



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL

ANA DULCE DE CASTRO HOLANDA

**CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE CONCRETOS POR
MEIO DE DIFERENTES MÉTODOS E CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO**

FORTALEZA

2023

ANA DULCE DE CASTRO HOLANDA

CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE CONCRETOS POR MEIO
DE DIFERENTES MÉTODOS E CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

FORTALEZA

2023

ANA DULCE DE CASTRO HOLANDA

CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE CONCRETOS POR MEIO
DE DIFERENTES MÉTODOS E CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 08/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Azevedo Pereira
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Prof^ª. Dr^ª. Juceline Batista dos Santos Bastos
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Me. Aldo de Almeida Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Márcia e Ronaldo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Márcia, ao meu pai Ronaldo, ao meu irmão Samuel e minha irmã Ana Alice, por todo suporte nesta etapa e ao longo de toda minha vida. À minha família, em especial, minhas tias, que me acolheram em Fortaleza-CE, Nélia, Leene e Carmen, sem elas toda essa caminhada seria ainda mais difícil. Não há palavras para expressar minha gratidão.

Ao Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, pela excelente orientação, pela sua disponibilidade, por suas contribuições e acima de tudo, pelo incentivo quando nada parecia funcionar.

Agradeço o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), nas pessoas de Paulo Victor, Helano e Manoel, pela disponibilidade e ajuda na execução dos ensaios.

Ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec), por disponibilizar o acesso às instalações para realização de ensaios, agradeço especialmente o técnico Adriano, por todo auxílio na execução dos testes.

Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), na pessoa da professora Juceline, por ter permitido a utilização para a realização de parte desse trabalho. Também ao INCT, nas pessoas de Iolanda e Annie e todos os outros profissionais do laboratório.

A Daniel, que me permitiu acompanhar sua pesquisa e me deu uma direção, por todo apoio e auxílio na elaboração deste trabalho. A Mauro, pelo suporte na execução dos ensaios e análise dos resultados, agradeço também a Abcael, Ingrid, Kleison, Lucas, Pablo e ao Grupo de Pesquisa em Reologia de Materiais (ReoM), por toda assistência e prontidão.

Aos meus amigos da graduação, que tornaram esse processo muito mais leve. Agradeço a Artur, por todo apoio e incentivo na vida profissional e pessoal.

Agradeço aos professores participantes da banca examinadora, Dra. Claudia Azevedo, Dra. Juceline Bastos e Me. Aldo de Almeida, por terem aceitado o convite para avaliar este trabalho.

Estendo meus agradecimentos à BCP Engenharia, nas pessoas de Abner, Layane e André Ayres, pelo fornecimento dos corpos de prova e pela compreensão nos meus dias ausentes para a realização da pesquisa.

"A satisfação está no esforço e não apenas na realização final." (MAHATMA GANDHI)

RESUMO

O módulo de elasticidade do concreto é uma propriedade que desempenha um papel fundamental no comportamento estrutural de construções, ele é essencial para entender como o concreto reage sob cargas e esforços diversos, sendo especialmente importante em obras de larga escala, como pontes e barragens, que estarão expostas a carregamentos extremos e condições ambientais adversas. Nesse contexto, a avaliação das propriedades mecânicas do concreto é crucial para ajuizar o desempenho e durabilidade das construções. Os métodos normatizados, como a aplicação de ondas ultrassônicas, a estimação para fins de projeto com base na resistência mecânica, ou mesmo o ensaio tradicional de módulo de elasticidade estático, fornecem estimativas que apresentam divergências. O seguinte trabalho objetiva analisar as variações no módulo de elasticidade obtido através de diferentes técnicas experimentais, além de identificar o dano no material associado às condições de carregamento e a discrepância dessas técnicas em comparação ao modelo proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Para isso, foram realizados ensaios não destrutivos (ressonância por impacto e módulo dinâmico através da velocidade de pulso ultrassônico) intercalados com ensaio estático (nas amplitudes de 30%, 20% e 10% da resistência última do concreto - f_c) e quase-estático (gerando a propriedade viscoelástica conhecida como módulo complexo) variando a frequência de carregamento. Os resultados demonstraram que houve uma redução no valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$, em média $2,4\% \pm 2,9\%$ na UTM-25 e $2,3\% \pm 1,3\%$ na UTM-30, entre a frequência de 25 Hz e 0,03 Hz, sugerindo que o concreto se torna menos rígido à medida que a frequência de carregamento diminui. Não havendo diferença significativa entre as medições das duas prensas servo-hidráulicas *Universal Test Machine* (UTM). Para a amplitude de carregamento, houve uma redução de $4,0\% \pm 1,0\%$ no módulo de elasticidade ressonante e no módulo de elasticidade dinâmico, após o ensaio de módulo de elasticidade estático com 30% do f_c , indicando a influência do carregamento no valor do módulo de elasticidade e possível danificação do material após a aplicação da carga. Quanto a previsão de módulo, através da proposta da NBR 6118 (ABNT, 2023) o valor calculado, $E_{ci}=29,50$ GPa, superou todas as medições obtidas com os métodos ensaiados. Para o módulo dinâmico, a adoção do coeficiente de Poisson sugerido na NBR 6118 (ABNT, 2023), $\nu = 0,2$, resultou em valores 25% maiores que as medições das ondas P associadas às ondas S.

Palavras-chave: Módulo de Elasticidade, Amplitude de Carregamento, Frequência de Carregamento, Módulo de Elasticidade Ressonante, Módulo de Elasticidade Dinâmico, Módulo Complexo.

ABSTRACT

The modulus of elasticity of concrete is a property that plays a fundamental role in the structural behavior of buildings. It is essential for understanding how concrete reacts under different loads and efforts, being especially important in large-scale works, such as bridges and dams, which will be exposed to extreme loads and adverse environmental conditions. In this context, the evaluation of the mechanical properties of concrete is crucial to judge the performance and durability of buildings. Standardized methods, such as the application of ultrasonic waves, estimation for design purposes based on mechanical resistance, or even the traditional static modulus of elasticity test, provide estimates that present divergences. The following work aims to analyze the variations in the modulus of elasticity obtained through different experimental techniques, in addition to identifying the damage to the material associated with the loading conditions and the discrepancy of these techniques in comparison to the model proposed by NBR 6118 (ABNT, 2023). For this, non-destructive tests were carried out (impact resonance and dynamic modulus through ultrasonic pulse speed) interspersed with static tests (at amplitudes of 30%, 20% and 10% of the concrete's ultimate strength - f_c) and quasi-static tests (generating the viscoelastic property known as complex modulus) by varying the loading frequency. The results demonstrated that there was a reduction in the absolute value of the complex module $|E^*|$, on average $2.4\% \pm 2.9\%$ in UTM-25 and $2.3\% \pm 1.3\%$ in UTM-30, between frequency of 25 Hz and 0.03 Hz, suggesting that concrete becomes less rigid as the loading frequency decreases. There was no significant difference between the measurements of the two Universal Test Machine (UTM) servo-hydraulic presses. For the loading amplitude, there was a reduction of $4.0\% \pm 1.0\%$ in the resonant modulus of elasticity and in the dynamic modulus of elasticity, after the static modulus of elasticity test with 30% of f_c , indicating the influence of loading in the value of the modulus of elasticity and possible damage to the material after applying the load. As for modulus prediction, through the proposal of NBR 6118 (ABNT, 2023) the calculated value, $E_{ci}=29.50$ GPa, surpassed all measurements obtained with the tested methods. For the dynamic module, the adoption of the Poisson ratio suggested in NBR 6118 (ABNT, 2023), $\nu = 0.2$, resulted in values 25% higher than the measurements of P-waves associated with S-waves.

