

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Bruno Gaspar Penna Roseno

**Avaliação experimental do deterioramento mecânico do concreto
causado por perfurações**

Juiz de Fora
2025

Bruno Gaspar Penna Roseno

**Avaliação experimental do deterioramento mecânico do concreto
causado por perfurações**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Flávio de Souza Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Juiz de Fora

2025

Bruno Gaspar Penna Roseno

**Avaliação experimental do deterioramento mecânico do concreto
causado por perfurações**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 31 de Março de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio de Souza Barbosa - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
Universidade Federal de Minas Gerais

Profa. Dra. Maria Ávila Branquinho
Universidade Federal de Juiz de Fora

Bruno Gaspar Penna Roseno

Título: Avaliação experimental do deterioramento mecânico do concreto causado por perfurações

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais

Aprovada em 31 de março de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio de Souza Barbosa - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Maria Ávila Branquinho -Membro titular interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior - Membro titular Externo
Universidade Federal de Minas Gerais

Juiz de Fora, 01/04/2025.



Documento assinado eletronicamente por Antônio Neves de Carvalho Júnior, Usuário Externo, em 02/04/2025, às 00:16, 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 Flavio de Souza Barbosa, Professor(a), em 03/04/2025, às 14:25, 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 Maria Avila Branquinho, Professor(a), em 03/04/2025, às 18:09, 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 Pedro Kopschitz Xavier Bastos, Professor(a), em 04/04/2025, às 14:06, 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 2327315 e o código CRC 3FCE889A.

Dedico esta tese a Deus, que transformou
cada suspiro de inquietação em um sopro de
inspiração

AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade de conclusão desta etapa.

A Deus, por me conceder saúde, discernimento e forças para superar cada desafio ao longo desta caminhada acadêmica. Sem Sua graça e misericórdia, nada disso seria possível.

À minha esposa, pelo amor e paciência ao longo desta jornada. Agradeço por cada sorriso, cada palavra de motivação, cada gesto de carinho. Incontáveis vezes, sua compreensão foi meu alento nos momentos de necessidade. Houve momentos em que a ausência se fez presente, mas seu apoio sempre me manteve firme. Em cada conquista, seu nome ecoa como um troféu invisível. Sua força me impulsionou a superar meus limites, permitindo que eu alcançasse meus objetivos. Obrigado por ser meu alicerce, minha inspiração, meu sustento. Agradeço por trilharmos juntos este caminho, lado a lado, preenchendo cada instante com amor e cumplicidade.

À minha família, por sempre acreditarem em mim, pelos valores transmitidos, por cada palavra de incentivo e por serem minha base sólida. O suporte e a confiança depositada em mim foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Ao meu orientador e coorientador, pela paciência, dedicação e por terem acreditado neste trabalho desde o início. Pelas valiosas orientações, pelos ensinamentos transmitidos e por todo apoio ao longo desta trajetória.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero agradecimento.

“A sabedoria pertence à apreensão intelectual das coisas eternas, para conhecimento, a compreensão racional das coisas temporais” (AGOSTINHO, S. La Trinità. Roma: Città Nuova, 1998).

RESUMO

A presença de furos em peças de concreto armado, necessários para diversos fins, é abordada pela norma ABNT NBR 6118:2023, referência para uma indicação de regiões especiais para realização de perfurações e limites dimensionais para furos em peças estruturais. Contudo, tais intervenções geram ondas de choque e vibrações que induzem danos internos ao material, como microfissuras e deslocamentos. Diante desse contexto, este estudo investiga experimentalmente a perda de resistência mecânica de vigas submetidas à perfuração por equipamentos de impacto, como martelos perfuradores e furadeiras rotativas através de ensaios em Corpos de Prova (CP) de concreto. Após testes iniciais preliminares, 9 CPs foram construídos num formato prismático com bases retangulares, aproximadamente proporcionais a vigas de concreto comumente usadas em obras civis diversas, respeitando as regras de semelhança entre modelos físicos. Após a realização de furos nos CPs com o uso de martelo perfurador, as alterações mecânicas são avaliadas por duas metodologias distintas: por meio de ensaios de ultrassom em toda a extensão dos CPs, com o objetivo de mensurar as diferenças no módulo de elasticidade dinâmico antes e após a perfuração; e através da análise da variação das frequências naturais dos CPs ensaiados, uma vez que reduções dessas frequências são comumente associadas a danos. Os resultados indicaram uma redução máxima de 17,5% e mínima de 5,1% no módulo de elasticidade para os CPs ensaiados, o que representa alterações significativas nas propriedades mecânicas do concreto. Já na análise por meio das frequências naturais, observou-se uma redução média de 12% nos valores obtidos, refletindo reduções de rigidez nos CPs. Finalmente, com base nos dados obtidos, foi proposta uma equação para estimar a redução do módulo de elasticidade em função da realização de furos, além de se recomendar o tipo de furação, dentre as analisadas, que menos danos causam aos CPs.

Palavras Chave: Perfuração de Concreto; Propagação de Danos; Módulo de Elasticidade Dinâmico.

ABSTRACT

The presence of holes in reinforced concrete elements, necessary for various purposes, is addressed by the ABNT NBR 6118:2023 standard, which serves as a reference for indicating special regions for drilling and dimensional limits for holes in structural elements. However, such interventions generate shock waves and vibrations that induce internal damage to the material, such as microcracks and spalling. In this context, this study experimentally investigates the loss of mechanical strength in beams subjected to drilling by impact equipment, such as hammer drills and rotary drills, through tests on concrete specimens. After preliminary tests, nine specimens were constructed in a prismatic shape with rectangular bases, approximately proportional to commonly used concrete beams in various civil construction projects, respecting the physical similarity rules between physical models. After drilling holes in the specimens using a hammer drill, mechanical alterations were evaluated using two distinct methodologies: ultrasound testing along the entire length of the specimens to measure differences in the dynamic modulus of elasticity before and after drilling; and analysis of variations in the natural frequencies of the tested specimens, as reductions in these frequencies are commonly associated with damage. The results indicated a maximum reduction of 17.5% and a minimum of 5.1% in the modulus of elasticity for the tested specimens, representing significant changes in the mechanical properties of the concrete. In the analysis based on natural frequencies, an average reduction of 12% in the obtained values was observed, reflecting stiffness reductions in the specimens. Finally, based on the obtained data, an equation was proposed to estimate the reduction in the modulus of elasticity as a function of drilling, in addition to recommending the type of drilling, among those analyzed, that causes the least damage to the specimens.

Keywords: Concrete Drilling; Damage Propagation; Dynamic Modulus of Elasticity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consequências comuns devido a incompatibilidade entre projetos e uma execução improvisada.....	1
Figura 2 - Distribuição de tensões em uma placa sob tração contendo um furo centralizado. Os valores de tensão são ilustrativos.	6
Figura 3 - Posições ideais de furação segundo a NBR 6118 (2023).....	9
Figura 4 - Viga com aberturas sob flexão pura.....	10
Figura 5 - Falha típica em cisalhamento de uma viga sem reforço de cisalhamento, com alteração na posição do furo.	11
Figura 6 - Modo de funcionamento de um aparelho de VPU.	15
Figura 7 - Configurações do posicionamento de medição do VPU. (A) Método direto. (B) Método semidireto. (C) Método indireto de superfície.	19
Figura 8 - Representação das dimensões da: (a) viga protótipo; (b) viga modelo reduzido.	25
Figura 9 - Esboço do gráfico ED^*/ED por a , sendo a curva a representação da Equação 21 proposta.	27
Figura 10 - Dimensões das formas, com indicação da posição do furo	28
Figura 11 - As dimensões respectivas da armadura.	31
Figura 12 - Foto ilustrativa do processo de perfuração viga perfurada e equipamento de perfuração utilizado.	32
Figura 13 - Gráfico aceleração versus tempo, do processo de perfuração da viga 5.	33
Figura 14 - Modelo de aparelho VPU.	35
Figura 15 - Posições de leitura nos ensaios de VPU nos CPs.	35
Figura 16 - Imagem da localização dos ensaios e da posição dos CPs e dos acelerômetros. Sendo a) Modelo Livre-Livre, e b) Modelo Engastado-Livre.....	36
Figura 17 - Posição do ensaio, em destaque a localização dos choques e do acelerômetro.	37
Figura 18 - Posição do ensaio, em destaque a localização dos choques e do acelerômetro.	37
Figura 19 - Gráfico descrição dos resultados da razão do ED/ED^* (antes e após a perfuração), em função da localização da medição na viga, com o uso de $\frac{1}{2}$ de potência de martetele.....	41

Figura 20 - Gráfico descrição dos resultados da razão do ED/ED^* (antes e após a perfuração), em função da localização da medição na viga, com o uso de $\frac{1}{4}$ de potência de martetele.....	42
Figura 21 - Gráfico descrição dos resultados da razão do ED/ED^* (antes e após a perfuração), em função da localização da medição na viga, sem uso do martetele.	43
Figura 22 - Extensão do dano, ou redução do ED , no CP para cada modo de perfuração.	47
Figura 23. Gráficos do ensaio no domínio do tempo, e no domínio das frequências. Para a Viga 9, no choque central, antes do furo.	48
Figura 24. Gráficos do ensaio no domínio do tempo, e no domínio das frequências. Para a Viga 9, no choque central, depois do furo.	49
Figura 25 - Consequências do dano nos CPs. (a) $\frac{1}{2}$ de martetele, (b) $\frac{1}{4}$ de martetele e (c) sem martetele. No face posterior a entrada da perfuração.	51
Figura 26. Box Plot, com os resultados de razão das FN antes e depois do furo, nos diversos grupos de potência, sendo (a) representando o modelo livre-livre e (b) o modelo engastado-livre.	52
Figura 27 - Posições de leitura nos ensaios de VPU nos CPs.	60
Figura 28 - Gráfico resumo dos resultados da diferença percentual entre do ED antes e depois da perfuração, pela localização da medição na viga, com uso de $\frac{1}{2}$ da potência do martetele.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos CPs, suas respectivas massas.....	30
Tabela 2. <i>Arms</i> e <i>T</i> , associado a cada potência de martetele aplicada na perfuração.	33
Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos de <i>ED</i> , para os transdutores medindo a VPU na direção Y e Z, com o uso de $\frac{1}{2}$ de potência de martetele.....	41
Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos de <i>ED</i> , para os transdutores medindo a VPU na direção Y e Z, com o uso de $\frac{1}{4}$ de potência de martetele.....	42
Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos de <i>ED</i> , para os transdutores medindo a VPU na direção Y e Z, sem o uso de potência de martetele.....	43
Tabela 6. Tabela resumo das FN, das vigas perfuradas com a potência de $\frac{1}{2}$ de martetele.....	49
Tabela 7. Tabela resumo das FN, das vigas perfuradas com a potência de $\frac{1}{4}$ de martetele.....	49
Tabela 8. Tabela resumo das FN, das vigas perfuradas sem a potência de martetele.	50
Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos de <i>ED</i> , para os transdutores medindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção Y, com o uso de $\frac{1}{2}$ de potência de martetele.....	61
Tabela 10 - Resumo dos resultados obtidos de <i>ED</i> , para os transdutores medindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção Y, com o uso de $\frac{1}{4}$ de potência de martetele.....	61
Tabela 11 - Resumo dos resultados obtidos de <i>ED</i> , para os transdutores medindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção Y, sem o uso de martetele.....	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO: CONTEXTUALIZAÇÃO E OBJETIVO	1
1.1.	OBJETIVOS	3
1.2.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	FUROS EM VIGAS	5
2.2.	MODULO DE ELASTICIDADE	12
2.3.	ANÁLISE DINAMICA.....	21
3.	METODOLOGIA E MATERIAIS	22
3.1.	DEFINIÇÃO DO PROTÓTIPO DE VIGA E DO MODELO REDUZIDO 22	
3.2.	DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO f DE DECAIMENTO DO ED	25
3.3.	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	27
3.4.	DOSAGEM DO CONCRETO	28
3.5.	ARMADURA.....	31
3.6.	EXECUÇÃO DOS FUROS	32
3.7.	AVALIAÇÃO POR ULTRASSOM	34
3.8.	AVALIAÇÃO DINÂMICA	36
4.	RESULTADOS	39
4.1.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	39
4.2.	FREQUÊNCIAS NATURAIS	48
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
6.	REFERÊNCIAS.....	54
	ANEXO 1. ESTUDO PRELIMINARES.....	60

1. INTRODUÇÃO: CONTEXTUALIZAÇÃO E OBJETIVO

A compatibilização de projetos em edificações desempenha um papel crucial na mitigação de falhas durante a execução das obras, promovendo a redução de custos e garantindo um controle de qualidade mais rigoroso. Moreira (2019) enfatiza que a interferência entre as dimensões e a disposição dos elementos estruturais deve ser cuidadosamente planejada para permitir a passagem das tubulações previstas. Situações recorrentes, como tubulações que interceptam pilares, interseção de dutos de ventilação com vigas e pilares, e furos de passagem não previstos exemplificam os desafios enfrentados na ausência de compatibilização eficiente. Estudos de caso apontam que tais conflitos podem ocasionar atrasos significativos, custos adicionais e até mesmo comprometimentos estruturais, pois exigem soluções como o reposicionamento de tubulações e ajustes não estabelecidos em projeto estrutural para acomodar as instalações hidráulicas e elétricas, como o exemplificado nas imagens da Figura 1.

Figura 1 - Consequências comuns devido a incompatibilidade entre projetos e uma execução improvisada.



Fonte: Google Imagens (2024).

As deficiências na qualidade dos projetos apresentam impactos significativos no processo construtivo e podem até inviabilizar o empreendimento. Oliveira e

Melhado (2006) destacam que a baixa qualidade do projeto pode resultar na redução da eficiência da construção, aumento de riscos, elevação dos custos para construtor e cliente final, e na ocorrência de não conformidades no empreendimento. Há um frequente inconveniente entre a atividade de projeto e a construção, onde o projeto muitas vezes é tratado como um simples instrumento isolado, com prazo e custo comprimidos, recebendo pouco aprofundamento e com caráter quase meramente legal, deixando a maioria das decisões para a fase de execução das obras, que geralmente ocorrem sem uma necessária atenção técnica.

Segundo Ruschel & Kehl (2024), o conceito BIM (*Building Information Modeling*) tem se consolidado mundialmente no mercado da Construção Civil devido à sua capacidade de integrar diferentes sistemas de projetos, economizando materiais e tempo ao promover um planejamento conjunto e sem desmembramento de etapas. Contudo, o BIM ainda não é amplamente utilizado, ocasionando recorrentes incompatibilidades entre projetos arquitetônicos, estruturais e de instalações, que frequentemente são identificadas apenas durante a execução da obra. A falta desse planejamento detalhado pode exigir furos e aberturas em elementos estruturais como vigas, o que, se não previsto em projeto e detalhado conforme a NBR 6118 (2023), pode comprometer a resistência e durabilidade do elemento.

Sousa *et al.* (2022) destacam que a NBR 6118 (2023) estabelece limites e procedimentos para furos e aberturas em elementos de concreto armado. Mas, na prática, essas normas são frequentemente negligenciadas, resultando na redução da resistência e durabilidade dos elementos estruturais.

Além disso, Arantes (2001) destaca que a presença de aberturas na alma de vigas de concreto armado altera significativamente seu comportamento estrutural, podendo levar a colapsos prematuros caso não sejam aplicados reforços específicos na região perfurada. Estudos experimentais, como os de El Maaddawy & Sherif (2009), Chin *et al.* (2012), Osman *et al.* (2017) e Aksoylu *et al.* (2020) demonstram que, além dos danos estruturais visíveis, as alterações internas na estrutura do material podem comprometer suas propriedades mecânicas. As alterações dinâmicas são apresentadas nos estudos realizados por Demir (2016) e Hamid & Fakhri (2022), onde as frequências naturais das vigas são alteradas pela presença dos furos.

1.1. OBJETIVOS

Com base nesse cenário, o objetivo deste trabalho é:

- Investigar experimentalmente o impacto de perfurações em CPs de concreto armado sobre seu comportamento mecânico estrutural, considerando os danos provocados pelo processo de perfuração, por meio da análise da variação do Módulo de Elasticidade Dinâmico e das Frequências Naturais das peças ensaiadas.

Dentre os objetivos secundários tem-se:

- Avaliar critérios para perfuração de vigas, indicando potências de perfuração que causem menos danos à estrutura;

- Avaliar a influência da metodologia de perfuração e da distância do furo sobre a severidade dos danos em vigas.

- Correlacionar resultados métodos de detecção danos em estruturas com a deterioração provocada por perfurações.

- Propor uma equação que quantifique a perda de rigidez mecânica dos CPs de concreto armado perfuradas.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

De modo a apresentar de forma clara o conteúdo desta dissertação de mestrado está dividido em oito capítulos. No primeiro Capítulo introduz-se o assunto, bem como se apresenta os objetivos principais e secundários da pesquisa. No Capítulo 2, aborda-se a conceituação teórica sobre furos em vigas de concreto, bem como as recomendações das principais bibliografias e normas acerca da realização desses furos. O Capítulo 3 explora o Módulo de Elasticidade, uma propriedade fundamental do concreto que pode ser considerada um indicador eficaz na avaliação de danos estruturais. O foco está na medição do Módulo de Elasticidade Dinâmico, que pode ser obtido por meio de ensaios não destrutivos como o de Velocidade de Pulso Ultrassônico. Portanto, são apresentados os detalhes do ensaio de ultrassom, que possibilita a avaliação ao longo de toda a viga de concreto. O Capítulo 4 apresenta a Análise Dinâmica, destacando a primeira Frequência Natural, fundamental para compreender o comportamento estrutural das vigas de concreto submetidas as condições livre-livre e engastada-livre. No Capítulo 5, são detalhados a metodologia

e os materiais empregados no estudo, a análise dimensional, as características da viga protótipo e da viga modelo reduzido, a confecção dos corpos de prova, a dosagem do concreto, a armadura e o processo de furação. Também são descritas as avaliações por ultrassom e a análise dinâmica realizadas no experimento. Em seguida, são apresentados, no Capítulo 6, os resultados obtidos, com ênfase na determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico e na análise das Frequências Naturais das vigas testadas. No Capítulo 7, são discutidas as considerações finais com base nos achados da pesquisa, destacando as conclusões e recomendações para estudos futuros. Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as referências bibliográficas. Este trabalho inclui o Anexo 1 que descreve, de forma detalhada, os estudos preliminares conduzidos durante a etapa inicial da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o estudo de Campos e Vargas (2013), é comum encontrar furos e aberturas em elementos estruturais, geralmente utilizados para passagem de tubulações e sistemas diversos. Essas instalações são frequentemente adicionadas por falta de compatibilização de projetos ou por improvisações durante a construção, resultando em alterações no fluxo de tensões na estrutura.

2.1. FUROS EM VIGAS

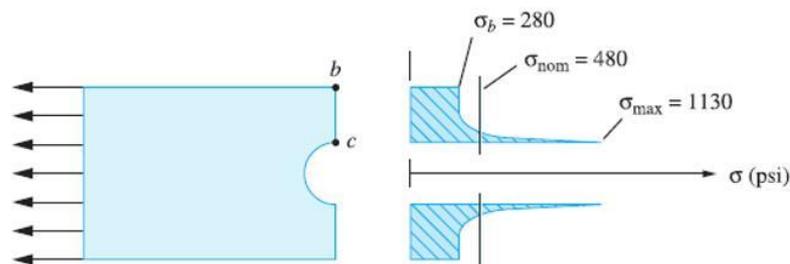
Embora a linha neutra à flexão da viga seja geralmente considerada a melhor localização para furos, essa não é uma regra absoluta devido aos esforços de cisalhamento presentes nas seções retas submetidas à flexão. Mansur e Tan (1999) afirmam que os furos tornam a estrutura mais complexa ao agir como concentradores de tensão, prejudicando a rigidez e a resistência da viga. Portanto, qualquer necessidade de perfurar a estrutura deve ser previamente definida em projeto, com cálculos que levem em consideração os esforços e tensões atuantes. O projeto deve especificar as dimensões dos furos e incluir armaduras adaptadas para compensar as alterações nas tensões da seção, garantindo a integridade estrutural da viga. Os mesmos autores informam que a inclusão de aberturas em vigas altera significativamente o comportamento estrutural desses elementos, principalmente nas dimensões transversais da viga, o que resulta em concentração de tensões nas bordas das aberturas. Essa concentração de tensões pode levar à formação de fissuras amplas e inaceitáveis do ponto de vista estético e, o mais drástico, pode reduzir a durabilidade da estrutura.

