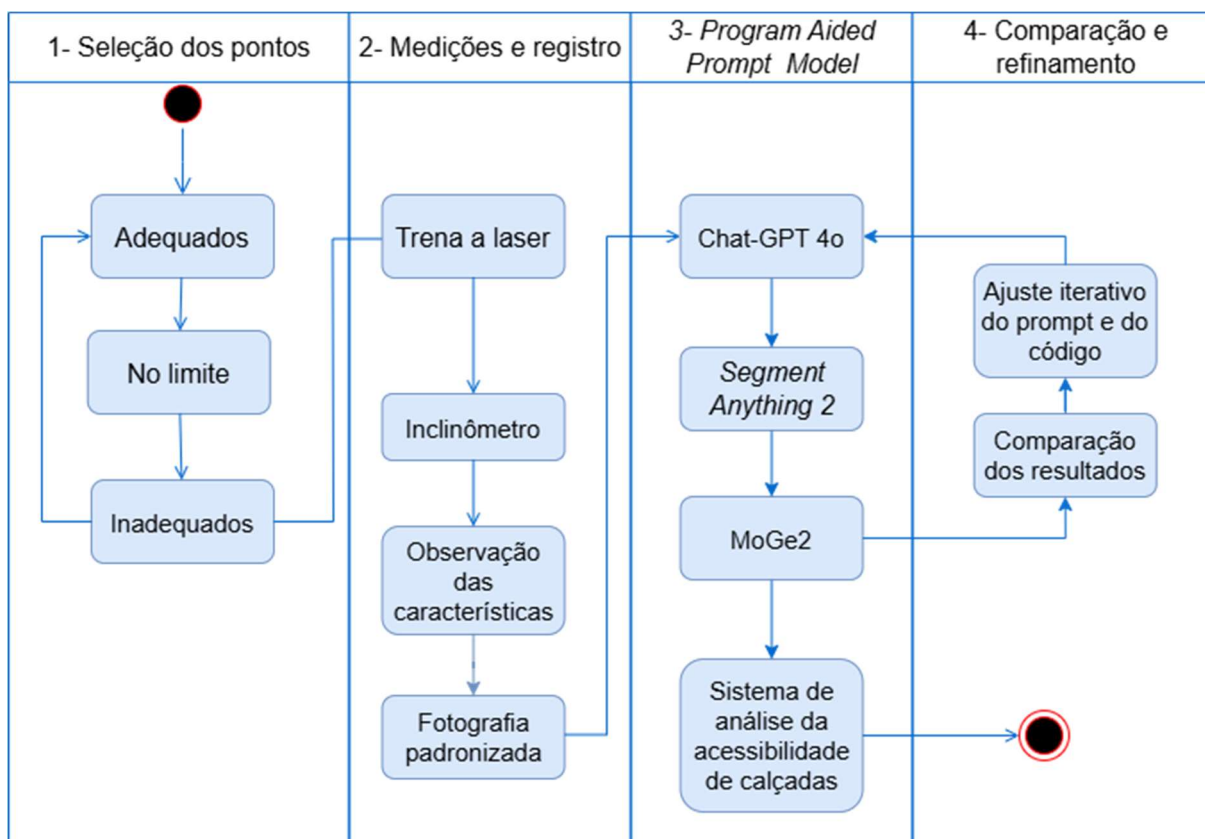
GPT-4o, na verificação de conformidade de calçadas aos parâmetros estabelecidos pela NBR 9050. Tratou-se, portanto, de um teste de aplicação tecnológica ainda pouco explorado da auditoria urbana. Simultaneamente, a pesquisa assumiu um viés descritivo ao se dedicar à caracterização do desempenho do modelo, por meio da mensuração e do relato de indicadores como acurácia, precisão e *recall*, em relação aos diferentes parâmetros normativos analisados.

Quanto à abordagem, o estudo adotou uma perspectiva quali-quantitativa. A dimensão quantitativa foi central para a avaliação da eficácia do modelo, com o emprego de métricas de acurácia e análises comparativas entre os resultados do processamento computacional e as medições de campo. Complementarmente, a dimensão qualitativa mostrou-se fundamental para a análise das limitações e dos erros do modelo, bem como para a interpretação dos resultados e de suas implicações teóricas e práticas. A análise qualitativa das falhas cognitivas e espaciais do LLM no contexto da visão computacional fornece subsídios para o refinamento da engenharia de *prompt* e para a compreensão das barreiras à escalabilidade da fiscalização urbana.

3.1.2. Estrutura do experimento

A investigação foi realizada em 4 etapas; primeiramente, foi realizada a seleção dos pontos que visou identificar *in loco* exemplos representativos de situações adequadas, próximas ao limite estabelecido pela norma e inadequadas. A Figura 24 descreve esse processo.

Figura 24 - Etapas do experimento



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Foram realizadas medições físicas *in loco* com o uso de trena a laser, inclinômetro digital e observação visual documentada, além da captura fotográfica padronizada. Para a captura fotográfica de cada ponto, as imagens foram obtidas com o uso das guias de composição da câmera, que exibem linhas de grade e indicação de nível na tela. Esse procedimento garantiu o posicionamento perpendicular da câmera em relação ao eixo da calçada. Na segunda fase, estas imagens foram categorizadas com base nos dados coletados e, em seguida, submetidas ao GPT-4o para análise, com registro sistemático das respostas geradas. Na terceira fase, essas respostas foram comparadas às medições e observações *in loco*. Por fim, foi conduzido um processo de refinamento iterativo do *prompt*, no qual as respostas foram avaliadas e o *prompt* ajustado sucessivamente.

3.1.3. Universo amostral

Foram selecionados 42 pontos com características representativas dos parâmetros de acessibilidade definidos pela NBR 9050 para calçadas e,

posteriormente, foram adicionados outros 4, totalizando 46 imagens. Juiz de Fora caracteriza-se como uma cidade de médio porte, com topografia acidentada e um amplo e heterogêneo universo de calçadas. Por tratar-se de uma investigação de natureza experimental, o estudo teve como objetivo testar a metodologia proposta, visando sua aplicação posterior em escala ampliada no município e em outros contextos urbanos. Nesse sentido, o tamanho amostral mostrou-se suficiente para a verificação dos parâmetros analisados, ainda que não constitua uma amostra probabilística passível de generalização estatística para todas as regiões da cidade.

A Tabela 7 apresenta a proporção da população de pessoas com deficiência e com transtorno de autismo em relação à população total de cada região do município, evidenciando áreas com maior concentração desses grupos, como os bairros Benfica, Progresso e Santa Luzia, que concentram conjuntamente 10,96% da população PCD e TEA do município. A tabela também define um índice de contribuição relativa, indicando as regiões com maior proporção, o que destaca que as requalificações não podem se restringir às áreas centrais, pois esta população encontra-se distribuída por todo o território do município.

Tabela 7 - Proporção por bairros da população de pessoas com deficiência e transtorno de autismo em relação à população total dos bairros

Num	Rp	Up	Total Est.	Pcd/Ptea	% Total X Pcd/Ptea	% Relativa De Num Pcd/Ptea X Total Est Do Município	Índice de Contribuição da % Relativa de Num Pcd/Ptea X Total Est do município Normalizado (0.00 A 10.00)
N1	Norte	Benfica	52699	1766	3,351	0,30283	10
L2	Leste	Progresso	33745	1224	3,627	0,20989	6,931
S2	Sul	Santa Luzia	30494	1215	3,984	0,20834	6,88
Co2	Centroeste	Francisco Bernardino	20125	1028	5,108	0,17628	5,821
O1	Oeste	São Pedro	39514	1011	2,559	0,17336	5,725
L1	Leste	Vitorino Braga	32060	963	3,004	0,16513	5,453
Se1	Sudeste	Lourdes	22930	951	4,147	0,16307	5,385
Ne2	Nordeste	Gramma	16312	900	5,517	0,15433	5,096
C3	Centro	São Mateus	53412	849	1,59	0,14558	4,807
Co4	Centroeste	Cerâmica	25836	770	2,98	0,13204	4,36
Ne1	Nordeste	Santa Terezinha	29766	683	2,295	0,11712	3,867
C2	Centro	Centro	43686	665	1,522	0,11403	3,766
L3	Leste	Linhares	8860	610	6,885	0,1046	3,454
Se2	Sudeste	Vila Ideal	23212	591	2,546	0,10134	3,347
C1	Centro	Mariano Procópio	31350	576	1,837	0,09877	3,262
S3	Sul	Teixeiras	22961	520	2,265	0,08917	2,945
Co3	Centroeste	Morro Do Sabão	14393	462	3,21	0,07922	2,616
Se3	Sudeste	Retiro	11019	374	3,394	0,06413	2,118
Ne3	Nordeste	Figueiras	4247	325	7,652	0,05573	1,84
O2	Oeste	Aeroporto	14113	250	1,771	0,04287	1,416
Co1	Centroeste	Remonta	1100	177	16,091	0,03035	1,002
N2	Norte	Igrejinha	8311	176	2,118	0,03018	0,997

N4	Norte	Barreira Do Triunfo	1258	157	12,48	0,02692	0,889
N3	Norte	Dias Tavares	935	69	7,38	0,01183	0,391
S1	Sul	Graminha	8850	49	0,554	0,0084	0,277

Fonte: Juiz de Fora, 2024

Como mencionado, algumas ruas da cidade receberam obras de requalificação em períodos anteriores; nessas regiões, é possível identificar calçadas que apresentam a maioria das características adequadas, permitindo avaliar determinados parâmetros isoladamente. Para esses exemplos, foram selecionados pontos na região central, os quais se encontram demarcados na Figura 25, apresentada abaixo:

Figura 25 - Pontos coletados na região central



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os pontos destacados no bairro central concentram-se nas ruas Fonseca Hermes, Santo Antônio, Doutor João Pinheiro e São Sebastião. Trata-se de uma área de topografia majoritariamente plana, com fluxo intenso de pedestres e grande proximidade a equipamentos de serviços e comércio da cidade. Nessas vias, a maior

parte dos parâmetros exigidos pela norma é atendida, possibilitando o teste de parâmetros específicos de acessibilidade de maneira isolada.

Além desses, foram selecionados pontos no bairro Santa Luzia destacados em vermelho na Figura 26, que figura entre as áreas com maior população de pessoas com deficiência no município, conforme observado na Tabela 6. Por apresentar maior proximidade à área central, o bairro reúne calçadas em condições variadas, como evidenciado nas imagens e levantamentos do ambiente construído que podem ser acessados através do link https://github.com/thaianecardoso/sidewalk_analyzer, o que ampliou o espectro de situações analisadas.

Figura 26 - Pontos coletados no bairro Santa Luzia



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

No bairro Santa Luzia, as ruas selecionadas para o experimento foram a Rua Ibitiguia e a Avenida Santa Luzia. Apesar de apresentarem trechos majoritariamente

planos, observa-se a presença recorrente de obstáculos, interrupções e acessos de veículos que interferem na continuidade da circulação, além de estrangulamentos da faixa destinada aos pedestres.

3.2. Coleta de dados

Seguindo o princípio de que a observação direta constitui uma ferramenta primária nos estudos urbanos, a coleta de dados foi realizada pela própria autora, de forma padronizada, em cada um dos 40 pontos analisados, nos dias 31/07/2024 e 01/08/2024, no turno da manhã, com o objetivo de reduzir interferências externas, como variações de uso e condições ambientais. A coleta teve o objetivo de reunir dados quantitativos, por meio de medições realizadas com medidor de distância a laser e inclinômetro digital, bem como obter informações qualitativas provenientes da observação visual e do registro fotográfico. Os métodos de verificação adotados, os instrumentos utilizados e os respectivos parâmetros normativos encontram-se sistematizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Métodos de verificação

Características	Verificação local	Parâmetro
Inclinação longitudinal	Inclinômetro	5% máx.
Inclinação transversal	Inclinômetro	3% máx.
Largura	Trena digital	1,2 m mín.
Obstáculos	Observação local	Postes, objetos, grama, marcadores, árvores, floreiras
Posição dos obstáculos	Observação local	Faixa livre ou faixa de serviço
Buracos, trincas ou elevações	Observação local	O pavimento deve ser contínuo, firme
Rampas de calçada	Observação local	
Material de pavimentação	Observação local	Identificar o material
Cunha (Rampa de acesso)	Observação local	Rampas de acesso de veículos que começam na calçada
Degrau	Observação local	2 cm máx.
Interrupção	Observação local	Segmentos não pavimentados

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Cada item mencionado pela norma foi agrupado em categorias analíticas, de modo a permitir sua observação conjunta ou isolada, conforme as características do trecho avaliado. Para o presente estudo, foi utilizado um nível bolha como uma referência para calibração das medições; por este motivo, o objeto pode ser identificado na maior parte das imagens obtidas durante a coleta de dados.

3.2.1. Etapa da coleta de imagens urbanas

Todas as imagens foram capturadas em um smartphone Samsung S23, com zoom definido em 1x e resolução de 12 MP. As capturas foram realizadas utilizando as linhas de composição e os marcadores de nível da câmera, que se baseiam no acelerômetro, no giroscópio de orientação e nos sensores de vetor de rotação do dispositivo, assegurando o controle de enquadramento e da origem da imagem, aspectos relevantes para a análise computacional da visão. A indicação de nivelamento foi mantida alinhada em ambas as direções, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Guias de composição



Fonte: Coleção da autora (2026)

O posicionamento da câmera foi mantido a aproximadamente 1,5 metros de altura, no eixo do passeio e perpendicularmente a este, garantindo o enquadramento adequado dos elementos no campo de visão e a neutralidade do indicador de nível. As imagens privilegiavam vistas frontais dos pontos, por representarem o sentido do

deslocamento e permitirem melhor leitura das características de largura e inclinação, além de fornecerem referências verticais para o contexto espacial e evidenciarem os elementos críticos avaliados, como rampas, obstáculos e irregularidades no piso.

Em cada ponto foram obtidas de duas a três imagens, totalizando aproximadamente 100 a 120 registros fotográficos. As capturas foram realizadas sob iluminação natural, em dias secos, de modo a favorecer tanto o deslocamento em campo quanto a qualidade das informações coletadas. Sempre que possível, evitaram-se horários de maior fluxo de pedestres, a fim de reduzir interferências visuais nas imagens.

Os metadados de GPS associados às imagens registram suas coordenadas geográficas e foram transpostos para o formulário de coleta imediatamente após a captura, sendo posteriormente lançados no mapa correspondente às Figuras 23 e 24, conforme descrito no item 3.1.3.

3.2.2. Levantamento de campo

Para cada ponto, foram mensuradas as larguras totais da calçada, em metros, obtidas por meio de trena a laser com precisão de 1,5 milímetros, bem como as inclinações transversais e longitudinais, em porcentagem, medidas com inclinômetro digital. Também foi observada a presença de elementos como postes, canteiros, degraus e outros mobiliários urbanos, além de rampas de acesso de veículos, assim como a largura da faixa livre nos casos em que havia interferências no passeio.

Foram ainda observados os materiais utilizados na superfície e suas características, tais como firmeza, existência de imperfeições, aderência do material, tipos de revestimento empregados. Todos os dados coletados foram registrados de forma padronizada em um formulário do Google Forms, abrangendo a totalidade dos itens levantados em campo.

3.2.3. Instrumentos e equipamentos utilizados

A trena a laser utilizada foi do modelo Bosch GLM 50-12, com precisão de 1,5 milímetros, amplamente empregada no setor de construção e em levantamentos técnicos em razão de sua versatilidade e alcance de até 50 metros.

Embora o nível de bolha seja o mais utilizado na construção civil, verificou-se que, para a aferição de inclinações de até 3%, indicadas para a inclinação transversal

das calçadas, sua precisão se mostrou insuficiente. Por este motivo, o inclinômetro digital mostrou-se o instrumento mais adequado e eficaz para as medições realizadas neste estudo.

O smartphone Samsung S23 Note possui sensores de acelerômetro, orientação, giroscópio, proximidade, vetor rotacional e localização, além das câmeras digitais de 12 MP, utilizadas de forma integrada pelos aplicativos empregados na coleta e no registro das imagens urbanas.

3.2.4. Formulário de inspeção padronizado

Foi elaborado um formulário da plataforma Google Forms, no qual as informações são coletadas de maneira padronizada, gerando automaticamente uma tabela com os resultados. A estrutura do formulário consistiu em um cabeçalho que continha a identificação do ponto, ao qual era atribuída uma numeração, a data e hora da coleta, a localização em coordenadas de GPS, o nome do coletor e a inserção da foto capturada, conforme apresentado na Tabela 9. Na primeira seção do formulário, foram inseridas as medidas de largura da calçada, da faixa livre e as inclinações longitudinais e transversais, bem como as inclinações das rampas de acesso de veículos e de rebaixamento de guias.

Tabela 9 - Seção 1: Identificação dos pontos

Item	Descrição	Tipo de resposta	Obrigatoriedade
Data da coleta	Data em que o levantamento foi realizado	Data	Obrigatório
Identificação do ponto	Número atribuído ao ponto de coleta	Texto livre	Obrigatório
Localização geográfica	Coordenadas de latitude e longitude (GPS)	Coordenada	Obrigatório
Endereço	Logradouro e número do imóvel lindeiro	Rua e número	Obrigatório

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Na segunda seção do formulário, procedeu-se à identificação da existência de rampas de acesso de veículos e de rampas de rebaixamento de meio-fio, elementos que, quando presentes, seriam posteriormente mensurados e avaliados quanto às suas inclinações e à conformidade normativa. Essa etapa tem caráter preliminar e classificatório, permitindo distinguir os pontos que demandariam aferições adicionais, conforme sistematizado na Tabela 10:

Tabela 10 - Seção 2: Elemento adicional

Item	Descrição	Tipo de resposta	Obrigatoriedade
Rebaixamento de meio-fio	Existência de rampa de rebaixamento para travessia de pedestres	Checkbox	Opcional

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em seguida, foi realizado o levantamento das dimensões quantitativas da calçada, incluindo as larguras totais e de faixa livre, bem como as inclinações longitudinais e transversais. Quando identificadas, também foram aferidas as inclinações das rampas para acesso de veículos e rampas de rebaixamento de meio fio, uma vez que esses elementos apresentam características geométricas e critérios normativos distintos, conforme descrito anteriormente. As variáveis mensuradas nessa etapa estão sistematizadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Seção 3: Medições quantitativas

Item	Descrição	Tipo de resposta	Obrigatoriedade
Largura da calçada	Largura total do passeio	Número (m)	Obrigatório
Largura da faixa livre	Largura destinada à circulação livre de pedestres	Número (m)	Opcional
Inclinação transversal	Inclinação transversal da calçada	Número (%)	Obrigatório
Inclinação longitudinal	Inclinação longitudinal da calçada	Número (%)	Obrigatório
Inclinação da rampa de rebaixamento	Inclinação da rampa de rebaixamento de meio-fio	Número (%)	Opcional
Inclinação da rampa de acesso de veículos	Inclinação da rampa de acesso de veículos ao lote	Número (%)	Opcional

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Na quarta seção foram incluídas as informações qualitativas referentes às condições da calçada, contemplando o material da superfície, a qualidade da pavimentação, a existência de fissuras, trincas ou buracos, bem como a presença de objetos na calçada e de elementos que interrompem a faixa livre de circulação. A identificação desses aspectos foi realizada por meio de campos textuais e checkboxes, permitindo também registrar se a passagem por uma pessoa em cadeira de rodas seria possível e qual o principal desafio identificado para a circulação. As variáveis qualitativas levantadas nesta etapa estão sistematizadas na Tabela 12:

Tabela 12 - Seção 4: Medições qualitativas

Item	Descrição	Tipo de resposta	Obrigatoriedade
Material da superfície	Identificação do material de	Texto	Obrigatório

Superfície escorregadia	pavimentação Indicação de característica escorregadia do pavimento	Checkbox	Opcional
Fissuras, trincas ou buracos	Presença de irregularidades na superfície	Checkbox	Obrigatório
Qualidade da pavimentação	Avaliação geral do estado do pavimento	Texto	Obrigatório

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Na quinta seção, realizou-se a identificação dos objetos e obstáculos presentes na calçada por meio de *checkboxes*. Considerando que a disponibilização de mobiliários urbanos como postes, bancos, sinalização e lixeiras é fundamental para o conforto e a funcionalidade do espaço público, optou-se por uma segmentação analítica que permitisse observar a posição relativa desses elementos. Essa abordagem possibilitou verificar se esses objetos estão corretamente posicionados na faixa de serviço ou se configuram obstruções à faixa livre de circulação, caracterizando obstáculos à mobilidade dos pedestres. Os itens levantados nesta etapa encontram-se sistematizados na Tabela 13:

Tabela 13 - Seção 5: Objetos e obstáculos

Item	Descrição	Tipo de resposta	Obrigatoriedade
Rampa de acesso de veículos que interrompe a faixa livre.	Degrau geralmente de seção triangular que gera desnível na faixa livre		
Objetos na calçada	Identificação de mobiliários e elementos urbanos	Checkbox	Opcional
Obstáculos na faixa livre	Identificação de elementos que obstruem a circulação	Checkbox	Opcional

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Na sexta seção, realizou-se uma avaliação geral das condições de acessibilidade da calçada, considerando de forma integrada as medições quantitativas e as observações qualitativas registradas nas seções anteriores. Essa etapa teve como objetivo sintetizar a análise do trecho avaliado, identificando se seria possível a circulação de uma pessoa em cadeira de rodas e apontando o principal desafio à mobilidade observado no local. As variáveis analisadas nesta etapa estão descritas na Tabela 14:

Tabela 14 - Seção 6: Avaliação geral

Item	Descrição	Tipo de	Obrigatoriedade
------	-----------	---------	-----------------

		resposta	
Circulação por cadeira de rodas	Avaliação da possibilidade de passagem Síntese do principal obstáculo à circulação	Texto	Obrigatório
Maior desafio identificado		Texto	Obrigatório

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Por fim, a última seção foi dedicada ao envio da imagem correspondente a cada ponto avaliado, que constitui o insumo visual para a etapa de análise computacional por meio de inteligência artificial. A imagem anexada sintetiza as condições observadas em campo e permite a correlação entre os dados métricos, qualitativos e visuais do trecho analisado, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Seção 7: Envio da fotografia

Item	Descrição	Tipo de resposta	Obrigatoriedade
Fotografia do ponto	Imagem do trecho avaliado	Arquivo de imagem	Obrigatório

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Após a elaboração deste formulário, realizou-se um levantamento piloto em oito pontos para validar sua estrutura e funcionalidade. A organização adotada estabeleceu parâmetros obrigatórios, analisados em todas as imagens, como a largura da calçada, as inclinações longitudinal e transversal, a largura da faixa livre, o material da superfície, a qualidade da pavimentação e a avaliação geral das condições de acessibilidade. Paralelamente, contemplou parâmetros que não se repetem em todos os trechos, como a presença de objetos na calçada, obstáculos na faixa livre, rampas de acesso de veículos e rampas de rebaixamento de meio-fio. Em função dessa variabilidade, as imagens foram posteriormente agrupadas, de modo a evitar distorções na análise comparativa.