Keywords: Modulus of Elasticity, Loading Amplitude, Loading Frequency, Resonant Modulus of Elasticity, Dynamic Modulus of Elasticity, Complex Modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - MEV do concreto com vistas a zona de transição na interface entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia.....	17
Figura 2 - Zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, microestrutura em concretos.....	18
Figura 3 - Fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto	19
Figura 4 - Módulos de elasticidade do concreto.....	20
Figura 5 - a) Ciclo de carregamento para determinação do módulo de elasticidade através da Metodologia A - com a tensão σ_a fixa b) módulo de Elasticidade Tangente Inicial	21
Figura 6 - a) Indicação das componentes de tensão e deformação no CP b) Defasagem no tempo entre as curvas senoidais de carregamento e deformação. c) Componentes do módulo complexo $ E^* $	23
Figura 7 - Direção de vibração e propagação das ondas P e ondas S	25
Figura 8 - Metodologia TIBLA e TFD para determinar o ToF da onda S (CC com idade superior a 100 dias).....	27
Figura 9 - Amplitude de oscilação em função da frequência angular	28
Figura 10 - Condições de contorno para excitação longitudinal	29
Figura 11 - Comportamento vibracional de um objeto cilíndrico excitado longitudinalmente	29
Figura 12 - Gráfico da Função Resposta de Frequência (FRF) para CC com idade superior a 100 dias.....	30
Figura 13 - Exemplo de curva de degradação no módulo de elasticidade	32
Figura 14 - Fluxograma do método	34
Figura 15 - Sequência de ensaios para determinação do módulo de elasticidade	35
Figura 16- Corpos de prova utilizados para os ensaios de módulo de elasticidade.....	36
Figura 17 - Medições dos CPs.....	37
Figura 18 - a) Equipamento de teste ultrassônico. b) Transdutores utilizados para aferição do ToF das ondas P e ondas S.....	38
Figura 19 - Configuração do ensaio de ressonância por impacto.....	39
Figura 20 - a) Prensa EMIC b) montagem do ensaio de módulo de elasticidade estático	40
Figura 21 - Colagem dos targets.....	41
Figura 22 - Montagem do ensaio.....	41
Figura 23 - Relação entre as medições do módulo de elasticidade estático com a variação das amplitudes de carregamento	44

Figura 24 - Diferença entre a medição de referência do E_d e do E_r após carregamento com as amplitudes de 30%, 20% e 10% do f_c no módulo de elasticidade estático	46
Figura 25 - Curva de tensão e de deformação do concreto referente ao valor absoluto do módulo complexo via compressão, nas diferentes frequências de ensaio a) Frequência de 25,0 Hz b) Frequência de 10,0 Hz c) Frequência de 3,0 Hz d) Frequência de 1,0 Hz e) Frequência de 0,3 Hz f) Frequência de 0,1 Hz g) Frequência de 0,01 Hz	47
Figura 26 - Variação média do $ E^* $ nas diferentes frequências para as prensas UTM-25 e UTM-30	51
Figura 27 - Efeito da frequência no ângulo de fase do concreto	51
Figura 28 - Equalização dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade do concreto	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova	37
Tabela 2 - Cargas utilizadas nos ensaios de módulo de elasticidade estático.....	40
Tabela 3 - Parâmetros para determinação do módulo complexo	41
Tabela 4 - Valor médio do módulo de elasticidade estático nas diferentes amplitudes de carregamento para CC com idade superior a 100 dias	43
Tabela 5 - Resultados para módulo de elasticidade estático nas diferentes amplitudes de carregamento para CC (concreto convencional) com idade superior a 100 dias.....	44
Tabela 6 - Resultados para o módulo de elasticidade dinâmico. Valores de referência e após carregamento com 30%, 20% e 10% do f_c	45
Tabela 7 - Resultados para o módulo de elasticidade ressonante. Valores de referência e após carregamento com 30%, 20% e 10% do f_c	46
Tabela 8 - Resultados para o valor absoluto do módulo complexo nas diferentes frequências de ensaio para os 10 CPs na UTM - 25	50
Tabela 9 - Resultados para o valor absoluto do módulo complexo nas diferentes frequências de ensaio para os 10 CPs na UTM - 30	50
Tabela 10 - Coeficiente de Poisson calculado a partir das ondas S	53
Tabela 11 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico utilizando $\nu=0,2$	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Problema e questões de pesquisa.....	14
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Considerações gerais sobre o módulo de elasticidade	16
3.2. Configurações de ensaio para determinar o módulo de elasticidade.....	19
3.3. Efeitos da variação da amplitude de carregamento	31
3.4. Efeitos da variação da frequência de carregamento	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. Amostragem	35
4.2. Ensaio mecânicos	37
4.3. Sequência de ensaios.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1. Influência da amplitude de carregamento.....	43
5.2. Influência da frequência de carregamento.....	47
5.3. Técnicas de ensaio.....	52
5.4. Variação do coeficiente de Poisson.....	53
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material. Quanto maior o módulo, mais rígida e menos deformável a estrutura será. Esta propriedade é especialmente utilizada na concepção de projetos estruturais, e posteriormente na avaliação da deterioração do concreto ao longo de sua vida de serviço. À medida que o módulo decresce a estrutura tende a acumular mais deformações, favorecendo o potencial surgimento de fissuras e outras manifestações patológicas.

Nesse contexto, a avaliação das propriedades mecânicas do concreto é crucial para ajuizar o desempenho e durabilidade das construções. Ensaio não destrutivos (ensaio de ressonância por impacto e ensaio de módulo dinâmico por pulso ultrassônico) têm sido utilizados para estimar a qualidade e medir as propriedades mecânicas, incluindo a rigidez, de materiais cimentícios (BEZERRA *et al.*, 2022; CARRASCO *et al.*, 2016; HASSAN, 2012; POPOVICS, 2008).

Com o avanço do setor da construção civil, observa-se uma tendência de estruturas cada vez mais complexas. Sublinhando a necessidade de conhecer o comportamento elástico do concreto nas diversas condições de carregamento. Além da solicitação estática, muitas vezes essas estruturas são submetidas a cargas cíclicas, devido a sua operação usual ou cargas acidentais, como incidência de ventos, com diferentes amplitudes e frequências de carregamento. Para este tipo particular de carregamento, o módulo complexo é um parâmetro mais abrangente para a análise da deformação, fluência e durabilidade destas estruturas, por possuir informações sobre a parcela elástica e viscosa do material (LIANG *et al.*, 2022). Essa é uma propriedade de análise da deformação (módulo de elasticidade + parcela viscosa) aplicada à carregamentos cíclicos. A análise do módulo complexo também está associada aos efeitos da fadiga, que descreve a degradação da estrutura ao longo do tempo devido ao dano acumulado de carregamento cíclicos submetidos à estrutura.