Silva *et al.* (2019) investigaram os impactos da perfuração não planejada em vigas de concreto armado, identificando a potencial perda de resistência, devido a perda de seção resistente e a corte de estribos. Em seus estudos os autores identificaram uma falha por cisalhamento que ocorreu devido à ausência de reforço adequado para suportar as tensões aplicadas. Além disso, vigas com um furo na região de maior momento fletor e fora dos padrões da NBR 6118 (2014), apresentaram fissuras verticais sob a mesma carga. Esse último detalhe enfatiza a adoção medidas de segurança e consulta às normas regulamentadoras ao planejar furos em estruturas de concreto armado para evitar comprometimentos na resistência estrutural.

Moreira (2019) conclui que a realização de furos em vigas de concreto armado sem a devida verificação pode ocasionar problemas devido à geração de esforços não previstos, uma vez que, em todas as vigas com furos analisadas, as tensões de compressão no concreto foram maiores do que nas vigas sem furos. Além disso, a deformação máxima das vigas com furos também foi superior à de uma viga de referência. Sua pesquisa também constatou que a presença de furos e aberturas é mais desfavorável quanto mais próxima à zona de compressão, o que está em conformidade com a recomendação da norma NBR 6118 (2023).

Os testes de compressão conduzidos por Sousa *et al.* (2022) demonstraram que corpos de prova cilíndricos de concreto sem perfuração apresentaram resistência média de 17,55 MPa. No entanto, os corpos de prova com furos de oito milímetros apresentaram uma média de resistência de 16,44 MPa, com uma perda de resistência de 6,31%. Um terceiro grupo, com furos de dez milímetros, apresentou uma média de resistência de 15,16 MPa, indicando uma perda de 13,67% na resistência. Já o quarto grupo, com furos de quatorze milímetros, teve uma média de resistência de 14,97 MPa, refletindo numa perda de resistência de 14,73%. Esses resultados indicam a existência de uma correlação direta entre o aumento do diâmetro das perfurações e a redução da resistência à compressão dos elementos de concreto armado.

Figura 2 - Distribuição de tensões em uma placa sob tração contendo um furo centralizado. Os valores de tensão são ilustrativos.



Fonte: Roark *et al.* (2020)

Furos de pequeno diâmetro não promovem reduções significativas nas características mecânicas das vigas, entretanto, à medida que o diâmetro aumenta, é necessário um reforço com estribos. É possível observar que a presença do furo, na Figura 2, representa uma redistribuição de tensões ao redor do furo, portanto, uma alteração das características mecânicas próximo ao furo. A localização dos furos também se mostra relevante, pois, ocorre uma redução da capacidade de carga no

meio do vão se comparados aos furos mais próximos à região de apoio, sendo que na região do apoio pode haver perdas significativas por cisalhamento. Em aberturas de grande porte, o aumento da tensão de cisalhamento decorrente da redução da seção de concreto ocasiona um crescimento expressivo das tensões principais de tração, levando a viga ao colapso por cisalhamento. De maneira geral, a solução para a perda de resistência em vigas com furos perfurados posteriormente deve considerar múltiplos fatores, incluindo a posição da abertura, a esbelteza do vão de cisalhamento e o tipo de carregamento, sendo necessária a realização de investigações adicionais para avaliar o impacto de parâmetros geométricos e mecânicos ainda não contemplados, como o processo de perfuração (ÖZKILIÇ *et al.*; 2022).

Abreu *et al.* (2016), em sua pesquisa, revelaram que os furos em vigas de concreto armado provocam aumentos significativos nas flechas e nas tensões internas das vigas. Notavelmente, vigas com dois furos próximos do apoio apresentam o maior valor de flecha, evidenciando a influência direta das perfurações na deformação estrutural. Além disso, os esforços cortantes e momentos fletores foram consideravelmente maiores nas vigas com furos, especialmente quando os furos estão localizados em regiões críticas, como o centro do vão. Isso resulta em maior consumo de aço para reforço das vigas, impactando sua resistência e estabilidade estrutural.

No estudo de Campos e Vargas (2013), as vigas analisadas apresentaram diferentes comportamentos em ensaios de resistência à compressão axial, tração e módulo de elasticidade. As vigas que possuíam armadura de reforço ao cortante apresentaram capacidade de carga maior, 3,76% superior, em média, à das vigas sem reforço e 6,01% superior à das vigas de alma cheia. O reforço impactou também na quantidade de fissuras, que foi significativamente menor nas vigas com reforço, aproximando-se das vigas de alma cheia em termos de abertura máxima de fissuras. Assim, como também é proposto por Mansur (1998), o reforço com armadura nas vigas com furos contribui para uma melhor capacidade de suporte e menor incidência de danos.

Mansur e Tan (1999) demonstram que a presença de aberturas em vigas de concreto influencia significativamente a distribuição de fissuras e sua largura máxima, afetando a capacidade de serviço da viga em relação à fissuração. Eles observaram ainda que, em algumas vigas analisadas, a abertura mais próxima ao ponto central apresentou um padrão de fissuração semelhante ao de uma viga sólida, enquanto

vigas com aberturas preenchidas com argamassa não retrátil exibiram um comportamento semelhante, embora com fissuras de falha que contornaram o centro da abertura devido à falta de aderência adequada entre o concreto original e o preenchimento.

Segundo Souza (2004), o procedimento convencional para análise e dimensionamento de estruturas de concreto armado ocorre em etapas, como a estimativa inicial das dimensões dos elementos estruturais, a determinação dos esforços internos, o dimensionamento das seções transversais e a análise não-linear completa em casos específicos. A segurança desse método, especialmente nos passos mais comuns da análise estrutural, está embasada na prática, testes e experiências ao longo dos anos. Porém se faz necessária uma análise mais detalhada, utilizando modelos físicos realistas e técnicas de análise plástica para garantir um dimensionamento seguro. Para tanto, pode-se aplicar recursos computacionais, que, atualmente, são muito avançados e possibilitam análises mais precisas, desde que haja, por parte dos usuários, experiência e conhecimento teórico na aplicação dessas ferramentas.

De acordo com Mansur e Tan (1999), as aberturas transversais em vigas podem apresentar diferentes formas e tamanhos. Pesquisadores como Özkiliç *et al.* (2022) consideraram aberturas de formas circulares, Ali & Saeed (2022) avaliaram aberturas retangulares, sendo essas duas formas as mais comuns, necessárias para acomodar tubulações de serviços, como para fornecimento de água e energia elétrica. Ressalta-se que os cantos de uma abertura retangular são arredondados com a intenção de reduzir a possível concentração de tensões nos cantos agudos, protegendo assim o comportamento de fissuração da viga em serviço. Estudos mais antigos como os de Prentzas (1968) consideravam ainda aberturas em formas de diamantes, triangulares, trapezoidais e até mesmo irregulares em seus estudos experimentais.

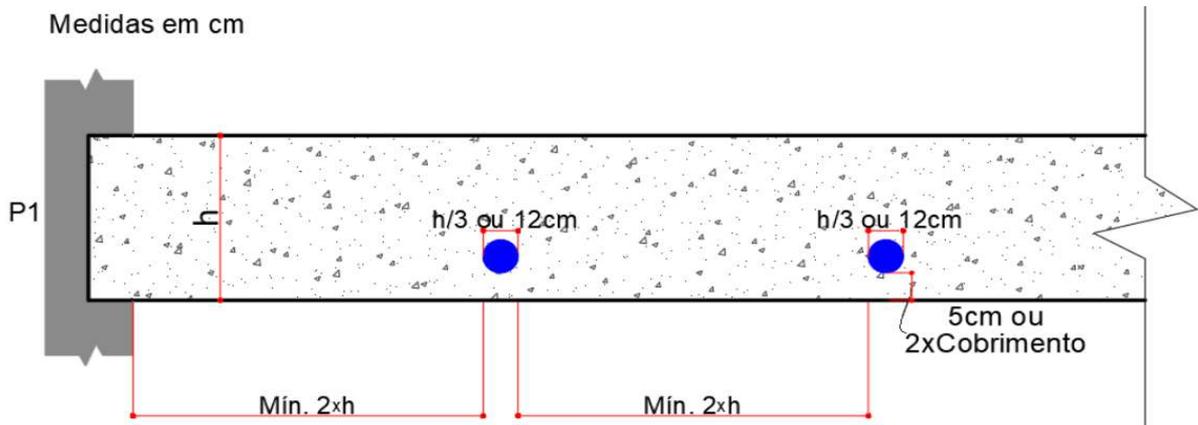
De acordo com as recomendações do item 13.2.5 da NBR 6118 (2023), que informa acerca de furos e aberturas (Figura 3), é importante seguir as seguintes orientações ao fazer furos em vigas de concreto armado para garantir a integridade estrutural:

1. Localização do furo: o furo deve estar a uma distância mínima de 5,0 cm da face mais próxima da viga. Além disso, deve ter, no mínimo, duas vezes o cobrimento previsto para a armadura.

2. Dispensa de verificação: para que a realização do furo dispense a necessidade de verificação estrutural adicional, devem ser seguidas as recomendações, apresentadas na Figura 3:

- O furo deve estar localizado na zona de tração da viga e a uma distância mínima de duas vezes a altura da viga da face do apoio.
- A dimensão do furo deve ser, no máximo, de 12,0 cm ou um terço da altura da viga, o que for menor.
- A distância entre as faces dos furos deve ser de, no mínimo, duas vezes a altura da viga.
- Os cobrimentos devem ser suficientes e seguir as recomendações da NBR 6118 (2023) conforme a classe de agressividade ambiental.
- Não deve ser realizado o seccionamento das armaduras.

Figura 3 - Posições ideais de furação segundo a NBR 6118 (2023).

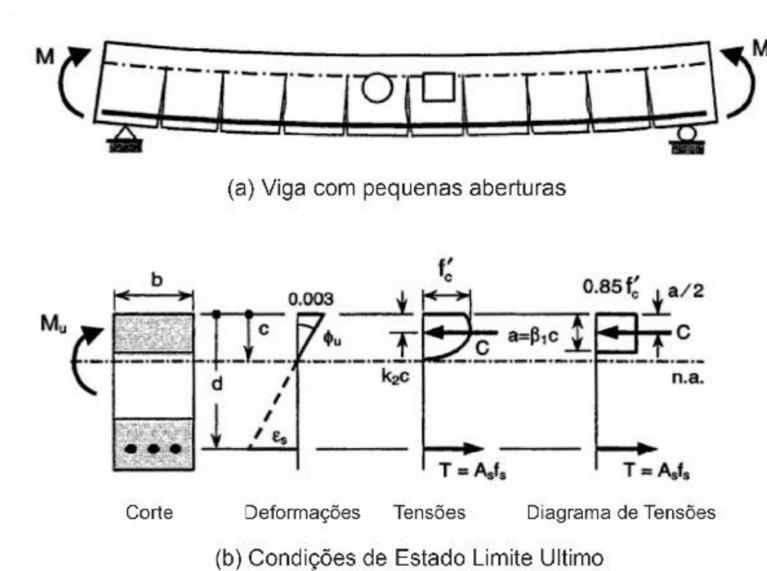


Fonte: NBR 6118 (2023)

A distribuição de tensões ao redor de uma abertura transversal em vigas tem sido amplamente estudada por diversos pesquisadores, destacando-se os trabalhos de Morsy & Barima (2019), Elsanadedy *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2020). Esses pesquisadores utilizaram a rigidez do material para analisar o comportamento das tensões, seguindo os estudos de Mansur e Tan (1999), e assumindo que o material é homogêneo e isotrópico, e seguindo a Lei de Hooke. Os resultados desses estudos, demonstram que, para aberturas circulares e retangulares, as tensões de tração significativas ocorrem na borda do orifício, com validação experimental para diferentes relações de tensão de flexão-cisalhamento.

Mansur e Tan (1999) explicam que, em uma viga sólida submetida à flexão pura, ao atingir a carga última, desenvolve-se um padrão de fissuras que se propagam verticalmente até o eixo neutro, conforme ilustrado na Figura 4 (a). Na condição de colapso, as distribuições de deformação e tensão ao longo da seção transversal seguem a teoria usual de resistência à flexão, resultando em forças de tração e compressão que formam um par equilibrado pelo momento aplicado, representado na Figura 4 (b). Quando uma abertura transversal é introduzida na viga dentro da zona de tração, não há alteração no mecanismo de suporte de carga, desde que a abertura não reduza a área de concreto necessária para o desenvolvimento do bloco de compressão. No entanto, a presença da abertura pode antecipar o início das fissuras devido à redução do momento de inércia, embora isso tenha um efeito marginal nas larguras das fissuras e na deflexão.

Figura 4 - Viga com aberturas sob flexão pura.

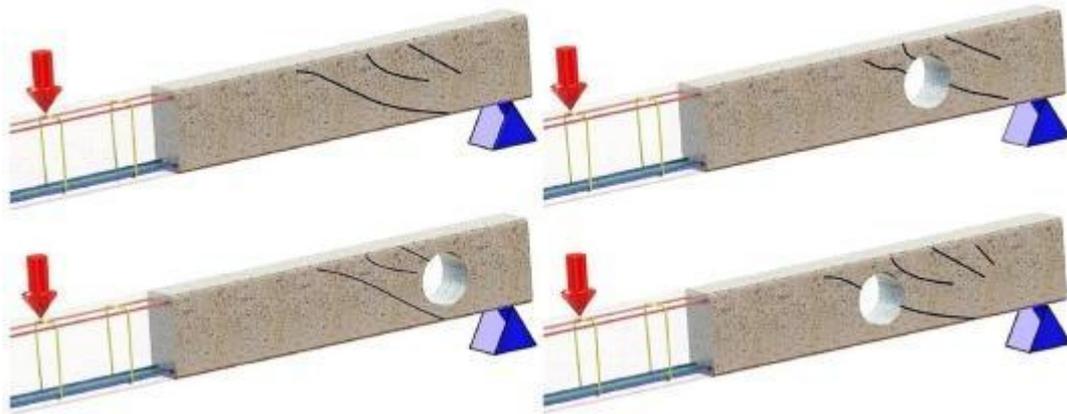


Fonte: Mansur e Tan (1999), modificado.

Essas condições foram confirmadas pelo estudo de Jasissm e Jarallah (2018), que notaram que a resistência de uma viga com aberturas permaneceria a mesma que a da viga sólida correspondente, desde que as aberturas não reduzam a área de concreto necessária para o desenvolvimento do bloco de tensão de compressão no estado último. No entanto, devido à redução do momento de inércia na seção através da abertura, as fissuras se iniciarão em um estágio mais precoce de carregamento; entretanto, essa iniciação precoce de fissuras tem apenas um efeito marginal nas larguras das fissuras e na deflexão.

Quando uma pequena abertura é introduzida na alma de uma viga, dados de testes reportados por Latha & Kumar (2017), indicam que elas apresentam um comportamento semelhante ao das vigas sem aberturas. Corroborando com Mansur e Tan (1999) indicaram que o modo de falha permanece essencialmente o mesmo que o de uma viga sólida. No entanto, como a abertura representa uma fonte de fraqueza, o plano de falha sempre passa pelo centro da abertura, exceto quando a abertura está muito próxima do apoio, de modo a evitar o potencial plano de falha inclinado. A Figura 5 demonstra esquematicamente algumas falhas típicas em cisalhamento de vigas contendo aberturas circulares, alterando sua posição na viga.

Figura 5 - Falha típica em cisalhamento de uma viga sem reforço de cisalhamento, com alteração na posição do furo.



Fonte: Özkiliç *et al* (2022)

De acordo com Mansur e Tan (1999), a força cortante em uma viga está sempre associada ao momento fletor, exceto na seção no ponto de inflexão. Em uma viga elástica homogênea, como uma viga de concreto antes de fissurar, a presença de cisalhamento altera a direção da tensão principal de tração de uma direção horizontal para uma direção inclinada ao eixo longitudinal da viga. Como o concreto não resiste a tração, essa tensão diagonal de tração eventualmente leva ao que é basicamente conhecido como falha por tração diagonal de uma viga. Quando a viga é fornecida com muito esforço de cisalhamento, a falha também pode ocorrer por esmagamento do concreto em uma direção diagonal, conhecida como falha por compressão diagonal.

No caso de pequenas aberturas, a necessidade de armadura para controle de fissuras pode não ser tão grande. Como estribos já são fornecidos ao lado da abertura para garantir resistência adequada, respeitando os espaçamentos indicados pela NBR 6118 (2023), a provisão de armadura diagonal pode ser considerada para restringir o crescimento de fissuras ao longo do plano de falha. Uma quantidade de armadura diagonal suficiente para suportar o cisalhamento total ao longo do plano de falha inclinado a 45° (falha do tipo viga) foi recomendada por Mansur (1998).

2.2. MODULO DE ELASTICIDADE

A propriedade mais verificada no controle do concreto em obras é a resistência à compressão. No entanto, as tecnologias atuais requerem outras propriedades, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade, em certos projetos. Sendo assim, novas técnicas vêm sendo utilizadas, como os Ensaio Dinâmicos Não Destrutivos (END), que, segundo Diógenes *et al.* (2011), fornecem informações integradas e globais sobre a estrutura, incluindo rigidez e amortecimento. END são especialmente úteis para projetistas, pois permite monitorar o módulo de elasticidade, por exemplo, ao longo da vida útil da estrutura, sem a necessidade de moldar várias amostras. Esses ensaios são essenciais para estimar a resistência do material e são fundamentais para o cálculo estrutural e o conhecimento das deformações dos elementos estruturais.

Segundo Possan *et al.* (2021), existe uma movimentação crescente na importância do Módulo de Elasticidade Estático (E_E) do concreto, além da resistência à compressão axial, como parâmetro e propriedade do concreto obrigatório para a aprovação definitiva da qualidade do concreto estrutural. Assim, o objetivo de muitos pesquisadores brasileiros na área de tecnologia do concreto é estudar e desenvolver métodos mais simplificados e acessíveis para determinação do E_E , visando reduzir custos, aumentar a confiabilidade dos resultados, a frequência dos ensaios e a eficiência dos laboratórios, de modo a proporcionar aos construtores e projetistas resultados confiáveis e rápidos, garantindo maior segurança e economia na execução de projetos na construção civil. Ao empregar ultrassom para sua determinação, por exemplo, o Módulo de Elasticidade resultante é classificado como Dinâmico (E_D) para distingui-lo do Módulo de Elasticidade obtido por meio do método Estático (E_E) convencional.

De acordo com Fernandes (1996), o E_E do concreto é influenciado por vários parâmetros que precisam ser verificados, entre eles a natureza dos agregados, a relação água/cimento e a idade do material. Araújo Júnior *et al.* (2018) notaram que a quantidade de agregados na mistura do concreto exerce uma influência significativa tanto no E_E como no E_D . Ou seja, os valores maiores de E_E correspondem a traços com maior teor de agregados, enquanto os menores estão relacionados a traços com menor teor de agregados. Essa observação está em linha com o entendimento de Mehta e Monteiro (2014) e Diógenes *et al.* (2011) sobre a influência dos agregados no E_E e no E_D do concreto.

Cabral *et al.* (2014) enfatizam a importância de uma análise criteriosa dos resultados obtidos nos ensaios para determinação do E_E e do E_D do concreto. Eles apontam que essa análise deve levar em consideração uma série de fatores, como a natureza e o diâmetro do agregado, a velocidade de aplicação da carga durante os ensaios, as dimensões dos corpos de prova utilizados e a temperatura ambiente durante os testes. Além disso, destacam a importância de uma dosagem adequada dos materiais, observando que, independentemente da consistência do concreto (plástica ou autoadensável), os resultados obtidos mostraram que esses fatores influenciam nos resultados.

2.2.1. Módulo de Elasticidade Dinâmico

Segundo Diógenes *et al.* (2011), os END são cruciais na obtenção de dados das estruturas, permitindo o monitoramento, ao longo do tempo, do módulo de elasticidade do material, sem causar danos à estrutura *in loco*. Essas informações são essenciais para a elaboração de projetos estruturais e controle da vida útil da estrutura. Os autores Possan *et al.* (2021) sugerem que a estimativa do módulo estático a partir do dinâmico pode se tornar uma prática rotineira, inclusive para medir a resistência à compressão, sendo realizada uma associação direta, devido à sua não-destrutividade e baixo custo, substituindo assim os ensaios esporádicos.