3.3. Engenharia de *prompt* no desenvolvimento do *Sidewalk Analyzer*

Ao projetar um *prompt* para tarefas complexas, recomenda-se iniciar com uma abordagem simples, utilizando a técnica conhecida como *zero-shot prompting*, na qual o modelo se baseia exclusivamente em seu conhecimento pré-treinado, sem o fornecimento de exemplos adicionais. A eficácia desse *prompt* inicial pode então ser testada e refinada por meio de inclusão sucessiva de exemplos, restrições e maior contextualização em iterações subsequentes.

Para o teste inicial, o GPT recebeu a seguinte instrução *zero-shot*: “Verifique se a imagem a seguir atende à NBR 9050”. Essa instrução deliberadamente simples teve como objetivo estabelecer uma linha de base para o conhecimento prévio do modelo sobre as normas brasileiras de acessibilidade, antes da introdução de orientações estruturadas. A Figura 28 apresenta a imagem enviada para essa avaliação preliminar.

Figura 28 - Imagem analisada



Fonte: Coleção pessoal da autora (2024)

A imagem selecionada apresenta uma calçada urbana típica em Juiz de Fora, com características relevantes para a avaliação da acessibilidade, incluindo largura da calçada, condições da superfície, presença de mobiliário urbano e relação da via de pedestres com as propriedades adjacentes. A escolha justifica-se pela presença simultânea de múltiplos parâmetros passíveis de análise conforme a NBR 9050, permitindo avaliar a capacidade do ChatGPT-4o de identificar vários fatores de

conformidade de forma integrada. A resposta do modelo a este *prompt* inicial revela o conhecimento existente sobre as regulamentações brasileiras de acessibilidade. A resposta do ChatGPT-4o a este *prompt* inicial zero-shot é apresentada a seguir:

“Resposta do GPT-4:

A NBR 9050 é a norma brasileira que estabelece diretrizes de acessibilidade para edifícios, móveis, espaços urbanos e equipamentos, a fim de garantir acesso igualitário para pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida.

Para verificar se a imagem está em conformidade com a NBR 9050, vários aspectos precisam ser considerados:

1. Largura da calçada: a calçada deve ter uma largura livre mínima de 1,20 metro para permitir a passagem de cadeiras de rodas.
2. Superfície: a superfície da calçada deve ser firme, estável, antiderrapante e livre de obstáculos.
3. Obstáculos: móveis urbanos, como postes e placas, não devem obstruir o trajeto acessível.
4. Piso tátil: Deve ter piso tátil para orientar pessoas com deficiência visual.

Analisando a imagem:

1. Largura da calçada: A calçada parece ser larga o suficiente para acomodar a passagem de cadeiras de rodas, mas sem medidas exatas, é difícil confirmar.
2. Superfície: A superfície parece ser firme e estável, com um padrão que pode oferecer propriedades antiderrapantes.
3. Obstáculos: há um poste no meio da calçada, o que é um obstáculo e não está em conformidade com as normas de acessibilidade.
4. Piso tátil: não há piso tátil visível para orientar pessoas com deficiência visual.

Com base nos aspectos visíveis, a calçada não está em total conformidade com a NBR 9050 devido à presença de obstáculos (poste) e à ausência de piso tátil.”

A construção de *prompts* para tarefas analíticas exige instruções claras quanto às atividades a serem executadas e ao formato de saída desejado. Em processos mais complexos, recomenda-se a segmentação da tarefa em etapas sucessivas, estratégia associada ao conceito de *Chain of Thought*, que orienta o modelo a estruturar o raciocínio em subetapas. Essa abordagem foi incorporada na versão estruturada do *prompt* (V2.0), apresentada no Quadro 1, cujos desdobramentos analíticos podem ser observados na Figura 29 e sistematizados na Tabela 13.

Quadro 1 - Versão estruturada do prompt (V2.0)

Verify in the following image as a table of 2 columns with the question in the left column and the answer in the right column with a few words.

- 1- Classify the width of the free lane of the sidewalk that appears in the following picture as "accessible" when there is enough space for a person in a wheelchair to pass through
- 2- Inform the surface material objectively
- 3- Classify the surface material of the sidewalk into firm or soft
- 4- Classify the surface of the sidewalk into stable or unstable
- 5-Identify the existence of cracks with "yes" for positive or "no" for negative
- 6-Identify the existence of holes with "yes" for positive or "no " for negative
- 7-Identify the existence of bumps with "yes" for positive or "no " for negative
- 8-Classify the surface of the sidewalk into "slippery" or "non-slip."
- 9-Identify the existence of obstacles with "yes" for positive or "no " for negative
- 10-Identify obstacles that would obstruct the free lane of the sidewalk objectively
- 11-Identify the existence of tactile flooring on the sidewalk with "yes" for positive or "no " for negative
- 12-Classify the transversal slope of the sidewalk as "Transversal slope appropriate" when appropriate for a person in a wheelchair and "Transversal slope inappropriate" for negative answers.
- 13-Classify the longitudinal slope of the sidewalk as "Longitudinal slope appropriate" when appropriate for a person in a wheelchair and "Longitudinal slope inappropriate" for negative answers.
- 14- Identify the existence of a curb ramp
- 15- Identify the existence of a wedge or ramp for vehicle access.

Fonte: Elaborado pela autora

Na versão estruturada (V2.0), apresentada na Figura 29 e na Tabela 16, além da segmentação das atividades, ampliou-se o contexto ao considerar explicitamente o espaço necessário à circulação de uma pessoa em cadeira de rodas; definiram-se categorias de resposta predominantemente binárias e estabeleceu-se o formato tabular de saída. As instruções foram direcionadas prioritariamente à classificação e à identificação contextual dos elementos da cena.

Figura 29 - Ponto JF 37



Fonte: Coleção da autora (2026).

Tabela 16 - Resposta do prompt refinado (V2.0) ao ponto JF37

Question	Answer
1. Classify the width of the free lane of the sidewalk as "accessible".	Not accessible
2. Inform the surface material objectively	Concrete
3. Classify the surface material of the sidewalk into firm or soft	Firm
4. Classify the surface of the sidewalk into stable or unstable	Stable
5. Identify the existence of cracks	Yes
6. Identify the existence of holes	No
7. Identify the existence of bumps	Yes
8. Classify the surface of the sidewalk into "slippery" or "non-slip."	Non-slip
9. Identify the existence of obstacles	Yes
10. Identify obstacles that would obstruct the free lane of the sidewalk	Signpost pole
11. Identify the existence of tactile flooring on the sidewalk	No
12. Classify the transversal slope of the sidewalk	Transversal slope inappropriate
13. Classify the longitudinal slope of the sidewalk	Longitudinal slope appropriate
14. Identify the existence of curb ramp	No
15. Identify the existence of a wedge or ramp for vehicle access	Yes

Fonte: OpenAI (2025).

Na versão 3.0 do experimento, foi observada a inconsistência do modelo em apresentar respostas idênticas às mesmas perguntas utilizando o GPT-4o, e houve a tentativa de ajustar a temperatura do modelo, que reduz a aleatoriedade do resultado e quão determinísticas serão suas respostas. Portanto, recomenda-se a redução da temperatura para otimizar a concisão, a objetividade e os usos factuais, dessa forma valores mais elevados deste parâmetro podem ser utilizados para usos em que buscase maior criatividade e liberdade. Foi utilizada para este exemplo a imagem JF02b que corresponde à Figura 30:

Figura 30: Imagem JF02b



Fonte: Coleção da autora (2026).

Na Tabela 17, destacam-se as inconsistências da análise em relação à imagem JF 02b. Além deste teste, foi também realizado outro com a temperatura 0,

que compara a consistência da resposta do GPT 4.1, que pode ser encontrado no Anexo I.

Tabela 17 - Variação dos resultados com as mesmas configurações.

Imagem	JF02b	Modelo utilizado	Temperatura	Modelo utilizado	Temperatura
		GPT-4o	3	GPT-4o	3
Pergunta	Ground Truth	Resposta do sistema	Classificação	Resposta do sistema	Classificação
“Classifique a largura da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou Não Acessível caso contrário.”	2,32	Não Acessível	Incorreto	Acessível	Correspondente
Classifique a largura da faixa livre da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou “Não Acessível” caso contrário.”	1,41	Não Acessível	Incorreto	Acessível	Correspondente
Classifique a inclinação longitudinal da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou “Não Acessível” caso contrário.”	5,7	Acessível	Correspondente	Acessível	Correspondente
Classifique a inclinação transversal da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou “Não Acessível” caso contrário.”	1,27	Acessível	Correspondente	Acessível	Correspondente
“Classifique a qualidade do revestimento da calçada com uma pontuação entre 1 e 10, sendo 1 para má qualidade e 10 para boa qualidade (considere a existência de fissuras, rachaduras e/ou buracos)”	8	4	Correspondente	6	Incorreto
“Quais os materiais utilizados na superfície da calçada?”	Concreto	Concreto	Correspondente	Concreto	Correspondente
“Existe trinca na calçada? (Sim/Não)”	Sim	Sim	Correspondente	Sim	Correspondente
“Existe buraco na calçada? (Sim/Não)”	Não	Não	Correspondente	Não	Correspondente
“Existe fissura na calçada? (Sim/Não)”	Sim	Sim	Correspondente	Sim	Correspondente
“Existe rampa de acesso para carros que interrompe a faixa livre? (Sim ou Não)”	Não	Não	Correspondente	Não	Correspondente

“Liste os obstáculos que obstruem a faixa livre da calçada objetivamente”	Obstáculo não identificado	Folhas, rachaduras	Correspondência parcial	Folhas	Correspondência parcial
“Liste os obstáculos que se encontram na calçada”	Árvore, Canteiro	Árvores, folhas, rachaduras	Correspondência parcial	Árvores, Folhas	Correspondência parcial
“Existe rampa de rebaixamento do meio fio na calçada? (Sim/Não)”	Não	Não	Correspondente	Não	Correspondente
“Seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?”	Sim	Não	Incorreto	Sim	Correspondente
“Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas para passar pela calçada?”	Inclinação longitudinal	Rachaduras e obstáculos na faixa livre	Incorreto	Trincas e fissuras na calçada	Incorreto

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Embora os resultados preliminares, com base em 20 imagens, tenham indicado 100% de precisão na identificação de objetos, materialidade da superfície e imperfeições do pavimento, observaram-se inconsistências relevantes na estimativa de largura, inclinação e posição relativa dos elementos. Então realizaram-se testes comparativos adicionais para avaliação dimensional, evidenciando alucinações nos parâmetros geométricos, conforme a Tabela 18, referente à Figura 31.

Figura 31 - Ponto JF13



Fonte: Coleção da autora (2024).

Tabela 18 - Comparação entre estimativas do GPT-4o e medições em campo (V3.0)

Medição	Resultado	Valor de referência	Erro
Largura da calçada	1.30 m	1.39 m	6.5%
Largura da faixa livre	0.90 m	1.33 m	32.3%
Inclinação transversal	2.0%	4.43%	54.9%
Inclinação longitudinal	3.0%	1.05%	185.7%

Fonte: OpenAI (2025).

Apesar da largura total da calçada ter apresentado valor aproximado ao medido em campo, a largura da faixa livre foi subestimada em 32,3% e as leituras relativas às inclinações apresentaram erros grosseiros. Neste caso, identificaram-se como possíveis causas a ausência de objeto de referência no *prompt*, a inexistência de pré-processamento da imagem e a utilização isolada de um modelo propenso a alucinações.

Gao *et al.* (2022) propõem uma abordagem que extrapola a interpretação baseada exclusivamente em linguagem natural ao empregar linguagens de programação na resolução de problemas, por meio dos *Program Aided Language*

Models (PAL). Nessa estratégia, o modelo gera “programas” que executam parte do processamento por intermédio de um interpretador, como o Python. Foi verificado que, para otimização dos resultados, o uso de linguagem de programação mostrou-se essencial, devido à possibilidade de automatização dos processos de análise, replicabilidade e avaliação dos modelos. A linguagem Python foi escolhida por sua facilidade de aprendizado, ampla aplicabilidade e integração com modelos de *Machine Learning* (ML).

Atualmente, o treinamento de modelos de LLM inclui tanto bancos de dados de linguagem natural quanto linguagens de programação. Em diversas aplicações, como a resolução de problemas matemáticos, observa-se que, embora haja a compreensão da tarefa, persistem falhas na execução da solução, que pode ser conduzida de forma mais consistente por meio de linguagens de programação consolidadas (Gao *et al*, 2022). Com base nesta abordagem, os testes subsequentes foram realizados em ambiente VS Code, integrado ao Copilot, visando estruturar e automatizar o processamento analítico.

Nas iterações subsequentes, foram incorporadas ao teste referências dimensionais do objeto amarelo presente na imagem, correspondentes a um nível manual com dimensões conhecidas de 30 cm de largura, 5 cm de altura e 2,2 cm de espessura. Paralelamente, passou-se a combinar modelos para tarefas específicas. A inserção de um objeto com medidas conhecidas permitiu ao sistema estabelecer relações proporcionais entre elementos da cena, possibilitando a estimativa dimensional dos objetos analisados, conforme apresentado na Tabela 16:

Tabela 16 - Integração de um objeto de referência (V3.1)

Medição	Resultado	Valor de Referência	Erro
Sidewalk width	0.75 m	1.39 m	46.0%
Free lane width	0.50 m	1.33 m	62.4%

Fonte: OpenAI (2025)

Incluindo-se as referências de dimensões do objeto inserido na imagem, o modelo ainda enfrenta dificuldades para interpretar a sua orientação, gerando resultados com erros mais expressivos que a versão 3.0, no qual a proporção da calçada em relação ao objeto deveria ser de 4,6 vezes e foi considerada 2,5 vezes.

Seguindo a abordagem de *Program Aided Language Model*, na qual as tarefas são segmentadas, há a possibilidade de combinação entre modelos e ferramentas para execução da tarefa. Desta maneira, a biblioteca Open CV, que se trata de uma biblioteca de ferramentas de visão computacional de código aberto foi utilizada neste projeto para aprimorar a detecção dos contornos, executando um pré-processamento, a ferramenta também implementa correção da perspectiva.

Tabela 17- Implementação da ferramenta OpenCV (V4.0)

Medição	Resultado	Valor de	
		Referência	Erro
Largura da calçada	2.86 m	1.39 m	105.8%
Largura da faixa livre	2.30 m	1.33 m	72.9%
Inclinação transversal	0.0%	4.43%	100.0%
Inclinação longitudinal	8.0%	1.05%	661.9%

Fonte: OpenAI (2025) e OpenCV

Verificou-se que a falta de informações de profundidade gerou erros grosseiros na interpretação da imagem, levando o modelo a ancorar sua análise em uma referência incorreta. Piccineli *et al.* (2024) propõem uma abordagem inovadora para estimar a profundidade por meio de píxeis, utilizando-se da técnica de Estimativa Precisa da Profundidade em Píxeis (*Monocular Metric Depth Estimation* MMDE), trazendo a possibilidade de ampliar a aplicabilidade desta técnica para uma maior variedade de cenários, independentemente dos parâmetros das câmeras utilizadas. A abordagem desenvolvida propõe uma leitura universal de MMDE; o método desenvolvido é chamado de UniDepth. A ferramenta utiliza um treinamento prévio para prever a escala da cena e os parâmetros de lentes da câmera e gera uma representação pseudo esférica que visa reproduzir os ângulos dos raios capturados pela câmera. A ferramenta foi integrada ao sistema de análise de calçadas.

Tabela 18 - Integração com UniDepth (V5.0)

Medição	Resultado	Valor de	
		referência	Erro
Largura da calçada (ref)	1.40 m	1.39 m	0.7% ✓
Largura da calçada (depth)	1.36 m	1.39 m	2.2% ✓
Inclinação transversal	50.5%	4.43%	1040.0%
Inclinação longitudinal	49.4%	1.05%	4604.8%

Fonte: Elaborado pela autora

Após estimar a profundidade, o resultado gerado para a largura da calçada apresentou margem de erro inferior a 1% e a calibragem da referência funcionou corretamente. As inclinações permanecem superestimadas. Por fim, o Modelo *Segment Anything* foi integrado para aprimorar a detecção do plano da calçada:

A aplicação resultante é um sistema de análise de calçadas, que utiliza recursos avançados de Machine Learning, adequa a imagem para a mínima resolução necessária de 800px, realiza a classificação dos objetos e estimação da profundidade, segmenta a imagem e calcula as dimensões solicitadas de imagens individuais ou de grupos de imagens.

Para a versão 6.0, incorporou-se o modelo MoGe-2 que, assim como o UniDepth, visa ampliar as aplicações de extração de geometria monocular com maior detalhamento e escala métrica. Wang *et al.* (2025) comparam os principais modelos dedicados à Estimação de Profundidade Monocular (Monocular Depth Estimation, MDE) e à Estimação de Geometria Monocular (MGE) quanto aos critérios de precisão geométrica, predição métrica e granularidade geométrica, apontando resultados superiores em relação aos demais.

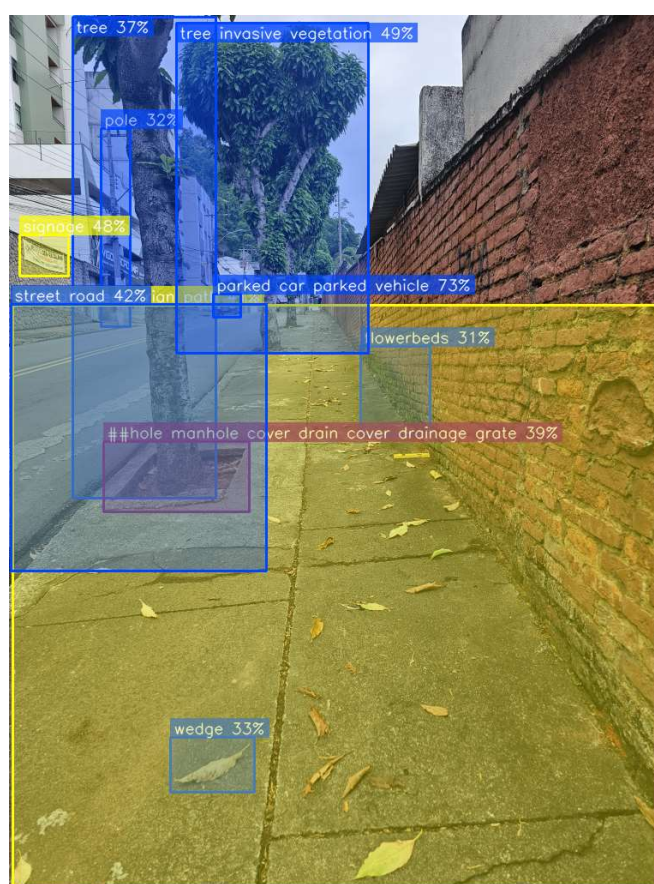
A ferramenta resultante desse processo foi o sistema *Sidewalk Analyzer*, cuja interface permite ao usuário inserir uma imagem ou conjunto de imagens: o sistema realiza a redução da resolução para maior eficiência no processamento, identifica os objetos presentes na calçada, executa medições de profundidade, larguras e distâncias, compara os resultados com os parâmetros da norma de acessibilidade NBR 9050 (2020) e gera um relatório a ser confrontado com os dados coletados *in loco*.

3.4. Processamento computacional - Sidewalk Analyzer

O avanço das iterações anteriores evidenciou a necessidade de integrar diferentes abordagens computacionais para ampliar a precisão das análises realizadas. Nesse contexto, estruturou-se um sistema capaz de articular modelos especializados em tarefas complementares, visando maior confiabilidade nos resultados. A ferramenta resultante da segmentação das tarefas, com o objetivo de obter maior precisão por meio da combinação de Modelos de Aprendizado Profundo (Deep Learning Models) e LLMs para a classificação das calçadas quanto à existência de obstáculos e à largura da faixa livre, é apresentada nesta seção.

Para o desenvolvimento desta ferramenta, são empregados quatro principais pilares tecnológicos que, associados, permitem a classificação das calçadas quanto aos parâmetros estabelecidos na NBR 9050. No âmbito da visão computacional, a ferramenta Grounding DINO possibilita a identificação de objetos específicos a partir de *prompts* em linguagem natural, destacando nas imagens as regiões em que podem ser encontrados. Esse modelo é associado ao SAM2, um modelo de código aberto de aprendizagem profunda que segmenta com precisão as áreas da imagem correspondentes aos objetos identificados, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Segmentação semântica da imagem JF02

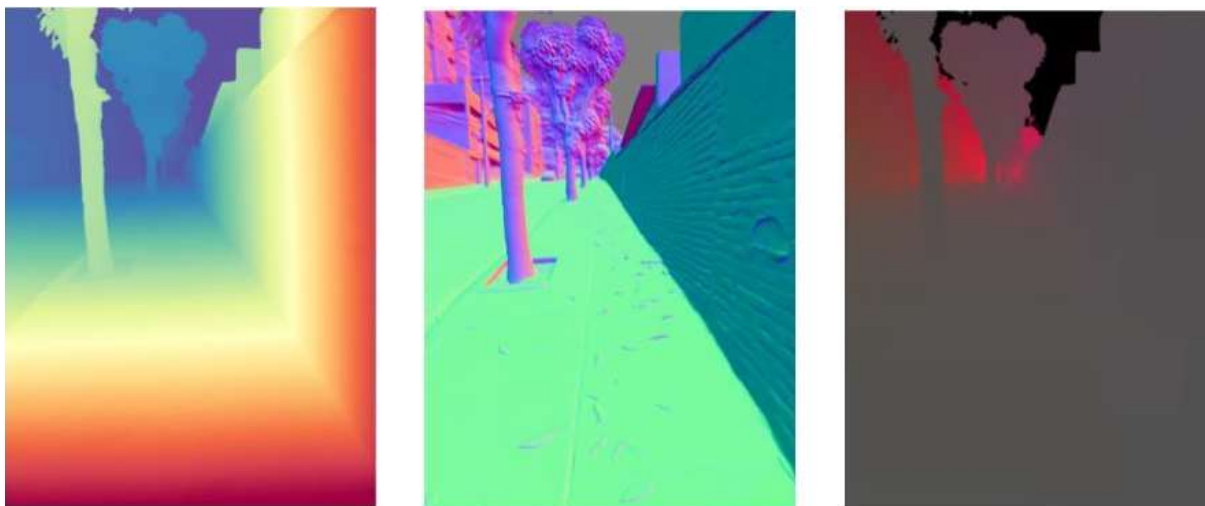


Fonte: Coleção da autora (2026)

Após a identificação dos objetos na imagem, o modelo de estimação geométrica monocular MoGe2 realiza o cálculo da profundidade por meio de um mapa de pontos afins, correspondente à reconstrução tridimensional da cena (Wang et al., 2025). Dessa forma, o modelo gera arquivos que convertem a relação entre os píxeis da imagem em proporções métricas. Os dados extraídos desses arquivos são calibrados com base no objeto de referência posicionado sobre a calçada, visando maior precisão.