Na fase de projeto não há como definir com precisão o valor do módulo de elasticidade, já que este depende de diversos parâmetros, dos quais, o tipo de agregado, traço utilizado e a zona de transição são os mais influentes (NUNES, 2005; MEHTA E MONTEIRO, 1994). Considerando que dificilmente as estruturas em serviço estarão submetidas a carregamentos cíclicos, com amplitude e frequência constante (FERREIRA, 2011), torna-se necessário o entendimento do comportamento da deformação sob diferentes métodos, considerando sua influência direta no desempenho de materiais de base cimentícia (WANG *et al.*, 2021; EKIN E UYANIK, 2021).

1.1. Problema e questões de pesquisa

Em projetos de estruturas de concreto, os métodos de dimensionamento normatizados estabelecem estimativas para obtenção do módulo de elasticidade através da relação com a resistência característica à compressão do concreto (MELO NETO; HELENE, 2002). Diversas pesquisas (OLIVEIRA, 2019; SANTOS *et al.*, 2017; CABRAL, 2014) compararam os valores normativos com diferentes técnicas de ensaio para determinação do módulo de elasticidade. No entanto, são poucos os estudos que avaliaram as diferentes condições de carregamento que podem influenciar no módulo elástico da estrutura em serviço.

Além disso, apesar de existirem estudos que confirmem a influência do módulo de elasticidade na durabilidade de estruturas de concreto (CHU *et al.*, 2023; LIANG *et al.*, 2022), são escassas as informações disponíveis na literatura com relação a degradação do módulo de elasticidade quando submetido a carregamentos cíclicos de frequências e amplitudes de carregamento variáveis.

As questões motivadoras para execução deste estudo estão listadas abaixo:

- Que variações e divergências nos resultados podem ser esperadas com diferentes métodos de caracterização na obtenção do módulo de elasticidade em concretos?
- Qual a ordem de grandeza da variação do módulo de elasticidade em diferentes condições de carregamento, variando amplitudes e frequências?
- Qual a magnitude da diferença entre o módulo de elasticidade do concreto obtido por diferentes técnicas experimentais e a estimativa proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2023)?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho visa contribuir com a compreensão das variações no módulo de elasticidade obtido através de diferentes técnicas experimentais, amplitudes e frequências de carregamento. Seus objetivos específicos, organizados de maneira a completar o objetivo geral, são apresentados de maneira destacada a seguir.

2.2. Objetivos específicos

- Investigar o efeito das variações de amplitude e de frequência de carregamento no módulo de elasticidade do concreto, assim como em seu ângulo de fase;
- Investigar danificação de concretos durante ensaios de módulo de elasticidade estático e módulo complexo por diferentes métodos de determinação de rigidez;
- Comparar os resultados obtidos através de métodos estimados em norma, para os diversos tipos de módulo, com os resultados obtidos através de diferentes técnicas experimentais;
- Comparar as medições entre as prensas servo-hidráulicas *Universal Test Machine – 25* (UTM-25) e *Universal Test Machine – 30* (UTM-30), quanto ao ângulo de fase e o módulo de elasticidade complexo de concreto convencional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguinte seção trata sobre o módulo de elasticidade, os efeitos das mudanças da amplitude e da frequência de carregamento na durabilidade de estruturas de concreto, os tipos de ensaio que serão realizados nesta pesquisa e os modelos usualmente adotados para determinação do valor desta propriedade. Aborda-se uma revisão da literatura sobre o tema, com o intuito de levantar os principais aspectos que fundamentam a pesquisa proposta.

3.1. Considerações gerais sobre o módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de *Young*, em alusão ao cientista Thomás Young (1773 – 1829) que realizou importantes contribuições para a elasticidade dos sólidos, representa um dos principais parâmetros a serem analisados em estruturas de concreto. Esta propriedade indica a rigidez, ou seja, a capacidade do material suportar deformações não permanentes. Quanto maior o valor do módulo de elasticidade, maior será sua capacidade de resistir a distorções e suportar maiores carregamentos sem deformações permanentes.

As estruturas de concreto em serviço estão expostas a diversos carregamentos e ações da natureza que geram deformações. Estas deformações favorecem o surgimento de manifestações patológicas, como fissuras.

Em materiais com o comportamento perfeitamente elástico, ou seja, aqueles que apresentam deformação sob a ação de uma força, mas recuperam em totalidade a sua forma após o descarregamento, o módulo de elasticidade é dado pela relação direta entre tensão e deformação (Equação 1), como descreve a Lei de Hooke. Em contrapartida, quando o elemento não consegue recuperar sua forma original após a remoção da carga ele é considerado viscoso.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Onde,

E representa o módulo de elasticidade;

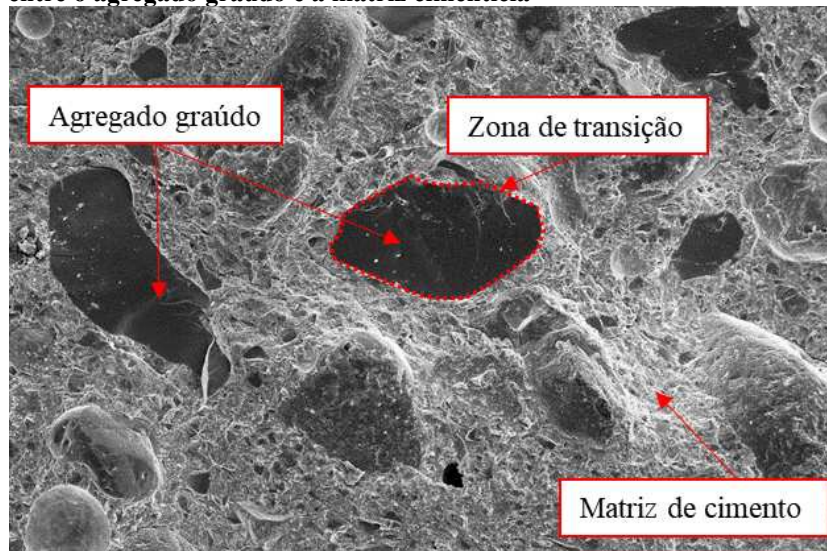
σ é a tensão (MPa);

e ε é a deformação (mm/mm).

Por se tratar de um material composto, o comportamento físico do concreto é bastante complexo, sob a ação de uma tensão ele apresenta uma combinação entre as propriedades

elásticas e viscosas, caracterizado como viscoelástico (SHAMES, 1989). Dessa forma, a partir de determinado nível de carregamento as deformações sofridas pela estrutura não se recuperam totalmente, indicando que o material atingiu o limite elástico. Apesar da relação intrínseca entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto, o crescimento no valor do módulo não ocorre de forma proporcional ao aumento da resistência à compressão, este comportamento está associado à formação de microfissuras, geralmente entre a matriz cimentícia e os agregados, na chamada zona de transição (Figura 1), região mais frágil do concreto devido a uma maior presença de vazios. A formação dessas microfissuras resulta em uma perda na resistência à compressão e também no valor do módulo de elasticidade (BARBOSA, 2010). Até resistências abaixo de 30% da carga de ruptura, estas microfissuras tendem a permanecer estáveis (MEHTA E MONTEIRO, 1994), para carregamentos acima destes, observa-se um aumento nas aberturas que posteriormente podem levar a estrutura ao colapso. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite investigar detalhes microestruturais da amostra analisada. A Figura 1 indica a disposição das Zonas de Transição entre a pasta e os agregados graúdos.