O principal objetivo do uso de técnicas de END na construção civil é localizar e avaliar falhas e defeitos em estruturas de concreto endurecido, sendo esses métodos úteis para diagnósticos complexos, sem a deterioração do material, o que reduz custos de manutenção importantes. Diversos métodos de ensaio são eficientes e precisos, com o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), amplamente utilizado por

sua versatilidade, baixo custo e grande capacidade de detecção e fornecimento de informações sobre o concreto (ADAMATI *et al.*, 2017).

De acordo com Kaur *et al.* (2019), uma variedade de métodos está sendo empregada para avaliar características de resistência do concreto. Embora métodos microestruturais, como a microscopia eletrônica de varredura e a espectroscopia de energia dispersiva, além de propriedades macroscópicas, como resistência e permeabilidade, proporcionem uma compreensão valiosa do processo da evolução da cura do cimento e cicatrização de fissuras, esses ensaios são destrutivos e exigem preparação elaborada. Portanto, faz-se necessário o uso de tecnologias de monitoramento instantâneas e não intrusivas, como técnicas não destrutivas que incluem medições de VPU e emissão acústica.

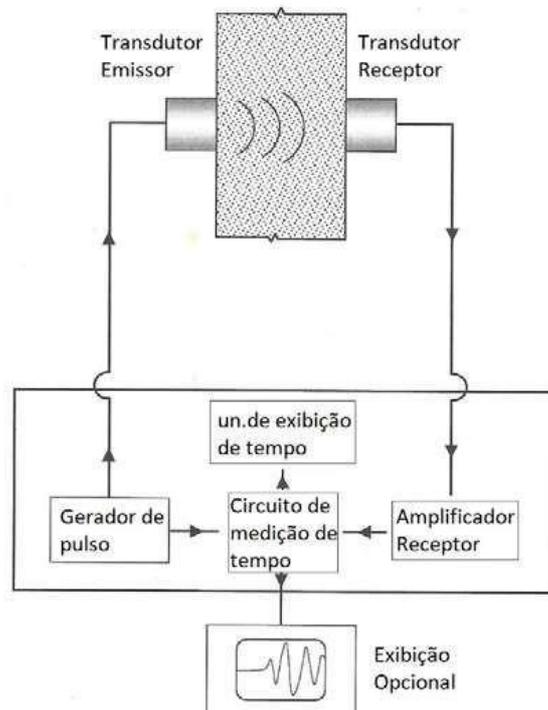
Assim como ocorre com o E_E , a norma brasileira NBR 8802 – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (2019) descreve diversos fatores que influenciam os resultados na determinação da VPU. Segundo essa norma, o tamanho e a forma do elemento testado não afetam a velocidade de propagação, desde que a dimensão lateral do elemento seja pelo menos igual ao comprimento de onda do pulso transmitido, garantindo a precisão dos resultados. Além disso, a velocidade do pulso geralmente não é afetada pelo comprimento do percurso pelo qual a onda irá se propagar. Logo, o que pode gerar erros é a heterogeneidade do concreto e limitações do equipamento de medição. A norma também enfatiza a importância de manter a superfície do concreto lisa e limpa para assegurar um bom acoplamento dos transdutores, e sugere procedimentos para regularizar a superfície quando necessário, superfícies muito rugosas ou com acabamento devem ser evitadas, pois as propriedades do concreto na camada superficial podem diferir das do interior do material.

2.2.2. Ensaio de Ultrassom

Kaur *et al.* (2019) explicam que o método VPU envolve a transmissão e recepção de pulsos por meio de transdutores piezoelétricos, que podem estar posicionados em modos diversos de transmissão ou reflexão. A avaliação é feita pela análise das características das ondas, como velocidade, atenuação e mudança de fase. Embora a VPU seja uma medida comum, ela pode não ser sensível a deteriorações localizadas, como fissuras, sugerindo a necessidade de explorar outros

parâmetros para monitorar a estrutura. Além disso, a natureza heterogênea do concreto exige uma alta relação sinal-ruído, para garantir um monitoramento confiável. Neste ensaio, os pulsos são transmitidos e recebidos por um par de transdutores, e a mudança nas características da onda é monitorada. A Figura 6 ilustra o circuito percorrido por um pulso no ensaio de ultrassom, conforme adaptado de Naik, Malhotra e Popovics (2004).

Figura 6 - Modo de funcionamento de um aparelho de VPU.



Fonte: Naik, Malhotra e Popovics (2004), modificado.

Segundo Bompan e Haach (2018), embora poucos estudos tenham explorado o uso do efeito acustoelástico para avaliar tensões em estruturas de concreto, existem pesquisas significativas que analisaram a influência das tensões nas ondas ultrassônicas propagadas longitudinal e transversalmente ao eixo de carregamento. Destaca-se a sensibilidade das ondas para avaliação do nível de tensão no concreto, embora o espalhamento das ondas seja um desafio a ser superado. Os autores revelaram que as VPU são sensíveis alterações na resistência compressão uniaxial e os valores dos coeficientes acustoelásticos. As propriedades mecânicas do concreto indicaram uma possível correlação entre esses parâmetros, contribuindo para um maior entendimento do comportamento acustoelástico do material e avançando na avaliação do nível de tensão no concreto.

Adamatl *et al.* (2017) analisaram as influências de diversos parâmetros nos resultados dos ensaios de VPU. Entre os parâmetros operacionais avaliados estavam diferenças de malhas de leituras, níveis de experiência dos operadores, superfícies distintas e a presença ou ausência de armaduras. Os resultados mostraram que a escolha da malha de leitura depende do tamanho do elemento e da dimensão do defeito; malhas de leituras mais refinadas forneceram resultados mais precisos. A experiência do operador foi a variável mais significativa, destacando a importância de treinamento adequado para evitar interpretações errôneas. A escolha criteriosa dos parâmetros de ensaio é essencial para uma interpretação precisa da qualidade das estruturas de concreto. O VPU se mostrou vantajoso para a avaliação estrutural, especialmente quando combinado com parâmetros específicos, como superfícies lisas e operadores experientes, para detectar vazios internos. Esses ensaios são sensíveis às variações de homogeneidade e densidade do concreto, fornecendo dados valiosos para a tomada de decisões sobre intervenções em estruturas.

Haach e Ramirez (2016) realizaram uma investigação sobre a tomografia ultrassônica como método de avaliação qualitativa do concreto, destacando sua eficácia na detecção de heterogeneidades e na análise da homogeneidade estrutural. O estudo experimental avaliou diferentes arranjos de transdutores e a influência de descontinuidades em prismas de concreto, concluindo que a qualidade dos resultados obtidos depende do tamanho e da disposição dos transdutores, bem como da distribuição da proporção. Foi observado que um número excessivamente maior de leituras não resulta necessariamente em resultados de melhor qualidade, desde que ao reduzir a quantidade de leituras possa garantir a precisão dos resultados, sendo verificados estatisticamente. Além disso, confirmou-se que a VPU diminuiu gradualmente com a redução da resistência a compressão do concreto, evidenciando a relação entre essas propriedades.

2.2.3. Princípio físico

Segundo Bungey e Millard (2006), três tipos de ondas são gerados por um impulso aplicado a uma massa sólida. As ondas de superfície, com deslocamento de partículas elíptico, são as mais lentas, enquanto as ondas de cisalhamento ou transversais, com deslocamento de partículas perpendicular à direção de propagação, são mais rápidas. As ondas longitudinais, com deslocamento de partículas na direção

de propagação (também conhecidas como ondas de compressão), são as mais importantes, pois são as mais rápidas e geralmente fornecem informações mais úteis. Os transdutores eletroacústicos produzem principalmente ondas longitudinais, os outros tipos geralmente resultam em menor acurácia devido à sua menor velocidade. Adicionalmente, a velocidade de uma onda em um meio é dependente das propriedades elásticas e da massa desse meio.

Para um meio infinito, homogêneo e isotrópico, a velocidade é definida pela Equação 1.

$$V = \sqrt{\frac{K \times E_D}{\rho}} \quad (1)$$

Onde:

V é a velocidade da onda (m/s),

K é a relação do Poisson Dinâmico representada pela Equação 2:

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)} \quad (2)$$

E_D é o Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa),

ρ é a Densidade (kg/m³), e

ν é o coeficiente de Poisson dinâmico.

Na Equação 1, o valor de E_D é pouco influenciado, devido às variações do coeficiente de Poisson dinâmico ν , e, portanto, utiliza-se de uma estimativa razoável do valor. É possível calcular o E_D usando um valor medido da velocidade da onda V . Apesar das variações esperadas nos coeficientes de Poisson dinâmicos ν e densidades ρ , pelo fato do concreto ser um material muito heterogêneo, a relação entre a velocidade e o E_D pode ser considerada razoavelmente consistente. (NAIK, MALHOTRA E POPOVICS; 2004)

O equipamento de ensaio desempenha um papel crucial nesse processo, pois deve ser capaz não apenas de gerar um pulso ultrassônico, mas também de transmiti-lo eficientemente ao concreto, receber e amplificar o retorno do pulso, e medir o tempo decorrido com uma precisão de $\pm 1\%$. A escolha cuidadosa dos transdutores, que devem ter frequências naturais ideais entre 20 kHz e 150 kHz, e a configuração adequada desses dispositivos são fundamentais para obter resultados confiáveis,

segunda a norma NBR 8802 (2019). Além disso, é essencial garantir a eliminação de bolsas de ar entre o transdutor e a superfície do concreto, aplicando um meio acústico adequado, como gel de petróleo ou sabão líquido, para assegurar um acoplamento eficaz que minimize erros de leitura e garanta resultados precisos na medição da VPU. Bompman e Haach (2018) afirmam ainda que a VPU específica depende das propriedades elásticas e da densidade do meio. Para calcular a velocidade dessas ondas de em um meio sólido elástico e homogêneo, utiliza-se a Equação 3.

$$V = f \cdot \gamma \quad (3)$$

Onde:

V é a Velocidade da onda (m/s),

f é a frequência (Hz), e

γ é o comprimento de onda (m).

A Equação 3 ajuda a entender como a frequência e o comprimento de onda das ondas estão relacionados à sua velocidade de propagação. No método de ensaio de VPU, um pulso de onda ultrassônica é gerado em um ponto na superfície do objeto de teste, e o tempo de viagem desse pulso até outro ponto é medido. Com base na distância entre os dois pontos, pode-se determinar a VPU da onda. Este método é essencial para avaliar as propriedades do concreto, pois permite analisar como as ondas se comportam dentro do material, ajudando a identificar possíveis problemas como vazios, fissuras e partículas de agregado que afetam a propagação das ondas e, por consequência, a integridade estrutural do concreto. Kaur *et al.* (2019) explicam que o ensaio consiste em posicionar os transdutores em distâncias conhecidas e emitir uma onda através de um transdutor emissor, recebendo-a em outro ponto da estrutura por um transdutor receptor. O tempo de trânsito do pulso aparece na tela do osciloscópio, e a velocidade é definida pela Equação 4:

$$V = \frac{L}{\Delta T} \quad (4)$$

Onde:

V é a Velocidade da onda (m/s),

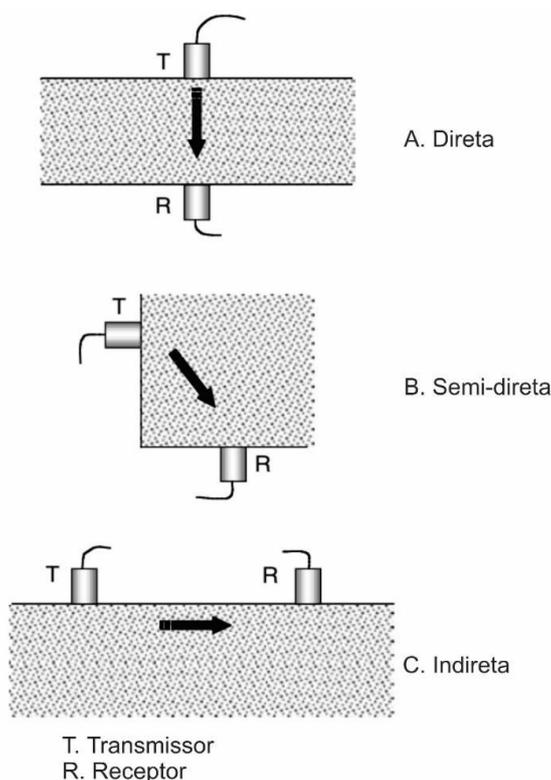
L é a Distância entre transdutores (m), e

ΔT é o Tempo de trânsito (s).

O ensaio de ultrassom pode ser aplicado através de três formas distintas de transmissão: direta, indireta e semidireta. A Figura 7 apresenta o posicionamento dos transdutores nas três formas de aplicação do ensaio de VPU, conforme adaptado de Naik, Malhotra e Popovics (2004).

Segundo a NBR 8802 (2019), na transmissão direta as ondas são recebidas com maior intensidade, sendo esta, a configuração mais recomendada para determinar a velocidade de propagação das ondas em um meio. A transmissão indireta é utilizada quando não se tem acesso a uma das faces do elemento. Sendo que a determinação da velocidade através da transmissão indireta é menos satisfatória do que através da transmissão direta.

Figura 7 - Configurações do posicionamento de medição do VPU. (A) Método direto. (B) Método semidireto. (C) Método indireto de superfície.



Fonte: Naik, Malhotra e Popovics (2004), modificado.

O equipamento de teste de VPU, representado na Figura 6, envolve um circuito que gera o pulso, mede o tempo de viagem através do material e amplifica o sinal recebido pelos transdutores. Estes transdutores, ao serem colocados em contato pleno com o objeto de teste, transmitem e recebem o pulso de onda. O tempo de trânsito do pulso, ΔT , é medido e utilizado para calcular a velocidade das ondas de compressão, conforme a Equação 4. Durante a propagação do pulso no concreto,

ocorre dispersão nas interfaces entre agregados e argamassa, resultando numa forma de onda complexa recebida pelo transdutor, que contém múltiplas reflexões de ondas. A variação na composição do concreto, especialmente na camada superficial, pode afetar a velocidade do pulso, sendo possível estimar a espessura e qualidade de camadas diferentes. Essas considerações são cruciais para uma interpretação precisa dos resultados e uma avaliação eficiente da integridade estrutural do concreto.

2.2.4. Determinação do Módulo de Elasticidade

Segundo Naik, Malhotra & Popovics (2004), a VPU de uma onda viajando por um material elástico é unicamente definida pelas constantes elásticas e pela densidade do material pela teoria de propagação de ondas. Portanto, é possível calcular o E_E de um material se a VPU for medida e os valores do coeficiente de Poisson e da densidade forem conhecidos ou assumidos. Esse método possui uma vantagem em relação a outras técnicas padronizadas, que utilizam frequências de vibração, pois o teste não é restrito a corpos de prova especialmente moldados em laboratório. Vários pesquisadores relatam a estimativa do E_E a partir de medições de VPU em concreto. No entanto é importante salientar que, geralmente, o módulo de elasticidade dinâmico estimado a partir de medições de VPU é maior do que o obtido a partir de medições de vibração, mesmo quando o valor do coeficiente de Poisson é conhecido. Segundo Resende (2018), o E_E pode ser correlacionado com a velocidade da onda de cisalhamento utilizando a Equação 5:

$$E_E = V_s^2 \times 2 \times \rho \times (1 + \nu) \quad (5)$$

Onde:

E_E é o Módulo de Elasticidade Estático (GPa),

V_s é a Velocidade da onda (m/s),

ρ é o Peso específico (kg/cm³), e

ν é o Coeficiente de Poisson.

Karaiskos *et al.* (2015) observa que o E_D é uma ferramenta importante para estimar melhor as deformações nas estruturas, contribuindo para a compreensão do comportamento estrutural. A Equação 6 fornece o valor do E_D :

$$E_D = V^2 \times \rho \times \frac{(1 + \nu_d) \times (1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)} \quad (6)$$

Onde:

E_D é o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa),

ν_d é o Coeficiente dinâmico de Poisson,

ρ é a Densidade (kg/cm³)

V é a Velocidade da onda (m/s).

Possan *et al.* (2021) enfatizam a importância de evitar a incorporação de incertezas nos resultados dos ensaios de determinação E_E e E_D . Eles destacam as recomendações de diversos pesquisadores, como Karaiskos *et al.* (2015), que defendem a análise conjunta de resultados representativos devido à quantidade de variáveis envolvidas. Vasconcelos e Giammusso *apud* Possan *et al.* (2021) alertam para o potencial de erros de execução de ensaios que podem aumentar as incertezas dos resultados em até 25%. Jacintho e Giongo (2000) observam que o tamanho do corpo de prova influencia diretamente o E_E . Araújo (2014) destaca a influência dos equipamentos utilizados nas medições das deformações, enquanto Metha e Monteiro (2014) mencionam a diminuição da velocidade de aplicação da carga como um fator que pode aumentar as deformações do concreto. Esses autores também apontam para a importância do estado de umidade dos corpos de prova, sendo os resultados em corpos de prova úmidos geralmente 15% maiores do que os em corpos secos.

2.3. ANÁLISE DINÂMICA

Segundo Aragão Filho *et al.* (2000), a inspeção visual constitui o método mais comumente empregado para o monitoramento da integridade estrutural. No entanto, sua eficácia pode ser limitada devido à inacessibilidade de determinadas regiões da estrutura e à ausência de um indicador quantitativo do nível de deterioração remanescente. Alternativas como END, incluindo raios-X e ultrassom, são geralmente locais e caros, sendo ideais como complementares a outros métodos que indicam regiões com possíveis falhas.

De acordo com Zhang *et al.* (2020), danos podem também ser identificados com a avaliação das Frequências Naturais (FN) de vigas de concreto armado, utilizando sensores de aceleração. A evolução dos danos em uma estrutura resulta na redução das FN, o que sugere a viabilidade da aplicação de métodos baseados em análise modal para o monitoramento da integridade estrutural e a previsão da vida

útil remanescente das estruturas de concreto armado. Outros trabalhos que abordam esse tema são: Cui *et al* (2017), Pranno *et al.* (2022), Hamad *et al.* (2015) e Hamid e Fakhri (2022).

Cardoso (2005), também destaca uma redução nas FN de vibração em vigas danificadas comparadas às vigas intactas. Sendo assim, optou-se por utilizar uma análise dinâmica complementar aos resultados de ultrassom, visando correlacionar as variações das FN das vigas ensaiadas com seus respectivos níveis de danificação.

3. METODOLOGIA E MATERIAIS

A partir das informações apresentadas, foi proposto o desenvolvimento de um modelo experimental em escala reduzida, com o objetivo de viabilizar a realização dos ensaios propostos. Esse modelo foi concebido para representar uma viga protótipo típica de obras de pequeno e médio porte na construção civil, respeitando os princípios da teoria das semelhanças.

Com base nesse modelo, foi realizado o dimensionamento de corpos de prova em concreto armado, seguidos da execução das perfurações nos corpos de prova e da aplicação dos procedimentos experimentais. Para verificação dos danos foram realizados os ensaios de Ultrassom e as avaliações dinâmicas, realizadas por meio da análise da frequência natural, tanto em seu estado original quanto após a perfuração, permitindo a comparação dos efeitos estruturais provocados pela perfuração.

3.1. DEFINIÇÃO DO PROTÓTIPO DE VIGA E DO MODELO REDUZIDO

O modelo matemático que descreve o decaimento do E_D de uma viga de concreto armado ao longo do seu comprimento e após a perfuração foi definido com base em uma função f composta por cinco variáveis, conforme apresentado na Equação 7.:

$$E_D^* = f(E_D, \lambda, \varphi, a, I) \quad (7)$$

Onde:

E_D e E_D^* representam os módulos de elasticidade, antes e após o dano respectivamente, em GPa;

I é o momento de inércia da seção, em m^4 ;

φ é o diâmetro do furo, sendo “ A ” a área do dano ou furo calculado, considerado como circular, em m;

a é a distância entre o centro da perfuração e o ponto observado na peça. (quanto maior essa distância, menor o impacto do choque na região da peça, associada a variável a), em m;

λ é o fator adimensional obtido a partir do método de perfuração e sugerido neste presente trabalho para três tipos diferentes de potência de perfuração: sem o uso martetele, com $\frac{1}{4}$ de potência de martetele e com $\frac{1}{2}$ de potência de martetele, considerando-se a máquina usada nos ensaios.

Parâmetros adicionais, relativos às armaduras ou à granulometria dos agregados, não foram incluídos, limitando a aplicação direta dos resultados a vigas similares às testadas. Contudo, espera-se que os resultados quantitativos sejam válidos para vigas semelhantes e sirvam como guia qualitativo para vigas distintas.