A Figura 33 apresenta um mapa de profundidade colorizado, um mapa normal e um mapa de profundidade em escala de cinza, representações visuais da variação de profundidade e da reconstrução geométrica gerada pelo modelo.

Figura 33 - Mapas de profundidade gerados pelo MoGe2

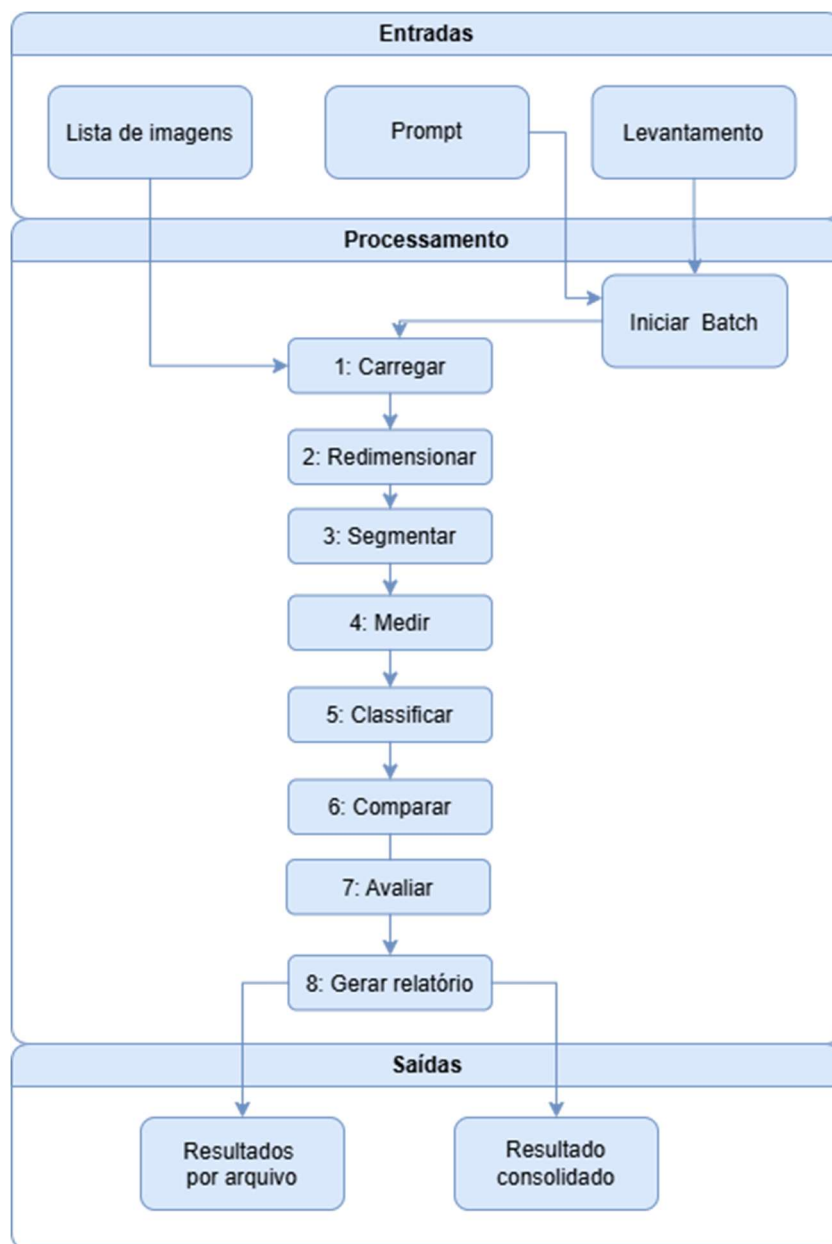


Fonte: Elaborado pela autora através do modelo MoGe2.

Os mapas de profundidade são representações gráficas da escala métrica extraída da cena, gerados para então calcular-se as dimensões dos objetos que compõem as calçadas que serão avaliadas. O GPT-4o é então utilizado para comparar os dados obtidos de largura, profundidade e posição relativa dos objetos, analisando sua conformidade com os parâmetros estabelecidos na NBR 9050 e, na sequência, gerar o relatório correspondente.

A imagem enviada para análise é carregada na plataforma individualmente ou em grupos e, em seguida, redimensionada para a proporção de 1024 × 768. Posteriormente, passa por segmentação gráfica e identificação dos objetos. Após essa etapa, o sistema gera mapas de profundidade e calcula as medidas da largura da calçada e da faixa livre. Por fim, a imagem é classificada quanto aos parâmetros de acessibilidade da NBR 9050, sendo gerado um relatório que compara as informações obtidas com o levantamento realizado *in loco*. O fluxograma apresentado na Figura 34 representa a sequência de processamento.

Figura 34 - Fluxograma de processamento do Sidewalk Analyzer:



Fonte: Elaborado pela autora

O programa compara os dados do levantamento realizado in loco com os resultados obtidos pelo sistema, que utiliza o GPT-4o para verificar se as respostas são corretas, parcialmente corretas ou incorretas. O relatório é então exportado com as informações organizadas em tabelas comparativas por imagem, bem como em um resultado consolidado, que sintetiza os dados por categorias.

3.4.1. Preparação da imagem

Em cada ponto, foram capturadas de duas a três fotografias do local, no formato 3000 × 4000 píxeis, em JPG e orientação vertical, posteriormente reduzidas para 768 × 1024 píxeis. Deu-se preferência à vista frontal da calçada, por representar o sentido da circulação de pedestres. As imagens selecionadas deveriam apresentar nitidez, enquadramento adequado dos elementos avaliados e ausência de obstruções temporárias.

Um nível de bolha foi posicionado nas imagens referentes a 38 dos 46 pontos, com o objetivo de indicar o local exato das medições e servir como objeto de referência, por possuir dimensões conhecidas que possibilitam a extração métrica a partir das imagens.

Para a organização dos experimentos, as imagens selecionadas receberam nomenclatura padronizada, seguindo o padrão “JF01”, sendo inseridas na tabela gerada pelo formulário, que continha endereço, coordenadas geográficas e demais informações coletadas in loco.

Após um dos testes de detecção de profundidade, observou-se que a inclinação vertical da câmera do celular produzia distorções na extração da inclinação do piso. Por esse motivo, a captura das imagens foi repetida, assegurando-se de que, além do alinhamento com as marcações de nível laterais, o aparelho estivesse também nivelado verticalmente, utilizando-se o recurso de composição assistida por inteligência artificial para reduzir a distorção das linhas verticais.

3.4.2. Aplicação do Sidewalk Analyzer

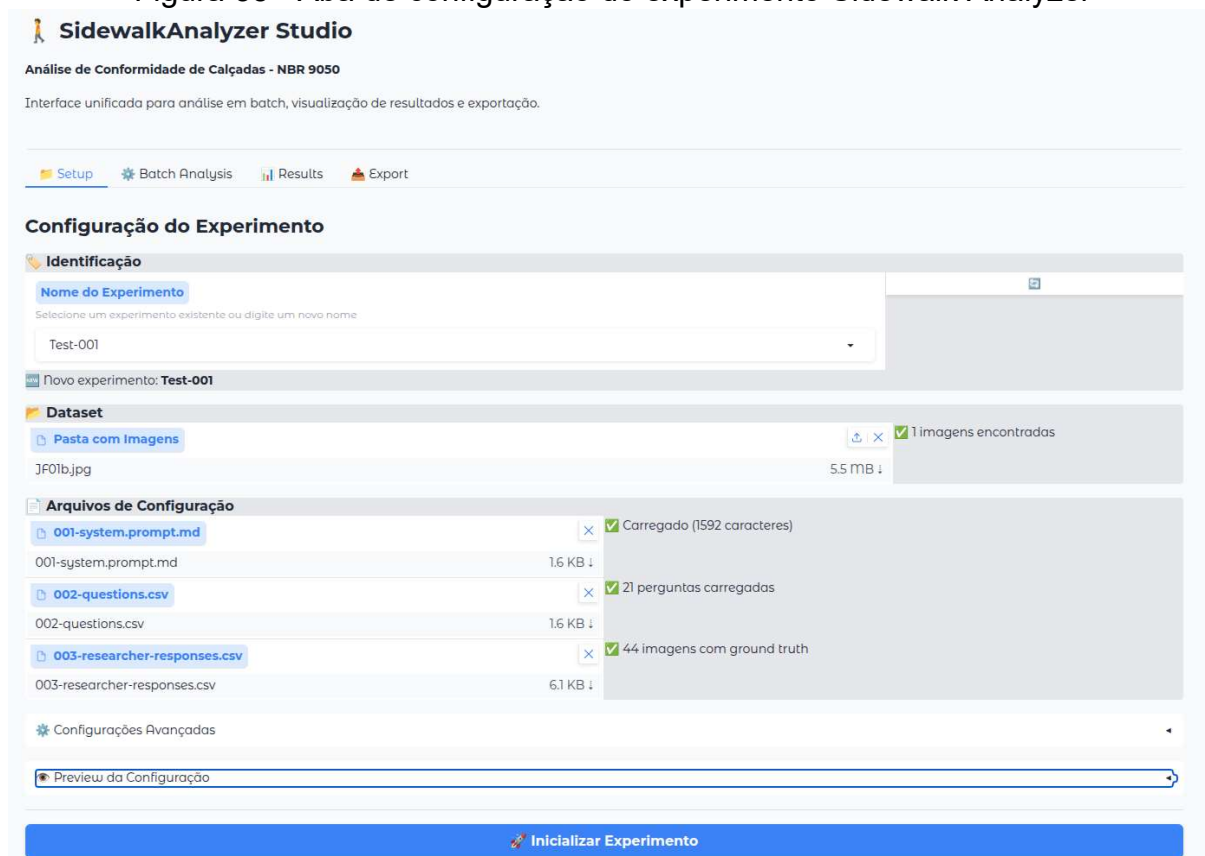
Para os testes iniciais, a versão do modelo utilizada foi o GPT-4o empresarial. Nesses, os uploads foram realizados individualmente e, em seguida, optou-se por uma abordagem padronizada utilizando-se a linguagem Python, o que possibilitou realizar os experimentos e testes com maior agilidade para registro das respostas e possibilitou que fossem feitas alterações e ajustes subsequentes, assim como a associação de modelos e o registro automático dos resultados.

A interface do Sidewalk Analyzer Studio permite o envio das imagens, a seleção da pasta de destino para registro das informações e o encaminhamento do prompt destinado à análise pelo GPT-4o, bem como a inserção de alterações no código,

correspondentes às versões do experimento desenvolvidas em Python, integradas aos dados do levantamento realizado *in loco*.

Essa versão (Figura 35) foi elaborada especificamente para o desenvolvimento da presente pesquisa, prevendo ajustes no sistema e no prompt para a condução dos experimentos e o registro sistemático das respostas.

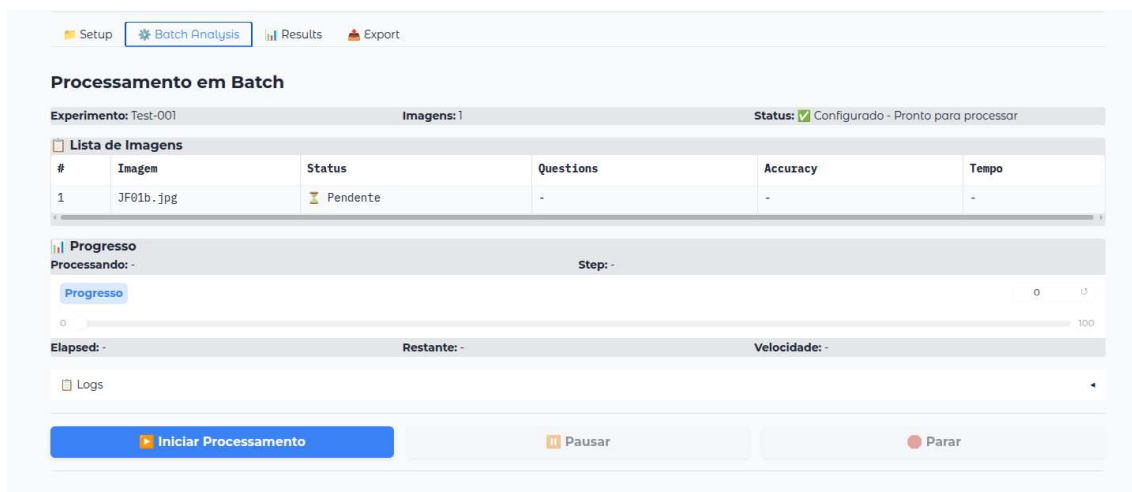
Figura 35 - Aba de configuração do experimento Sidewalk Analyzer



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Após o início do experimento, há uma segunda aba (Figura 36) destinada à inserção das imagens a serem analisadas, na qual é possível acompanhar o progresso do processamento, identificar eventuais etapas que gerem erros a serem corrigidos no programa e verificar seu desempenho.

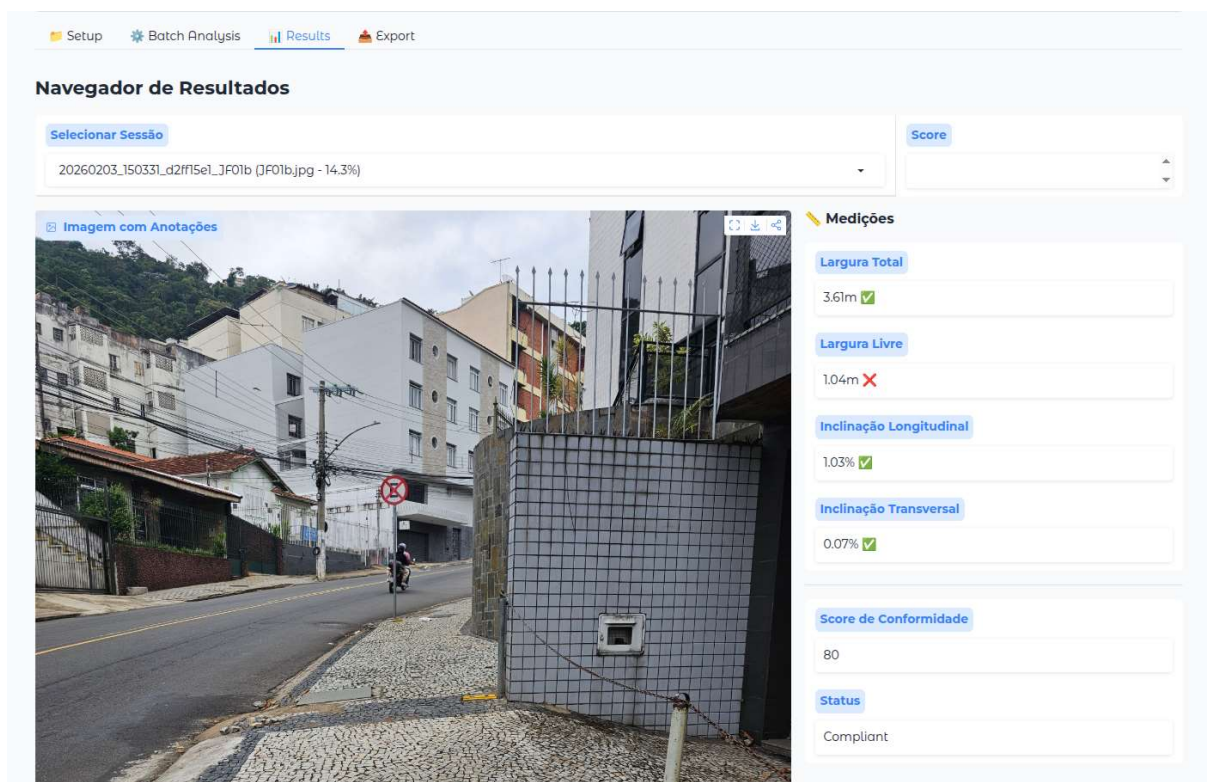
Figura 36 - Aba de inserção das imagens



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Os resultados desta análise podem ser visualizados em uma aba dedicada, onde as medições aparecem em destaque, junto da imagem a ser analisada, como pode ser observado na Figura 37:

Figura 37 - Aba de resultados



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Em seguida, o relatório que sintetiza os resultados quantitativos, qualitativos, a identificação dos objetos, assim como a avaliação geral, é exibido em formato de tabela, juntamente com a comparação que avalia a precisão das respostas (Figura 38):

Figura 38 - Relatório gerado pelo Sidewalk Analyzer

Comparação Q&A						
Accuracy		Exact Match		Within Tolerance		Incorrect
23.1%		3		0		5
Perguntas e Respostas						
ID	Pergunta	Tipo	Sistema	Pesquisador	Status	Conf.
joint		META	Metadata not available		—	100%
image		META	JF01b.jpg		—	100%
sidewalk_width	What's the sidewalk width?	CALC	Measurement not available	2,308	x	100%
free_lane_width	What's the free lane width?	CALC	Measurement not available	1,57	x	100%
longitudinal_slope	What's the longitudinal slope?	CALC	Measurement not available	7,82	x	100%
transversal_slope	What's the transversal slope?	CALC	Measurement not available	4,53	x	100%
wedge_slope	What's the wedge Slope?	CALC	Measurement not available		—	100%
pavement_quality	What's the pavement quality?	DIRE	Regular, com algumas irregu...	Poor	◆	50%
surface_material	What's the surface material?	DIRE	Pedras portuguesas	Portuguese stone	✓	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O sistema foi desenvolvido para comparar os experimentos e gerar os relatórios de maneira padronizada e estruturada, identificando as etapas nas quais os arquivos intermediários são gerados, registrando os processos, proporcionando grande flexibilidade e consistência.

Conforme demonstra a Figura 36, devem ser inseridos três arquivos para a configuração do experimento. Portanto, foi inserido no campo “arquivos de configuração” referente ao contexto que irá servir como referência dos parâmetros da norma a serem avaliados conforme Quadro 2:

Quadro 2 - Contexto do sistema para Versão 03 e Versão 07:

=== INSTRUÇÕES DO SISTEMA ===

Definição de calçada:

- A superfície entre a parede e o meio-fio ;
- Ou a superfície entre a parede e a sarjeta;
- Ou a superfície entre a delimitação de um terreno cercado ou murado e a faixa de rolamento da rua.

IMPORTANTE: Calçadas podem ser compostas por mais de um material

Definição de Faixa Livre:

- O trecho da calçada entre obstáculos e parede.
- Ou o trecho da calçada entre obstáculos e o meio-fio.
- Ou o trecho da calçada entre a parede e o meio-fio

Definição de Obstáculo:

- Objetos permanentes sobre a calçada;
- Ou desníveis permanentes superiores a 2 cm.
- Ou trincas
- Ou buracos

Definição de Superfície Irregular:

- Superfície com desníveis entre 0,5 e 2 cm sem rampa;
- OU superfície com trincas;
- Ou superfície com ressaltos;
- OU superfície trepidante.

Não considerar como obstáculo ou superfície irregular:

- Fissuras;
- Carros estacionados na rua;
- Objetos móveis como sacola de lixo, folhas ou objetos desse tipo

Crítérios para que a Faixa Livre seja considerada acessível:

- Não ter Superfície Irregular;
- Não ter obstáculos
- A inclinação longitudinal deve ser a mesma da rua
- A inclinação transversal deve ser confortável para uma pessoa utilizando cadeira de rodas
- Deve haver espaço suficiente para a passagem de uma pessoa utilizando cadeira de rodas.

Crítérios para que calçada seja considerada acessível:

- Faixa Livre acessível;
- Ter, pelo menos, uma rampa de rebaixamento nas esquinas ou travessias
- A rampa de acesso de veículos não interrompe a faixa livre

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

As instruções contidas no arquivo de contexto visam descrever de maneira objetiva, estruturada e direta os elementos visuais a serem avaliados. Foi observado que o treinamento realizado para os modelos utiliza imagens provenientes do norte global, e por este motivo havia dificuldade de identificação de alguns elementos.

É importante destacar que as definições devem descrever alguns parâmetros de maneira abrangente, como a descrição da calçada, que muitas vezes pode estar incompleta ou inadequada na imagem, quanto aos exigidos pela norma que serão utilizados para avaliar a conformidade ou não dos objetos identificados.