Figura 1 - MEV do concreto com vistas a zona de transição na interface entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia



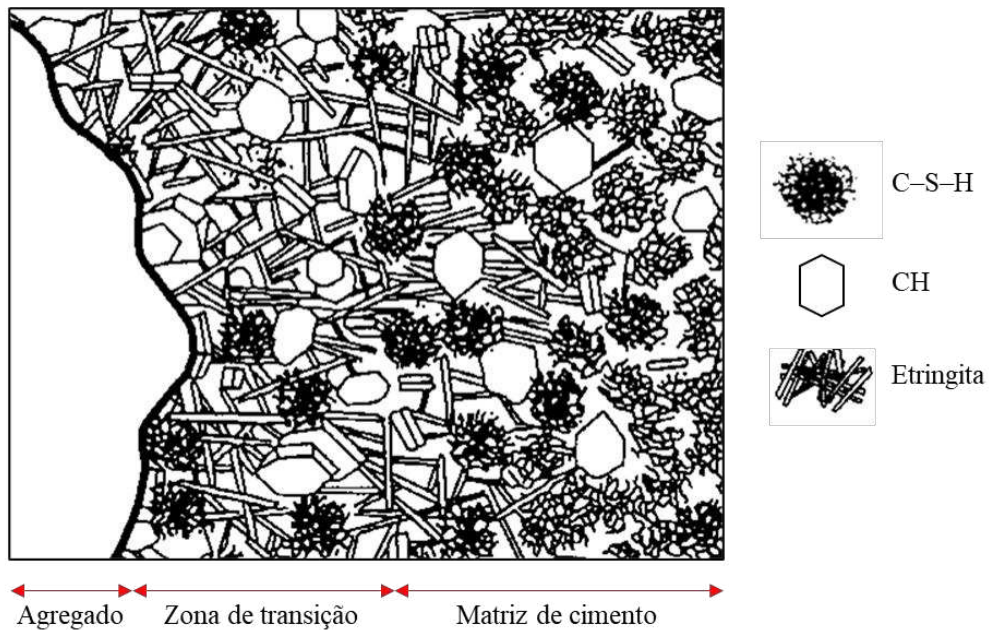
Fonte: Vinne, 2017 – Adaptado

A zona de transição é tão menor quanto maior for a resistência à compressão do concreto. Concretos de alta resistência (acima de 50 MPa) tendem a ter uma zona de transição mais compacta, melhorando a aderência entre os agregados e a pasta de cimento, aumentando a resistência geral do material.

A relação água/cimento é um fator crucial na qualidade do concreto. Uma relação a/c

mais alta significa mais água na mistura, o que pode elevar a porosidade na pasta de cimento, e consequentemente a uma zona de transição mais fraca. Quando há mais água, forma-se uma película maior envolta dos agregados graúdos. Esta película pode impedir uma ligação mais forte entre os agregados e a matriz cimentícia, resultando em uma zona de transição mais ampla e mais fraca. Isso pode reduzir a resistência do concreto, pois a zona de transição ampliada torna-se preferencial para a iniciação da fissuração e a penetração de agentes agressivos.

Figura 2 - Zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, microestrutura em concretos



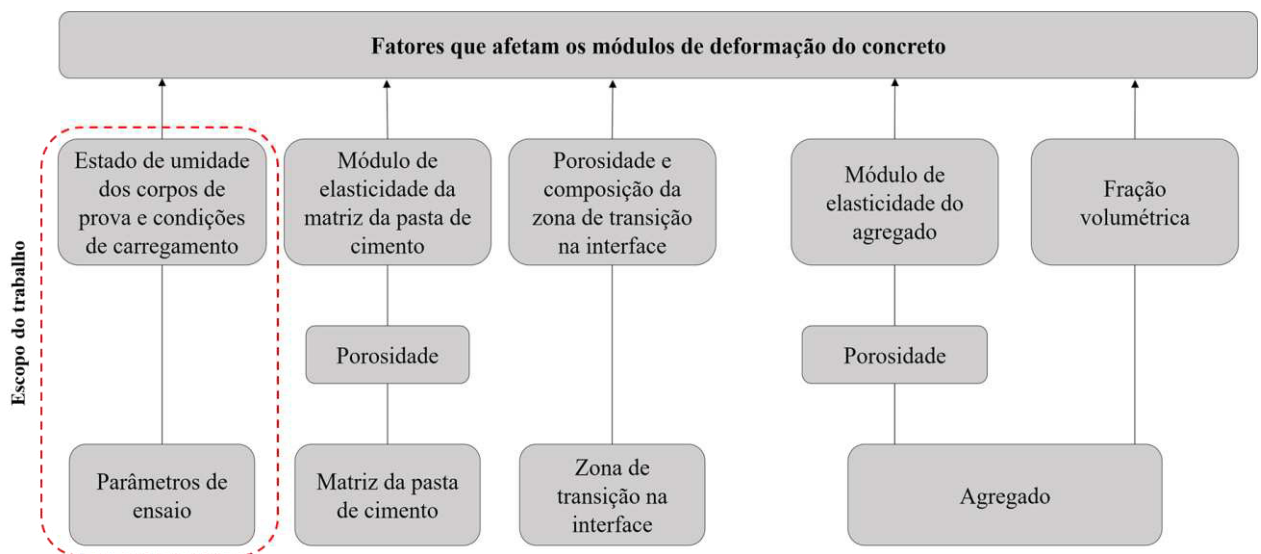
Fonte: Mehta e Monteiro, 2008

O C-S-H (silicato de cálcio hidratado) representa o principal produto da hidratação do cimento, sendo fundamental para o desenvolvimento da resistência mecânica. O C-H (hidróxido de cálcio) é um subproduto da hidratação, seu papel principal é manter o teor alcalino da estrutura, protegendo as armaduras. No entanto, quando em contato com o dióxido de carbono da atmosfera ocorre um processo conhecido como carbonatação, podendo reduzir a durabilidade do concreto. A etringita é um mineral formado nas etapas iniciais da hidratação do cimento, ela contribui para o ganho inicial de resistência do concreto.