Os CP ensaiados deverão respeitar a teoria das semelhanças, considerando os números adimensionais Π de Vaschy-Buckingham, apresentados por Carneiro (1996). O número de grupos adimensionais Π é determinado pela diferença entre o número total de grandezas físicas (n) e o número de grandezas fundamentais (q) para o problema. Assim, observando-se a Equação 7, que conta com 6 grandezas físicas e, considerando-se 2 grandezas de base (problemas estáticos de mecânica), tem-se na Equação 8:

$$\Pi = n - q = 6 - 2 = 4 \quad (8)$$

Para o presente trabalho, foram adotados os seguintes números Π s:

$$\Pi_1 = \frac{E_D^*}{E_D} \quad (9)$$

$$\Pi_2 = \frac{\varphi}{a} \quad (10)$$

$$\Pi_3 = \frac{I}{a^4} \quad (11)$$

$$\Pi_4 = \lambda \quad (12)$$

Para garantir a semelhança física entre a viga protótipo e o modelo reduzido, os quatro números Π (Equações 9 a 12) devem ser iguais em ambos. Adotando-se a

notação de super-índice (p) para o protótipo e (m) para o modelo reduzido, tem-se para Π_1 (Equação 13):

$$\begin{aligned}\Pi_1^{(p)} &= \Pi_1^{(m)} \\ \frac{E_D^{*(p)}}{E_D^{(p)}} &= \frac{E_D^{*(m)}}{E_D^{(m)}}\end{aligned}\quad (13)$$

Como o concreto usado tanto no modelo quanto no protótipo são considerados iguais ($E_D^{(p)} = E_D^{(m)}$), a Equação 13 se resume a:

$$E_D^{*(p)} = E_D^{*(m)} \quad (14)$$

De acordo com a Equação 14, as reduções obtidas para E_D no modelo reduzido são idênticas às obtidas para o protótipo. Para Π_2 , tem-se:

$$\begin{aligned}\Pi_2^{(p)} &= \Pi_2^{(m)} \\ \frac{\varphi^{(p)}}{a^{(p)}} &= \frac{\varphi^{(m)}}{a^{(m)}}\end{aligned}\quad (15)$$

Adotando-se $\varphi^{(p)} = 3$ cm, como uma medida de furo mínima em um caso real para um tudo hidráulico ou um eletroduto de uma polegada, e $\varphi^{(m)} = 1$ cm, a correspondência entre as distâncias $a^{(p)}$ e $a^{(m)}$ ficam:

$$a^{(p)} = 3 \cdot a^{(m)} \quad (16)$$

Observando-se a Equação 16, nota-se que as distâncias a serem observadas entre o ponto de perfuração e a região analisada na viga protótipo são 3 vezes maiores que as correspondentes no modelo reduzido.

Para o número Π_3 , tem-se:

$$\begin{aligned}\Pi_3^{(p)} &= \Pi_3^{(m)} \\ \frac{I^{(p)}}{a^{(p)4}} &= \frac{I^{(m)}}{a^{(m)4}}\end{aligned}\quad (17)$$

Como $a^{(p)} = 3 \cdot a^{(m)}$, após manipulações algébricas:

$$I^{(p)} = 81 \cdot I^{(m)} \quad (18)$$

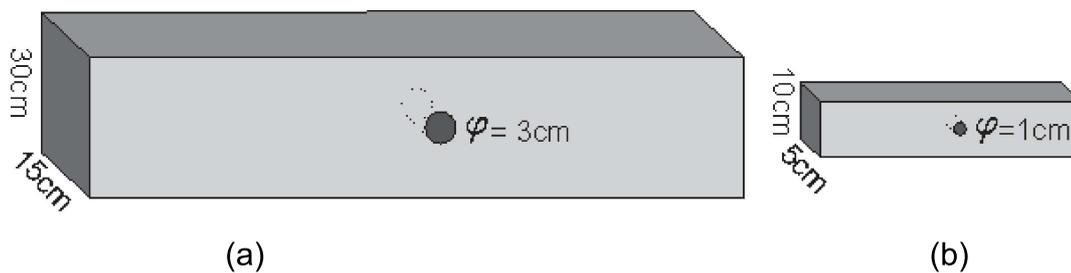
Finalmente, o quarto número Π fornece:

$$\begin{aligned}\Pi_4^{(p)} &= \Pi_4^{(m)} \\ \lambda^{(p)} &= \lambda^{(m)}\end{aligned}\quad (19)$$

A Equação 19 indica que os fatores adimensionais associados aos tipos de penetradores são os mesmos para o protótipo e para o modelo. Então, para garantir a semelhança física, a viga protótipo, com seção transversal retangular de 15 cm \times 30 cm e um furo de 3 cm de diâmetro centralizado, deverá ter um modelo reduzido representando os corpos de prova (CPs) a serem ensaiados, com seção de 5 cm \times 10 cm e um furo de 1 cm de diâmetro centralizado, conforme ilustrado na Figura 8. Lembrando que, apesar das reduções de E_D poderem ser diretamente obtidas pelo modelo reduzido (ver Equação 14), as posições onde se avaliam essas reduções, associadas à variável a , devem ser multiplicadas por 3, conforme apresentado na Equação 16, quando se quiser inferir sobre as reduções de E_D no protótipo.

Observa-se que o protótipo escolhido é um tipo de elemento estrutural muito usado em estruturas de pequeno e médio porte, sendo que o furo central pode ser atribuído à passagem de tubulação hidráulica. Observa-se também que a proporção entre a altura e a largura da viga protótipo escolhida é consistente com outros trabalhos da literatura, como nos trabalhos de Junges (2011) e Santos (2006).

Figura 8 - Representação das dimensões da: (a) viga protótipo; (b) viga modelo reduzido.



Fonte: Autor.

3.2. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO f DE DECAIMENTO DO E_D

A equação que define a função f , genericamente descrita na Equação 7, é obtida através da análise da dimensionalidade e proporcionalidade entre as variáveis envolvidas. Para tal, analisaram as 6 variáveis presentes na Equação 7, sendo uma

independente (E_D^*) e as outras 5 dependentes ($E_D, \lambda, \varphi, a, I$), e suas relações de proporcionalidade. Estas relações são analisadas nos tópicos que seguem.

- O valor de E_D^* tem como limite superior o valor de E_D , sendo este último considerado constante ao longo de um CP íntegro.
- À medida que a distância a aumenta, E_D^* diminui, uma vez que, com o aumento de a , há uma aproximação da região perfurada.
- Os valores da constante adimensional λ serão definidos, ajustando-se aos valores experimentais de cada tipo de perfuração. Pode-se dizer, entretanto, que λ é proporcional à energia e ao impacto da perfuradora dispensados para a realização do furo. Assim, para maiores valores de λ , tem-se mais fissuração e, conseqüentemente, menores valores de E_D^* .
- As demais variáveis envolvidas (I - inércia e φ - diâmetro do furo), além de outras que não foram consideradas e que, porventura, possam influenciar nos valores de E_D^* , foram mantidas constantes nos testes realizados. Assim, para se caracterizar a influência dessas grandezas nos valores de E_D^* , seriam necessários novos ensaios experimentais, algo que é proposto como trabalhos futuros.

Tendo como referência as análises supracitadas e assumindo que não há dependência direta entre as variáveis envolvidas, propõe-se então:

$$E_D^*(a, \lambda) = E_D^*(0, \lambda) - g(\varphi, I) \cdot a \cdot \lambda \quad (20)$$

Sendo $g(\varphi, I)$ uma função a ser determinada e que foge ao escopo do presente trabalho. Entretanto, para o caso dos CPs ora estudados, tem-se $g(\varphi, I)/E_D = k$, sendo k uma constante, uma vez que, para todos os ensaios, essas variáveis não foram alteradas. Assim, a Equação (20) pode ser reescrita como:

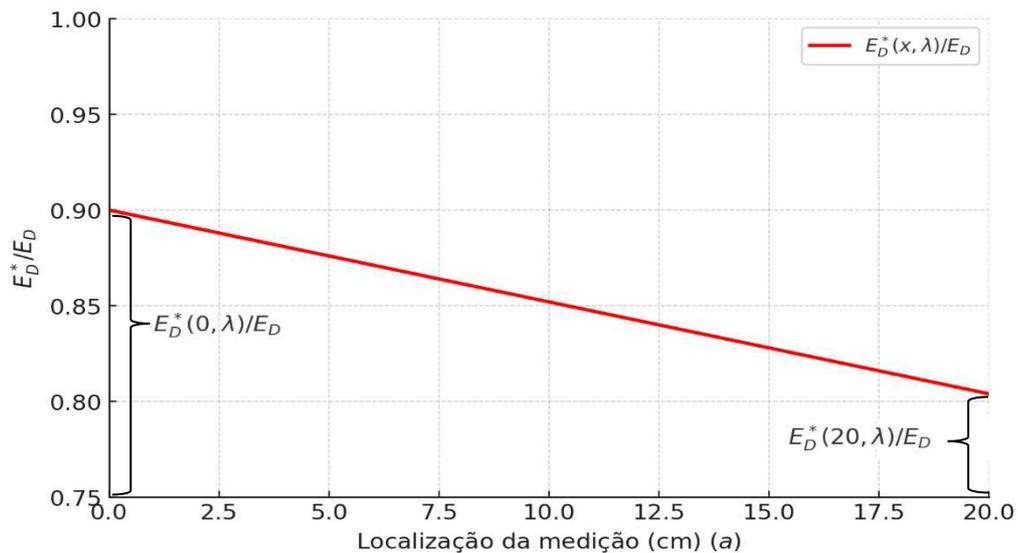
$$\frac{E_D^*(a, \lambda)}{E_D} = \frac{E_D^*(0, \lambda)}{E_D} - k \cdot a \cdot \lambda \quad (21)$$

onde $k = g(\varphi, I)/E_D$ (constante, com dimensão L^{-1} , sendo L a unidade de comprimento usada para a variável a).

Observa-se que a origem do referencial para a definição da variável a é o local onde se tem a medida de E_D^* mais à esquerda nos CPs. O valor de a é limitado à coordenada do furo. Isso ocorre devido à simetria assumida no comportamento do

Módulo de Elasticidade em relação à perfuração, onde pontos equidistantes ao furo, em ambos os lados, apresentam o mesmo valor de E_D^* . A Figura 9 esboça a função $E_D^*(a, \lambda)/E_D$, com valores típicos.

Figura 9 - Esboço do gráfico E_D^*/E_D por a , sendo a curva a representação da Equação 21 proposta.



Fonte: Autor.

A Equação 21 reforça que o presente trabalho avalia as reduções de E_D^* em função da variável a , que define a distância entre o furo e a região analisada, e do fator λ , sendo este último obtido em função do método de perfuração.

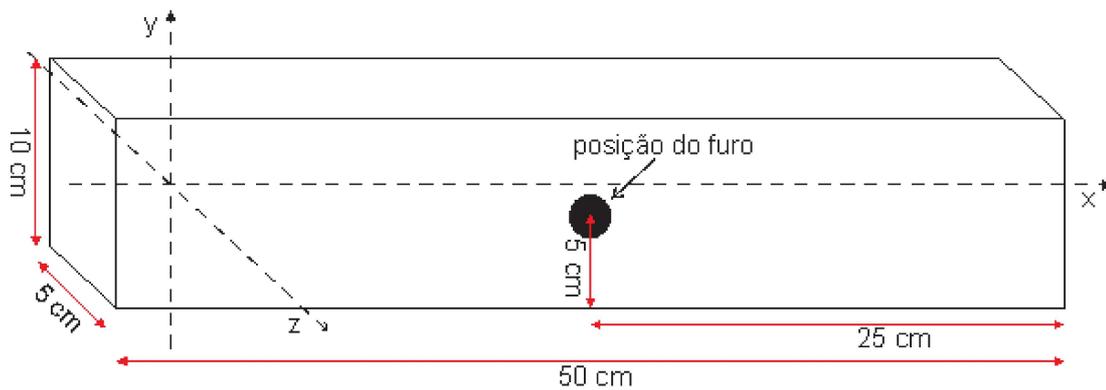
Embora dimensionalmente correta, a validação da Equação 20 depende de testes experimentais que avaliem a influência do tamanho do furo e do momento de inércia da viga íntegra (φ e I , respectivamente). Adicionalmente, como mencionado na Seção 5.1, parâmetros relativos às armaduras e à granulometria dos agregados não foram incluídos na Equação 20, restringindo sua aplicação direta. Portanto, é necessário investigar experimentalmente esses parâmetros, buscando compreender suas influências em E_D^* e, se relevantes, incorporá-los à Equação 20.

3.3. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A confecção dos corpos de prova, assim como os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Faculdade de

Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Respeitando-se as dimensões apresentadas anteriormente, foram confeccionados 20 moldes de dimensões 5 x 10 x 50 cm, ilustrado na Figura 10. As formas foram fabricadas em madeira e revestidas com plástico acrílico para evitar aderência ao concreto durante o processo de secagem. A união das formas foi realizada utilizando parafusos, garantindo estabilidade durante o preenchimento, compactação e desforma do concreto.

Figura 10 - Dimensões das formas, com indicação da posição do furo



Fonte: Autor.

A moldagem das peças foi realizada em duas camadas, com cada camada compactada por 60 golpes de um martelo de borracha ao redor da forma. Essa técnica de compactação por impacto foi adotada para garantir a densidade adequada do concreto e a eliminação de vazios na estrutura, simulando o efeito do vibrador em um caso real.

3.4. DOSAGEM DO CONCRETO

Foi adotado um concreto com traço em massa 1:0,84:2,53:3,72 (cimento, areia de britagem, areia natural de rio e brita "zero") Essa proporção foi selecionada a partir dos estudos realizados para a resistência de 25 MPa apresentado por Oliveira & Carvalho (2018), sendo essa a resistência aplicada em obras de pequeno e médio porte, que consideraram a resistência desejada e a trabalhabilidade adequada para a moldagem dos elementos estruturais. Para a consistência desejada no trabalho foi fixada a relação água/cimento de 0,60, adicionado-se ainda 0,65% de aditivo plastificante em relação à massa de cimento, seguindo a recomendação dos autores. O traço utilizado foi cuidadosamente medido, aplicado em quantidades de acordo com

a necessidade das moldagens programadas, em quilogramas: 20 kg de cimento, 67,43 kg de areia (de britagem e natural) e 74,48 kg de brita 0. Além disso, foram adicionados 0,13 kg de aditivo plastificante e 12 litros de água, ajustados conforme a umidade da areia para alcançar a consistência e trabalhabilidade desejadas do concreto.

A mistura foi realizada em betoneira de 140 litros. Na colocação dos materiais na betoneira, cada componente foi adicionado gradualmente, começando por uma parcela de água, seguida pelos agregados, o cimento e o aditivo, completando-se com o restante da água, garantindo uma mistura homogênea e uniforme. Durante o processo de mistura, a betoneira operou de forma contínua para assegurar a completa homogeneização dos materiais. Por fim, o concreto foi descarregado da betoneira em carrinho de mão e foi aplicado nos moldes, com rapidez e uniformidade, evitando-se a segregação dos materiais e garantindo a melhor qualidade dos CPs. A fluidez do concreto a partir resultado do ensaio abatimento de tronco de cone (Slump) foi de 85 mm (NBR 8953; 2015). As formas foram preenchidas em até duas horas depois da mistura do concreto atendendo as recomendações da NBR 5738 (2015). Os CPs cilíndricos, usados para medir a resistência aos 28 dias, foram moldados somente após todas as vigas estarem completamente cheias.

O processo de cura durou 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 5738 (2015). Após três dias, as peças foram desformadas e mantidas em cura por mais 20 dias. Essas condições de mistura, moldagem e cura resultaram numa resistência acima da esperada do concreto, após o ensaio de resistência a compressão. Seguindo a NBR 5739 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (2018), foram obtidos os resultados de resistências para os CP1, CP2 e CP3 os valores de 23,89 MPa, 25,75 MPa e 26,16 MPa, respectivamente. Portanto, resultaram em resistências à compressão (f_{cm}) de 25,27 MPa, próxima da resistência esperada de 25 MPa (com f_{ck} de 23,72 MPa). Ocorreu uma mínima variação nas dimensões das vigas prontas. Portanto, das 20 vigas moldadas, foram escolhidas as nove melhores, padronizadas em dimensões e massa para os ensaios. Após a desforma, foram selecionados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões dos CPs, suas respectivas massas.

Número do CP ensaiado	Dimensões do CP						Massa do CP (Kg)
	Comprimento do CP, eixo X		Altura do CP, eixo Y		Largura (ou base) do CP, eixo Z		
	L_{min} (cm)	$L_{máx}$ (cm)	h_{min} (cm)	$h_{máx}$ (cm)	b_{min} (cm)	$b_{máx}$ (cm)	
1	49,6	49,7	9,9	10,1	5,7	5,8	6,60
2	50,0	50,1	9,4	9,6	5,3	5,5	6,23
3	49,9	50,1	9,7	9,9	5,5	5,7	6,50
4	49,7	49,9	9,7	9,9	5,4	5,7	6,53
5	50,0	50,0	9,9	10,2	5,0	5,2	6,24
6	49,8	49,9	9,8	9,9	5,8	5,6	6,56
7	50,0	50,1	9,7	9,9	5,3	5,5	6,26
8	50,2	50,3	10,3	10,1	5,0	5,3	6,20
9	49,9	50,0	9,6	9,9	5,8	5,6	6,55

3.4.1. Cimento

Utilizou-se o cimento CP III-32 RS, classificado conforme a norma NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos (2018), produzido industrialmente através da moagem do clínquer, sulfato de cálcio, material carbonático e escória granulada de alto-forno, também conhecida como LHS – Ligante Hidráulico Siderúrgico. A escolha desse cimento foi devido à sua disponibilidade no mercado regional, pelo seu baixo calor de hidratação e por sua cura mais lenta, proporcionando um concreto com menor risco de fissuras.

3.4.2. Agregado miúdo

A areia natural proveniente do Rio Preto foi escolhida como agregado miúdo devido à sua granulometria adequada, passante na peneira 6,8 mm, e características físicas favoráveis para a produção de concreto de qualidade. Foram determinadas as propriedades físicas da areia, como massa unitária de 1,526 kg/dm³, massa específica real de 2,587 kg/dm³ (NBR 16916, 2021), e a umidade superficial de 2,20%, por meio do ensaio do frasco de Chapman (NBR 9775, 2011), para avaliar a quantidade de água retida no agregado.

A areia de britagem artificial foi fornecida por uma pedreira localizada na cidade de Matias Barbosa (MG). Foi produzida por meio de um processo de britagem de rochas de granulação mais grossa. Possui massa unitária de 1,72 kg/dm³ e massa específica real de 2,725 kg/dm³, com teor de material pulverulento igual a 20,8%.

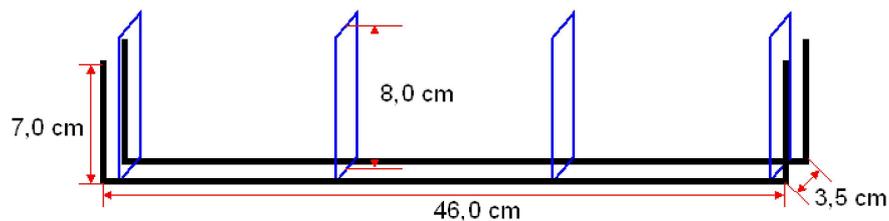
3.4.3. Agregado graúdo

A escolha da brita 0 na mistura se deveu ao tamanho dos elementos a serem moldados, minimizando desvios de resultados durante operações de perfuração realizados nos CPs. A presença de agregados graúdos maiores poderia comprometer a uniformidade e a resistência da estrutura. A brita 0, originada de rochas graníticas provenientes de uma pedreira em Matias Barbosa (MG), foi selecionada como agregado graúdo devido à sua resistência e durabilidade. As massas unitária e específica real da brita 0 foram de $1,428 \text{ kg/dm}^3$ e $2,726 \text{ kg/dm}^3$, respectivamente (NBR 16917, 2021).