Além do arquivo de contexto, é enviado o arquivo que contém as perguntas e como esta deverá ser comparada com a tabela que corresponde ao registro do levantamento realizado *in loco*, sendo enviado num arquivo de texto e pode ser visualizado na Tabela 15:

Tabela 15 - Perguntas enviadas ao sistema e correspondência ao levantamento:

Variável	Pergunta correspondente
"largura_da_calçada"	Classifique a largura da calçada como "Acessível" ou "Não Acessível" (Foco em: Superfície da calçada)
"largura_da_faixa_livre"	Classifique a largura da faixa livre da calçada como "Acessível" ou "Não Acessível" (Foco em: Faixa livre da superfície da calçada)
"Inclinação_longitudinal"	Classifique a inclinação longitudinal da calçada como "Inclinação longitudinal adequada" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas e "Inclinação longitudinal inadequada" para respostas negativas. (Foco em: Superfície da calçada)
"inclinação transversal"	Classifique a inclinação transversal da calçada como "Inclinação transversal adequada" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas e "Inclinação transversal inadequada" para respostas negativas. (Foco em: Superfície da calçada)
"rampa_de_acesso_de_veiculos_interrompe"	Identifique a existência de uma rampa de acesso para carros e se ela interrompe a faixa livre. (Foco em: Rampa de acesso para carros ou Cunha)
"qualidade_do_pavimento"	Classifique a qualidade do revestimento com uma pontuação de 1 a 5, com 1 para má qualidade e 5 para boa qualidade, considerando a existência de fissuras, rachaduras ou buracos (Foco em: Superfície da calçada)
"material_da_superficie"	Qual é o material utilizado (Foco em: Superfície da calçada)
"trincas"	Identifique as fissuras (Foco em: Superfície da calçada)
"buracos"	Identifique trincas (Foco em: Superfície da calçada)
"fissuras"	Identifique buracos (Foco em: Superfície da calçada)
"obstáculos_na_faixa_livre"	Identifique obstáculos na faixa livre (Foco em: Superfície da calçada)
"obstáculos_na_calçada"	Identifique obstáculos na calçada (Foco em: Superfície da calçada)
"há_rampa_de_acesso_de_veículo_ou_cunha"	Identifique se há rampa para acesso de veículo ou cunha (Foco em: Superfície da calçada)
"há_rampa_de_rebaixamento"	Identifique se há rampa de rebaixamento do meio-fio (Foco em: Rampa)
"seria_possível_a_passagem_por_uma_pessoa_em_cadeira_de_rodas"	Seria possível a passagem de uma pessoa utilizando uma cadeira de rodas? (Foco em: Superfície da calçada, rachaduras, buracos, desníveis, obstáculos)
"qual_o_maior_desafio_para_uma_pessoa_em_cadeira_de_rodas"	Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas? (Foco em: Superfície da calçada, rachaduras, buracos, desníveis, obstáculos)

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O mesmo arquivo que contém as perguntas apresenta ao sistema o formato em que as respostas deverão ser respondidas, que também será respondida com uma tabela, com campos correspondentes ao levantamento e aos demais experimentos para que a comparação entre as respostas seja facilitada conforme Tabela 16:

Tabela 16 - Formato das respostas

Variável	Resposta
"largura_da_calçada"	"sua resposta aqui"
"largura_da_faixa_livre"	"sua resposta aqui"
"inclinação_longitudinal"	"sua resposta aqui"
"inclinação_transversal"	"sua resposta aqui"
"existência_de_rampa_de_acesso_para_carros_que_interrompe_a_faixa_livre"	"sua resposta aqui"
"qualidade_do_pavimento"	"sua resposta aqui"
"material_da_superficie"	"sua resposta aqui"
"fissuras"	"sua resposta aqui"
"trincas"	"sua resposta aqui"
"buracos"	"sua resposta aqui"
"obstáculos_na_faixa_livre"	"sua resposta aqui"
"obstáculos_na_calçada"	"sua resposta aqui"
"existe_rampa_de_acesso_para_veículo_ou_cunha"	"sua resposta aqui"
"existe_rampa_de_rebaixamento_do_meio_fio"	"sua resposta aqui"
"é_possível_a_passagem_de_uma_pessoa_em_cadeira_de_rodas"	"sua resposta aqui"

"qual e o maior desafio para uma pessoa usuaria de cadeira de rodas" "sua resposta aqui"
 Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Além destes, também é enviado o levantamento realizado *in loco* que será comparado aos experimentos para verificar a acurácia do sistema. O arquivo contém o levantamento dos parâmetros obtidos para as 46 imagens coletadas. A Tabela 17 contém um exemplo do registro executado, que poderá ser verificado integralmente no seguinte link: https://github.com/thaianecardoso/sidewalk_analyzer

Tabela 17 - Exemplo de estrutura de registro

image	sidewalk_width	free_lane_width	Longitudinal_slope	transversal_slope	Surface_material	obstacles_in_the_free_lane	[etc]
JF01b	2,308	1,57	7,82	4,53	Pedra portuguesa	Buraco	...

Fonte: Elaborado pela autora

Para o desenvolvimento do Experimento 7, as perguntas foram categorizadas conforme as etapas do processo descrito no item 3.4. As questões classificadas como “cálculo” percorreram as etapas de medição de profundidade, identificação de objetos, segmentação semântica, medição de larguras e inclinações da calçada, seguidas de resposta e avaliação. Já as classificadas como “pergunta direta” puderam utilizar os dados gerados nas medições, mas foram encaminhadas diretamente para análise e avaliação pelo GPT-4o. Alguns campos da tabela permaneceram separados pelo caractere underline (), por representarem variáveis utilizadas pelo programa. A etapa de medições utilizou a identificação do objeto segmentado como variável do sistema, a fim de distinguir componentes pertencentes à calçada daqueles que configuravam obstáculos ou características da superfície capazes de dificultar ou impedir a circulação na faixa livre. As perguntas enviadas ao sistema na versão 7.0 estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Perguntas enviadas ao Sidewalk Analyzer para a versão 7.0

nome_da_coluna	Tipo_da_coluna	Objeto_de_segmentacao	pergunta
Largura_da_calçada	cálculo	Superfície_da_calçada	Qual a largura da calçada?
largura_da_faixa_livre	cálculo	Faixa_livre_da_Superfície_da_calçada	Qual a largura da faixa livre?
inclinacao_longitudinal	cálculo	Superfície_da_calçada	Qual a inclinação longitudinal da calçada?

inclinacao_transversal	cálculo	Superfície_da_calçada	Qual a inclinação transversal da calçada?
Classificacao_da_largura_da_calçada	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Classifique a largura da calçada como "Acessível" ou "Não Acessível"
Classificacao_da_largura_da_faixa_livre	Pergunta_direta	Faixa_livre_da_Superfície_da_calçada	Classifique a largura da faixa livre da calçada como "Acessível" ou "Não Acessível"
Classificacao_da_Inclinacao_longitudinal	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Classifique a inclinação longitudinal da calçada como "Inclinação longitudinal adequada" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas e "Inclinação longitudinal inadequada" para respostas negativas. Classifique a inclinação transversal da calçada como "Inclinação transversal adequada" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas e "Inclinação transversal inadequada" para respostas negativas.
Classificacao_da_inclinacao_transversal	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Classifique a inclinação transversal da calçada como "Inclinação transversal adequada" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas e "Inclinação transversal inadequada" para respostas negativas.
Existe_rampa_de_Acesso_para_carros_que_e_interrompe_a_faixa_livre	Pergunta_direta	Rampa_de_acesso_para_carros_ou_cunha	Existe uma rampa de acesso para carros que interrompe a faixa livre?
Qualidade_do_pavimento	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Classifique a qualidade do revestimento da calçada com uma pontuação entre 1 e 5, sendo 1 para má qualidade e 5 para boa qualidade, considerando a existência de fissuras, rachaduras ou buracos
Material_da_superfície	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Qual é o material utilizado na superfície da calçada?
trincas	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Identifique a existência de trincas com "Sim" para positivo e "Não" para respostas negativas
buracos	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Identifique a existência de buracos com "Sim" para positivo e "Não" para respostas negativas
fissuras	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Identifique a existência de fissuras com "Sim" para positivo e "Não" para respostas negativas
Obstaculos_na_faixa_livre	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Liste objetivamente os obstáculos que obstruem a faixa livre
Obstaculos_na_calçada	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Liste os obstáculos na calçada
Existe_rampa_de_acesso_para_veiculo_ou_cunha	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada	Identifique se há rampa para acesso de veículo ou cunha, com "Sim" ou "Não"
Existe_rampa_de_Rebaixamento_do_meio_fio	Pergunta_direta	rampa	Identifique se há rampa de rebaixamento do meio-fio
Seria_possivel_Passar_em_cadeira_de_rodas	Pergunta_direta	Superfície_da_Calçada,_trincas,_buracos,_desníveis,_o_bstáculos	Seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?
Maior_desafio_para_Pessoa_usuaria_de_cadeira_de_rodas	Pergunta_direta	Superfície_da_calçada,_trincas,_buracos,_desníveis,_o_bstáculos	Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?

Fonte: Elaborado pela autora

Após gerar as respostas, o próprio sistema as compara com o levantamento realizado *in loco* e com os parâmetros apresentados no arquivo de configuração,

gerando um relatório que pode ser verificado na Tabela 22, que traz um exemplo da análise gerada para um dos pontos. Os experimentos foram realizados utilizando o mesmo sistema que possibilita a comparação entre os modelos e instruções, com a mesma conta.

Enquanto a versão 7.0 do experimento utilizou apenas as respostas geradas pelo modelo GPT-4o, a versão 8.0 utilizou também as leituras dos demais modelos de *machine learning*, descritos no item 3.4, que extraem dimensões das imagens. Na versão 6.0 do experimento, foram identificados desafios e limitações relacionados à definição de determinados obstáculos e à extração das medidas, os quais serão descritos nas seções do relatório apresentadas nas Tabelas 19, 20, 21 e 22, a seguir, referentes à Figura 39.

Figura 39 - Imagem JF29b



Fonte: Coleção da autora (2026)

Tabela 19 - Limitações e desafios da versão 6.0

Imagem: JF29b	
Experimento	exp0006
01 – Medições Quantitativas	
Pergunta	Resultado
Qual a largura da calçada?	Levantamento: 1,55

	Sistema: 2,59 m
	✘ Incorreto — Diferença de 67,3% excede a tolerância de 10%.
	Levantamento: 1,53
Qual a largura da faixa livre?	Sistema: 0,87 m
	✘ Incorreto — Diferença de 43,1% excede a tolerância de 10%.
	Levantamento: 1,92
Qual a inclinação longitudinal da calçada?	Sistema: 0,99 %
	✘ Incorreto — Diferença de 48,4% excede a tolerância de 10%.
	Levantamento: 25,00
Qual a inclinação transversal da calçada?	Sistema: 0,08 %
	✘ Incorreto — A diferença de 99,7% excede a tolerância de 10%.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Após a avaliação das imagens com a combinação dos modelos, verificou-se imprecisão relevante na extração das medidas, principalmente em razão da variação de profundidade em imagens externas sem limites definidos ao fundo. Os resultados indicaram que a orientação vertical e o ângulo de captura influenciaram o alcance da profundidade, ampliando a variação entre os píxeis. Essa questão é detalhada no item 3.5.3, que trata das limitações do modelo e dos ajustes metodológicos.

Quanto às análises qualitativas, relativas à identificação de materiais, qualidade da superfície e irregularidades como trincas, buracos e fissuras, o modelo apresentou elevada precisão desde os testes iniciais, com variações pontuais de nomenclatura, como nos casos registrados no levantamento, como bloco intertravado de concreto e classificado apenas como concreto. A imagem JF29b apresentou correspondência integral na identificação de materiais e irregularidades, conforme a Tabela 20:

Tabela 20 - Medições qualitativas da versão 6.0

Imagem: JF29b	
📁 02 – Medições Qualitativas	
Pergunta	Resultado
	Levantamento: 3
Qualidade do revestimento da calçada	Sistema: 2
	✘ Incorreto — Diferença de 33,3% excede a tolerância de 10%.
Material da superfície da calçada	Levantamento: Concreto
	Sistema: Concreto
	☑ Correspondência exata — Respostas idênticas.
Existência de trincas	Levantamento: Sim

	Sistema: Sim
	<input checked="" type="checkbox"/> Correspondência exata — Respostas idênticas.
	Levantamento: Não
Existência de buracos	Sistema: Não
	<input checked="" type="checkbox"/> Correspondência exata — Respostas idênticas.
	Levantamento: Sim
Existência de fissuras	Sistema: Sim
	<input checked="" type="checkbox"/> Correspondência exata — Respostas idênticas.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).


Nesta versão, apresentou-se também a comparação automatizada entre o levantamento *in loco* e as informações geradas pelo sistema. Inicialmente, a leitura da qualidade da calçada foi comparada diretamente aos valores do levantamento, o que produziu discrepâncias superiores às reais; posteriormente, o procedimento foi ajustado para considerar a escala mínima de 1 e máxima de 10. Em relação aos objetos e obstáculos, foi necessário revisar algumas definições contextuais, pois o sistema registrava desníveis ou superfícies irregulares sem empregar a nomenclatura “cunha”, conforme exemplificado na Tabela 21.

Tabela 21 - Obstáculos e objetos na versão 6.0

Imagem: JF29b	
Experimento	exp0006
03 – Objetos e Obstáculos	
Pergunta	Resultado
	Levantamento: Cunha
Obstáculos na faixa livre	Sistema: Nenhum obstáculo visível (superfície irregular)
	<input checked="" type="checkbox"/> Incorreto — Não há correspondência entre as respostas.
	Levantamento: Cunha
Obstáculos na calçada	Sistema: Moto, lixo e superfície irregular
	<input checked="" type="checkbox"/> Incorreto — Nenhum dos itens do sistema corresponde ao levantamento.
05 – Avaliação Geral	
Pergunta	Resultado
	Levantamento: Não
Passagem de pessoa em cadeira de rodas	Sistema: Possível, mas com dificuldade
	<input checked="" type="checkbox"/> Incorreto — As respostas são opostas.

Levantamento: Cunha para acesso à garagem

Maior desafio para pessoa em cadeira de rodas Sistema: Superfície irregular com fissuras e rachaduras

 Correspondência parcial — Ambos indicam dificuldade relacionada à superfície.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A cunha corresponde ao degrau de seção triangular gerado pela acomodação de rampas de acesso de veículos que interrompem a calçada, conforme descrito nos manuais de calçadas de Florianópolis (2014) e de Belo Horizonte (2020). O termo, adotado no levantamento, foi raramente identificado pelo modelo; entretanto, observou-se que, em algumas imagens, o sistema reconhecia variações de nível e superfícies trepidantes como superfície irregular. Nas versões subsequentes, foram incluídas uma pergunta específica sobre a presença de rampa de acesso de veículos interrompendo a faixa livre e a definição de superfície irregular no contexto do sistema, o que resultou em melhoria na precisão dessa identificação.

3.5. Validação e análise comparativa

O uso de linguagem natural para a execução de tarefas tem sido amplamente difundido, abrangendo desde a elaboração, análise, tradução, síntese e classificação de textos até aplicações multimodais, cujos resultados frequentemente se aproximam da produção humana. Contudo, parte dessas respostas, embora verossímeis em termos linguísticos, pode apresentar incorreções ou inconsistências frente a evidências externas, sendo classificadas como alucinações (ALANSARI *et al.*, 2025). Diante do avanço tecnológico dessas ferramentas, impõe-se a necessidade de avaliação rigorosa de seu desempenho e confiabilidade.

Foram realizados testes subsequentes, comparando os resultados com os levantamentos realizados *in loco*. Sempre que identificada alguma limitação na leitura da LLM, novas soluções foram implementadas e novamente testadas, utilizando-se a linguagem Python para execução dos experimentos e comparação padronizada dos resultados. Nesta pesquisa, os critérios de avaliação contemplaram a exatidão das respostas em termos quantitativos, por meio dos percentuais de acerto, e qualitativos, com análise dos tipos de erro e dos contextos de falha em cada parâmetro. Para assegurar transparência e confiabilidade, tanto os acertos quanto às limitações do modelo foram devidamente documentados.

A abordagem “LLM-as-a-Judge” constitui uma alternativa escalável para avaliação automatizada de saídas geradas por LLMs, ao comparar dados de referência com respostas produzidas pelo mesmo ou por outro modelo (Zheng *et al.*, 2023). Nesse procedimento, o modelo juiz recebe as perguntas originais, as respostas geradas pelo sistema e a resposta de referência. No caso do Sidewalk Analyzer, foi também fornecido ao modelo juiz o arquivo de configuração contendo os parâmetros da NBR 9050.

3.5.1. Tabela de correspondência entre medições de campo e respostas do modelo

A tabulação comparativa apresentou os dados do levantamento realizado no local, a resposta gerada pelo sistema, a avaliação conduzida pelo GPT-4.1 e a respectiva justificativa. A tabela incluiu ainda a segmentação por seção, agrupando as perguntas conforme a estrutura adotada no formulário de coleta de dados, como exemplificado na Tabela 22.

Tabela 22 - Formato da tabela-mestra

Imagem: JF05b								
Experimento	exp-v8				exp-v7			
01-Medições Quantitativas	Levant. (metros)	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)
"Qual a largura da calçada?"	2,47	2.56m	⊖ Not Evaluated	Difference of 3.5% (relative, within 10.0% tolerance). System: 2.56, Researcher: 2.47	[Indefinido]	[Indefinido]	[Indefinido]	[Indefinido]
"Qual a largura da faixa livre?"	1,43	1.28m	✗ Incorrect	Difference of 10.4% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 1.28, Researcher: 1.43	[Indefinido]	[Indefinido]	[Indefinido]	[Indefinido]
"Classifique a largura da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou Não Acessível caso contrário."	2,47	Acessível	☑ Exact Match	A largura da calçada é 2,47 m, acima do mínimo de 2,0m exigido pela NBR 9050:2020 para ser considerada acessível. O sistema classificou corretamente como 'Acessível'.	2,47	Não Acessível	⚠ Partial Match	O pesquisador forneceu o valor da largura (2,47m), mas não classificou explicitamente como 'Acessível' ou 'Não Acessível'. O sistema classificou como 'Não Acessível'. Considerando que 2,47m é suficiente para cadeira de rodas, o correto seria 'Acessível'. Portanto, é uma correspondência parcial, pois o sistema fez uma inferência, mas não corresponde ao valor objetivo.
Classifique a largura da faixa livre da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário."	1,43	Não acessível	☑ Exact Match	A faixa livre tem 1,43 m, acima do mínimo de 1,2m, mas o sistema classificou como 'Não Acessível'. Considerando apenas a largura, seria 'Acessível', mas a classificação pode considerar outros fatores (obstáculos, superfície irregular). Sem mais contexto, a resposta do sistema está correta se outros critérios não foram atendidos.	1,43	Não Acessível	⚠ Partial Match	O pesquisador forneceu o valor 1,43m, que geralmente é considerado acessível para cadeira de rodas. O sistema classificou como 'Não Acessível'. Portanto, é uma correspondência parcial, pois o sistema não corresponde ao valor objetivo, mas a resposta do pesquisador não é categórica.
Classifique a inclinação longitudinal da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário."	1,45	Acessível	☑ Exact Match	A inclinação longitudinal é 1,45%, bem abaixo do máximo permitido de 8,33%. O sistema classificou corretamente como 'Acessível'.	1,45	Não Acessível	⚠ Partial Match	O pesquisador forneceu o valor 1,45 (provavelmente em porcentagem), que está dentro do limite de acessibilidade. O sistema classificou como 'Não Acessível'. Portanto, é uma correspondência parcial, pois o sistema não corresponde ao valor objetivo, mas a resposta do pesquisador não é categórica.
Classifique a inclinação transversal da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário."	0,93	Acessível	☑ Exact Match	A inclinação transversal é 0,93%, abaixo do máximo de 3%. O sistema classificou corretamente como 'Acessível'.	0,93	Não Acessível	⚠ Partial Match	O pesquisador forneceu o valor 0,93, que está dentro do limite de acessibilidade. O sistema classificou como 'Não Acessível'. Portanto, é uma correspondência parcial, pois o sistema não corresponde ao valor objetivo, mas a resposta do pesquisador não é categórica.

02-Medições Qualitativas	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)
"Classifique a qualidade do revestimento da calçada com uma pontuação entre 1 e 10, sendo 1 para má qualidade e 10 para boa qualidade (considere a existência de fissuras, rachaduras e/ou buracos)"	8	4	✘ Incorrect	Difference of 50.0% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 4.00, Researcher: 8.00	8	4	✘ Incorrect	Difference of 50.0% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 4.00, Researcher: 8.00
"Quais os materiais utilizados na superfície da calçada?"	Concreto grosso	Concreto e ladrilho hidráulico	⚠ Partial Match	O sistema identificou 'Concreto e ladrilho hidráulico', enquanto o pesquisador indicou 'Concreto grosso'. Ambos mencionam concreto, mas o sistema adicionou um material não citado pelo pesquisador.	Concreto grosso	Concreto e ladrilho	⚠ Partial Match	O sistema respondeu 'Concreto e ladrilho', enquanto o pesquisador respondeu 'Concreto grosso'. Ambos mencionam concreto, mas o sistema adicionou 'ladrilho' e o pesquisador especificou o tipo de concreto. Não é uma correspondência exata, mas há sobreposição.
"Existe trinca na calçada? (Sim/Não)"	Não	Sim	✘ Incorrect	O sistema respondeu 'Sim', mas o pesquisador respondeu 'Não'. Não há trinca, segundo o pesquisador, portanto a resposta do sistema está incorreta.	Não	Sim	✘ Incorrect	O sistema respondeu 'Sim' e o pesquisador respondeu 'Não'. São respostas opostas e categóricas.
"Existe buraco na calçada? (Sim/Não)"	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical
"Existe fissura na calçada? (Sim/Não)"	Sim	Sim	☑ Exact Match	Answers are identical	Sim	Sim	☑ Exact Match	Answers are identical
03-Objetos e Obstáculos	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)
"Existe rampa de acesso para carros que interrompe a faixa livre? (Sim ou Não)"	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical	Não	Sim	✘ Incorrect	O sistema respondeu 'Sim' e o pesquisador respondeu 'Não'. São respostas opostas e categóricas.
"Liste os obstáculos que obstruem a faixa livre da calçada objetivamente"	Desnível	Mesa e bancos de concreto, árvore	⚠ Partial Match	O sistema listou 'Mesa e bancos de concreto, árvore', enquanto o pesquisador listou 'Desnível'. Ambos são obstáculos, mas não há correspondência direta entre os itens.	Desnível	Mesa e bancos de concreto, árvore, desnível acentuado	⚠ Partial Match	O sistema listou 'Mesa e bancos de concreto, árvore, desnível acentuado' e o pesquisador apenas 'Desnível'. O sistema incluiu mais obstáculos do que o pesquisador observou, mas ambos mencionam desnível.
"Liste os obstáculos que se encontram na calçada"	Árvore, Mesa de xadrez, desnível	Mesa e bancos de concreto, árvore, desnível acentuado	⚠ Partial Match	O sistema listou 'Mesa e bancos de concreto, árvore, desnível acentuado', enquanto o pesquisador listou 'Árvore, Mesa de xadrez, desnível'. Há correspondência parcial, mas o sistema agrupou mesas e bancos e não especificou 'Mesa de xadrez'.	Árvore, Mesa de xadrez, desnível	Mesa e bancos de concreto, árvore, desnível acentuado, trincas	⚠ Partial Match	O sistema listou 'Mesa e bancos de concreto, árvore, desnível acentuado, trincas' e o pesquisador 'Árvore, Mesa de xadrez, desnível'. Ambos mencionam árvores, mesa e desnível, mas o sistema adicionou bancos e trincas, enquanto o pesquisador especificou 'mesa de xadrez'.
04-Elementos Adicionais	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)
"Existe rampa de rebaixamento do meio fio na calçada?"	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical

(Sim/Não)"								
05-Avaliação Geral	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)
"Seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?"	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical	Não	Não	☑ Exact Match	Answers are identical
"Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas para passar pela calçada?"	Desnível	Obstáculos fixos (mesa, bancos, árvore) e desnível acentuado na calçada	⚠ Partial Match	O sistema mencionou 'Obstáculos fixos (mesa, bancos, árvore) e desnível acentuado', enquanto o pesquisador destacou apenas 'Desnível'. O sistema incluiu mais desafios, mas o principal citado pelo pesquisador está presente.	Desnível	Desnível acentuado e obstáculos fixos como mesa, bancos e árvore que bloqueiam a passagem	⚠ Partial Match	O sistema respondeu 'Desnível acentuado e obstáculos fixos como mesa, bancos e árvores que bloqueiam a passagem', enquanto o pesquisador respondeu apenas 'Desnível'. O sistema incluiu mais detalhes, mas ambos concordam que o desnível é o maior desafio.