A estrutura da zona de transição interfere diretamente no módulo de elasticidade do concreto, em decorrência principalmente do volume de vazios e a presença de microfissuras (ELSHARIEF *et al.*, 2003). Devido a isso, ainda que os materiais constituintes do concreto possuam elevada rigidez (agregado graúdo e pasta), a rigidez do composto pode ser significativamente inferior (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Por se tratar de um compósito, as propriedades mecânicas do concreto estão diretamente relacionadas às propriedades de seus constituintes e da interface entre os agregados e a matriz cimentícia. Fatores externos também interferem nas propriedades elásticas do material, tais como a umidade (NEVILLE, 2013; MEHTA E MONTEIRO, 2014), temperatura (MYRTJA *et al.*, 2021; MARKERT *et al.*, 2022) e tipos de carregamento (ONESCHKOW *et al.*, 2020; CERVO E BALBO, 2004). A Figura 3 aponta os principais contruibuintes que influenciam no módulo de elasticidade do concreto. Este trabalho é voltado para a avaliação dos parâmetros de ensaios, no que tange as condições de carregamento.

Figura 3 - Fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro, 2014

3.2. Configurações de ensaio para determinar o módulo de elasticidade

Os ensaios mecânicos podem ser classificados quanto à integridade em destrutivos e não destrutivos, já em relação as configurações de carregamento podem ser separados em ensaios estáticos, dinâmicos e com carregamento constante.

Ensaio destrutivos são aqueles que causam inutilização parcial ou total do elemento ensaiado, ensaios de tração por compressão diametral e resistência característica à compressão, por exemplo. Em contraste, os ensaios dinâmicos ou não destrutivos produzem tensões discretas, que minimizam a probabilidade do surgimento de microfissuras oriundas do efeito de fluência – deformações ocasionadas por carregamento constante ao longo do tempo.

Para caracterização do concreto, ensaios não destrutivos vêm sendo amplamente utilizados (ARAGON *et al.*, 2019; MAKOOND *et al.*, 2020), e eles são definidos como técnicas

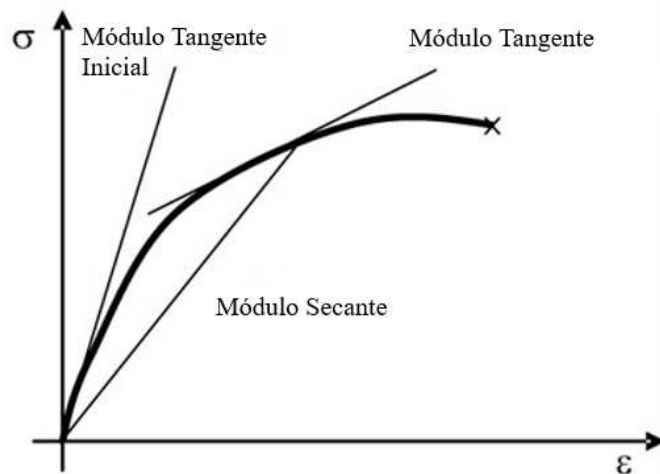
de ensaio que não alteram as propriedades físicas, químicas ou de forma do material (CARTZ, L., 1995). O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido indiretamente através das frequências naturais de vibração ou pela velocidade do som com a utilização de pulso ultrassônico.

A relação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico depende da taxa de carregamento, temperatura e resistência à compressão (SHKOLNIK, I. E., 2005). Para o concreto o módulo de elasticidade dinâmico é sempre superior ao estático (NEVILLE, 2016; MEHTA E MONTEIRO, 2014; POPOVICS, 2008).

3.2.1. Módulo de Elasticidade Estático

O módulo de deformação ou módulo de elasticidade estático, como é usualmente conhecido, se refere ao módulo obtido através de uma carga aplicada de forma gradual e constante, a resposta do material (deformação) é verificada sob esta condição de carregamento. Devido à natureza viscoelástica do concreto, na literatura são abordados três tipos de módulo de elasticidade estático, apontados na Figura 4.

Figura 4 - Módulos de elasticidade do concreto



Fonte: Araujo, Guimarães e Gey, 2012

Conforme Mehta e Monteiro (1994), o Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (E_{ci}) é relativo às deformações no regime elástico, sendo uma reta tangente à curva de tensão e deformação partindo da origem. O módulo secante é definido como a inclinação da reta que parte da origem até um percentual da resistência à compressão, usualmente trabalha-se com 40% da tensão de ruptura do concreto (f_c). Já o módulo tangente é referente a inclinação da linha

traçada em qualquer ponto da curva tensão-deformação. Ambos indicam o módulo de elasticidade estático e imediato.

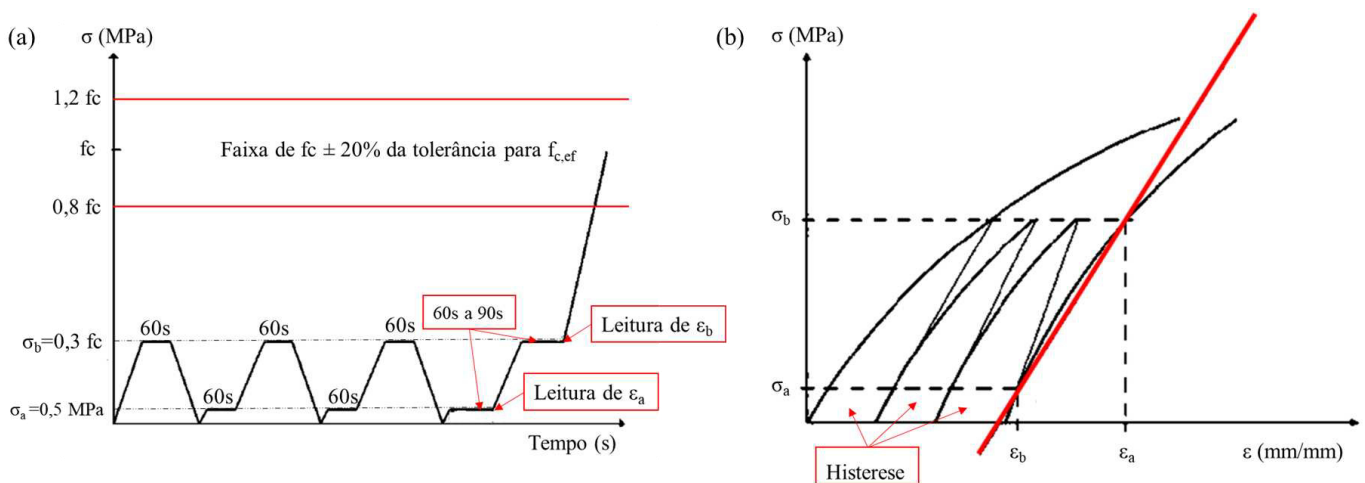
Para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa, a NBR 6118 (ABNT, 2023) sugere estimar o módulo de elasticidade tangente inicial através da Equação 2.

$$E_{ci} = \alpha_E * 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

Onde α_E é um coeficiente de ajuste baseado no tipo de agregado gráúdo utilizado na mistura e f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão na idade de 28 dias.

A NBR 8522 (ABNT, 2021) estabelece os métodos de ensaio para obtenção da curva tensão-deformação do concreto. Ela prevê duas metodologias para a determinação do módulo de elasticidade tangente. A metodologia A – onde a tensão σ_a permanece fixa ao longo do ensaio, conforme apresentado na Figura 5a, e a Metodologia B – onde a deformação ε_a se mantém fixa.