3.5. ARMADURA

Na incorporação do aço como elemento de reforço foram adicionadas duas barras transversais de aço CA-60 de 5,0 mm de diâmetro, presas por quatro arames recozidos de 1,24 mm de diâmetro, formando uma estrutura semelhante à de um estribo. Essa configuração de estribos foi adotada exclusivamente para manter a posição das barras de aço dentro da forma durante a concretagem sem utilidade estrutural, e o aço longitudinal para garantir a distribuição uniforme das cargas ao longo da estrutura, portanto, a bitola foi escolhida respeitando a quantidade de aço mínima e com equivalência em relação a uma viga protótipo. Cada barra longitudinal possui 60 cm de comprimento, com uma dobra de 7 cm em cada extremidade para ancoragem na estrutura, proporcionando resistência suficiente para suportar as cargas aplicadas e com cobertura de 1 cm. O formato das barras está ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - As dimensões respectivas da armadura.



Fonte: Autor.

3.6. EXECUÇÃO DOS FUROS

Para a realização dos furos nas vigas de concreto, as peças foram fixadas em morsas na parte superior do CP, ou seja, na região sem armadura longitudinal, garantindo estabilidade durante o processo, conforme mostra a Figura 12 (a). Esse esquema foi escolhido por se aproximar do comportamento real de uma viga, em que sua parte superior normalmente se encontra também fixada, em uma ligação bastante rígida com a laje de concreto. Um exemplo de CP perfurado é mostrado na Figura 12(b). A máquina perfuradora Bosch Gbh 2-24D de 820W, usada para a realização dos furos nos CPs, é apresentada na Figura 12(c).

A determinação precisa da força de aplicação do dano durante o processo de perfuração apresenta desafios significativos devido à complexidade inerente ao sistema de medição. Em virtude dessa limitação, optou-se por uma abordagem alternativa e simplificada baseada na mensuração da vibração do sistema de perfuração por meio de um acelerômetro com capacidade de até 10 g, conforme mostrado na Figura 12 c, captando acelerações na direção longitudinal do furo. A Figura 13 apresenta a resposta típica registrada para a perfuração com o acelerômetro instalado.

Figura 12 - Foto ilustrativa do processo de perfuração viga perfurada e equipamento de perfuração utilizado.



(a) Processo de perfuração



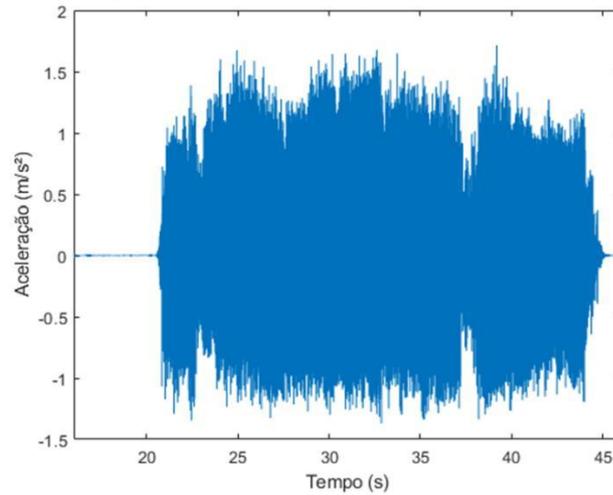
(b) Viga com furo central



(c) Equipamento de perfuração com acelerômetro instalado

Fonte: Autor.

Figura 13 - Gráfico aceleração versus tempo, do processo de perfuração da viga 5.



Fonte: Autor.

A partir dos dados coletados, procedeu-se à análise dos valores RMS (*Root Mean Square*) das acelerações (A_{rms}), que é uma medida estatística usada para determinar o valor efetivo de uma grandeza variável ao longo do tempo e do tempo necessário para a perfuração. No presente trabalho foram analisados três modos de perfuração: perfuração simples (sem martelete); perfuração com martelete a $\frac{1}{4}$ de sua potência máxima; e perfuração com martelete a $\frac{1}{2}$ de sua potência máxima. Os resultados médios obtidos para os tempos de perfuração (T) e valores de A_{rms} são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. A_{rms} e T , associado a cada potência de martelete aplicada na perfuração.

	A_{rms} (média, em m/s^2)	T (médio, em min)
sem potência de martelete	1,59	16,55
$\frac{1}{4}$ de potência de martelete	2,16	4,41
$\frac{1}{2}$ de potência de martelete	2,46	1,39

Os valores A_{rms} e de tempo médio necessário para furação serão usados mais adiante no texto para auxiliar na interpretação do parâmetro adimensional λ , usado para caracterizar o tipo de furação, conforme definido na Equação 7.

3.7. AVALIAÇÃO POR ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom foi realizado no LMCC, obedecendo a norma NBR 8802 (2019). O equipamento de ultrassom utilizado foi o modelo PUNDIT LAB+ da Proceq, mostrado na Figura 14, juntamente com o CP no momento do ensaio. Os transdutores usados (Figura 14) são de alta frequência, especificamente calibrados para ensaios em materiais de alta densidade como o concreto, com frequências variando entre de 20 e 500 kHz, conforme indicação normativa. Antes do início dos ensaios, o equipamento foi calibrado utilizando-se uma barra-padrão de referência, visando maior precisão dos ensaios. Para garantir a eficiência na transmissão e recepção das ondas ultrassônicas, foi empregado um gel entre os transdutores e a superfície do corpo de prova (CP), que reduz a impedância acústica na interface sólido-transdutor, minimizando perdas por reflexão e otimizando a transmissão da energia acústica.

Ao final do ensaio, o equipamento de ultrassom fornece, como saída, os parâmetros fundamentais para a análise do comportamento do material, incluindo o tempo necessário para a propagação das ondas entre os transdutores e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Esses dados foram registrados e utilizados nas etapas subsequentes de processamento e interpretação dos resultados.

3.7.1. Procedimento de uso do aparelho de emissão de pulsos ultrassônicos

Algumas recomendações para uso do aparelho de ultrassom devem ser observadas, segundo seu fabricante. São elas:

- Realizar a limpeza da superfície do CP utilizando um pano, para remoção de sujeira, detritos e resíduos.
- Posicionar de forma estratégica os transdutores de ultrassom em locais pré-determinados conforme o plano de ensaio previsto, levando em consideração a geometria e as características dos CPs.
- Verificar a estabilidade e a integridade dos transdutores antes da realização do ensaio para evitar erros de medição.

Figura 14 - Modelo de aparelho VPU.

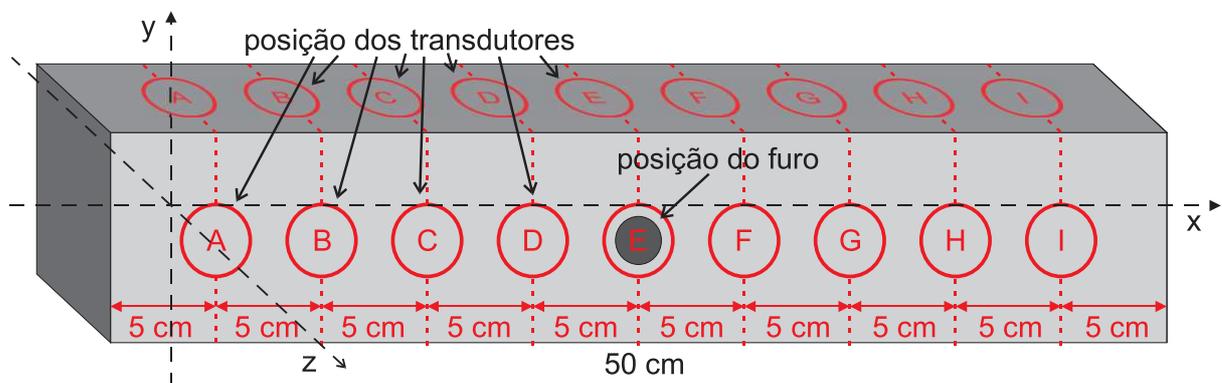


Fonte: Autor.

3.7.2. Malha de posicionamento dos transdutores

Os ensaios foram realizados com os transdutores colocados em nove posições distintas, chamadas de A, B, C, D, E (centro), F, G, H, e I, com espaçamento entre si de 5 cm de e a 5 cm das extremidades conforme mostrado na Figura 15. Essa figura também define a direção Y usada para se determinar as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. Nessa mesma direção foram realizadas medições em nove posições no eixo Z em três posições no eixo X.

Figura 15 - Posições de leitura nos ensaios de VPU nos CPs.



Fonte: Autor.

3.7.3. Medições

Os ensaios foram realizados tomando-se como critério quatro medições independentes em cada um dos nove pontos distribuídos ao longo da viga, nos eixos Y e Z, antes do furo. E, ainda, foram realizadas 16 medições independentes, após o furo, nos mesmos pontos, totalizando a amostragem para análise estatística.

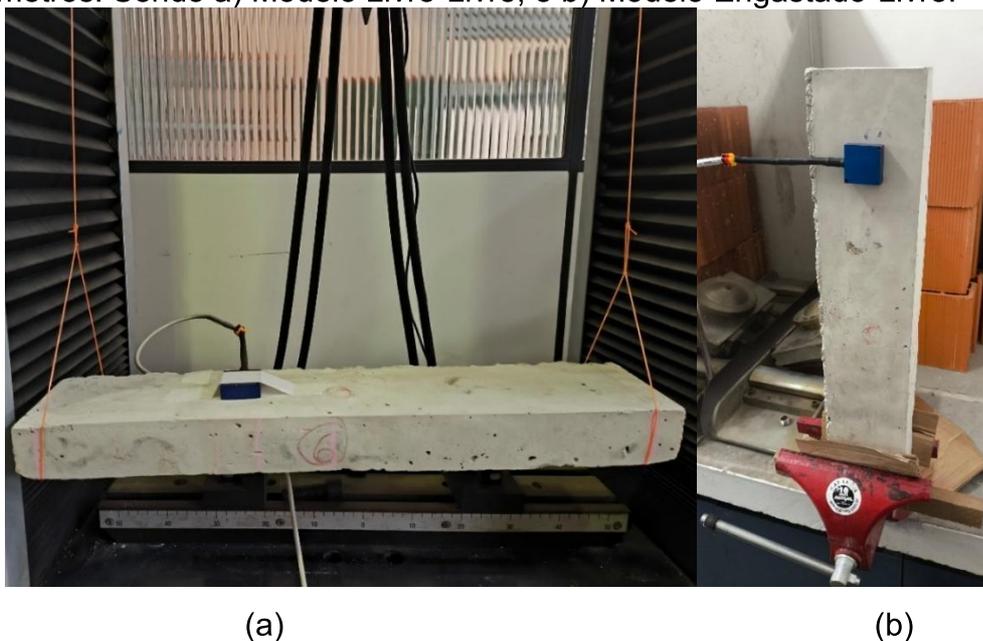
Com o intuito de melhorar a confiabilidade dos resultados obtidos, foram calculadas médias aparadas, descartando-se 25% dos valores mais distantes da média global, minimizando assim a influência de *outliers*. Dentre os fatores que podem influenciar a medição estão as imprecisões do aparelho de ultrassom, variações na condição superficial da viga, como rugosidade ou irregularidades locais, e a quantidade inadequada de gel condutor aplicado durante os ensaios

Por fim, os valores finais das medições foram organizados e analisados com base em métodos estatísticos apropriados, permitindo a identificação das tendências. A comparação entre os valores obtidos antes e depois da perfuração possibilita a quantificação das alterações nos E_D e a avaliação do impacto estrutural dos furos ao longo dos diferentes eixos analisados.

3.8. AVALIAÇÃO DINÂMICA

A avaliação dinâmica das vigas foi realizada em dois cenários distintos: livre-livre (suspenso, Figura 16(a)) e engastado-livre (fixo, Figura 16(b)). O objetivo foi determinar as FN de vibração e avaliar as alterações nessas frequências após a introdução de um furo no ponto médio da viga.

Figura 16 - Imagem da localização dos ensaios e da posição dos CPs e dos acelerômetros. Sendo a) Modelo Livre-Livre, e b) Modelo Engastado-Livre.

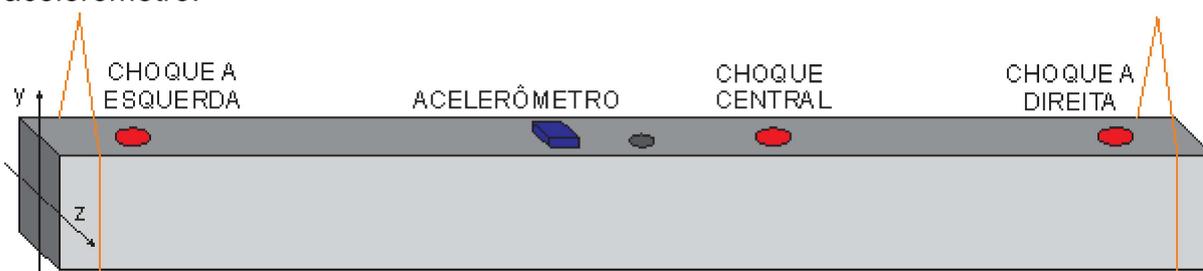


Fonte: Autor.

No cenário com CP livre-livre, as vigas de concreto armado foram suspensas por fios de náilon de alta resistência e massa desprezível, posicionados em suas extremidades, conforme mostrado na Figura 17. Este arranjo teve como finalidade minimizar vibrações externas indesejadas e garantir que as extremidades permanecessem livres, mas devidamente amarradas, de forma a evitar deslocamentos ou movimentos excessivos durante os testes.

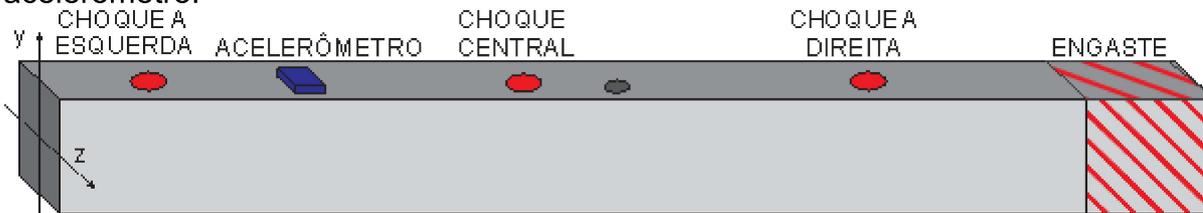
No modelo engastado-livre, a viga de concreto armado foi configurada de maneira a ter uma extremidade rigidamente engastada, enquanto a outra extremidade fica livre para se mover, conforme mostrado na Figura 18. Para estrutura de fixação foi usada uma morsa mecânica (ou torno de bancada de aço). Estável para garantir que a viga ficasse firmemente engastado em uma extremidade, para evitar qualquer movimento ou vibração indesejada. A extremidade da viga, 5 cm a partir da extremidade a esquerda, foi inserida na estrutura de fixação e ancorada com parafusos de alta resistência, garantindo que não houvesse movimento relativo entre a viga e a estrutura de fixação. Os impactos mecânicos foram aplicados manualmente em três pontos da viga, no centro, à direita e a esquerda da viga, conforme a Figura 17 e 18. Foi utilizado uma peça de madeira marcada para a realização do choque, garantindo a repetição das condições de impacto ao longo dos experimentos.

Figura 17 - Posição do ensaio, em destaque a localização dos choques e do acelerômetro.



Fonte: Autor

Figura 18 - Posição do ensaio, em destaque a localização dos choques e do acelerômetro.



Fonte: Autor.

As vibrações induzidas pelos choques foram registradas por meio de um acelerômetro instalado na superfície da viga, posicionados para captar as amplitudes de aceleração no ponto central do CP e mais à direita do CP para os modelos livre-livre e engastado-livre respectivamente (ver Figuras 17 e 18)

Os dados de vibração foram medidos imediatamente após o impacto e durante o período de amortecimento das vibrações, permitindo a análise das FN do CP. Para tal foi utilizado um acelerômetro com capacidade de 2g e um sistema de aquisição de sinais, ambos da marca Lynx. Este conjunto trabalha junto para coleta, conversão e processamento de dados de vibração que foram captados em 24000 Hz, configurado para realizar medições durante um período de 30 segundos, sendo realizado cerca de 6 impactos nesse intervalo. Sendo os sinais captados em duas direções, no eixo Y e no eixo Z da viga.

As frequências naturais de vibração antes e depois da realização de furos foram obtidas através do uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT), via Matlab.

4. RESULTADOS

Os ensaios realizados com o objetivo de avaliar o E_D por meio da propagação de pulsos ultrassônicos e da análise das frequências naturais de vibração permitem uma caracterização do comportamento estrutural das vigas de concreto armado submetidas à perfuração. A utilização de ambos os ensaios permite a correlação entre os resultados obtidos, de modo a verificar a consistência dos dados. A partir dessa comparação, é possível confirmar a confiabilidade dos valores encontrados, uma vez que os resultados apresentem semelhanças.

4.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Os resultados resumidos obtidos para E_D via ensaio de ultrassom na direção Y e Z, para os três níveis de potência do marteleto analisados: 1/2 da potência de marteleto, com o uso de 1/4 da potência e sem uso de marteleto podem ser observados nas Tabelas 3, 4 e 5, respectivamente. Com relação aos desvios padrões obtidos, pode-se afirmar que aqueles de menor magnitude indicam uma dispersão de resultados menos significativa, o que pode ser um indicativo de confiabilidade das medidas obtidas. Assim, observa-se que os desvios padrões médios mostrados na Tabela 3, antes e depois do furo foram, respectivamente, 2,60 GPa e 2,88 GPa o que corresponde a aproximadamente 7,17% e 9,23% dos valores de E_D apresentados. Já para Tabela 4, esses valores sobem para 3,27 GPa (antes do furo) e 2,70 GPa (depois do furo), respectivamente, representando, aproximadamente, 9,35% e 8,81% dos valores de E_D apresentados. Finalmente, para Tabela 5, tem-se 3,56 GPa e 3,44 GPa para os desvios padrões médios antes e depois dos furos, respectivamente, sendo esses equivalentes a 10,67% e 12,07% dos valores de E_D apresentados. Dessa forma, entende-se que os resultados obtidos depois da furação com marteleto a 1/2 de potência devem ser observados com maior reserva, uma vez que a sua respectiva dispersão (desvio padrão de 12,07%) está maior que aquelas alcançadas nas demais situações.

Os resultados obtidos no estudo atual corroboram, em grande parte, com os resultados do estudo preliminar, evidenciando a relação entre o dano aplicado ao concreto e as variações do E_D , em função das condições experimentais demonstradas. As proporções de E_D por ultrassom confirmaram a tendência de

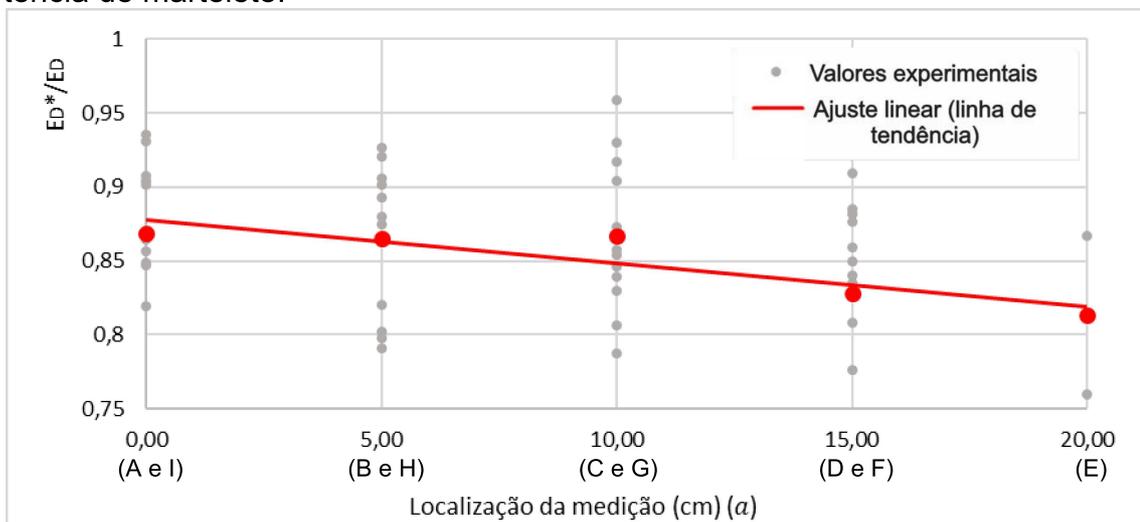
redução com a proximidade dos furos, comportamento já apresentado nos testes preliminares.