Fonte: Elaborado pela autora

Além de gerar respostas, o sistema realiza a avaliação comparativa em relação aos dados do levantamento e apresenta justificativa para o resultado obtido. Na versão 6.0, essa verificação limitava-se à comparação direta entre resposta gerada e dado de campo, enquanto na versão 7.0, o procedimento foi aprimorado para considerar também o arquivo de configuração, que reúne parâmetros e definições extraídos da NBR 9050 e estruturados para melhor interpretação pela LLM. Essa ampliação permitiu explicitar os critérios mobilizados na avaliação, orientar ajustes e otimizar processos, conforme detalhado na seção de análise dos resultados.

Na categoria de medições quantitativas, verifica-se a correspondência exata dos valores, classificando-se o campo como correto quando coincidente, como adequado quando situado dentro da margem de tolerância de 10% e como incorreto quando essa margem é ultrapassada. Persistem, contudo, limitações relevantes quanto à exatidão da largura. Nessa mesma categoria, o sistema também classifica a calçada como acessível quando sua largura atende às exigências normativas, ou seja, superior a 2,00 m, e quando a faixa livre é superior a 1,20 m.

Na verificação das respostas relativas à classificação da faixa livre, a versão 7.0 considerou exclusivamente a análise global realizada pelo GPT-4.1, já na versão 8.0, passou a incorporar as medições obtidas por Geometria Monocular, a partir das quais o sistema procedeu à classificação como Acessível ou Inacessível.

Nas categorias avaliativas, a medição foi registrada numericamente, acompanhada da respectiva resposta em valor absoluto e da classificação desses valores segundo os parâmetros normativos. Para este estudo, definiu-se que calçadas com largura superior a 2,00 m deveriam ser identificadas como acessíveis, assim como faixas livres superiores a 1,20 m. Ressalta-se, contudo, que calçadas com largura inferior a 2,00 m podem ser consideradas acessíveis quando a faixa livre estiver integralmente desobstruída.

Na categoria de obstáculos, foram considerados exclusivamente elementos permanentes e de grande porte, como postes, árvores, sinalização e mobiliário urbano, de modo a assegurar correspondência metodológica com os critérios adotados no levantamento *in loco*. O mesmo princípio orientou a análise da dimensão da faixa livre, restringindo a avaliação a interferências estruturais efetivas sobre a circulação.

De acordo com a NBR 9050, desníveis superiores a 0,5 cm devem receber tratamento rampado e, quando superiores a 2 cm, são caracterizados como degraus,

configurando obstáculo à circulação. No presente estudo, tais desníveis foram classificados como superfície irregular, uma vez que se distribuem espacialmente de forma distinta dos obstáculos de grande porte, demandando tratamento analítico específico.

3.5.2. Critérios de precisão e erro

Para as seções do formulário que se referem a medições qualitativas, elementos adicionais da calçada, e para a avaliação geral, a maior parte das perguntas que compõem o *input* demandam respostas afirmativas ou negativas, e portanto sua métrica de erro é de acurácia simples. O sistema compara as respostas do modelo com o levantamento realizado *in loco* e avalia se há correspondência direta. Os resultados são então agrupados e obtém-se uma proporção dos acertos em relação ao total de casos. As respostas calculadas pelo sistema são consideradas “corretas” quando correspondem exatamente à referência, são consideradas “dentro da margem de tolerância” quando apresentam valor 10% acima ou abaixo da referência, sendo consideradas incorretas quando extrapolam essa margem.

As medições quantitativas passam por um processo de extração das dimensões da imagem por geometria monocular, e este valor é classificado conforme os parâmetros da norma e então comparado ao levantamento, assim mantendo o mesmo formato de resposta da versão 7.0. Essa classificação não é numérica; portanto, as respostas são classificadas como corretas, incorretas ou parcialmente corretas.

A qualidade da superfície da calçada foi classificada em uma escala de 1 a 10, em que 1 corresponde à qualidade ruim, com muitas irregularidades, desníveis e patologias construtivas, e 10 corresponde a uma boa qualidade da superfície, devidamente pavimentada, não escorregadia, firme e contínua. Essa pergunta apresenta um caráter subjetivo e também há a possibilidade de resposta parcialmente correta.

A seção correspondente aos objetos e obstáculos identificados na calçada demanda que o modelo liste os obstáculos. A resposta gerada pode corresponder exatamente à resposta apresentada no levantamento, ou corresponder parcialmente quando a descrição conter os objetos listados no levantamento, além de outros, ou será classificada como incorreta. O mesmo ocorre em relação ao último item da Seção 5 referente à avaliação geral da acessibilidade, que questiona qual o maior desafio

para uma pessoa usuária de cadeira de rodas, que contém uma resposta objetiva aberta.

Para a identificação dos objetos adicionais da calçada, que seriam a rampa de rebaixamento e as rampas de acesso de veículos que interrompem a faixa livre, foi considerada a totalidade das imagens e outra restrita ao universo amostral em que estes elementos foram identificados.

A classificação gerada pelo modelo juiz é classificada como “correto” (exact match), “incorreto” (incorrect), dentro da margem de tolerância (within tolerance), parcialmente correto (partial match) e também pode apresentar uma justificativa.

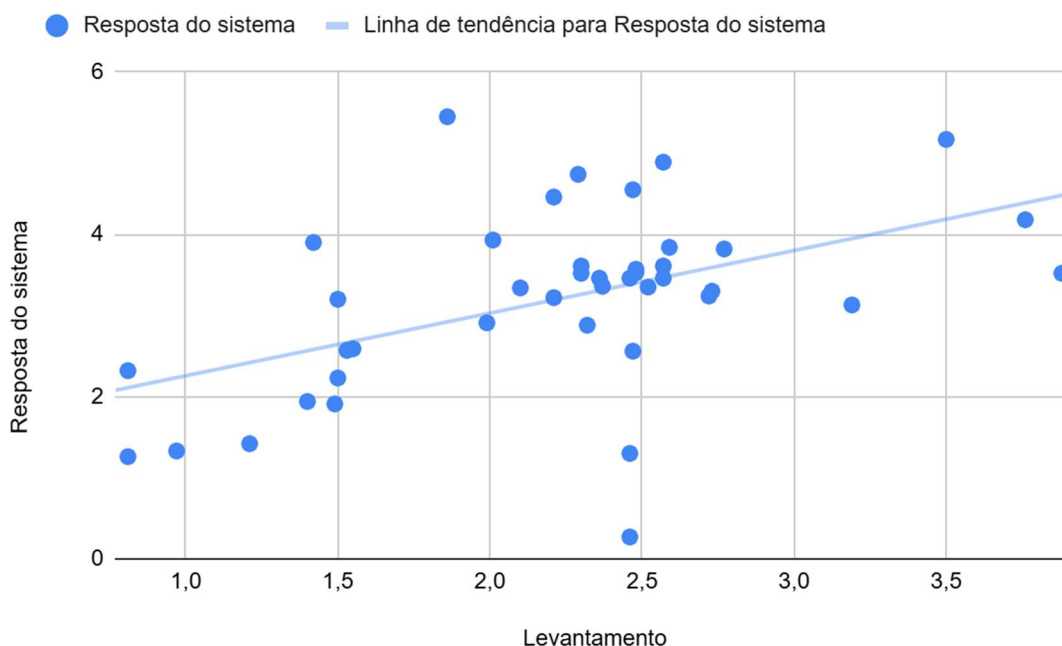
A coluna correspondente às respostas do sistema contém também o raciocínio por trás da resposta que esclarece as causas de resultados inconsistentes, ao comparar-se apenas o resultado bruto com o levantamento.

Os resultados do sistema Sidewalk Analyzer, assim como a comparação realizada pelo modelo juiz, foram avaliados pelo pesquisador, que também adicionou observações ao relatório, uma vez que a comparação dos valores absolutos pode ignorar nuances locais.

3.5.3. Limitações do modelo e ajustes metodológicos

O avanço tecnológico associado à reconstrução de geometria e dimensões a partir de uma única imagem constituiu o principal desafio da metodologia proposta. Ainda assim, essa abordagem contribuiu para a consolidação dos resultados, alcançando Correlação de Pearson de 0,49 para as dimensões de largura da calçada. Foram excluídas quatro imagens nas quais o sistema gerou valores nulos. Os dados correspondentes estão apresentados no gráfico da Figura 40.

Figura 40 - Correlação das dimensões de largura da calçada



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A correlação de 0,49 indica correlação positiva entre os valores identificados pelo sistema e os valores, mas estes contêm alguma aleatoriedade e divergências que ultrapassam 100% de diferença. Desta forma, o aprimoramento deste parâmetro requer testes adicionais que contenham diferentes ângulos da câmera. De maneira semelhante, o fator de correlação para a faixa livre foi de apenas 0,39 e os valores gerados pelo sistema para as inclinações longitudinais não apresentaram correlação positiva.

Na versão 8.2, nas questões que não representaram medidas, todos os valores apresentados contêm uma resposta concisa, uma explicação do raciocínio utilizado na resposta e uma nota de confiança, destacando a origem do dado. A adição do dado de medição realizado pelo sistema o torna mais determinista e confiável em relação à reprodutibilidade das respostas, porém os resultados das dimensões geradas pelo sistema ainda extrapolam a margem de erro. Portanto, a categorização da largura é um exemplo em que os resultados podem aparentar estar corretos, porém, com um risco de conter falsos positivos em valores muito próximos aos limites estabelecidos pela norma.

Tabela 23 - Exemplo de uma análise da imagem JF04c

Imagem: JF04c					
Experimento		exp-v8.2			
01-Medições Quantitativas	Ground Truth	Sistema	Avaliação (LLM)	Justificativa (LLM)	Observações
“Qual a largura da calçada?”	2,47	4.55m	✘ Incorrect	Difference of 84.2% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 4.55, Researcher: 2.47	
“Qual a largura da faixa livre?”	1,43	0.98m	✘ Incorrect	Difference of 31.6% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 0.98, Researcher: 1.43	
“Qual a inclinação longitudinal da calçada?”	1,45	1.29%	✘ Incorrect	Difference of 11.0% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 1.29, Researcher: 1.45	
“Qual a inclinação transversal da calçada?”	0,93	0.13%	✘ Incorrect	Difference of 85.8% (relative) exceeds 10.0% tolerance. System: 0.13, Researcher: 0.93	
“Classifique a largura da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou Não Acessível caso contrário. Considere somente a largura da calçada.”	2,47	A largura da calçada é acessível. A largura medida é de 4,55 m, acima do mínimo de 2,0 m exigido pela NBR 9050:2020. Confiança: 8.	✔ Exact Match	O sistema classificou corretamente a largura da calçada como acessível, pois o valor informado (4,55 m) está acima do mínimo exigido pela NBR 9050:2020 (2,0 m). O valor do pesquisador (2,47 m) também está acima do mínimo, então ambos concordam implicitamente na classificação.	O valor de referência encontra-se fora do limite de tolerância.
Classifique a largura da faixa livre da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou “Não Acessível” caso contrário. Considere somente a largura da faixa livre da calçada.”	1,43	A largura da faixa livre é Não Acessível. A faixa livre tem 0,98 m, abaixo do mínimo de 1,2 m exigido pela norma. Confiança: 9.	✘ Incorrect	O sistema classificou a faixa livre como 'Não Acessível' com base em 0,98 m, mas o pesquisador mediu 1,43 m, que está acima do mínimo de 1,2 m. Portanto, a resposta correta seria 'Acessível'.	
Classifique a inclinação longitudinal da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou “Não Acessível” caso contrário. Considere somente a inclinação longitudinal da calçada.”	1,45	A inclinação longitudinal é Acessível. O valor de 1,29% está bem abaixo do máximo permitido de 8,33%. Confiança: 8.	✔ Exact Match	Ambos os valores (1,29% do sistema e 1,45% do pesquisador) estão bem abaixo do limite de 8,33%. A classificação como 'Acessível' está correta.	O valor de referência encontra-se fora do limite de tolerância.
Classifique a inclinação transversal da calçada como	0,93	A inclinação transversal é Acessível. O valor	✔ Exact Match	Ambos os valores (0,13% do sistema e 0,93% do pesquisador) estão abaixo do	

"Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário. Considere somente a inclinação transversal da calçada."

de 0,13% está muito abaixo do máximo permitido de 3%.
Confiança: 8.

limite de 3%. A classificação como 'Acessível' está correta.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Após o processamento das imagens, foi observado que o ângulo em que as imagens foram executadas e a orientação da câmera vertical geram uma grande variação na profundidade, como destacado nas variáveis em negrito na Tabela 24 de um dos arquivos de saída do sistema relativo à etapa de medição.

Tabela 24 - Arquivos de saída da etapa de Medição da imagem JF04c

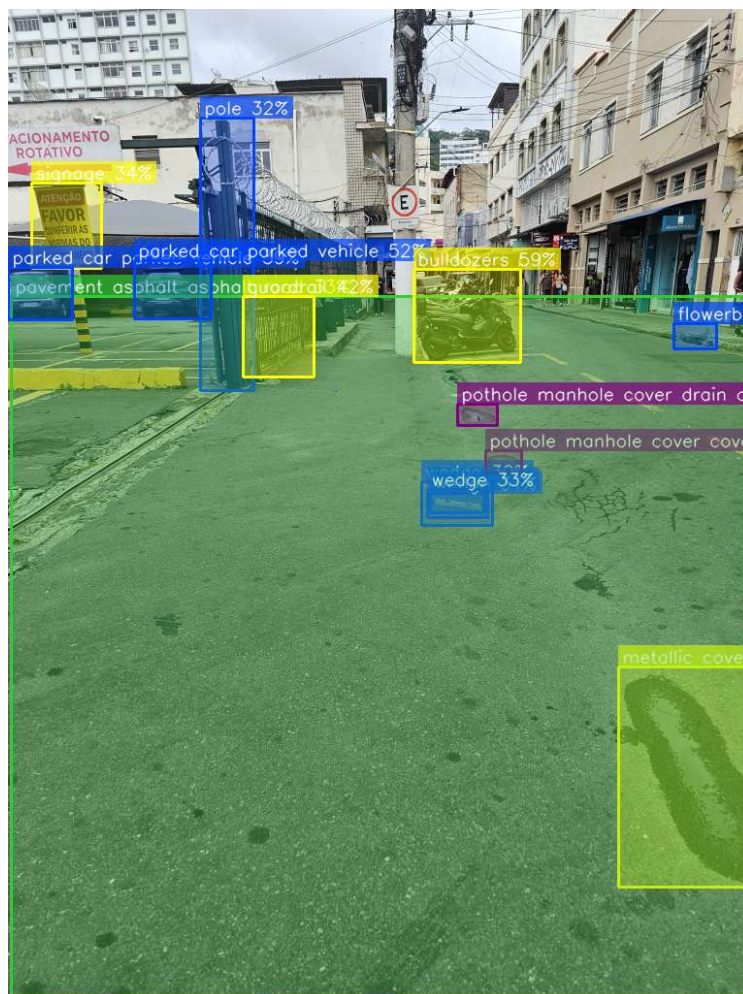
Arquivo de saída da etapa de medição	Contorno da calçada, Largura máx e Faixa Livre
<pre> "free_width_m": "0.97847295", "width_m": "4.549573", "max_width_m": "7.3236513", "width_confidence": 0.31788375973701477, "longitudinal_slope_pct": 1.2900110334157944, "cross_slope_pct": 0.13175420463085175, "slope_confidence": 0.34506332874298096, "surface_roughness": 100.0, "mean_depth_m": 3.77821946144104, "scale_valid": false, "scale_warning": "High depth variance detected. Scale estimation may be inaccurate." </pre>	

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Tabela 24 apresenta os arquivos de saída gerados na etapa de medição. Em etapas anteriores, o sistema realiza a segmentação semântica dos objetos, das irregularidades, dos obstáculos e da calçada, conforme explicado no item 3.3, gerada

uma máscara correspondente à superfície da calçada e à área de contato entre objetos e obstáculos e essa superfície. Então, o sistema utiliza a sobreposição destes para traçar o contorno que será utilizado para calcular a largura da calçada e a largura da faixa livre. Na imagem JF4c, o acesso do imóvel é realizado por uma rampa adjacente à calçada, mas não faz parte da mesma, e o sistema considerou a rampa do imóvel no contorno considerado para a largura máxima, identificada pela linha vermelha. A continuidade de material e falta de delimitação entre o imóvel e a área pública causaram interpretações equivocadas nesta e em outras imagens, além disso, a orientação da câmera em retrato e com ângulo totalmente vertical fazem com que o campo de profundidade alcance uma distância muito grande, o que gerou repetidamente a mensagem destacada em negrito retirada dos arquivos de saída da etapa de medição na Tabela 24. O desafio quanto à identificação do limite da calçada se dá tanto quando há continuidade de materiais com o interior do terreno quanto em relação à rua como pode ser observado na Figura 41.

Figura 41 - Calçadas em asfalto, sem meio fio e sarjeta, imagem 24b




Fonte: Coleção da autora

Os elementos que constituem a calçada discutidos no item 2.3 possuem importante função para drenagem urbana, segurança dos pedestres e acessibilidade tanto para pessoas com baixa mobilidade quanto para deficiência visual. Na figura 41 o modelo apresenta dificuldade para identificar os limites entre a via, a calçada e o lote por haver continuidade entre seus materiais e níveis uma vez que essa é construída inteiramente em asfalto com inclinação transversal elevada por toda a seção da calçada, sem meio fio ou sarjeta para direcionamento das águas pluviais. Diante desta situação modelo apresentou dificuldade de identificar o espaço livre destinado à circulação de pedestres como o espaço destinado à calçada quando os demais elementos encontraram-se ausentes.

Na Tabela 25 ao capturar a imagem 45b, há um exemplo com um ângulo aproximado de 35° considerando-se o ângulo horizontal como 0° e com o celular na

orientação em paisagem, desta forma é possível enquadrar toda a extensão da calçada a uma distância menor, resultando numa medição mais precisa.

Tabela 25 - Arquivos de saída da etapa de Medição da imagem JF45b

Arquivo de saída da etapa de medição	Contorno da calçada, Largura máx e Faixa Livre
<pre> "free_width_m": "1.3620334", "width_m": "4.8921447", "max_width_m": "5.687749", "width_confidence": 0.773766815662384, "longitudinal_slope_pct": 0.32749054953455925, "cross_slope_pct": 0.025698024546727538, "slope_confidence": 0.9826408624649048, "surface_roughness": 100.0, "mean_depth_m": 2.741746664047241, "scale_valid": true, "scale_warning": null, </pre>	

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nas imagens, a linha vermelha representa a largura máxima encontrada para a calçada, que foi de 5,69 m, e a linha destacada em azul foi indicada como a faixa livre, onde também há erro por considerar uma folha como um obstáculo que interrompe a calçada. Tais desafios requerem ajustes de parâmetros a serem considerados em pesquisas futuras.

Durante os testes do sistema, foi verificado que o ângulo da câmera interferiu na reconstrução geométrica e então foi realizada uma 2ª coleta de todas as 40 imagens capturadas anteriormente que receberam a mesma identificação, porém acompanhadas de um “b” ou “c” no caso da imagem 4, tendo sido adicionadas 6 imagens coletadas posteriormente para cobrir casos específicos que tinham um universo amostral pequeno.

3.6. Considerações éticas e legais

Estratégias de governança digital vêm sendo incorporadas ao serviço público, ampliando a capacidade de monitoramento urbano, diagnóstico de infraestrutura e qualificação do acesso por meio de soluções mais inclusivas. Tecnologias de processamento de imagem e inteligência artificial apresentam potencial para otimizar recursos e apoiar a tomada de decisão. Contudo, sua adoção impõe

responsabilidades institucionais relativas à integridade dos dados, à cibersegurança e à transparência no uso das informações.

As Diretrizes Éticas para Inteligência Artificial Confiável, publicadas pela Comissão Europeia em 2019, estabelecem que sistemas de IA devem respeitar o arcabouço legal vigente, observar princípios éticos e demonstrar robustez técnica e social. Tais sistemas devem apoiar decisões humanas, e não substituí-las, exigindo previsão de supervisão e responsabilização no desenho das políticas públicas.

Além disso, recomenda-se que os modelos sejam reprodutíveis, precisos e passíveis de correção, com mecanismos de verificação e explicabilidade das decisões. As diretrizes também enfatizam a promoção da diversidade, a prevenção de vieses discriminatórios, a auditabilidade dos sistemas e a clara atribuição de responsabilidade pelos resultados gerados.

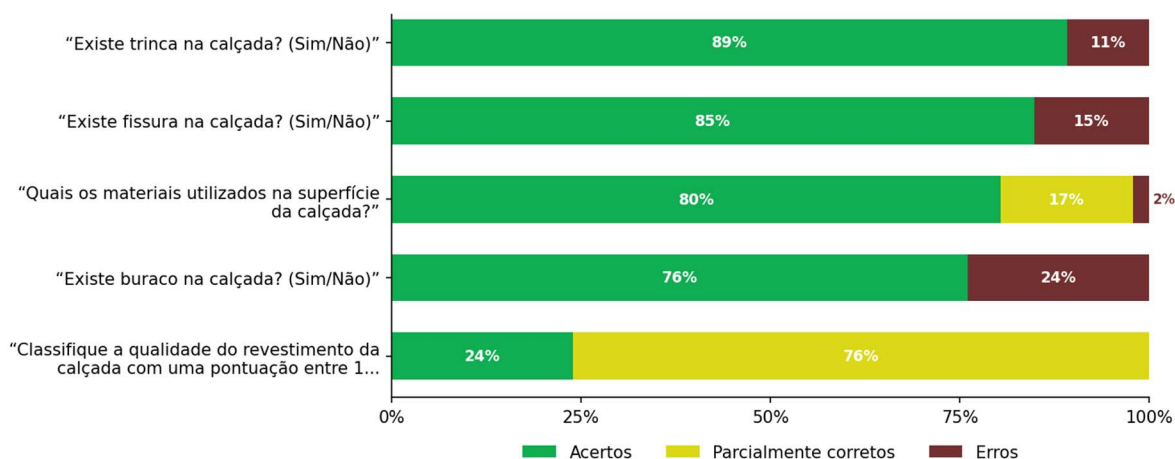
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a verificação dos resultados pelo modelo juiz, foram acrescentadas observações e avaliação crítica do pesquisador. As análises por pergunta foram organizadas segundo as mesmas categorias do formulário de coleta, por reunirem dados complementares. Observou-se que determinadas questões apresentam resultados correlatos, de modo que inconsistências pontuais podem ser esclarecidas ou complementadas na sequência, conforme detalhado na Análise de Erros.