Figura 5 - a) Ciclo de carregamento para determinação do módulo de elasticidade através da Metodologia A - com a tensão σ_a fixa b) módulo de Elasticidade Tangente Inicial



Fonte: Adaptado NBR 8522 (ABNT, 2021)

O $f_{c,ef}$ indica o valor da resistência efetiva do CP após a leitura dos deslocamentos e obtenção das deformações. Sendo tolerada uma diferença de até 20% do f_c . ε_a e ε_b equivalem as deformações referentes as tensões σ_a e σ_b , respectivamente.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) o Módulo Tangente Inicial (E_{ci}) é equivalente ao Módulo Secante entre $\sigma_a = 0,5$ MPa e 30% do f_c . A Figura 5b representa esquematicamente o E_{ci} .

As curvas iniciais do gráfico da Figura 5b indicam os ciclos de carga e descarga apontados na Figura 5a que precedem as medições do ensaio. Estes ciclos são fundamentais

para a eliminação de efeitos iniciais, conformando a amostra e eliminando possíveis irregularidades entre a interface do CP e os pratos de carga do equipamento de teste. A área entre as curvas de carregamento e descarregamento (histerese) corresponde a energia de deformação irreversível oriunda de microfissuras ou da fluência (BROOKS, 2015; NEVILLE, 2016).

Para a Metodologia A o $E_{ci,i}$ (GPa) é calculado através da Equação 3:

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (3)$$

Em geral, quanto maior o $E_{ci,i}$ mais rígida será a estrutura no início do carregamento, ou seja, irá exibir uma deformação menor sob uma carga inicial. Esta informação é desejável onde o desempenho da estrutura dependa crucialmente da rigidez do concreto.

3.2.2. Módulo de Elasticidade Complexo

O valor absoluto do módulo de elasticidade complexo $|E^*|$ (ocasionalmente referido como módulo dinâmico, ainda que inexistam efeitos inerciais) avalia a rigidez do material quando as cargas solicitantes são variáveis, inicialmente foi desenvolvido para caracterização de misturas asfálticas. Ele é representado como um número complexo, dividido em duas partes, a real $|E'|$ (módulo de armazenamento) e a imaginária $|E''|$ (módulo de perda) (BRINSON & BRINSON, 2008), como observado na Figura 7c, elas estão relacionadas através do ângulo de fase (φ), que indica o descompasso no tempo (Δt) (Equação 4) entre as curvas de tensão (σ_t) (Equação 5) e deformação (ε_t) (Equação 6) apontadas na Figura 7b.

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} \quad (4)$$

$$\sigma_t = \sigma_0 \sin \omega t \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

σ_0 e ε_0 representam as amplitudes da tensão e deformação, respectivamente. ω é a velocidade angular, $\omega = 2\pi f$. Dessa forma, φ está diretamente associado a frequência de

carregamento, que representa uma variável determinante na obtenção do módulo complexo.

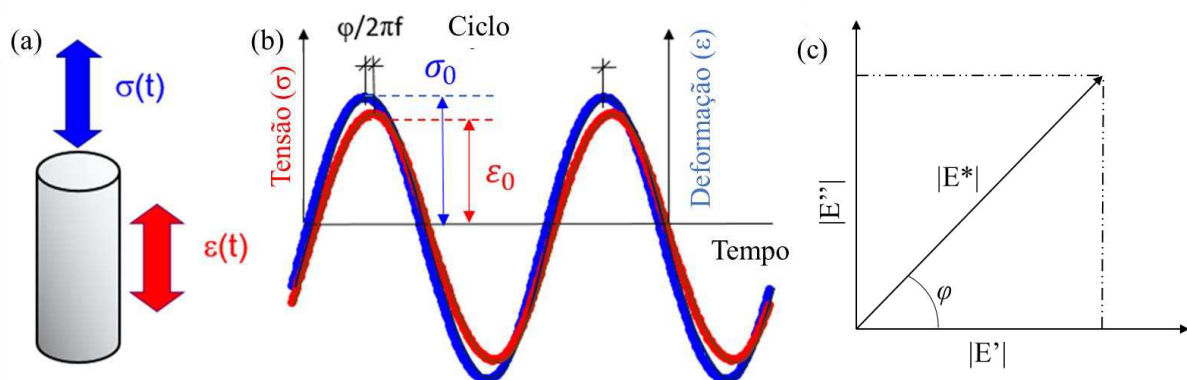
Fundamentalmente, o conceito do módulo complexo está expresso na Equação 7.

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

$|E^*|$ representa o valor absoluto do módulo complexo, $E' = |E^*| \cos \varphi$ e $E'' = |E^*| \sin \varphi$. E' indica o comportamento elástico do material e E'' reflete o efeito da viscoelasticidade, sendo assim φ avalia diretamente a dissipação de energia. Quanto maior o ângulo de fase mais susceptível à deformação a estrutura estará.

A Figura 6 ilustra a simulação de um teste de carga senoidal e a deformação correspondente. Na Figura 6a é mostrada uma tensão aplicada (indicação em azul) em um corpo de prova sob uma frequência (f) definida e a resposta à deformação axial (indicação em vermelho). Os sinais de leitura correspondentes (*tensão x tempo* e *deformação x tempo*) estão indicados na Figura 6b. As Equações 5 e 6 regem o comportamento das curvas modelado em função do tempo. Enquanto a Figura 6c indica a relação entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento na determinação do valor absoluto do módulo complexo, conforme discutido anteriormente.

Figura 6 - a) Indicação das componentes de tensão e deformação no CP b) Defasagem no tempo entre as curvas senoidais de carregamento e deformação. c) Componentes do módulo complexo $|E^*|$



Fonte: Targino, 2023 - Adaptado

Fu *et al.* (2021) observaram que diferentes condições de carregamento afetam o módulo de elasticidade complexo ($|E^*|$) e o ângulo de fase (φ) de misturas asfálticas, este efeito também foi observado por Norberto (2022) em materiais cimentícios, onde verificou-se que a amplitude

e a frequência de carregamento colaboram para a redução e aumento do $|E^*|$, respectivamente, coincidindo com diversos outros trabalhos (TARGINO *et al.* 2023; JAIN *et al.*, 2020; KACHKOUCH *et al.*, 2020; EVANGELISTA JUNIOR *et al.*, 2019; BRINSON & BRINSON, 2008).