Os valores de E_D apresentados nas Tabelas 3 a 5 oscilam em torno de 35 GPa e tendem a diminuir à medida que se aproximam dos furos. Essa tendência será analisada com mais detalhes a partir do resumo dos resultados extraídos dessas tabelas e apresentados nos gráficos das Figuras 19 a 21. Os gráficos mostram a razão E_D^*/E_D média após a perfuração, evidenciando reduções mais expressivas próximas ao furo (ponto E). Essa variação é confirmada pelos ajustes lineares (destacados em vermelho), cujos picos ocorrem nas extremidades esquerdas dos gráficos, correspondendo aos pontos de leitura mais à borda do CP. A nuvem de pontos em cinza representa medições realizadas em cada CP específico e em uma direção distinta, enquanto os valores médios são destacados em vermelho. A linha contínua vermelha corresponde à interpolação linear desses valores médios, permitindo avaliar a variação de E_D em função da distância ao furo.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos de E_D , para os transdutores medindo a VPU na direção Y e Z, com o uso de $\frac{1}{2}$ de potência de martelo.

Número do CP (Viga) ensaiado e eixo de leitura			Distância da borda a esquerda do CP ao ponto de leitura do pulso de Ultrassom (cm)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
			Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa)								
1	Z	Antes do furo	32,28	36,97	41,77	39,07	41,32	38,58	37,95	36,81	34,65
		Depois do furo	27,51	29,87	29,32	30,09		31,62	31,26	29,46	31,89
	Y	Antes do furo	36,66	36,96	38,08	37,67	35,87	36,38	37,07	36,17	32,99
		Depois do furo	32,17	32,58	32,50	32,64	32,29	28,90	30,02	32,77	31,53
2	Z	Antes do furo	38,15	37,79	38,86	35,58	35,24	36,35	37,46	39,69	38,54
		Depois do furo	33,56	34,28	34,14	25,73		27,06	30,90	29,71	30,51
	Y	Antes do furo	37,83	37,36	37,45	36,04	36,45	35,75	38,53	36,24	37,49
		Depois do furo	34,82	32,21	33,66	32,96	30,30	33,86	35,70	34,52	34,66
3	Z	Antes do furo	38,91	38,14	38,26	40,08	38,06	40,01	40,15	36,69	39,48
		Depois do furo	32,27	33,73	31,49	31,98		34,63	32,84	30,53	33,78
	Y	Antes do furo	36,76	37,08	36,54	34,58	33,88	35,90	36,89	36,56	34,37
		Depois do furo	33,66	33,57	31,78	31,28	28,28	31,09	31,93	33,25	31,61
Média (Desvio Padrão)	Antes do furo	36,76 (2,36)	37,39 (0,49)	38,49 (1,79)	37,17 (2,14)	36,80 (2,61)	37,16 (1,73)	38,01 (1,21)	37,03 (1,33)	36,25 (2,60)	
	Depois do furo	32,33 (2,56)	32,71 (1,59)	32,15 (1,73)	30,78 (2,68)	30,29 (2,00)	31,19 (2,88)	32,11 (2,00)	31,71 (2,09)	32,33 (1,56)	

Figura 19 - Gráfico descrição dos resultados da razão do E_D/E_D^* (antes e após a perfuração), em função da localização da medição na viga, com o uso de $\frac{1}{2}$ de potência de martelo.

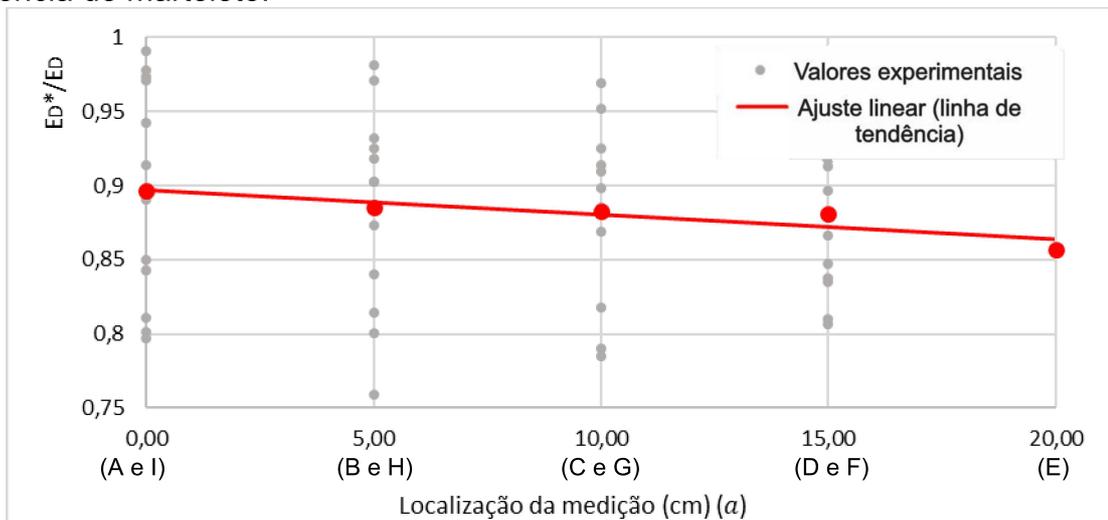


Fonte: Autor.

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos de E_D , para os transdutores medindo a VPU na direção Y e Z, com o uso de $\frac{1}{4}$ de potência de martetele.

Número do CP (Viga) ensaiado e eixo de leitura			Distância da borda a esquerda do CP ao ponto de leitura do pulso de Ultrassom (cm)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
			Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa)								
4	Z	Antes do furo	29,72	32,42	34,50	35,30	34,42	35,31	38,21	35,04	31,83
		Depois do furo	28,00	26,23	27,30	29,27		28,94	31,40	27,65	27,53
	Y	Antes do furo	32,08	35,78	36,55	36,69	38,21	38,20	37,40	37,82	37,35
		Depois do furo	33,78	33,55	31,96	32,76	32,43	32,60	33,48	33,91	33,64
5	Z	Antes do furo	34,71	33,60	32,85	32,20	31,55	31,44	29,16	29,78	33,62
		Depois do furo	27,68	30,16	30,45	29,92		28,83	30,02	31,16	29,11
	Y	Antes do furo	33,97	35,74	33,84	37,88	35,92	35,83	35,33	35,61	36,09
		Depois do furo	31,57	31,18	32,89	32,78	31,39	30,97	30,58	32,20	34,22
6	Z	Antes do furo	33,05	34,38	34,68	35,05	32,34	32,85	33,62	33,53	34,07
		Depois do furo	29,35	28,14	27,12	27,88		27,99	28,25	29,02	30,75
	Y	Antes do furo	34,49	34,24	34,33	34,92	35,41	35,67	36,14	36,18	34,52
		Depois do furo	33,55	31,71	31,58	31,54	29,60	31,68	31,03	31,97	32,56
Média (Desvio Padrão)	Antes do furo	33,00 (1,88)	34,36 (1,28)	34,46 (1,22)	35,34 (1,92)	34,64 (2,44)	34,88 (2,40)	34,97 (3,27)	34,66 (2,77)	34,58 (1,93)	
	Depois do furo	30,65 (2,70)	30,16 (2,63)	30,22 (2,46)	30,69 (1,99)	31,14 (1,43)	30,17 (1,84)	30,79 (1,72)	30,98 (2,28)	31,30 (2,64)	

Figura 20 - Gráfico descrição dos resultados da razão do E_D/E_D^* (antes e após a perfuração), em função da localização da medição na viga, com o uso de $\frac{1}{4}$ de potência de martetele.

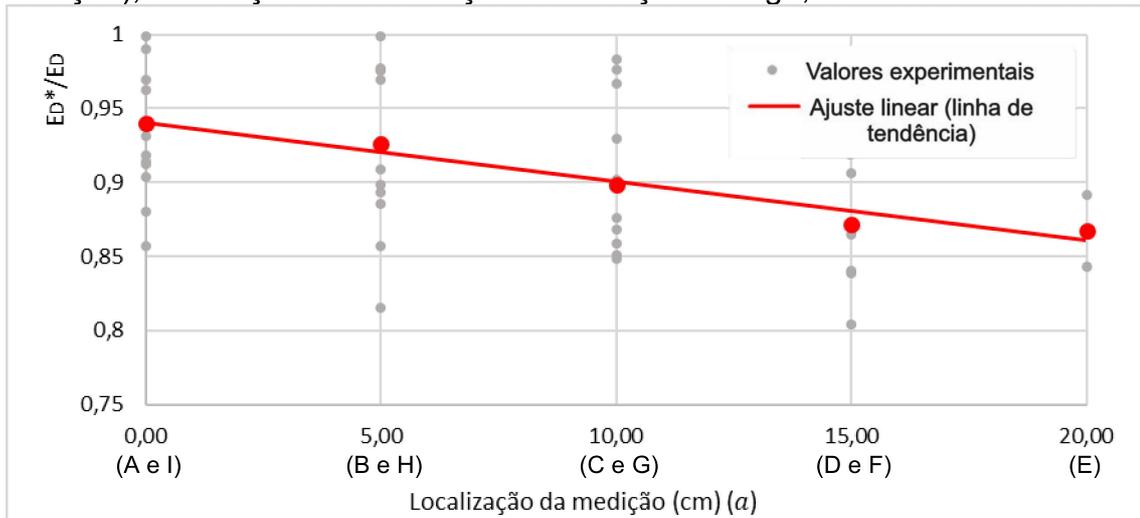


Fonte: Autor.

Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos de E_D , para os transdutores medindo a VPU na direção Y e Z, sem o uso de potência de martelo.

Número do CP (Viga) ensaiado e eixo de leitura			Distância da borda a esquerda do CP ao ponto de leitura do pulso de Ultrassom (cm)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
			Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa)								
7	Z	Antes do furo	31,15	28,64	29,18	29,07	29,82	30,39	30,32	34,85	32,19
		Depois do furo	28,62	28,64	28,69	28,08		28,04	28,42	30,37	30,49
	Y	Antes do furo	31,42	33,18	32,27	32,77	31,80	32,88	32,06	31,35	32,33
		Depois do furo	31,70	34,51	32,06	31,29	30,80	32,85	33,31	34,39	34,38
8	Z	Antes do furo	33,20	30,49	28,51	30,16	30,79	31,28	31,78	34,55	33,67
		Depois do furo	29,43	27,25	24,02	22,04		26,86	30,12	31,00	32,16
	Y	Antes do furo	36,02	35,99	37,58	38,05	36,33	37,88	37,59	37,75	35,54
		Depois do furo	31,12	32,39	33,56	31,49	30,85	31,31	32,86	32,60	33,10
9	Z	Antes do furo	33,03	35,79	34,94	36,86	34,32	33,31	36,30	32,16	33,68
		Depois do furo	30,19	30,02	29,00	28,90		30,72	28,36	29,86	30,55
	Y	Antes do furo	35,27	35,21	34,79	33,28	35,13	33,47	34,10	34,21	35,86
		Depois do furo	32,40	29,59	29,26	29,16	28,18	34,62	32,63	32,65	30,91
Média (Desvio Padrão)	Antes do furo	33,35 (1,98)	33,22 (3,05)	32,88 (3,55)	33,37 (3,56)	33,03 (2,60)	33,20 (2,59)	33,69 (2,82)	34,14 (2,25)	33,88 (1,55)	
	Depois do furo	30,58 (1,43)	30,40 (2,63)	29,43 (3,28)	28,49 (3,44)	29,94 (1,53)	30,73 (2,90)	30,95 (2,27)	31,81 (1,71)	31,93 (1,57)	

Figura 21 - Gráfico descrição dos resultados da razão do E_D/E_D^* (antes e após a perfuração), em função da localização da medição na viga, sem uso do martelo.



Fonte: Autor.

As linhas de tendência ou ajustes lineares mostrados nos gráficos das Figuras 19 a 21 representam as respectivas Equações 21 para cada método de furação. Nessas figuras, é possível observar que o ajuste linear adotado no presente trabalho pode ser considerado adequado, uma vez que os coeficientes de determinação (R^2) foram todos superiores a 0,81, chegando a alcançar mais de 0,96 para as perfurações realizadas sem martetele (quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 , melhor é a qualidade da regressão linear).

Reescrevendo as Equações 21, obtidas dos gráficos das Figuras 19 a 21, tem-se:

$$\frac{E_D^*(a, \lambda_{1/2})}{E_D} = 0,8777 - 0,0029 \cdot a \quad (22)$$

com martetele a $\frac{1}{2}$ potência;

$$\frac{E_D^*(a, \lambda_{1/4})}{E_D} = 0,8973 - 0,0017 \cdot a \quad (23)$$

com martetele a $\frac{1}{4}$ potência; e

$$\frac{E_D^*(a, \lambda_0)}{E_D} = 0,9403 - 0,0040 \cdot a \quad (24)$$

sem martetele.

Sendo os subíndices $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ e 0 da variável λ , respectivamente associados aos três tipos de perfuração: com $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ e sem potência de martetele.

Das Equações 22 a 24, é possível obter os respectivos coeficientes lineares, associados aos valores de $\frac{E_D^*(0, \lambda)}{E_D}$:

$$\frac{E_D^*(0, \lambda_{1/2})}{E_D} = 0,8777 \quad (25)$$

$$\frac{E_D^*(0, \lambda_{1/4})}{E_D} = 0,8973 \quad (26)$$

$$\frac{E_D^*(0, \lambda_0)}{E_D} = 0,9403 \quad (27)$$

Os valores $\frac{E_D^*(0, \lambda)}{E_D}$ apresentados nas Equações 25 a 27 demonstram uma excelente proximidade com os respectivos valores experimentais, com diferença percentual de -1,1%, 0,1% e -0,1% para os tipos de perfuração com $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ e sem potência de martetele, respectivamente. Essas constatações reforçam a qualidade do

ajuste linear. De forma semelhante, é possível comparar os dados experimentais com os respectivos valores obtidos através da regressão linear para $a = 20$ cm (na região do furo). Para os dados da regressão, tem-se:

$$\frac{E_D^*(20, \lambda_{1/2})}{E_D} = 0,8197 \quad (28)$$

$$\frac{E_D^*(20, \lambda_{1/4})}{E_D} = 0,8633 \quad (29)$$

$$\frac{E_D^*(20, \lambda_0)}{E_D} = 0,8603 \quad (30)$$

Levando a diferenças percentuais de -0,7%, -0,8% e 0,8% para os tipos de perfuração com $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ e sem potência de martetele, respectivamente. Mais uma vez, tem-se outro indicativo positivo de que o ajuste linear proposto está adequado.

4.1.1. Análise da região nas proximidades do furo

Observando-se as Equações 28 a 30, fica evidente que o uso do martetele a meia potência gera maiores degradações na região mais próxima do furo. Por outro lado, observa-se que os demais métodos de perfuração levaram a resultados semelhantes, sendo que o uso de $\frac{1}{4}$ de potência de martetele teve um desempenho ligeiramente melhor, pois apresentou menor redução do Módulo de Elasticidade. Esses resultados podem ser, em parte, explicados pelas amplitudes RMS das acelerações captadas junto à furadeira e pelos respectivos tempos de realização dos furos (ver Tabela 2). Com $\frac{1}{2}$ potência de martetele, têm-se as maiores amplitudes RMS de acelerações, o que provocou uma maior fissuração. Já com $\frac{1}{4}$ de potência ou sem martetele, há menores valores RMS, o que resultou em menos degradação.

Nota-se que os resultados sem martetele, mesmo com valores RMS inferiores em relação à perfuração com $\frac{1}{4}$ de potência, por ter atuado por um tempo aproximadamente quatro vezes maior, acabaram por gerar níveis de degradação próximas ao furo de magnitudes semelhantes àquelas geradas com a furadeira com martetele a $\frac{1}{4}$ de potência.

4.1.2. Análise da região mais afastada do furo

Nesta região, observando-se as Equações 25 a 27, fica claro que, mais uma vez, o uso de martetele a $\frac{1}{2}$ potência gerou maiores degradações e,

conseqüentemente, maiores reduções do Módulo de Elasticidade. Em seguida, têm-se os resultados para ¼ de potência e, por fim, os resultados sem martetele. Percebe-se, a partir desses resultados, que quanto maior a potência utilizada, maiores os níveis de fissuração gerados em pontos mais afastados do furo, o que era de se esperar.

4.1.3. Análise do fator λ

De acordo com as Equações 22 a 24, os valores de λ podem ser estimados através dos coeficientes angulares dos ajustes lineares. Assim, tem-se:

$$\lambda_{1/2} = \frac{0,0029}{k} \quad (31)$$

$$\lambda_{1/4} = \frac{0,0017}{k} \quad (32)$$

$$\lambda_0 = \frac{0,0040}{k} \quad (33)$$

Lembrando que k é uma constante para os casos estudados, os métodos de perfuração podem ser ordenados em ordem crescente de λ : ¼ de potência de martetele, ½ de potência de martetele e sem martetele. Esses valores mostram uma curva com a taxa de variação da redução do Módulo de Elasticidade em relação à variável a mais suave para o uso de 1/4 de potência, o que está associado a uma distribuição mais uniforme da fissuração ao longo do CP. Por outro lado, os resultados sem martetele levam aos maiores valores de λ , refletindo uma taxa de declínio mais acentuada do Módulo de Elasticidade à medida que se aproxima do furo.

4.1.4. Análise da região não afetada pelo furo

Partindo-se das Equações 22 a 24, é possível calcular os respectivos valores de a , para os quais tem-se:

$$\frac{E_D^*(a, \lambda)}{E_D} = 1 \quad (34)$$

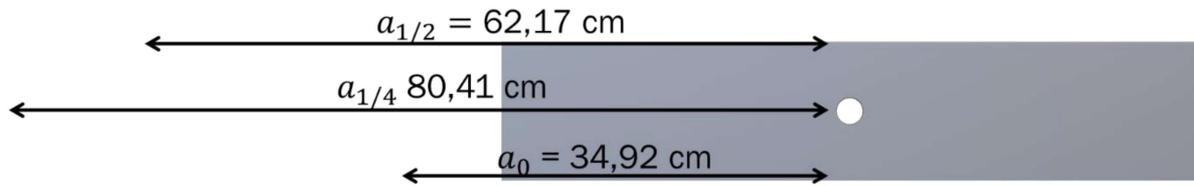
Esses valores refletem a extensão da região na qual o Módulo de Elasticidade seria afetado pelo furo. Assim, ter-se-ia:

$$a_{1/2} = -42,1724 \text{ cm} \Rightarrow 62,1724 \text{ cm do furo}$$

$$a_{1/4} = -60,4118 \text{ cm} \Rightarrow 80,4118 \text{ cm do furo}$$

$$a_0 = -14,9250 \text{ cm} \Rightarrow 34,9250 \text{ cm do furo}$$

Figura 22 - Extensão do dano, ou redução do E_D , no CP para cada modo de perfuração.



Fonte: Autor.

Percebe-se, na Figura 22, que os valores para 1/4 de potência afetariam regiões mais afastadas do furo do que outras formas de furação. Também se observa que a furação sem marteleto é a que degradaria a menor região do CP. Mais uma vez, é necessário evocar a Tabela 2 para melhor compreender esses resultados. A furação com 1/4 de potência, apesar de ter um valor de tração RMS médio inferior ao de 1/2 potência, possui um tempo de atuação praticamente três vezes maior, o que faria com que a fissuração se propagasse por extensões maiores do CP. Ressalta-se que essas análises são teóricas, uma vez que o CP não possui dimensões que permitem a verificação dos valores de a apresentados, tampouco das respectivas reduções do Módulo de Elasticidade. Daí o uso de verbos no futuro do pretérito (condicional).

4.1.5. Síntese das Análises

Diante das análises dispostas nos itens 6.1.1 a 6.1.4, pode-se concluir que:

- i. Maiores intensidades de marteleto tendem a levar a maiores reduções do Módulo de Elasticidade. É necessário observar outros parâmetros, como o tempo de perfuração. Potências menores (ou nulas), que ocorrem por mais tempo, também podem gerar reduções significativas.
- ii. Não usar marteleto tende a reduzir o Módulo de Elasticidade na região do furo de forma semelhante ao que ocorre com o uso de potências baixas. No presente estudo, mesmo que por pouca margem, em função do tempo de furação, não usar marteleto reduziu mais o Módulo de Elasticidade no centro da viga do que o uso de 1/4 de marteleto.
- iii. A fissuração gerada pelas potências baixas de Marteleto parece ser mais distribuída ao longo do CP. A utilização de um martelo de 1/4 de potência resultou na menor disparidade entre a redução do Módulo de Elasticidade na região do furo e nas áreas mais afastadas.