4.1.1. Precisão geral e específica por categoria

A seção dedicada às medições qualitativas compreende perguntas sobre a presença de patologias na pavimentação, como fissuras, trincas e buracos, bem como uma classificação da qualidade do revestimento. As respostas do modelo para estas questões apresentaram a maior porcentagem de acertos, com 89% das calçadas com trincas identificadas, 85% das calçadas com fissuras corretamente identificadas e 76% das calçadas com buracos identificados corretamente, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 41 - Gráfico de acurácia para a seção 2 - Medições qualitativas



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

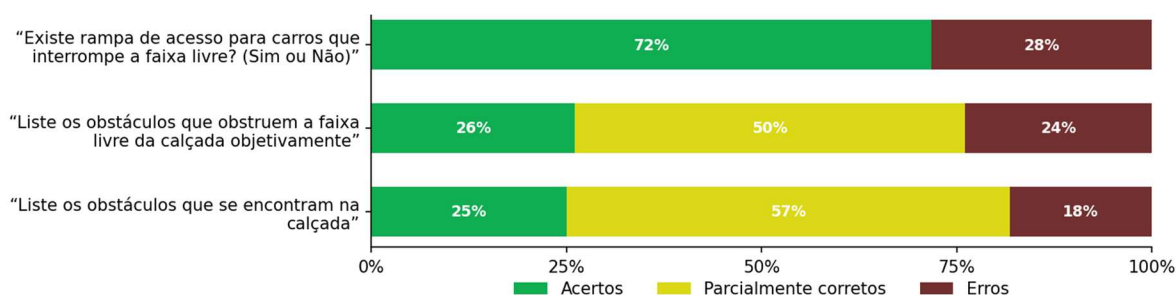
A qualidade da calçada foi classificada em escala de 1 a 10, sendo 1 correspondente a condição insatisfatória e 10 a condição adequada. Por se tratar de parâmetro subjetivo, adotou-se margem de tolerância de 10% para enquadramento como resposta parcialmente correta. O sistema apresentou coincidência exata em

24% das imagens, registrando, nos demais casos, valores próximos aos atribuídos no levantamento.

Quanto à identificação de objetos e obstáculos, os critérios envolveram o reconhecimento de elementos relevantes à acessibilidade e sua posição em relação à faixa de circulação. Nas versões iniciais, o modelo identificou folhas, resíduos e veículos, informações pertinentes à gestão urbana, porém não consideradas no levantamento por seu caráter transitório. A partir da versão 6.0, com ajustes no arquivo de configuração para restringir a análise a obstáculos permanentes, observou-se aumento na acurácia do sistema.

Além da identificação dos objetos presentes na calçada, solicitou-se ao sistema que reconhecesse sua posição relativa, considerando que essa infraestrutura desempenha múltiplas funções, podendo acomodar mobiliário urbano, arborização e iluminação pública sem comprometer a acessibilidade, desde que a faixa livre mantenha largura e inclinação adequadas conforme a norma. Durante o levantamento, observou-se ainda que rampas de acesso de veículos configuram obstáculo com morfologia e impacto específicos sobre a circulação, o que justificou a inclusão de questão própria para esse elemento. Os resultados consolidados desta seção, incluindo o gráfico de acurácia correspondente, estão apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Gráfico de acurácia da seção 3 - Obstáculos e Objetos.

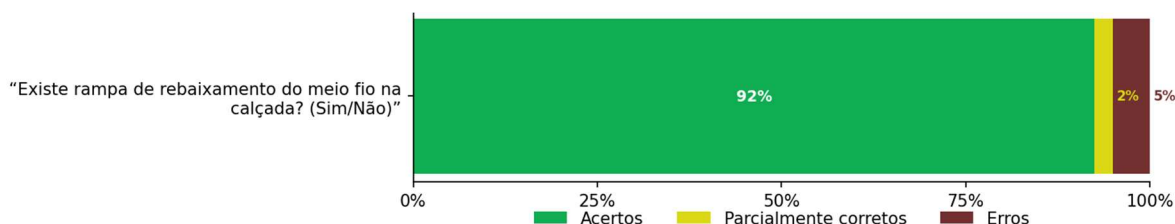


Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Na maior parte do percurso, os parâmetros analisados mantêm-se constantes; contudo, nas esquinas e travessias, introduz-se a exigência de rampas para rebaixamento do meio-fio, as quais possuem requisitos geométricos específicos quanto à inclinação, posicionamento em relação à via adjacente e área de manobra remanescente. Neste estudo, verificou-se apenas a identificação do elemento em

diferentes ângulos de captura. Considerando a totalidade da amostra, o sistema alcançou 92% de acertos; entretanto, como o parâmetro esteve presente em apenas oito imagens, a taxa de acerto dentro da amostra efetivamente representativa foi de 62%. O desempenho desta seção encontra-se sintetizado no gráfico de acurácia apresentado na Figura 40.

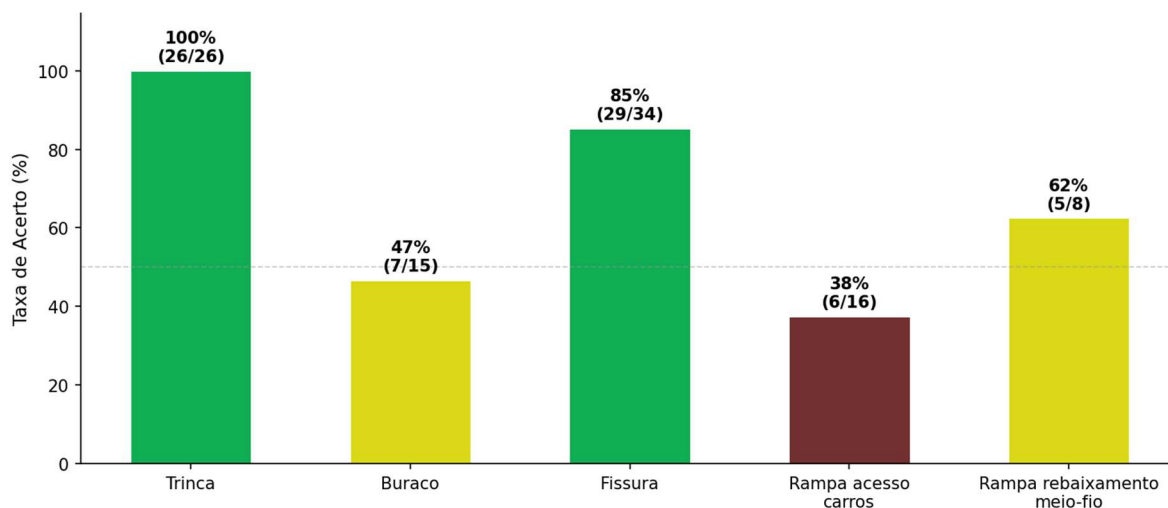
Figura 40 - Gráfico de acurácia da seção 4 - Elementos adicionais



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre as perguntas que apresentam respostas binárias, é importante destacar a acurácia total, ao poderem haver situações nas quais as patologias, elementos adicionais e obstáculos não estavam presentes sendo identificadas, e a acurácia em relação às imagens que apresentam estes elementos, que pode ser observada na Figura 41, nas quais o universo amostral foi limitado às respostas positivas.

Figura 41 - Acurácia das perguntas binárias representativas



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Além da rampa de rebaixamento do meio-fio, os demais parâmetros binários apresentaram acurácia de 100% para a identificação de trincas, 85% para a identificação de fissuras e 47% para a identificação de buracos. Quanto aos buracos, aqueles cobertos por vegetação não foram identificados dessa forma. Apenas 38%

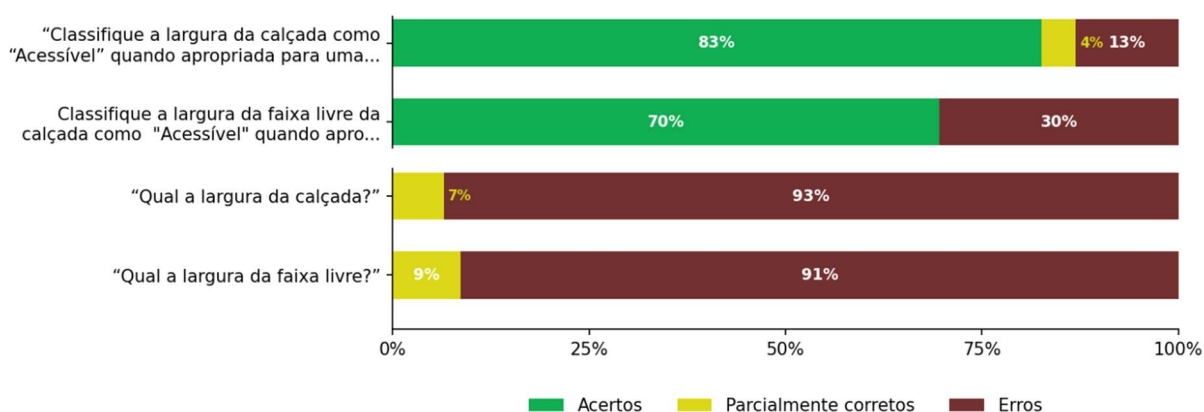
das rampas de acesso de veículos foram corretamente identificadas nas imagens, lembrando que para esse parâmetro foram consideradas apenas aquelas que interrompem a faixa livre.

Para a seção dedicada à medição quantitativa, foi considerada uma margem de tolerância de 10% para a avaliação da acurácia das questões com respostas numéricas. Conforme já mencionado na seção 3.5.3, o modelo apresenta uma correlação positiva entre os resultados e o local, porém, sua acurácia limitada pode gerar falsos positivos. Tal metodologia foi adotada na tentativa de tornar o sistema mais determinístico em relação às dimensões.

Após as questões numéricas, foram incluídas perguntas destinadas a classificar as dimensões como acessíveis ou inacessíveis, conforme os parâmetros da norma. O gráfico apresentado na Figura 41 sintetiza a proporção de imagens em que o sistema identificou calçadas com largura superior a 2,00 m e faixas livres superiores a 1,20 m. A mesma figura apresenta a taxa de acertos da seção quantitativa, avaliada pelo modelo juiz segundo os critérios de precisão e margem de erro descritos na Seção 3.5.2.

Nessa etapa, o sistema alcançou 83% de acerto quanto à largura da calçada e 70% quanto à largura da faixa livre, indicando capacidade de distinção entre calçadas mais amplas e mais estreitas, ainda que com limitações de precisão nas estimativas dimensionais.

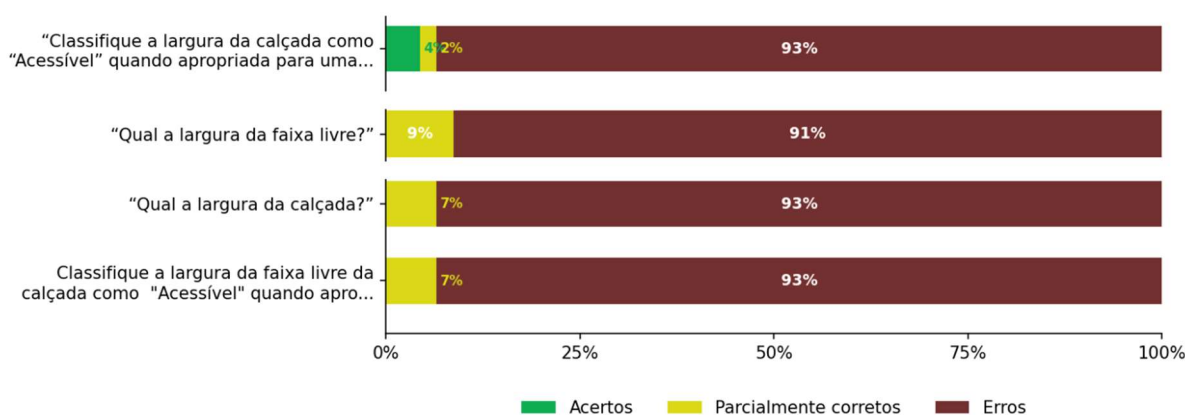
Figura 42 - Acurácia da seção de medição quantitativa avaliada pela LLM *as judge*



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A avaliação da LLM *as Judge* e a avaliação do pesquisador divergem amplamente nesta seção em relação às perguntas que consideram as medidas apresentadas pelo sistema, por considerar que as respostas fora do limite de tolerância encontram-se incorretas também na classificação, por representarem alto risco de gerarem falsos positivos. Porém, os resultados indicam que o aprimoramento do sistema em relação à extração das dimensões por geometria monocular pode aumentar a acurácia do sistema em relação às dimensões.

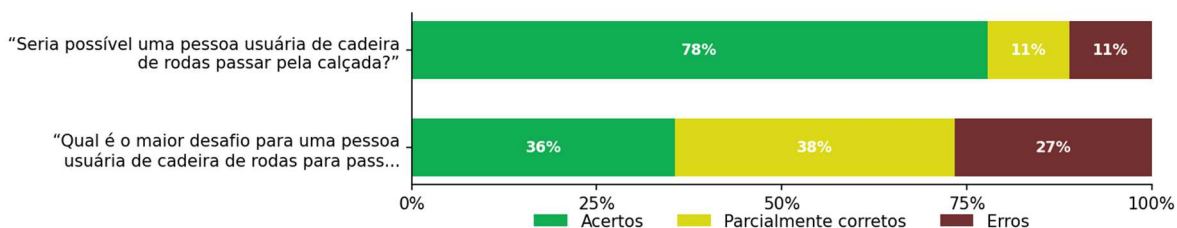
Figura 43 - Acurácia da seção de medição quantitativa quanto à LLM *as judge*



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O experimento foi desenvolvido para que cada elemento fosse avaliado individualmente e, posteriormente, o modelo avaliasse a acessibilidade global do ambiente construído representado nas imagens, considerando todos os fatores em conjunto. Foram consideradas tanto as respostas calculadas através do sistema *Sidewalk Analyzer* quanto às demais perguntas realizadas diretamente ao GPT 4.1 que combinadas resultam na seção 5, cujos resultados compõem o gráfico presente na Figura 44:

Figura 44 - Avaliação global



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A pergunta "seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?" foi respondida de maneira binária no formulário, porém a versão 8.2 traz

respostas como “possível com dificuldade” que frequentemente exprimem melhor as situações ambíguas encontradas no ambiente construído. O sistema apresentou 78% de acertos, 11% de respostas parcialmente corretas e 11% de erros nessa avaliação.

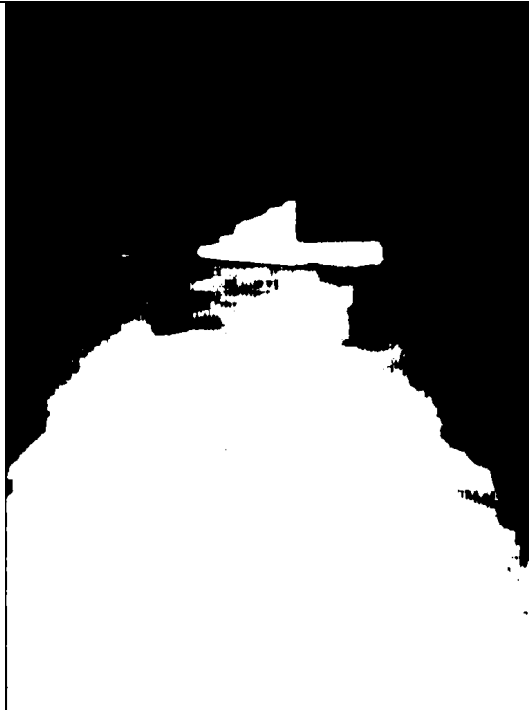
A pergunta correspondente ao maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas pode ser respondida por uma frase aberta objetiva, que também é resultado do processamento de todas as demais perguntas e obteve uma taxa de acertos de 36%. As respostas podiam encontrar-se incompletas ou apontar partes corretamente identificadas, somadas a desafios não identificados, que somaram 38% das respostas como parcialmente corretas, e as que não identificaram os desafios listados no levantamento ou apontaram desafios inexistentes representam 27% do total.

4.1.2. Análise de erros: causas e padrões recorrentes

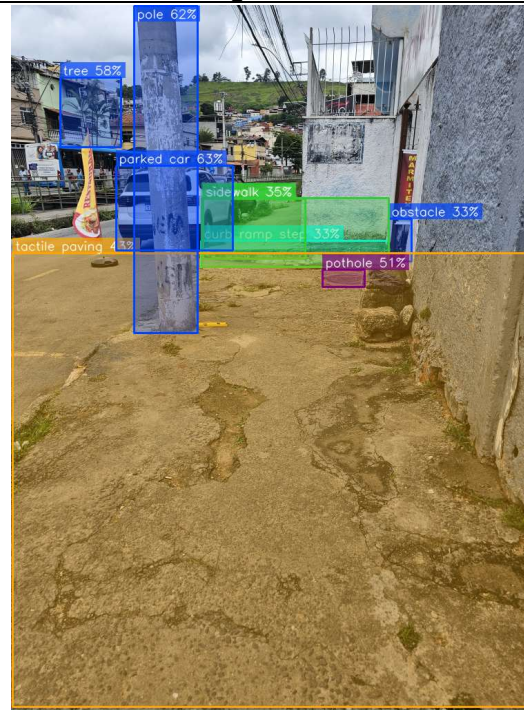
O sistema identifica corretamente a maior parte dos objetos, obstáculos e patologias construtivas presentes na calçada, distinguindo adequadamente os elementos situados na via daqueles efetivamente posicionados sobre o passeio. Contudo, a análise da posição relativa dos obstáculos em relação à faixa livre remanescente ainda constitui desafio relevante. Em diversas imagens que continham postes, árvores ou mobiliário alocados na faixa de serviço, o sistema indicou obstrução da passagem, mesmo quando o espaço livre atendia aos parâmetros normativos. O exemplo apresentado na Tabela 26 ilustra essa limitação: embora a calçada apresente irregularidades de superfície e interrupção longitudinal para acesso de veículos, corretamente identificadas, o sistema classificou o poste como obstáculo por estar “no meio da calçada”, desconsiderando que o espaço entre o poste e o mobiliário era suficiente para garantir circulação adequada.

Tabela 26 - Análise realizada pelo Sidewalk Analyzer para a imagem JF16b

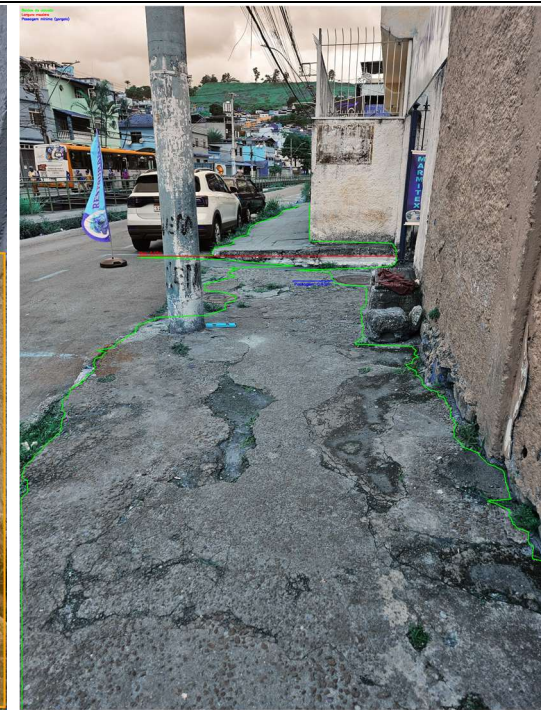
Imagem: JF16b



Máscara da calçada



Objetos identificados



Contorno da calçada

Experimento						
exp-v8.2						
03-Objetos e Obstáculos	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Avaliação Pesquisador	Justificativa (LLM)	Observações
“Existe rampa de acesso para carros que interrompe a faixa livre? (Sim ou Não)”	sim	Não, não há rampa de acesso para carros interrompendo a faixa livre. Não foi identificada nenhuma cunha ou rampa de garagem cruzando a faixa livre. Confiança: 8.	✗ Incorreto	✗ Incorreto	O sistema respondeu 'Não', mas o pesquisador respondeu 'Sim'.	O acesso de veículos na imagem encontra-se em nível com a rua, gerando uma interrupção total da calçada.
“Liste os obstáculos que obstruem a faixa livre da calçada objetivamente”	Degrau, trincas e buracos	O poste é um obstáculo que obstrui a faixa livre. Ele está posicionado no meio da faixa, reduzindo a passagem. Confiança: 10.	✗ Incorreto	✗ Incorreto	O sistema citou apenas o poste, enquanto o pesquisador listou degraus, trincas e buracos. O sistema não mencionou os principais obstáculos apontados	O poste não obstrui a faixa livre

"Liste os obstáculos que se encontram na calçada"	Poste, Mobiliário, Degrau, trincas e buracos	Os obstáculos na calçada são o poste e degraus de concreto próximos ao muro. Esses elementos dificultam a circulação. Confiança: 9.	⚠ Parcialmente correto	⚠ Parcialmente correto	pelo pesquisador. O sistema citou poste e degraus, mas deixou de mencionar mobiliário, trincas e buracos, que o pesquisador listou. Há sobreposição parcial.	
05-Avaliação Geral	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Avaliação Pesquisador	Justificativa (LLM)	Observações
"Seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?"	Não	Não seria possível passar facilmente em uma cadeira de rodas. A faixa livre é estreita e há obstáculos como o poste, além de superfície irregular. Confiança: 10. O maior desafio é a presença do poste na faixa livre e a superfície irregular. Esses fatores impedem a passagem segura e confortável de uma cadeira de rodas. Confiança: 10.	☑ Correto	☑ Correto	Ambos concordam que não seria possível passar em cadeira de rodas.	
"Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas para passar pela calçada?"	Degrau e buracos	Não seria possível passar facilmente em uma cadeira de rodas. A faixa livre é estreita e há obstáculos como o poste, além de superfície irregular. Esses fatores impedem a passagem segura e confortável de uma cadeira de rodas. Confiança: 10.	⚠ Parcialmente correto	⚠ Parcialmente correto	O sistema citou poste e superfície irregular, enquanto o pesquisador destacou degraus e buracos. Ambos mencionam obstáculos, mas não os mesmos.	O poste não interrompe a faixa livre