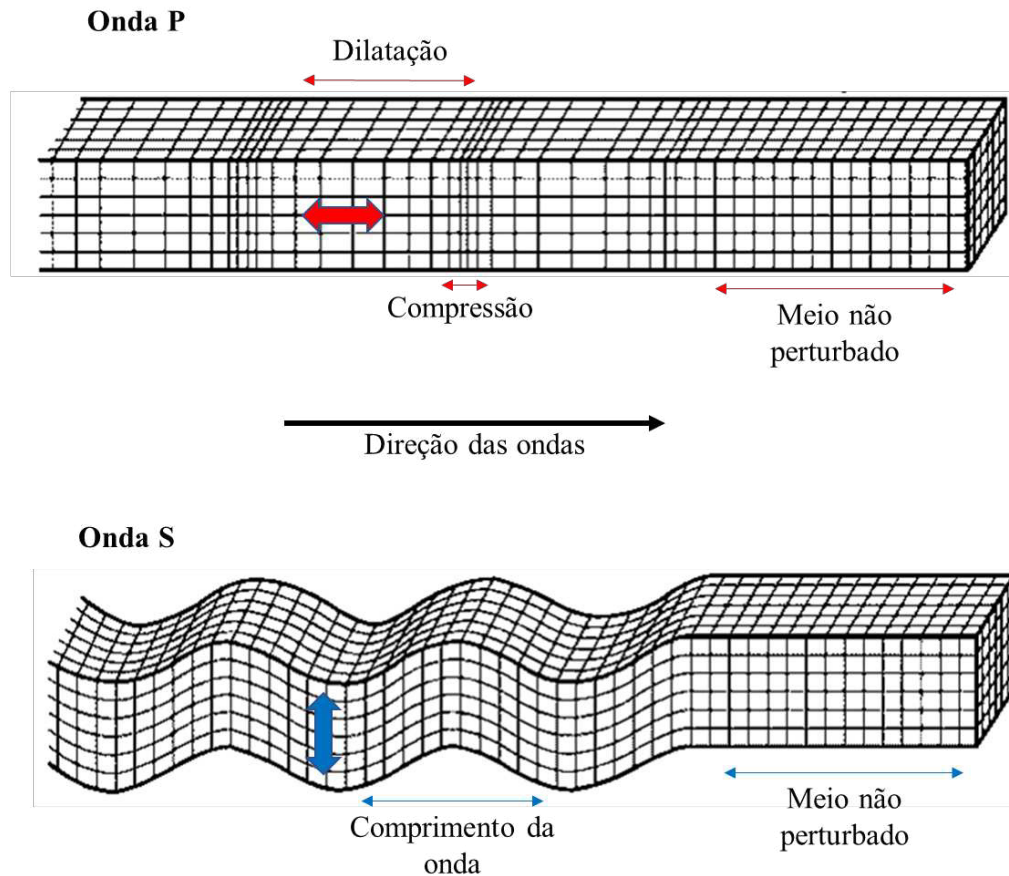
Para materiais cimentícios, estudos do comportamento mecânico através de carregamentos oscilatórios ainda são pouco estudados. Os ensaios de módulo complexo no Brasil usualmente seguem a norma DNIT ME 416 (IPR, 2019) para misturas asfálticas. O teste consiste na aplicação de um carregamento, podendo variar também a frequência e a temperatura de ensaio. Os deslocamentos lineares são medidos através de sensores – LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*).

3.2.3. Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) é o resultado do ensaio realizado por pulso-ultrassônico, sendo capaz de avaliar a rigidez do material a partir das medições de onda *ToF* (*Time of Flight*) que representa o tempo entre a emissão e a recepção do sinal. As ondas inerciais (dinâmicas) não causam deformações permanentes no material de propagação. Esta característica está associada às deformações instantâneas discretas e o seu valor é dado aproximadamente igual ao do módulo tangente inicial (MEHTA E MONTEIRO, 2013).

As principais ondas observadas nos sólidos são as ondas de superfície e as ondas de corpo. As ondas corporais podem ser primárias (ondas P), referente as ondas compressivas, ou secundárias (ondas S), que são ondas cisalhantes. O comportamento destas ondas está apresentado na Figura 7. Para a onda P, a direção de vibração das partículas do meio, em vermelho, está na mesma direção que a onda percorre, e elas se propagam longitudinalmente através de uma série de distensões e compressões do meio. Enquanto as ondas S provocam um movimento perpendicular à direção de transmissão, em azul. Quanto maior a rigidez do material, maior é a facilidade de propagação destas ondas.

Figura 7 - Direção de vibração e propagação das ondas P e ondas S



Fonte: Autor

As velocidades de propagação destas ondas estão diretamente relacionadas às propriedades mecânicas do material. As ondas superficiais ocorrem quando há uma superfície de separação entre materiais com propriedades elásticas diferentes. Como o concreto é fruto da mistura de diferentes componentes, quando aplicado um estímulo dinâmico, espera-se que além das ondas corporais sejam identificadas inúmeras ondas de superfície. As ondas P são mais rápidas e mais fáceis de serem identificadas, enquanto as ondas S são difíceis de detectar. Por esse motivo, usualmente determina-se o módulo de elasticidade dinâmico a partir da Equação 8 (ABNT NBR 15630:2008).

$$E_{cd} = C_p^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (8)$$

Onde,

C_p é a velocidade de pulso ultrassônico da onda P (m/s);

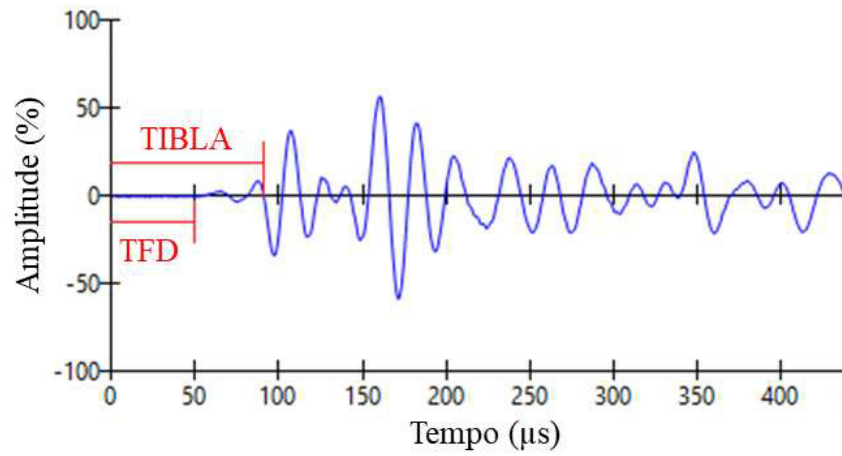
ρ é a densidade aparente do CP;

ν é o coeficiente de Poisson.

No entanto, esta metodologia pode fornecer resultados distantes da realidade, já que é preciso assumir por hipótese um valor para o coeficiente de Poisson do material. A NBR 6118 (ABNT, 2023) recomenda a utilização de $\nu = 0,2$ para tensões de compressão abaixo de 0,5 fc. Isso é igualmente adotado para estimação do que ficou conhecido como módulo dinâmico na área de Tecnologia do Concreto (YOUNG *et al.*, 2012). Porém, há alternativas para a determinação experimental simultânea do valor de módulo dinâmico e do valor de coeficiente de Poisson, utilizando não apenas um tipo de onda (ondas de compressão acima), mas duas (combinando com resultados de tempo de voo, por exemplo, de ondas de cisalhamento) (BEZERRA *et al.*, 2023).