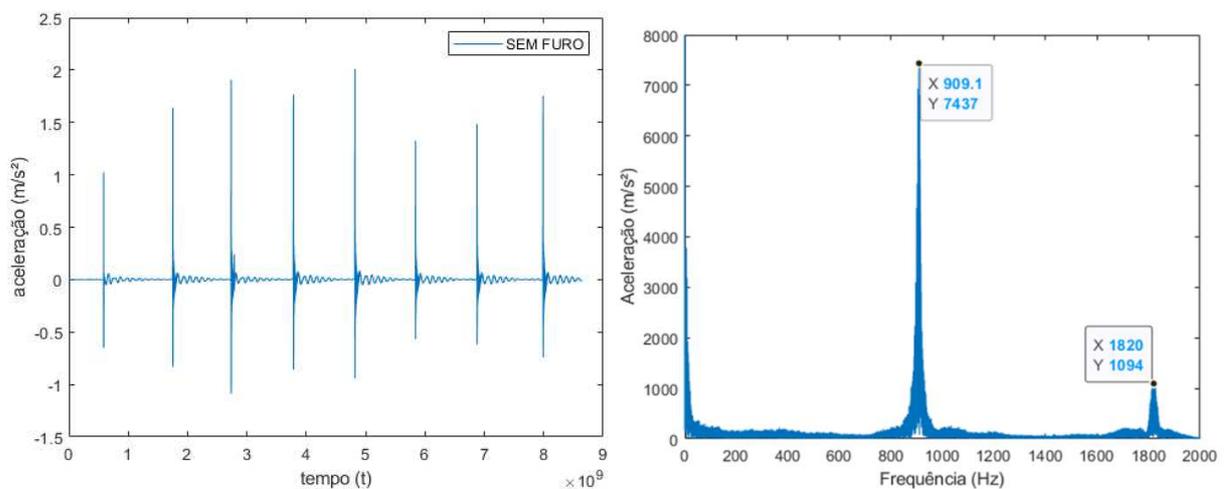
iv. Sem o uso de marteleto, há maior tempo de perfuração, porém, sem os impactos na perfuração, os danos ficam mais restritos à região próxima ao furo.

v. Com impactos na perfuração causados pelo marteleto, deve-se considerar o tempo necessário para fazer o furo. No presente estudo, verificou-se que o uso de marteleto a $\frac{1}{2}$ potência apresentou uma tendência de afetar uma área menor do CP, quando comparado ao uso de $\frac{1}{4}$ de potência, já que teve menos tempo de perfuração. Entretanto, em todas as análises o uso de maior potência gerou maior degradação.

4.2. FREQUÊNCIAS NATURAIS

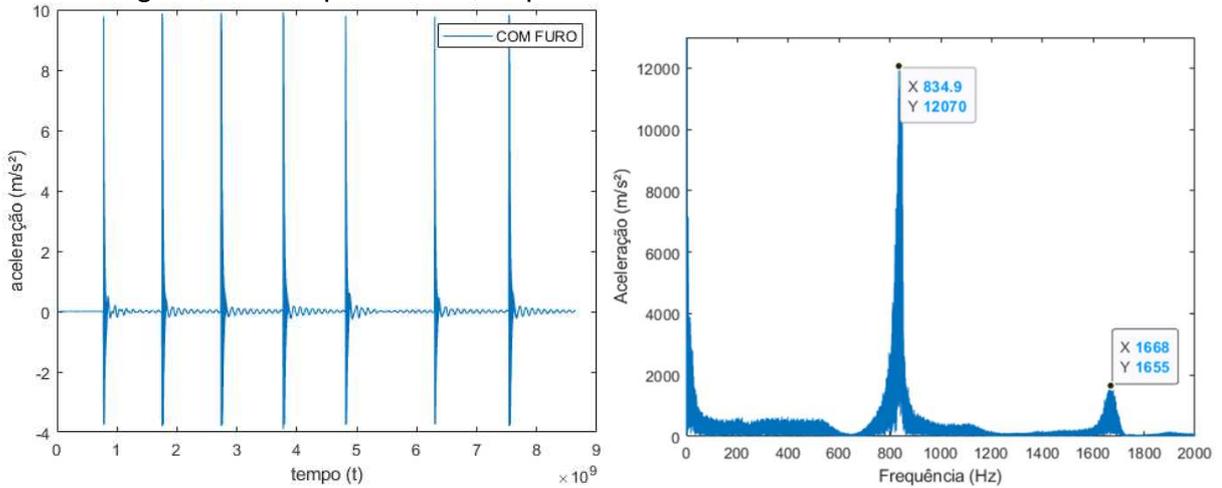
As Figuras 23 e 24 apresentam os gráficos com respostas típicas em termos de acelerações para um impacto no ponto central, medidas no eixo Y, nas duas condições: SEM FURO e COM FURO, respectivamente. Nessas figuras, são mostrados os resultados das acelerações no domínio do tempo e da frequência. No exemplo apresentado, a primeira FN do CP foi de 909,1 Hz antes do furo e 834,9 Hz após a realização do furo. Essa variação de 74,2 Hz (8,16%) reflete a alteração nas propriedades dinâmicas da viga, confirmando o efeito da influência sobre a estrutural.

Figura 23. Gráficos do ensaio no domínio do tempo, e no domínio das frequências. Para a Viga 9, no choque central, antes do furo.



Fonte: Autor.

Figura 24. Gráficos do ensaio no domínio do tempo, e no domínio das frequências. Para a Viga 9, no choque central, depois do furo.



Fonte: Autor.

Tabela 6. Tabela resumo das FN, das vigas perfuradas com a potência de $\frac{1}{2}$ de martetele.

	LIVRE-LIVRE (Hz)			LIVRE-ENGASTADO (Hz)		
	sem furo	com furo	diferença	sem furo	com furo	diferença
Viga 1	901,9	790,7	-12,3%	731	698,8	-4,4%
Viga 2	837,8	743	-11,3%	736,7	558,5	-24,2%
Viga 3	871,4	787,5	-9,6%	779,5	687,9	-11,8%
média	870,4	773,7	-11,1%	749,1	648,4	-13,4%

Tabela 7. Tabela resumo das FN, das vigas perfuradas com a potência de $\frac{1}{4}$ de martetele.

	LIVRE-LIVRE (hz)			LIVRE-ENGASTADO (hz)		
	sem furo	com furo	diferença	sem furo	com furo	diferença
Viga 4	934,8	900,5	-3,7%	814,5	789	-3,1%
Viga 5	802,5	776,4	-3,3%	688	664,5	-3,4%
Viga 6	862,4	849	-1,6%	795,2	747,8	-6,0%
média	866,6	842,0	-2,8%	765,9	733,8	-4,2%

Tabela 8. Tabela resumo das FN, das vigas perfuradas sem a potência de martetele.

	LIVRE-LIVRE (hz)			LIVRE-ENGASTADO (hz)		
	sem furo	com furo	diferença	sem furo	com furo	diferença
<i>Viga 7</i>	864	809,7	-6,3%	754,5	710,6	-5,8%
<i>Viga 8</i>	754,7	610,2	-19,1%	684,6	558,3	-18,4%
<i>Viga 9</i>	909,6	836,4	-8,0%	814,5	714,3	-12,3%
<i>média</i>	842,8	752,1	-11,2%	751,2	661,1	-12,2%

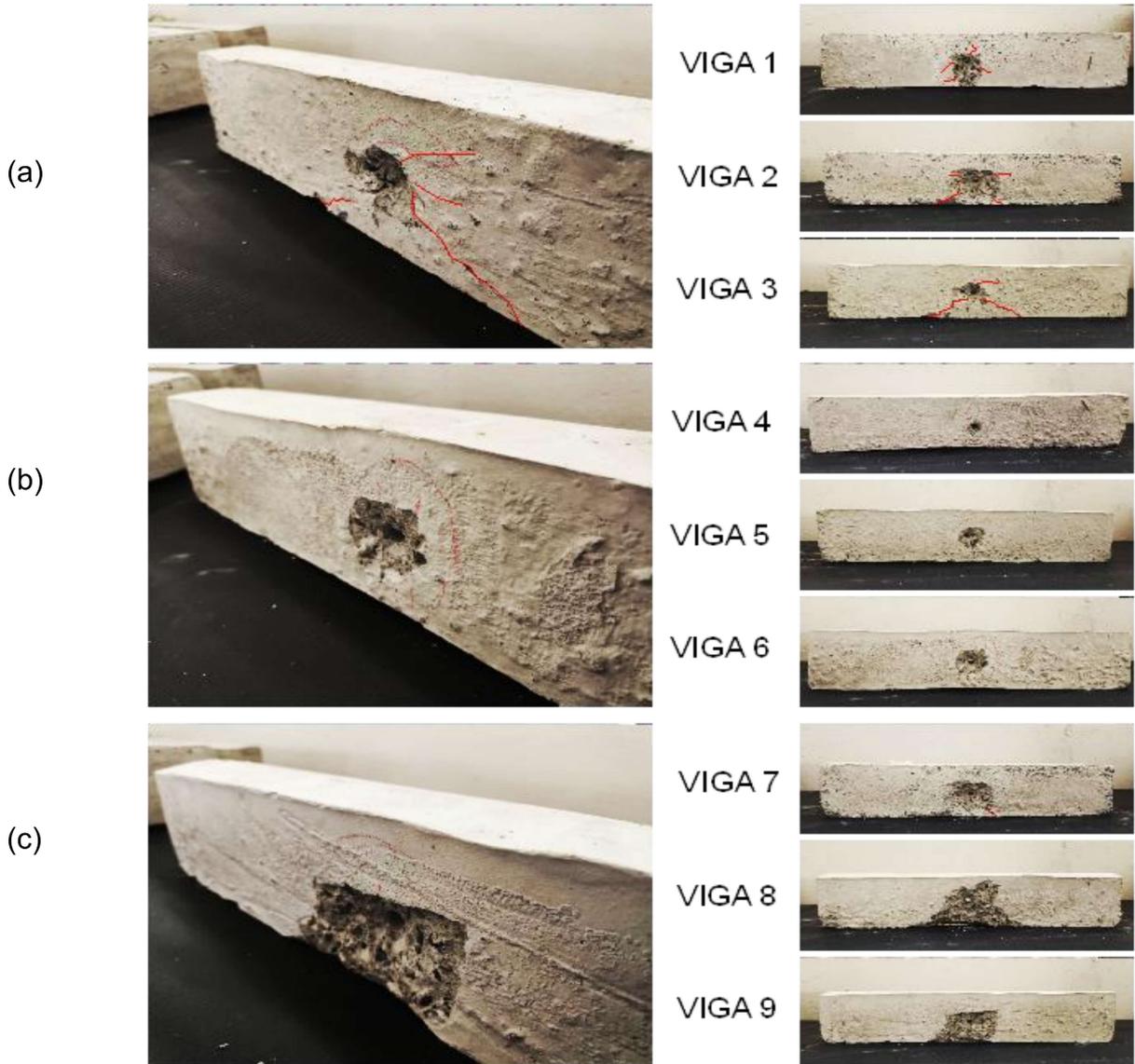
As Tabelas 6 a 8 apresentam as reduções médias da FN para os três níveis de potência de martetele em todas as vigas ensaiadas. Todas as vigas confirmaram a tendência de redução da FN, com valores variando entre 24% e 1,6% nas médias da FN após a aplicação do furo.

É importante destacar que as reduções das FN obtidas para os CPs ensaiados são influenciadas pela redução da rigidez à flexão dos CPs, causada pelos furos realizados. Diferentemente das análises da Seção 6.1, que se concentraram na redução do Módulo de Elasticidade Dinâmico, as reduções da FN são influenciadas tanto pela diminuição do E_D quanto pelo momento de inércia. Assim, é necessário avaliar, mesmo que qualitativamente, o estado do CP após a perfuração. As Figuras 25 apresentam imagens típicas dos furos para os três casos analisados. Observe-se que, nos casos de perfuração sem martetele ou com 1/2 martetele, há uma redução significativa da seção transversal na região do furo, na posição onde a broca termina de romper o CP, o que, conseqüentemente, leva a uma diminuição do momento de inércia da seção transversal nessa região. Isso é confirmado na redução média de massa de 93 g, 39 e 118 g, respectivamente, nos casos de aplicação de 1/2 da potência do martetele, 1/4 da potência do martetele e na condição sem uso de martetele

Os resultados agrupados em gráficos de caixa (boxplot) para as reduções de FN nos três casos analisados são apresentados na Figura 26. Nesses gráficos, os eixos verticais estão associados à razão FN^*/FN , sendo FN^* a FN após o furo. Note-se que, para as furações com 1/4 de martetele, há uma menor dispersão de resultados em comparação com os demais tipos de furação. Essa menor dispersão pode ser explicada pela ausência de deslocamentos de concreto na saída da broca nas vigas perfuradas com martetele a 1/4 de potência. Nos CPs onde ocorreu esse tipo de deslocamento (sem martetele e com martetele a 1/2 de potência – ver Figura 25), há

uma grande dispersão nos valores das FN identificadas, uma vez que a quantidade de concreto desprendido variou significativamente para cada CP.

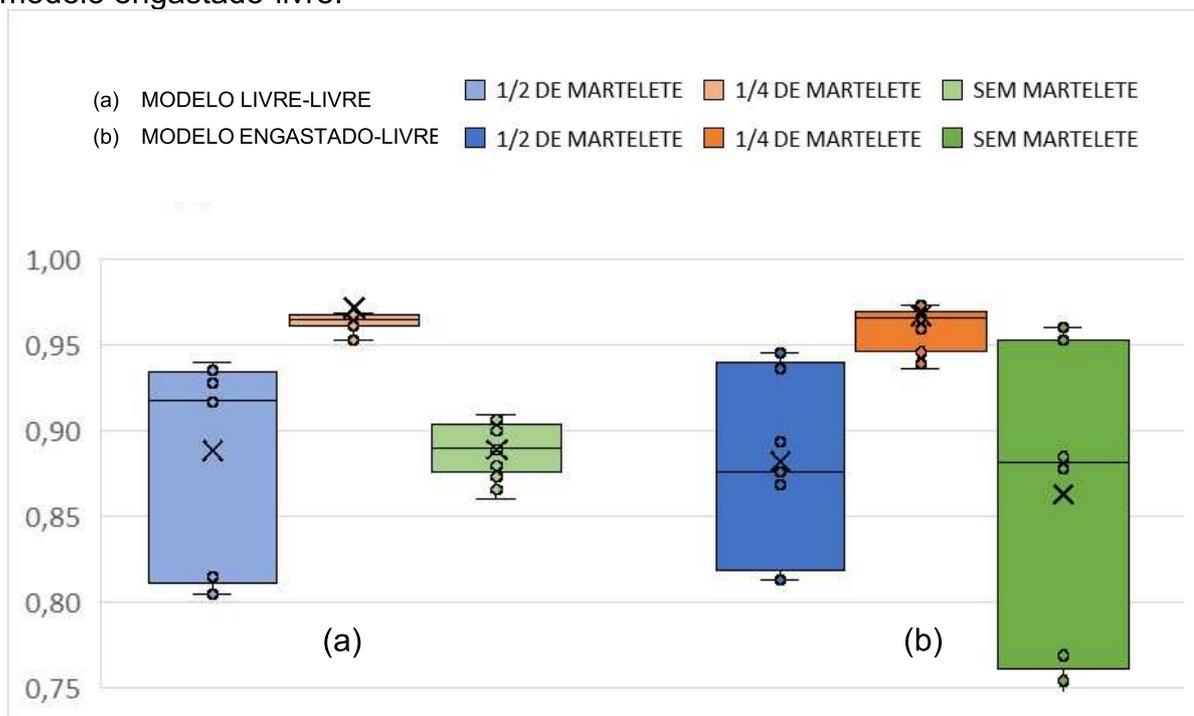
Figura 25 - Consequências do dano nos CPs. (a) 1/2 de martetele, (b) 1/4 de martetele e (c) sem martetele. No face posterior a entrada da perfuração.



Fonte: Autor.

Finalmente, reforçando que a variação das FN depende tanto do E_D quanto do momento de inércia, a Figura 26 evidencia que o tipo de furação que menos prejudica a rigidez à flexão do CP foi aquele realizado com martetele a 1/4 de potência. Isso demonstra que nem sempre o penetrador com a menor potência de martetele é o que menos afeta a rigidez flexão da viga a ser perfurada.

Figura 26. Box Plot, com os resultados de razão das FN antes e depois do furo, nos diversos grupos de potência, sendo (a) representando o modelo livre-livre e (b) o modelo engastado-livre.



Fonte: Autor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A perfuração em elementos estruturais de concreto armado é uma prática recorrente na construção civil, utilizada para a passagem de tubulações hidráulicas, instalações elétricas e outros sistemas. No entanto, a realização dessas intervenções pode comprometer a integridade estrutural das peças, uma vez que provoca alterações mecânicas que afetam a resistência e a rigidez dos elementos. Apesar das recomendações normativas, nem sempre esses procedimentos são executados conforme os critérios técnicos adequados, tornando essencial o aprofundamento do conhecimento sobre os impactos da perfuração em estruturas de concreto.

Com base nos resultados obtidos, este estudo experimental demonstrou que a perfuração de corpos de prova de concreto armado com equipamentos de impacto, como marteletes, induz alterações significativas nas propriedades mecânicas do material. As análises de ultrassom revelaram reduções no módulo de elasticidade dinâmico, enquanto a análise das frequências naturais indicou uma diminuição da rigidez à flexão dos corpos de prova. As análises constataram a degradação mecânica

induzida pelo processo de perfuração, reforçando a necessidade de um planejamento criterioso dessas intervenções em elementos estruturais desde a concepção do projeto.

Os resultados evidenciaram que a intensidade do impacto, o tempo de perfuração e o tipo de equipamento utilizado influenciam diretamente a extensão dos danos causados. Em particular, a utilização de um martetele com $\frac{1}{4}$ de potência demonstrou ser a opção que minimiza a variação da rigidez ao longo do corpo de prova, sugerindo que nem sempre a menor potência resulta em menores danos.

A equação proposta para estimar a redução do módulo de elasticidade em função da perfuração representa uma ferramenta útil para engenheiros e profissionais da construção civil, permitindo uma avaliação mais precisa dos impactos da perfuração em estruturas de concreto armado. Tal equação pode ser incorporada a projetos estruturais e diagnósticos de integridade, auxiliando na tomada de decisões fundamentadas. No entanto, é importante ressaltar que outros fatores, como o tipo de concreto, a geometria da peça e as condições de contorno, também podem influenciar os resultados e não foram considerados neste trabalho.

Este estudo contribui para um melhor entendimento dos efeitos da perfuração em concreto armado e destaca a importância de considerar os parâmetros de perfuração na avaliação da integridade estrutural. Recomenda-se que pesquisas futuras expandam essa abordagem por meio de análises computacionais avançadas e investigações experimentais envolvendo diferentes tipos de concreto, variabilidade geométrica das vigas e condições de carregamento mais complexas. Além disso, a integração de técnicas de monitoramento estruturais baseadas em sensores pode fornecer uma avaliação mais precisa e contínua dos danos induzidos pela perfuração, consolidando diretrizes mais seguras e eficazes para a engenharia de estruturas de concreto armado.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, R. V. S. DE; HORSTH, A. A.; OLIVEIRA, H. C. P. DE; PINTO, J. F. A. *Avaliação de furos horizontais em vigas de concreto armado em relação aos deslocamentos verticais e à elevação da quantidade de armadura*. Apresentado no II Seminário Científico da FACIG e I Jornada de Iniciação Científica da FACIG, nov, 2016.

ADAMATTI, D. S.; LORENZI, A.; CHIES, J. A.; SILVA FILHO, L. C. P. *Analysis of reinforced concrete structures through the ultrasonic pulse velocity: technological parameters involved*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 10, n. 2, p. 358-385, 2017.

AKSOYLU, C.; YAZMAN, Ş.; ÖZKILIÇ, Y. O.; GEMI, L.; ARSLAN, M. H. *Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite*. In: Composite Structures, Elsevier, v. 249, p. 112561, 2020.

ALI, S. R. M.; SAEED, J. A. *Shear capacity and behavior of high-strength concrete beams with openings*. Engineering Structures. Elsevier, v. 264, p. 114431, 2022.

ALVARES, M. da S.; PROENÇA, S. P. B. *Estudo de um modelo de dano para o concreto: formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado), USP São Carlos, São Carlos, SP, 1993.

ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. de; ROITMAN, N.; MAGLUTA, C. *Detecção de danos estruturais através de métodos diretos de ajuste de modelos*. In: XXIX JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL. Punta del Leste, 2000.