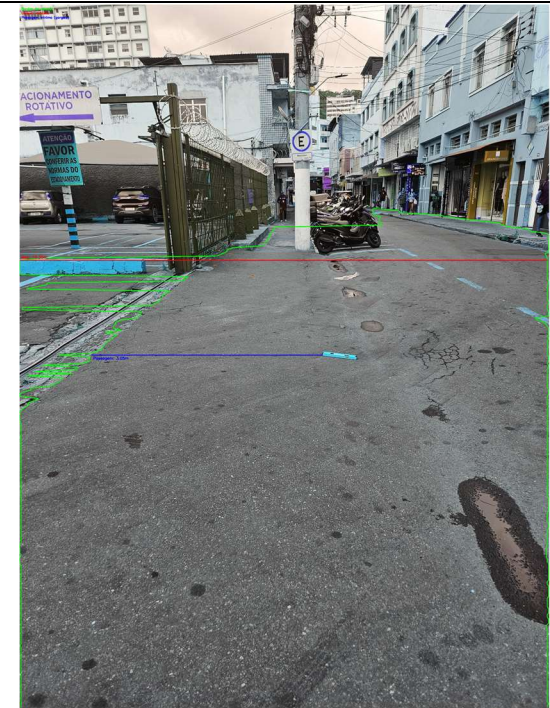
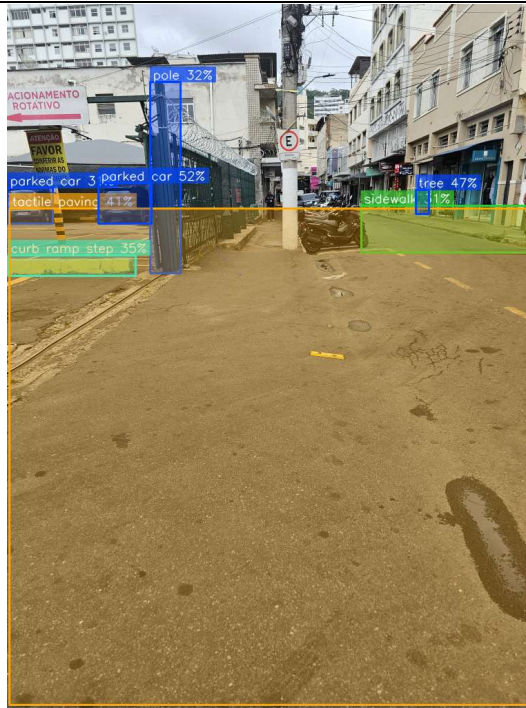
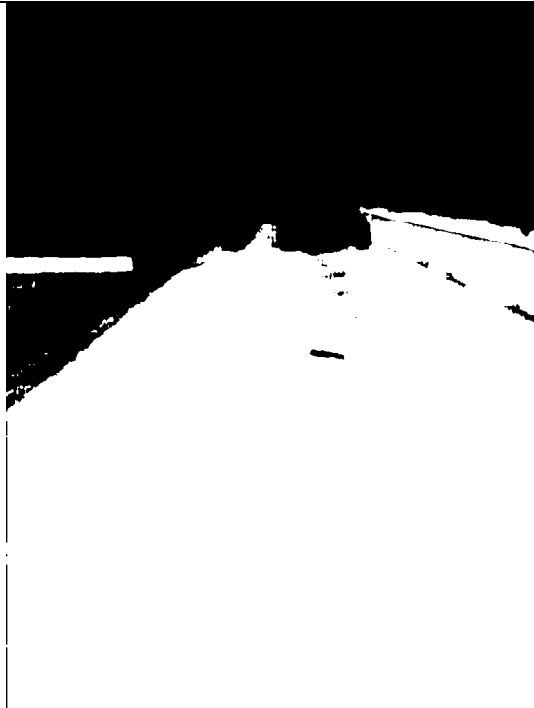
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A rampa de acesso de veículos que interrompe a passagem foi registrada no levantamento em 16 imagens e corretamente identificada em 37,5% dos casos em que esteve presente. As maiores dificuldades ocorreram quando sua configuração implicava interrupção total do passeio, gerando degrau, como na imagem JF16b, quando a abertura do imóvel não estava visível no enquadramento, como em JF20b; e quando toda a extensão da calçada apresentava inclinação contínua, como em JF10b. A análise detalhada desses casos encontra-se disponível no arquivo indicado no link: https://github.com/thaianecardoso/sidewalk_analyzer

Outro erro recorrente refere-se a calçadas executadas em asfalto. A continuidade material entre a via, o passeio e a área de estacionamento do imóvel lindeiro dificulta a delimitação precisa do contorno da calçada, comprometendo, em cascata, a aferição dos demais parâmetros, como exemplificado na imagem JF24b, apresentado a seguir na Tabela 27:

Tabela 27: Análise realizada pelo Sidewalk Analyzer para a imagem JF24b

Imagem: JF24b



Máscara da calçada

Objetos identificados

Contorno da calçada

Experimento

exp-v8.2

02-Medições Qualitativas	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Avaliação Pesquisador	Justificativa (LLM)	Observações
“Classifique a qualidade do revestimento da calçada com uma pontuação entre 1 e 10, sendo 1 para má qualidade e 10 para boa qualidade (considere a existência de fissuras, rachaduras e/ou buracos)”	6	A qualidade do revestimento é 4. Existem buracos visíveis e algumas imperfeições que prejudicam o deslocamento. Confiança: 7.	⚠️ Partial Match	⚠️ Partial Match	O sistema deu nota 4 e o pesquisador deu nota 6. Ambos indicam qualidade baixa a média, mas não há correspondência exata. Considerando a subjetividade da avaliação, é um match parcial.	
“Quais os materiais utilizados na superfície da calçada?”	Asfalto	O material da superfície é asfalto. A textura e cor indicam claramente o uso de asfalto na calçada. Confiança: 9.	✅ Exact Match	✅ Exact Match	Ambos identificaram o material como asfalto. Resposta exata.	

“Existe trinca na calçada? (Sim/Não)”	Não	Não existem trincas visíveis na calçada. Não foram identificadas trincas na superfície analisada. Confiança: 8.	✔ Exact Match	✔ Exact Match	Ambos responderam que não existem trincas. Resposta exata.
“Existe buraco na calçada? (Sim/Não)”	Não	Existem buracos na calçada. É possível observar buracos ao longo da faixa livre, o que pode dificultar o acesso. Confiança: 9.	✘ Incorrect	✘ Incorrect	O sistema identificou buracos, mas o pesquisador respondeu que não há buracos. Portanto, está incorreto.
“Existe fissura na calçada? (Sim/Não)”	Sim	Não existem fissuras na calçada. Não foram identificadas fissuras, apenas buracos e imperfeições maiores. Confiança: 8.	✘ Incorrect	✘ Incorrect	O sistema respondeu que não existem fissuras, mas o pesquisador respondeu que sim. Portanto, está incorreto.

03-Objetos e Obstáculos	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Avaliação Pesquisador	Justificativa (LLM)	Observações
“Existe rampa de acesso para carros que interrompe a faixa livre? (Sim ou Não)”	Sim	Não existe rampa de acesso para carros interrompendo a faixa livre. Não há cunha ou rampa de garagem cruzando a faixa livre nesta imagem. Confiança: 8.	✘ Incorrect	✘ Incorrect	O sistema respondeu que não existe rampa de acesso interrompendo a faixa livre, mas o pesquisador respondeu que sim. Portanto, está incorreto.	A continuidade do material entre a rua, calçada e estacionamento torna a identificação dos limites mais difícil
“Liste os obstáculos que obstruem a faixa livre da calçada objetivamente”	Não identificado	Os buracos são os principais obstáculos na faixa livre. Eles podem dificultar ou impedir o deslocamento seguro de cadeirantes. Confiança: 9.	✘ Incorrect	✘ Incorrect	O sistema identificou buracos como obstáculos, mas o pesquisador não identificou nenhum obstáculo. Portanto, está incorreto.	
“Liste os obstáculos que se encontram na calçada”	Não identificado	Os buracos são os principais obstáculos na calçada. Não há outros objetos permanentes ou desníveis significativos além dos buracos. Confiança: 9.	✘ Incorrect	✘ Incorrect	O sistema identificou buracos como obstáculos, mas o pesquisador não identificou nenhum obstáculo. Portanto, está incorreto.	
05-Avaliação Geral	Levantamento	Sistema	Avaliação (LLM)	Avaliação Pesquisador	Justificativa (LLM)	Observações
“Seria possível uma pessoa usuária de	Não	Seria possível passar,	✘ Incorrect	✘ Incorrect	O sistema disse que seria possível	

cadeira de rodas passar pela calçada?"	Inclinação transversal	mas com dificuldade. Os buracos podem dificultar ou até impedir a passagem segura de uma cadeira de rodas. Confiança: 8. O maior desafio são os buracos na faixa livre. Eles representam risco de queda e dificultam o deslocamento de cadeirantes. Confiança: 9.	passar, mas com dificuldade. O pesquisador respondeu que não seria possível. Portanto, está incorreto. O sistema apontou os buracos como maior desafio, enquanto o pesquisador indicou a inclinação transversal. Portanto, está incorreto.
"Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas para passar pela calçada?" Fonte: Elaborado pela autora (2026)		✗ Incorrect ✗ Incorrect	

Como se observa na imagem que apresenta a máscara da calçada em preto e branco, parte da via adjacente foi identificada como continuidade do passeio. Essa imprecisão de segmentação repercute nas respostas subsequentes: fissuras, buracos e trincas inexistentes no levantamento de campo são apontados pelo sistema, embora se localizem fora do espaço efetivamente destinado à calçada. No levantamento, também foram realizadas medições de inclinação transversal e longitudinal. Em situações nas quais toda a extensão do passeio se apresenta inclinada, o sistema demonstra dificuldade em classificar adequadamente esses casos, indicando limitação na distinção entre declividade normativa e irregularidade geométrica.

4.1.3. Relação entre a especificidade do estímulo e a precisão da resposta

Na versão 6.0, houve a necessidade de ajustar a precisão na descrição dos obstáculos identificados na calçada, uma vez que fissuras e folhas apontadas como obstáculos pelo sistema não representam barreiras relevantes para uma pessoa em cadeira de rodas. Dessa forma, foi adicionado ao arquivo de configuração que contém o contexto a ser analisado pela LLM com os parâmetros da norma, descrições mais detalhadas quanto aos obstáculos a serem considerados, que devem se restringir a obstáculos de grande porte e permanentes. A classificação de fissuras, trincas e buracos, assim como as irregularidades na superfície, foi separada dessa identificação de obstáculos para que houvesse alinhamento aos parâmetros utilizados no levantamento.

Tabela 27 - Experimento versão 6.0 quanto à especificidade

Imagem: JF02b			
Question	LLM Answer	Researcher Answer	Classification
"Liste os obstáculos que obstruem a faixa livre da calçada objetivamente"	Folhas, pequenas fissuras, árvores	Obstáculo não identificado	✘ Incorrect
"Liste os obstáculos que se encontram na calçada"	Árvores, folhas, pequenas fissuras	Árvore, Canteiro	⚠ Partial Match
"Seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?"	Possível, mas com dificuldade	Não	⚠ Partial Match
"Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas para passar pela calçada?"	Desviar das árvores e passar pelas fissuras e trincas no piso	Inclinação longitudinal	✘ Incorrect

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

4.2. Interpretação teórica dos resultados

A aplicação de modelos de linguagem com capacidade de visão computacional tem apresentado avanços significativos, e os resultados de precisão observados indicam potencial consistente para uso em contextos de monitoramento urbano. O modelo demonstrou desempenho promissor na identificação de patologias construtivas, interrupções do pavimento, desníveis, irregularidades superficiais e reconhecimento de objetos presentes na cena, evidenciando capacidade de leitura semântica do espaço físico.

Entretanto, a limitação na identificação da posição relativa dos elementos em relação à faixa livre revela um desafio estrutural da tecnologia: a compreensão espacial relacional. Essa dificuldade sugere que, embora a ferramenta seja adequada

para reconhecimento de objetos e atributos isolados, sua aplicação em avaliações normativas que dependem de análise geométrica contextual ainda demanda refinamento metodológico e técnico antes de ser plenamente incorporada como instrumento decisório.

Tecnologias de levantamento em larga escala, como sensoriamento remoto por satélite, uso de drones e veículos instrumentados, oferecem à gestão pública bases cartográficas amplas e sistemáticas. Contudo, a dinâmica cotidiana do espaço urbano exige atualização contínua e registros mais granulares, capazes de captar transformações pontuais e variações locais que escapam aos grandes mapeamentos periódicos.

Os resultados deste estudo indicam que a utilização isolada do GPT 4.1 pode implicar riscos operacionais, sobretudo por se tratar de um modelo generativo, sujeito a variações inferenciais nas respostas. Essa característica limita sua adoção como ferramenta única em processos formais de fiscalização. Por outro lado, a integração de diferentes modelos e camadas analíticas orientadas especificamente à avaliação da acessibilidade urbana revela potencial estratégico. A combinação entre segmentação espacial, mensuração geométrica e análise normativa automatizada pode ampliar a precisão das avaliações locais, aumentar a confiabilidade dos pareceres técnicos e contribuir para maior isonomia nos processos de aprovação e monitoramento de edificações e calçadas no âmbito municipal.

4.2.1. Desafios éticos, técnicos e regulamentares

A falta de uma cartilha que contenha maior quantidade de exemplos aplicáveis e que considere as condições locais, assim como a topografia acidentada do município, associada à falta de definição das rotas acessíveis, dificulta a avaliação no local, que pode trazer diversas situações não contempladas na norma atual.

A verificação in loco de todos os parâmetros de acessibilidade das calçadas, com métodos tradicionais, não é exigida pelo arcabouço legal, limitando a precisão dessa avaliação e prejudica a isonomia em relação aos contribuintes, uma vez que critérios diferentes podem ser aplicados a cada caso.

O uso de ferramentas de inteligência artificial e visão computacional não substitui a avaliação humana, porém, sua evolução poderá contribuir para uma análise mais precisa dos parâmetros de acessibilidade.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação de modelos de linguagem multimodal na inspeção da acessibilidade de calçadas, a partir da análise de imagens e da comparação sistemática entre resultados computacionais e medições realizadas in loco. Ao articular fundamentos normativos da NBR 9050, princípios de desenho universal e avanços recentes em visão computacional, o estudo posicionou-se na interseção entre inovação tecnológica e gestão urbana.

Os resultados indicam que o uso isolado de LLMs não é suficiente para assegurar uma auditoria técnica plenamente confiável. As limitações observadas, especialmente no que se refere à reconstrução geométrica e à interpretação da posição relativa de obstáculos, revelam restrições cognitivas ainda presentes nos modelos multimodais quando aplicados a tarefas espaciais finas. Contudo, a combinação de LLM realizando a extração geométrica por modelos auxiliares e estruturação de prompts orientados por parâmetros normativos, demonstrou potencial significativo para apoio à fiscalização pública.

Nesse sentido, a principal contribuição desta dissertação não reside apenas na mensuração da acurácia do modelo testado, mas na proposição de uma arquitetura metodológica replicável, capaz de evoluir com o avanço tecnológico. O estudo demonstra que a inteligência artificial pode atuar como instrumento complementar à análise humana, ampliando escala, sistematização e rastreabilidade dos processos de verificação normativa. As seções seguintes apresentam as limitações da investigação e delineiam caminhos para o aprofundamento científico e institucional dessa agenda.

5.1. Limitações do estudo

As limitações desta pesquisa decorrem tanto de condicionantes metodológicos quanto de restrições tecnológicas inerentes ao estágio atual dos modelos avaliados.

Do ponto de vista amostral, o levantamento foi realizado em 46 pontos selecionados de forma intencional, com o objetivo de representar situações adequadas, limítrofes e inadequadas segundo os parâmetros normativos. Embora suficiente para a validação experimental da metodologia proposta, o universo analisado não constitui amostra probabilística, o que impede generalizações

estatísticas para todo o município. A execução integral da coleta de dados pela autora, em prazo restrito, também limitou a ampliação territorial da investigação.

No plano técnico, a reconstrução geométrica a partir de imagens monoculares em ambiente externo revelou-se o principal desafio metodológico. A variação de profundidade, a ausência de limites definidos no plano de fundo e a interferência do ângulo e da orientação da câmera impactaram diretamente a precisão das medições quantitativas. Além disso, foram identificadas dificuldades recorrentes na interpretação da posição relativa de obstáculos em relação à faixa livre, aspecto crítico para a avaliação normativa da acessibilidade.

Por fim, cumpre reconhecer que modelos generativos multimodais apresentam variabilidade inferencial e suscetibilidade a imprecisões ou alucinações, especialmente em tarefas que exigem raciocínio espacial não mediado por linguagem. Embora o uso de um modelo juiz e a validação crítica do pesquisador tenham reduzido inconsistências, tais características reforçam que a tecnologia, em seu estado atual, não pode substituir a análise técnica especializada, devendo ser compreendida como ferramenta de apoio e não como instância decisória autônoma.

5.2. Recomendações para pesquisas futuras

Os resultados obtidos indicam que a agenda de pesquisa inaugurada por este estudo pode ser aprofundada em diferentes direções, tanto no plano metodológico quanto no tecnológico e institucional.

Em primeiro lugar, recomenda-se a ampliação e diversificação do universo amostral, com aplicação da metodologia em distintos contextos urbanos, incluindo bairros com diferentes padrões morfológicos, níveis de consolidação e condições topográficas. A realização de estudos comparativos intermunicipais permitirá testar a robustez do modelo frente a cenários variados, identificar padrões sistemáticos de erro e avaliar a estabilidade dos indicadores de desempenho.

No campo técnico, torna-se pertinente o desenvolvimento de abordagens híbridas que combinem modelos multimodais com técnicas complementares de reconstrução espacial, como múltiplas capturas por ponto, integração com modelos digitais de elevação ou sensores de profundidade. A incorporação de bases de dados rotuladas especificamente segundo os parâmetros da NBR 9050, por meio de processos de *fine-tuning* supervisionado, poderá contribuir para reduzir as limitações

observadas na interpretação da posição relativa de obstáculos e na estimativa de dimensões.

Outra frente relevante diz respeito à padronização dos protocolos de captura de imagem. Testes controlados envolvendo variações de ângulo, orientação, distância focal e enquadramento podem subsidiar a elaboração de diretrizes técnicas voltadas à fiscalização assistida por inteligência artificial. A consolidação desses protocolos é condição necessária para a escalabilidade da metodologia e para a redução da variabilidade inferencial do sistema.

No âmbito institucional, recomenda-se investigar a integração do sistema proposto a plataformas municipais de geoprocessamento e bancos de dados urbanos, possibilitando monitoramento contínuo e atualização sistemática das condições das calçadas. Estudos futuros devem contemplar análises de viabilidade operacional, governança de dados, rastreabilidade das decisões automatizadas e avaliação de custo-benefício em comparação aos métodos tradicionais de inspeção.

Por fim, sugere-se a expansão do escopo da metodologia para outros ambientes de uso coletivo obrigatório, especialmente espaços onde a menor variação de profundidade pode favorecer maior precisão geométrica. Tal ampliação permitirá avaliar a consistência do modelo em diferentes escalas espaciais e testar sua capacidade de adaptação a distintos conjuntos normativos.

Se, no estágio atual, a aplicação demonstrou limites técnicos claros, também evidenciou a possibilidade de estruturar um modelo de auditoria urbana assistida por inteligência artificial orientado por parâmetros normativos explícitos. O avanço dessa linha de investigação poderá contribuir para consolidar uma base metodológica replicável, capaz de aproximar inovação tecnológica e política pública em direção a processos decisórios mais transparentes, sistemáticos e fundamentados em evidências.

6 REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib. *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. 8. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2021. 160 p. ISBN 978-65-5580-031-9.

ACCESSMAP. AccessMap. Disponível em: <https://accessmap.net/>. Acesso em: 09 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9050:2020**. Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. ISBN 978-65-5659-371-5. Disponível em: https://drive.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/NBR9050_20.pdf. Acesso em: 17 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16537:2016**. *Design universal* — Aplicação de princípios de projeto de produtos, ambientes, programas e serviços para todos os usuários. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Disponível em: <https://drive.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/NBR%2016537.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Política Urbana. *Padrão de passeios de Belo Horizonte: cartilha ilustrativa*. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/informacoes/passeios>. Acesso em: dia 29 nov. 2023.

BEZERRA, Luíza Cavalcanti. A natureza jurídica das calçadas urbanas e a responsabilidade primária dos Municípios quanto à sua feitura, manutenção e adaptação para fins de acessibilidade. 2012. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/a-natureza-juridica-das-calcadas-urbanas.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979**. Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1979. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **Constituição (1988)**. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 30 nov. /2025.

BRASIL. **Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997**. *Código de Trânsito Brasileiro*. Consolidação atualizada. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm. Acesso em: 16 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 10.098, de 19 de dezembro de 2000**. Dispõe sobre normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas com deficiência ou

com mobilidade reduzida. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20 dez. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l10098.htm. Acesso em: 16 jan 2026.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Estabelece diretrizes gerais da política urbana. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em: 5 ago 2024.-+

BRASIL. **Código Civil (Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002)**. Consolidação atualizada. *Diário Oficial da União: Brasília, DF*, 2002. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/l10406compilada.htm. Acesso em: 11 nov. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012**. Dispõe sobre as **diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana**. *Diário Oficial da União: Brasília, DF*, 4 jan. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: 09 dez. 2025.

BRASIL. **Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015**. Institui a *Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência)*. *Diário Oficial da União: Brasília, DF*, 7 jul. 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm. Acesso em: 16/01/2016.

BRASIL. Decreto nº 9.451, de 26 de julho de 2018. Regulamenta dispositivos da legislação federal. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 27 jul. 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9451.htm. Acesso em: 30 set. 2025.

BROWN, Tom B. *et al. Language models are few-shot learners* [Modelos de linguagem são aprendizes few-shot]. arXiv preprint arXiv:2005.14165, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.14165>. Acesso em: 5 ago. 2024.