ARANTES, A. R. A. *Vigas de concreto de alta resistência com abertura na alma em região de apoio*. 155 f. Tese de (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.

ARAÚJO JÚNIOR, N. T. de; TORRES, S.; ESTOLANO, V.; BASTO, P.; MELO NETO, A. A. de. *Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto através dos ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica*. In: Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC. 2018.

ARAÚJO, S. S. Estudos experimentais sobre o módulo de especificação do concreto, Appris, 256p. Curitiba, PR, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: *Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: *Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 : *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2016.

BLEVINS, Robert D.; PLUNKETT, R. *Formulas for natural frequency and mode shape*. Journal of Applied Mechanics, v. 47, n. 2, p. 461, 1980.

BOMPAN, K. F.; HAACH, V.G. *Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity*. Construction and Building Materials, v.162, 2018

BOŃKOWSKI, P. A.; BOBRA, P.; ZEMBATY, Z.; JEĐRASZAK, B. *Application of rotation rate sensors in modal and vibration analyses of reinforced concrete beams*. Sensors, v. 20, n. 17, p. 4711, 2020.

BRESLER, B.; SCORDELIS, A. C. *Shear strength of reinforced concrete beams*. In: Journal Proceedings. p. 51-74. 1963.

CABRAL, L.; MONTEIRO, E.; HELENE, P. *Análise comparativa do módulo de elasticidade calculado segundo diferentes normas*. Revista ALCONPAT, v. 4, n. 2, p. 144-160, 2014.

CABRAL, L.; MONTEIRO, E.; HELENE, P.. *Análise comparativa do Módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas*. Rev. ALCONPAT, Mérida , v. 4, n. 2, p. 144-160, agosto 2014 .

CAMPOS, L.; VARGAS, A. *Análise experimental de vigas em concreto armado com furo na alma próximo ao apoio utilizando armadura de reforço*. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma-Sc, 2022.

CARNEIRO, Fernando Lobo. *Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos*. Editora UFRJ, 1996.

CHIN, S.; SHAFIQ, N.; NURUDDIN, M. F. *Strengthening of RC beams with large openings in shear by CFRP laminates: Experiment and 2D nonlinear finite element analysis*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, v. 4, n. 9, p. 1172-1180, 2012.

COSTA, L. M.; PIRES, T. A. D. C.; SILVA, J. J. D. R.; VASCONCELOS, G. M. D. A. *Análises experimental e numérica de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com barras de aço usando a técnica near-surface mounted (NSM)*. Matéria (Rio de Janeiro), v. 29, n. 1, p. e20230367, Rio de Janeiro, RJ, 2024.

COSTA, T. *Vida e obra de Lobo Carneiro*. COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

CUI, K.; YANG, W. H.; & GOU, H. Y. *Experimental research and finite element analysis on the dynamic characteristics of concrete steel bridges with multi-cracks*. Journal of Vibroengineering, v. 19, n. 6, p. 4198-4209, 2017.

DEMIR, E. *A study on natural frequencies and damping ratios of composite beams with holes*. Steel Compos Struct, v. 21, n. 6, p. 1211-1226, 2016.

Diógenes, H. J. F.; Cossolino, L. C.; Pereira, A. H. A.; El Debs, M. K.; El Debs, A. D. C. *Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica*. Revista IBRACON Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 4, n. 5, p. 803-813, dez, 2011.

EL MAADDAWY, T.; SHERIF, S. *FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings*. Compos. Struct, 89, 60–69. 2009.

ELSANADEDY, H. M.; AL-SALLOUM, Y. A.; ALMUSALLAM, T. H.; ALSHENAWY, A. O.; ABBAS, H. *Experimental and numerical study on FRP-upgraded RC beams with large rectangular web openings in shear zones*. Construction and Building Materials, v. 194, p. 322-343, 2019.

FERNANDES, S. A. *Análise das deformações do concreto e do comportamento de vigas submetidas à flexão simples*. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. 1996.

FERNANDES, S. A. *Análise das deformações do concreto e do comportamento de vigas submetidas à flexão simples*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo São Paulo, SP. 1996.

HAACH, V. G.; RAMIREZ, F. C. *Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography*. Construction and Building Materials, v. 119, p. 61-70, 2016.

HAMAD, W. I.; OWEN, J. S.; HUSSEIN, M. F. M. *Modelling the degradation of vibration characteristics of reinforced concrete beams due to flexural damage*. Structural Control and Health Monitoring , v. 22, n. 6, p. 939-967, 2015.

HAMID, A. S.; FAKHRI, M. S. *Effect of Hole Shape and Location on the Natural Frequency and Deformation of Composite Beams*. In: ICPER 2020: Proceedings of the 7th International Conference on Production, Energy and Reliability. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 571-583. 2022.

JACINTO, A.E. G. A.; GIONGO, J. S. *Deformações instantâneas de concreto*. In: É UMEu,GC (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. IBRACON. São Paulo, SP, 2005.

Jassim, N. Q.; Jarallah, H. K. *Performance enhancement of RC beams with large web openings by using reactive powder composite: an experimental study*. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, v. 21, n. 3, p. 405-416, 2018.

Karaiskos, G.; Deraemaeker, A.; Aggelis, D.G.; Van Hemelrijck, D.. *Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method*. Smart Materials and Structures, v. 24, n. 11, p. 113001, 2015.

KAUR, N. P.; SHAH J.K.; MAJHI, S.; MUKHERJEE, A. *Healing and simultaneous ultrasonic monitoring of cracks in concrete*. Materials Today Communications, v.18, 2019.

LATHA, M. S.; KUMAR, B. N. *Behavior of reinforced concrete beam with opening*. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), v. 8, n. 7, p. 581-593, 2017.

LIU, T. J.; CHEN, S. W.; FENG, Z. H.; LIU, H. Y. *Effect of web openings on flexural behaviour of underground metro station RC beams under static and cyclic loading*. Advances in Civil Engineering, v. 2020, n. 1, p. 1210485, 2020.

MÁLAGA-CHUQUITAYPE, C. *Strong-motion duration and response scaling of yielding and degrading eccentric structures*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v. 50, n. 2, p. 635-654, 2021.

MANSUR, M. A. *Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear*. Cement and concrete composites, v. 20, n. 6, p. 477-486, 1998.

MANSUR, M. A.; TAN, K. H. *Beams concrete with openings: analysis and design*. Estados Unidos: CRC Press LLC, 1999.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 751 p. 2014.

Moreira, M. A.; Moreira, J. F. A.; Gomes, T. A.; Farias, F. L. F.; Rodrigues, M. D. A.; Silva, R. J. C. *Análise experimental e teórica em vigas de concreto armado com furos na alma*. Essentia-Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia da UVA, v. 20, n. 2, 2019.

MORSYA, A.; BARIMA, A. M. *Behavior of RC Beams with Openings using Different Strengthening Techniques*. International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR), v. 46, n. 1, p. 195-219, 2019.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. *The ultrasonic pulse velocity method*. In: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, 2004.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 1982.

OLIVEIRA, O. J.; MELHADO, S. B. *Como administrar empresas de projeto de arquitetura e engenharia civil*. 2. ed. São Paulo: Pini, 66 f. 2006.

OLIVEIRA, T. M. de; LAGE, E. C.; CARVALHO, V. C. R. *Estudo de diferentes classes de concreto para curvas de correlação nacionais para o ensaio de esclerometria*. Principia: Caminhos da Iniciação Científica, v. 18, n. 1, p. 11-11, 2018.

OSMAN, BH; WU, E.; JI, B.; ABDULHAMEED, S.S. *Shear behavior of reinforced concrete (RC) beams with circular web openings without additional shear reinforcement*. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 21, p. 296-306, 2017.

ÖZKILIÇ, Y. O.; AKSOYLU, C.; GEMI, L.; ARSLAN, M. H. *Behavior of CFRP-strengthened RC beams with circular web openings in shear zones: Numerical study*. In: Structures. Elsevier, p. 1369-1389. 2022.

POSSAN, E.; ALVES, H.; HELENE, P.; BILESKY, P.; CARRAZEDO, R.; CURTI, R. *Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar*. ANAIS FAZER 62º CONGRESSO BRASILEIRO FAZER CONCRETO – 62CBC2020.ISSN2175-8182. Florianópolis, SC, set, 2020.

POSSAN, E.; ALVES, H.; HELENE, P.; BILESKY, P.; CARRAZEDO, R.; CURTI, R. *Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar*.10.4322/2175-8182.62CBC020.

PRANNO, A.; GRECO, F.; LONETTI, P.; LUCIANO, R.; MAIO, U. de. *An improved fracture approach to investigate the degradation of vibration characteristics for reinforced concrete beams under progressive damage*. International Journal of Fatigue, v. 163, p. 107032, 2022.

RUSCHEL, R. C.; KEHL, C. *Plano de implementação BIM curricular: proposta de protocolo e aplicação piloto no Brasil*. Ambiente Construído, v. 24, p. e131385, 2024.

SANTOS, D dos. *Análise de vigas de concreto armado utilizando modelos de bielas e tirantes*. Tese (Doutorado). USP, São Paulo, SP, 2006.

SILVA, G. B. da; KUO, E. E.; CHOUKRI, M. C.; TAVARES, M. M.; MORAES, W. *A Influência de furos não premeditados em vigas de concreto armado*. 19º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, São Paulo, SP, Brasil, 2019.

SOUSA, B. M.; SILVA, R. C.; OLIVEIRA, C. E. M.; SANTOS, P. R. A. R. *Análise da influência de furos em elementos de concreto submetidos à revisão*. In: Congresso Técnico Científico Da Engenharia E Da Agronomia – CONTECC, Caxias, MA, 2022.

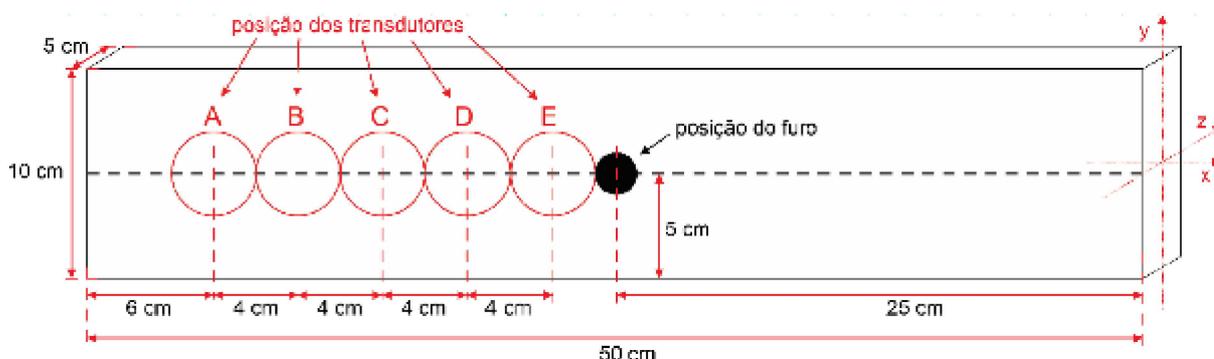
SOUZA, R. A. *Concreto estrutural: análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades*. 379 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2004.

ANEXO 1. ESTUDO PRELIMINARES

Foram conduzidos estudos preliminares seguindo a mesma metodologia proposta, utilizando CP de geometria prismática, com dimensões equivalentes às adotadas no estudo principal. A resistência à compressão foi determinada em laboratório conforme a norma NBR 5739 (2018), resultando em valores de 13,79 MPa, 12,55 MPa e 13,16 MPa para os CP1, CP2 e CP3, respectivamente. Dessa forma, a resistência média do concreto das vigas foi estimada em 13,17 MPa, aproximadamente metade da resistência considerada no estudo principal.

Adicionalmente, foram realizadas investigações acerca da variação do E_D por meio de ensaios de ultrassom, utilizando um equipamento VPU da marca Proceq, modelo Tico. As medições foram efetuadas em cinco posições distintas, rotuladas como A, B, C, D e E, localizadas a 6, 10, 14, 18 e 22 cm da extremidade da viga, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 27. Para cada CP, foram realizadas quatro leituras em cada uma das posições especificadas.

Figura 27 - Posições de leitura nos ensaios de VPU nos CPs.



Fonte: Autor.

Os resultados preliminares confirmaram parcialmente os dados obtidos no estudo principal. As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam os valores de E_D obtidos através do ensaio de ultrassom na direção Y para as três condições distintas: com $\frac{1}{2}$ da potência do martelo, com $\frac{1}{4}$ da potência e sem aplicação de martelo. Observou-se que os desvios padrões apresentaram magnitudes menores nos casos em que a dispersão dos resultados foi menos significativa, sugerindo maior confiabilidade das medições. Na Tabela 9, os valores aumentaram para 1,04 GPa (antes) e 4,07 GPa (após), representando 3,7% e 13,5% dos valores de E_D . Já na Tabela 10, os desvios padrões foram de 0,65 GPa antes e 2,39 GPa após a perfuração, equivalentes a 3,2%

e 12,3% dos valores de E_D . Os desvios padrões médios registrados na Tabela 11 foram de 0,75 GPa antes da perfuração e 0,59 GPa após a perfuração, correspondendo a 3,7% e 2,8% dos valores de E_D . A análise dos resultados indicou que os valores de E_D variam em torno de 20 GPa e tendem a diminuir com a proximidade dos furos e com o aumento da potência do martelo. A Figura 28 ilustra as razões médias de E_D^*/E_D após a furação, evidenciando uma tendência de redução mais acentuada à medida que se aproxima do furo. Os ajustes lineares e os coeficientes de determinação (R^2) sugerem que a redução de rigidez pode ser razoavelmente modelada por uma relação linear.

Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos de E_D , para os transdutores medindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção Y, com o uso de ½ de potência de martelo.

Número do CP (Viga) ensaiado		Distância da borda a esquerda do CP ao ponto de leitura do pulso de Ultrassom				
		A	B	C	D	E
		Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa)				
4	Antes do furo	21,36	21,78	22,09	21,96	20,09
	Depois do furo	19,89	21,27	19,30	18,29	14,98
5	Antes do furo	19,35	20,87	19,24	18,82	17,20
	Depois do furo	20,93	22,86	20,73	19,65	16,99
6	Antes do furo	20,83	18,38	17,63	17,17	17,63
	Depois do furo	19,35	15,14	13,62	12,96	13,81
Média (Desvio Padrão)	Antes do furo	20,51 (1,04)	20,34 (1,76)	19,65 (2,26)	19,32 (2,43)	18,31 (1,55)
	Depois do furo	20,05 (0,80)	19,76 (4,07)	17,88 (3,76)	16,96 (3,54)	15,26 (1,61)

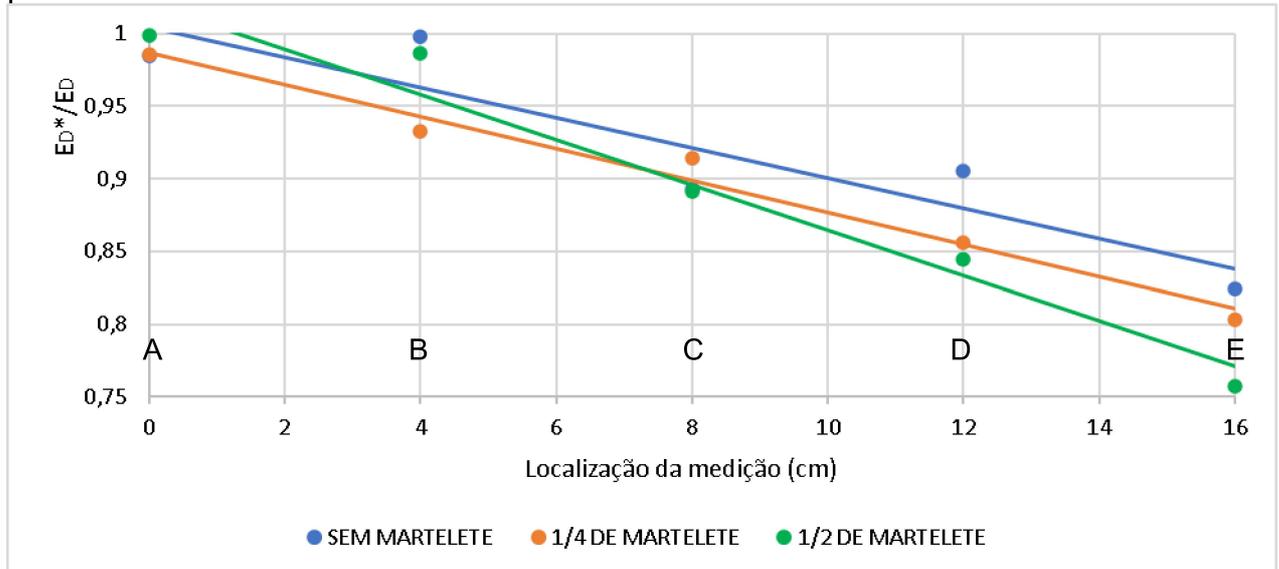
Tabela 10 - Resumo dos resultados obtidos de E_D , para os transdutores medindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção Y, com o uso de ¼ de potência de martelo.

Número do CP (Viga) ensaiado		Distância da borda a esquerda do CP ao ponto de leitura do pulso de Ultrassom (cm)				
		A	B	C	D	E
		Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa)				
1	Antes do furo	19,75	18,78	18,48	18,78	15,82
	Depois do furo	19,45	17,77	16,92	16,38	12,07
2	Antes do furo	20,87	18,92	19,53	19,71	17,73
	Depois do furo	19,08	16,43	17,40	16,54	15,19
3	Antes do furo	19,75	20,30	21,32	19,56	20,83
	Depois do furo	19,82	21,08	19,90	17,94	20,52
Média (Desvio Padrão)	Antes do furo	20,12 (0,65)	19,33 (0,84)	19,77 (1,44)	19,35 (0,50)	18,12 (2,53)
	Depois do furo	19,45 (0,37)	18,43 (2,39)	18,07 (1,60)	16,96 (0,86)	15,93 (4,27)

Tabela 11 - Resumo dos resultados obtidos de E_D , para os transdutores medindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção Y, sem o uso de martelete.

Número do CP (Viga) ensaiado		Distância da borda a esquerda do CP ao ponto de leitura do pulso de Ultrassom (cm)				
		A	B	C	D	E
		Módulo de Elasticidade Dinâmica (GPa)				
1	Antes do furo	19,64	20,20	20,55	18,96	18,65
	Depois do furo	19,59	20,31	17,87	17,64	17,59
2	Antes do furo	19,67	19,75	18,71	18,99	18,11
	Depois do furo	18,31	19,43	17,18	18,34	15,53
3	Antes do furo	20,95	19,31	18,54	19,20	18,02
	Depois do furo	20,25	19,17	17,78	17,55	15,72
Média (Desvio Padrão)	Antes do furo	20,09 (0,75)	19,75 (0,45)	19,27 (1,11)	19,05 (0,13)	18,26 (0,34)
	Depois do furo	19,38 (0,98)	19,64 (0,59)	17,61 (0,37)	17,84 (0,43)	16,28 (1,14)

Figura 28 - Gráfico resumo dos resultados da diferença percentual entre do E_D antes e depois da perfuração, pela localização da medição na viga, com uso de $\frac{1}{2}$ da potência do martelete.



Fonte: Autor.

Ademais, observa-se uma correlação direta entre a intensidade de martelete e o aumento dos danos estruturais, conforme evidenciado pela comparação das curvas de E_D em azul (sem martelete), verde (com martelete a $\frac{1}{2}$ potência) e laranja (com martelete a $\frac{1}{4}$ potência). No entanto, os resultados obtidos com $\frac{1}{2}$ da potência do martelete apresentaram uma maior dispersão, especialmente a partir do ponto C, o que pode estar relacionado a incertezas experimentais e ao alto desvio padrão encontrado nessa série de medidas, comprometendo sua confiabilidade.

Por fim, verificou-se que as diferenças percentuais médias de E_D são menores nas regiões próximas à extremidade da viga, sugerindo menor fissuração devido ao dano. No entanto, com a proximidade do furo, essas diferenças tornam-se mais expressivas. As Tabelas 9 a 11 evidenciam que o valor absoluto de E_D diminui proporcionalmente ao aumento da potência do martetele, com reduções percentuais superiores a 12% em relação ao CP intacto. A Figura 28 destaca esse comportamento, notadamente nas vigas 4 e 7, corroborando a influência da percussão no comprometimento das propriedades mecânicas do material.