CAF – Banco de Desenvolvimento da América Latina. **Caso Medellín: Como realizar projetos urbanos integrais?** 2014. Disponível em: <https://www.caf.com/pt/presente/noticias/caso-medellin-como-realizar-projetos-urbanos-integrais/>. Acesso em: 04 jan. 2026

CASTRO, G. G. de, Camargos, A. S., & Farias, M. S. . Barreiras de acessibilidade urbana: cotidiano das famílias de crianças com deficiências neurológicas. *Revista Família, Ciclos De Vida E Saúde No Contexto Social*, 8, 694–701, 2020. <https://doi.org/10.18554/refacs.v8i0.4744>

CÂMARA MUNICIPAL (Juiz de Fora). Comunicação (org.). **Câmara participa do lançamento do Programa Nova Juiz de Fora**. 2010. Disponível em: <https://www.camarajf.mg.gov.br/www/noticias/exibir/5117/Camara-participa-do-lancamento-do-Programa-Nova-Juiz-de-Fora.html>. Acesso em: 25 nov. 2025

CHEN, Liang; XIE, Weichu; LIANG, Yiyan; HE, Hongfeng; ZHAO, Hans; YANG, Zhibo; HUANG, Zhiqi; WU, Haoning; LU, Haoyu; BAO, Yiping; FAN, Yuantao; LI, Guopeng; SHEN, Haiyang; CHEN, Xuanzhong; XU, Wendong; SI, Shuzheng; CAI,

Zefan; CHAI, Wenhao; HUANG, Ziqi; LIU, Fangfu; LIU, Tianyu; CHANG, Baobao; HU, Xiaobo; CHEN, Kaiyuan; REN, Yixin; LIU, Yang; GONG, Yuan; LI, Kuan. **BabyVision: visual reasoning beyond language**. *BabyVision: Raciocínio visual além da linguagem*. arXiv, 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2601.06521>. Acesso em: 15 jan. 2026.

GALPERIN, Ron. City of Los Angeles Controller. Audits – Sidewalks, 2021. Disponível em: <https://controller.lacity.gov/audits/sidewalks>. Acesso em: 21 jan. 2026.

FLORIANÓPOLIS (Mun.). **Lei Complementar nº 482, de 17 de janeiro de 2014**. Institui o Plano Diretor de Urbanismo do Município de Florianópolis que dispõe sobre a política de desenvolvimento urbano, o plano de uso e ocupação, os instrumentos urbanísticos e o sistema de gestão. *Leis Municipais de Florianópolis*, 17 jan. 2014. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sc/f/florianopolis/lei-complementar/2014/48/482/lei-complementar-n-482-2014-institui-o-plano-diretor-de-urbanismo-do-municipio-de-florianopolis-que-dispoe-sobre-a-politica-de-desenvolvimento-urbano-o-plano-de-uso-e-ocupacao-os-instrumentos-urbanisticos-e-o-sistema-de-gestao>. Acesso em: 16/01/2026

GADELHA, Hugo Sarmiento *et al.* Lei brasileira de inclusão da pessoa com deficiência: modificações no código civil e conquistas sociais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e35011225444, 27 jan. 2022.

GAO, Peng; HAN, Jiaming; ZHANG, Renrui; LIN, Ziyi; GENG, Shijie; ZHOU, Aojun; ZHANG, Wei; LU, Pan; HE, Conghui; YUE, Xiangyu; LI, Hongsheng; QIAO, Yu. *LLaMA-Adapter V2: Parameter-Efficient Visual Instruction Model* [LLaMA-Adapter V2: modelo de instruções visuais eficiente em parâmetros]. arXiv preprint arXiv:2304.15010, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2304.15010>. Acesso em: 13 fev. 2025].

GAO, Luyu; MADAAN, Aman; ZHOU, Shuyan; ALON, Uri; LIU, Pengfei; YANG, Yiming; CALLAN, Jamie; NEUBIG, Graham. PAL: Program-aided language models [PAL: modelos de linguagem assistidos por programa]. arXiv preprint arXiv:2211.10435, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2211.10435>. Acesso em: 15 jan. 2026.

GE, Mengpin; FRIEDRICH, Johannes; VIGNA, Leandro, 4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor, WRI Brasil, 28 Fev 2020, Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Emissoes_de_gases_de_efeito_estufa&utm_content=4_graficos_para_entender_as_emissoes_de_gases_de_efeito_estufa_por_pais_e_por_setor&utm_term=efeito%20estufa&gad_source=1&gad_campaignid=13922542063&gbraid=0AAAAADPBcM00Mh9C6zbcGfVTzgF_D5Laa&gclid=CjwKCAiA86_JBhAIEiwA4i9Ju9f6cTvK-lybVksb1ioLxuOrpg5v5UrLWADsSWJq2b4HOXTGM9GgCxoCZvkQAvD_BwE. Acesso em 01/12/2025

GEHL, Jan. *Cidades para pessoas [Cities for people]*. São Paulo: Perspectiva, 2013a. 280 p. ISBN 978-85-273-0980-6

GEHL, Jan; SVARRE, Birgitte. *How to study public life* [Como estudar a vida pública]. Washington, DC: Island Press, 2013b. DOI: 10.5822/978-1-61091-525-0.

GIL, Antônio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GLOBAL DESIGNING CITIES INITIATIVE. *Pedestrian streets case study: Strøget, Copenhagen*. Disponível em: <https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide/streets/pedestrian-priority-spaces/pedestrian-only-streets/pedestrian-streets-case-study-stroget-copenhagen/>. Acesso em: 20 jan. 2026

HARVEY, David. *A produção capitalista do espaço*. Tradução de Carlos Szlak. São Paulo: Annablume, 2005. 251 p.

HARIRI, Walid. *Unlocking the potential of ChatGPT: a comprehensive exploration of its applications, advantages, limitations, and future directions in natural language processing* [Desvendando o potencial do ChatGPT: uma exploração abrangente de suas aplicações, vantagens, limitações e direções futuras no processamento de linguagem natural]. 27 mar. 2023.

HOWE, Bill *et al.* *Integrative urban AI to expand coverage, access, and equity of urban data* [IA urbana integrativa para expandir cobertura, acesso e equidade dos dados urbanos]. **The European Physical Journal: Special Topics**, v. 231, n. 9, p. 1741–1752, jul. 2022. DOI: 10.1140/epjs/s11734-022-00475-z.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Pirâmide etária*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18318-piramide-etaria.html>. Acesso em: 11 jan. 2026

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2010: resultados gerais. Rio de Janeiro, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/23/26170?detalhes=true>. Acesso em: 13 dez. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2010: resultados gerais. Rio de Janeiro, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/23/26170?detalhes=true>. Acesso em: 13 dez. 2023

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Censo Demográfico 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 13 dez. 2023.

IBRAHIM, Mohamed R.; HAWORTH, James; CHENG, Tao. *Understanding cities with machine eyes: a review of deep computer vision in urban analytics* [Compreendendo as cidades com olhos de máquina: uma revisão da visão computacional profunda na análise urbana]. **Cities**, v. 96, p. 102481, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.cities.2019.102481.

JACOBS, Jane. *Morte e vida de grandes cidades*. Tradução de Carlos S. Mendes Rosa. 3. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2011. 532 p.

JUIZ DE FORA. Departamento de Pesquisa e Geoprocessamento - Dpgeo. .Pontos de atenção.**Secretaria de Planejamento Urbano - Sepur**, 2024. Disponível em: <https://sisurb.pjf.mg.gov.br/portal/apps/sites/#/sisurb-geohub/apps/db5acefc2be3424db76f705458687367/explore>. Acesso em: 29 dez. 2025.

JUIZ DE FORA. Departamento de Pesquisa e Geoprocessamento (Dpgeo)- Mapeamento geoespacial das pessoas com deficiência/TEA.. **Secretaria de Planejamento Urbano - Sepur**, 2024. Disponível em: <https://sisurb.pjf.mg.gov.br/portal/sharing/oauth2/signin>. Acesso em: 15 dez. 2025.

JUIZ DE FORA. Departamento de Inteligência Tecnológica em Arrecadação (Dita)- **Dados Vetoriais municipais**. Protocolo de assuntos Diversos. Juiz de Fora, 2024. Disponível em: <https://juizdefora.1doc.com.br/atendimento>. Acesso em: 30/04/2024

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 6.908, de 4 de junho de 1986a**. Dispõe sobre o parcelamento do solo no Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/1986/6908>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 6.909, de 31 de maio de 1986b**. Dispõe sobre o Código de Obras do Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/1986/6909>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 6.910, de 31 de maio de 1986c**. Dispõe sobre o uso e a ocupação do solo no Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/1986/6910>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 10.410, de 20 de março de 2003**. Institui a Lei Orgânica do Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-organica/2003/10410>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 10.851, de 16 de dezembro de 2004**. Dispõe sobre normas urbanísticas no Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/2004/10851>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 11.197, de 3 de agosto de 2006**. Institui o Código de Posturas do Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/2006/11197>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 12.530, de 19 de abril de 2012**. Dispõe sobre diretrizes urbanísticas no Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/2012/12530>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Decreto nº 11.342, de 21 de setembro de 2012b.** Regulamenta dispositivos da legislação urbanística municipal. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/decreto/2012/11342>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 13.496, de 21 de fevereiro de 2017.** Dispõe sobre alterações na legislação urbanística municipal. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/2017/13496>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei Complementar nº 88, de 3 de dezembro de 2018.** Dispõe sobre normas complementares de ordenamento territorial. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-complementar/2018/88>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei nº 14.003, de 16 de janeiro de 2020.** Dispõe sobre diretrizes urbanas no Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-ordinaria/2020/14003>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Decreto nº 14.480, de 13 de abril de 2021.** Regulamenta dispositivos da legislação urbanística municipal. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/decreto/2021/14480>. Acesso em: 30 set. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **Compilação da legislação urbana.** Juiz de Fora, 2019. Disponível em: https://www.pjf.mg.gov.br/leis_urbanas/compilacao.php. Acesso em: 24 dez. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Decreto nº 15.003, de 2 de fevereiro de 2022.** Regulamenta normas urbanísticas municipais. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/decreto/2022/15003>. Acesso em: 30 set. 2025. 24 dez. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei Complementar nº 245, de 5 de julho de 2024.** Dispõe sobre normas urbanísticas complementares no Município de Juiz de Fora. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-complementar/2024/245>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Lei Complementar nº 247, de 9 de agosto de 2024b.** Dispõe sobre ajustes no sistema de planejamento urbano municipal. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/lei-complementar/2024/247>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (Mun.). **Decreto nº 17.467, de 22 de setembro de 2025.** Regulamenta dispositivos da legislação urbanística municipal. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/j/juiz-de-fora/decreto/2025/17467>. Acesso em: 30 set. 2025.

JUIZ DE FORA (MG). **Lei complementar nº 164, de 30 de maio de 2022**. Dispõe sobre a regularização de construções, reformas, modificações ou ampliações de edificações realizadas sem prévia licença da Prefeitura de Juiz de Fora e que não se enquadram nas Leis Municipais nº 6.909 e nº 6.910, de 31 de maio de 1986. Juiz de Fora, Câmara Municipal de Juiz de Fora, 31 maio 2022. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/mg/j/juiz-de-fora/lei-complementar/2022/16/164/lei-complementar-n-164-2022-dispoe-sobre-a-regularizacao-de-construcoes-reformas-modificacoes-ou-ampliacoes-de-edificacoes-realizadas-sem-previa-licenca-da-prefeitura-de-juiz-de-fora-e-que-nao-se-enquadram-nas-leis-municipais-ns-6909-e-6-910-de-31-de-maio-de-1986>. Acesso em: 24 dez. 2025.

JUIZ DE FORA (MG). **Lei complementar nº 245, de 2024**. Dispensa a solicitação de alvará de licença e estabelece normas para execução de pequenas reformas. Juiz de Fora, Câmara Municipal de Juiz de Fora, 2024. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/mg/j/juiz-de-fora/lei-complementar/2024/25/245/lei-complementar-n-245-2024-dispensa-a-solicitacao-de-alvara-de-licenca-e-estabelece-normas-para-execucao-de-pequenas-reformas?q=245%2F2024>. Acesso em: 24 dez. 2025.

JUIZ DE FORA (MG). **Lei complementar nº 247, de 2024**. Altera o artigo 68-A da Lei nº 6.909, de 31 de maio de 1986. Juiz de Fora, Câmara Municipal de Juiz de Fora, 2024. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/mg/j/juiz-de-fora/lei-complementar/2024/25/247/lei-complementar-n-247-2024-altera-o-artigo-68-a-da-lei-6909-de-31-de-maio-de-1986?q=247%2F2024>. Acesso em: 24 dez. 2025.

LECUN, Yann; BENGIO, Yoshua; HINTON, Geoffrey. Deep learning. *Nature*, [S.l.], v. 521, p. 436–444, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14539>

LEFEBVRE, Henri. *O direito à cidade*. Tradução de Rubens Eduardo Ferreira Frias. 5. ed. São Paulo: Centauro Editora, 2008. 144 p. ISBN 8588208970.

LI, Yan et al. Estimating building age from Google Street View images using deep learning [Estimativa da idade de edificações a partir de imagens do Google Street View usando aprendizado profundo] **INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE (GISCIENCE): Proceedings in Informatics Schloss Dagstuhl**, ed 40, p 40:1-40-7 .2018. Disponível em: <https://drops.dagstuhl.de/storage/00lipics/lipics-vol114-giscience2018/LIPIcs.GISCIENCE.2018.40/LIPIcs.GISCIENCE.2018.40.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

LING, Anthony. *Pela estatização da calçada*. Caos Planejado, 19 jan. 2026. Disponível em: <https://caosplanejado.com/pela-estatizacao-da-calcada-2/>. Acesso em: 22 jan. 2026.

LIU, Ziyu et al. *Viability of photovoltaic highways for urban traffic: estimation of solar energy from Street View images* [Viabilidade de rodovias fotovoltaicas para o tráfego urbano: estimativa de energia solar a partir de imagens do Street View]. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 303–318, 10 ago. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619312743>. Acesso em: 11 fev. 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.

LYNCH, Kevin. *A imagem da cidade*. Lisboa: Edições 70, 2011.

MAKEABILITY LAB. *Sidewalk: projects*. Seattle: University of Washington, 2025. Disponível em: <https://makeabilitylab.cs.washington.edu/project/sidewalk/>. Acesso em: 22 nov. 2025.

MOONEY, Stephen J. *et al.* Desenvolvimento e validação de uma ferramenta de auditoria de segurança para pedestres baseada no Google Street View. **Epidemiology**, v. 31, n. 2, p. 301–309, 1 mar. 2020.

NEW YORK (Cidade). Department of Transportation. **Sidewalks**. Disponível em: <https://www.nyc.gov/html/dot/html/infrastructure/sidewalkintro.shtml>. Acesso em: 20 jan. 2026.

NGUYEN, Quynh C. *et al.* Espelho da vizinhança: caracterização automatizada em 360° do ambiente construído para pesquisas sobre efeitos de vizinhança. **Journal of Epidemiology and Community Health**, v. 72, n. 3, p. 260–266, 1 mar. 2018.

NING, H.; LI, Z.; YE, X.; WANG, S.; WANG, W.; HUANG, X. Exploração da dimensão vertical de imagens do Street View com base em aprendizado profundo: estudo de caso sobre a estimativa da elevação do pavimento térreo. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 36, n. 7, p. 1317–1342, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. *Convenção sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência*. Nova York, 2006. Promulgada no Brasil pelo **Decreto nº 6.949, de 25 de agosto de 2009**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6949.htm. Acesso em: 04 ago. 2024.

OPENAI. Boas práticas para engenharia de prompts com a API da OpenAI: Como fornecer instruções claras e eficazes aos modelos da OpenAI. São Francisco, 2024. Disponível em: <https://help.openai.com/en/articles/6654000-best-practices-for-prompt-engineering-with-the-openai-api>. Acesso em: 5 ago. 2024.

OpenAI. "ChatGPT 4 é uma inteligência artificial de linguagem natural desenvolvida pela OpenAI, que usa uma arquitetura de rede neural para gerar respostas a perguntas feitas por usuários." Acesso em 18 de abril de 2023. (<https://openai.com/blog/chat-gpt-3-launch/>)

OPENCV. *OpenCV — Open Source Computer Vision Library*. Disponível em: <https://opencv.org/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

PLIAKAS, Triantafyllos *et al.* Optimising measurement of health-related characteristics of the built environment: Comparing data collected by foot-based street audits, virtual street audits and routine secondary data sources. **Health and Place**, v. 43, p. 75–84, 1 jan. 2017.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. *Prefeitura lança oficialmente Plano Municipal de Calçadas e normas para manutenção e construção de passeios públicos*. Secretaria Municipal de Obras e Viação. Porto Alegre, [2013?]. Disponível em: https://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/smov/default.php?p_secao=121. Acesso em: 22 jan. 2026.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. *SP amplia programa de manutenção e qualificação de calçadas e acessibilidade urbana*. Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://prefeitura.sp.gov.br/web/se/w/noticias/78930>. Acesso em: 22 jan. 2026.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. *Prefeitura disponibiliza mapa online das calçadas requalificadas na cidade*; Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento. São Paulo, 16 set. 2021. Disponível em: <https://prefeitura.sp.gov.br/web/licenciamento/w/noticias/318047>. Acesso em: 30 set. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA- Portal de notícias. Programa Nova Juiz de Fora – Obras de remodelação de calçadas seguem na Rua Santo Antônio. Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=29952>. Acesso em: 08 jan. 2026.

RAVI, Nikhila; GABEUR, Valentin; HU, Yuan-Ting; HU, Ronghang; RYALI, Chaitanya; MA, Tengyu; KHEDR, Haitham; RÄDLE, Roman; ROLLAND, Chloe; GUSTAFSON, Laura; MINTUN, Eric; PAN, Junting; ALWALA, Kalyan Vasudev; CARION, Nicolas; WU, Chao-Yuan; GIRSHICK, Ross; DOLLÁR, Piotr; FEICHTENHOFER, Christoph. *SAM 2: Segment Anything in Images and Videos* [SAM 2: segmentar qualquer coisa em imagens e vídeos]. arXiv preprint arXiv:2408.00714, 1 ago. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2408.00714>. Acesso em: 22 jan. 2026.

RZOTKIEWICZ, Agnieszka; PEARSON, Amber L.; DOUGHERTY, Brian V.; SHORTRIDGE, Ashton; WILSON, Nick. *Systematic review of the use of Google Street View in health research: major themes, strengths, weaknesses and possibilities for future research* [Revisão sistemática do uso do Google Street View em pesquisas em saúde: principais temas, pontos fortes, limitações e possibilidades para pesquisas futuras]. **Health & Place**, v. 52, p. 240–246, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.healthplace.2018.07.001.

SACRAMENTO, João et al. *Dendritic cortical microcircuits approximate the backpropagation algorithm* [Microcircuitos corticais dendríticos aproximam o algoritmo de retropropagação]. arXiv preprint arXiv:1810.11393, 2018.

SANTOS, Luana Maria dos. **Processo de constituição da Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência: a influência dos atores sociais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.

VASWANI, Ashish et al. Attention Is All You Need. 12 jun. 2017.

WANG, Chenglong; ZHOU, Hang; CHANG, Kaiyan; LIU, Tongran; ZHANG, Chunliang; YANG, Murun; DU, Quan; XIAO, Tong; ZHANG, Yue; ZHU, Jingbo. Learning evaluation models from large language models for sequence generation.

arXiv preprint arXiv:2308.04386v3, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2308.04386>. Acesso em: 09 jan. 2026.

WASHINGTON (District of Columbia). *DC Official Code § 9-401.06* (2025). Disponível em: <https://code.dccouncil.gov/us/dc/council/code/sections/9-401.06>. Acesso em: 30 set. 2025.

WHEELMAP. About Wheelmap,2010. Disponível em: <https://news.wheelmap.org/en/about-wheelmap/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

YANG, Juncheng *et al.* O impacto financeiro da vegetação ao nível da rua nos edifícios comerciais de Nova Iorque. **Landscape and Urban Planning**, v. 214, 1 out. 2021.

ZANDOMENECO, Ingrid Etges. Calçada certa. Florianópolis: **IPUF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis**, 2019. 27 p.

ZHANG, Fan *et al.* Urban Visual Intelligence: Studying Cities with AI and Street-level Imagery. 2 jan. 2023.

ZHANG, Liying *et al.* Quantifying the urban visual perception of Chinese traditional-style building with street view images. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 17, 1 set. 2020.

ZHENG, L., Chiang, W.-L., Sheng, Y., Zhuang, S., Wu, Z., Zhuang, Y., Lin, Z., Li, Z., Li, D., Xing, E. P., Zhang, H., Gonzalez, J. E., & Stoica, I. (2023). Judging LLM-as-a-Judge with MT-Bench and Chatbot Arena. arXiv:2306.05685.

ANEXO I - VERSÃO 3 UTILIZANDO O MODELO GPT-4O COM TEMPERATURA 0

Imagem	JF02b	Modelo utilizado GPT-4o	Temperatura 0	Modelo utilizado GPT-4o	Temperatura 0
Pergunta	Levantamento	Resposta do sistema	Classificação	Resposta do sistema	Classificação
“Classifique a largura da calçada como “Acessível” quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou Não Acessível caso contrário.”	2,32	Não Acessível	Incorreto	Acessível	Correspondente
Classifique a largura da faixa livre da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário.”	1,41	Não Acessível	Incorreto	Acessível	Correspondente
Classifique a inclinação longitudinal da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário.”	5,7	Acessível	Correspondente	Acessível	Correspondente
Classifique a inclinação transversal da calçada como "Acessível" quando apropriada para uma pessoa em cadeira de rodas ou "Não Acessível" caso contrário.”	1,27	Acessível	Correspondente	Acessível	Correspondente
“Classifique a qualidade do revestimento da calçada com uma pontuação entre 1 e 10, sendo 1 para má qualidade e 10 para boa qualidade (considere a existência de fissuras, rachaduras e/ou buracos)”	8	4	Correspondente	6	Incorreto
“Quais os materiais utilizados na superfície da calçada?”	Concreto	Concreto	Correspondente	Concreto	Correspondente
“Existe trinca na calçada? (Sim/Não)”	Sim	Sim	Correspondente	Sim	Correspondente
“Existe buraco na calçada? (Sim/Não)”	Não	Não	Correspondente	Não	Correspondente
“Existe fissura na calçada? (Sim/Não)”	Sim	Sim	Correspondente	Sim	Correspondente
“Existe rampa de acesso para carros que interrompe a faixa livre? (Sim ou Não)”	Não	Não	Correspondente	Não	Correspondente
“Liste os obstáculos que obstruem a faixa livre da calçada objetivamente”	Obstáculo não identificado	Árvores, folhas	Incorreto	Folhas	Correspondência parcial

“Liste os obstáculos que se encontram na calçada”	Árvore, Canteiro	Árvores, folhas	Correspondência parcial	Árvores, Folhas	Correspondência parcial
“Existe rampa de rebaixamento do meio fio na calçada? (Sim/Não)”	Não	Não	Corresponde	Não	Correspondente
“Seria possível uma pessoa usuária de cadeira de rodas passar pela calçada?”	Sim	Não	Incorreto	Sim	Incorreto
“Qual é o maior desafio para uma pessoa usuária de cadeira de rodas para passar pela calçada?”	Inclinação longitudinal	Árvores e largura insuficiente da faixa livre	Incorreto	Fissuras e trincas na calçada	Incorreto

Fonte: Elaborado pela autora (2026).