Uma alternativa é a utilização da velocidade de pulso ultrassônico das ondas de cisalhamento associadas às ondas compressivas. Bezerra *et al.* (2023) investigaram diferentes técnicas para determinação do módulo de elasticidade através de ensaios não destrutivos, particularmente no que se refere à leitura eficiente da onda S de modo a obter resultados coerentes com os demais ensaios analisados. Devido à natureza das ondas de cisalhamento, o tempo do primeiro desvio (tratado no artigo como TFD - *Time of the First Deviation*) medido com o receptor não corresponde necessariamente à chegada das ondas S, pois há outras ondas perturbando mecanicamente o material. Conforme avaliado pelos autores, o tempo para a intersecção antes da chegada das ondas de menor amplitude (tratado no artigo como metodologia TIBLA - *Time for Intersection Before Arrival of the Lowest Amplitude Waves*) seria a mais adequada, pois corresponde ao módulo determinado com outro método independente da hipótese sobre o valor do coeficiente de Poisson (ressonância por impacto). Com esse método de leitura das ondas S, dispensa-se a adoção de valores para o coeficiente de Poisson, caracterizando os materiais cimentícios de maneira mais fiel (BEZERRA *et al.*, 2023). Ela consiste na intersecção entre o eixo x e o sinal antes das ondas de menor amplitude serem observadas, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Metodologia TIBLA e TFD para determinar o ToF da onda S (CC com idade superior a 100 dias)



Fonte: Autor

Através do tempo de voo (ToF) (T_p para onda P e T_s para onda S) é possível determinar a velocidade de voo de cada onda, C_p (m/s) e C_s (m/s) (Equação 9 e Equação 10, respectivamente), através de uma relação com o comprimento, L (m), do CP.

$$C_p = \frac{L}{T_p} \quad (9)$$

$$C_s = \frac{L}{T_s} \quad (10)$$

Através das velocidades de voo (Equação 11 e Equação 12), obtém-se a fórmula para calcular o coeficiente de Poisson (Equação 13). O resultado é aplicado na Equação 8 para a determinação do módulo de elasticidade.

$$C_p = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E_{cd}}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (11)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E_{cd}}{2(1 + \nu)\rho}} \quad (12)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{C_p}{C_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{C_p}{C_s}\right)^2 - 1} \quad (13)$$

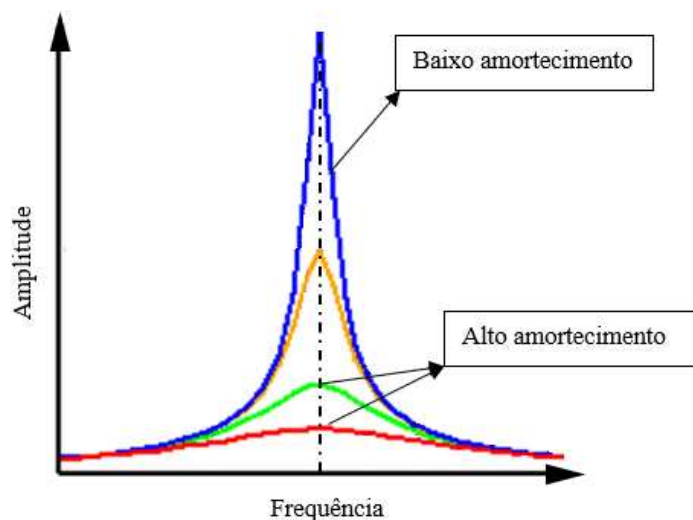
A NBR 8802 (ABNT, 2019) estabelece os parâmetros para determinação da velocidade de propagação da onda por pulso ultrassônico em concreto. A NBR 15630 (ABNT, 2008) prescreve o método de ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico em corpos de prova de argamassa através da propagação de ondas longitudinais (ondas P). Neste trabalho, foi mantido o fluxo de ensaio, adicionando-se a verificação das ondas de cisalhamento (ondas S).

3.2.4. *Módulo de Elasticidade Ressonante*

O módulo de elasticidade ressonante (E_r) é fruto do ensaio de ressonância por impacto. A rigidez é determinada indiretamente através da medição de frequências de ressonância de um material quando submetido a uma perturbação. A ressonância ocorre quando a frequência da excitação coincide com uma das frequências naturais do material, nessa condição a amplitude de vibração (resposta do material ao estímulo externo) aumenta significativamente. Cada frequência natural está associada a um modo de vibração específico.

Elevadas amplitudes podem ser obtidas após uma sequência de pequenos impulsos em uma determinada frequência. Os sistemas reais possuem forças de amortecimento, que limitam o acúmulo de energia da força externa e consequentemente o crescimento das oscilações. Quando o amortecimento é pequeno a frequência excitadora se aproxima da frequência natural e a amplitude atinge o seu valor máximo (Figura 9). As medições identificam as frequências nas quais o material exhibe picos de resposta.

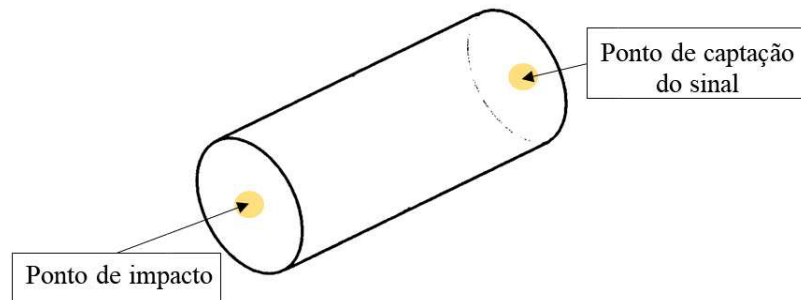
Figura 9 - Amplitude de oscilação em função da frequência angular



Fonte: Autor

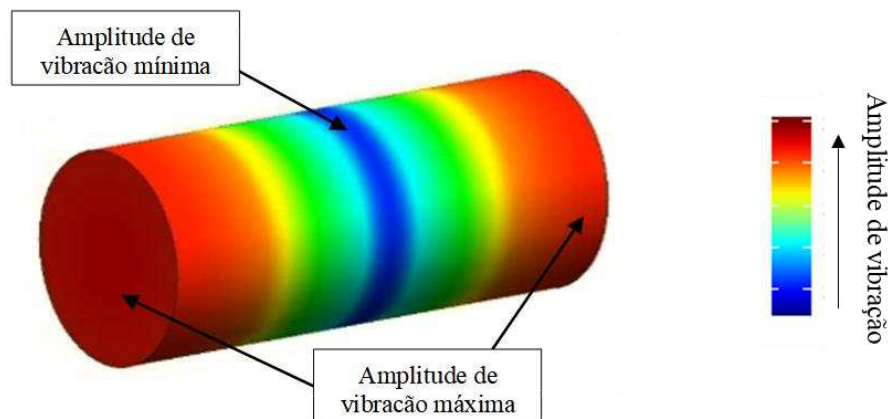
O ensaio consiste na aplicação de um impulso mecânico de curta duração, nas posições longitudinal, torcional ou flexional, em um corpo de prova com a geometria conhecida, a resposta acústica é obtida por um acelerômetro (BAHR et al., 2013). A Figura 10 indica as condições de contorno para excitação longitudinal, o comportamento vibracional de um objeto cilíndrico excitado nessas condições está disposto na Figura 11.

Figura 10 - Condições de contorno para excitação longitudinal



Fonte: Autor

Figura 11 - Comportamento vibracional de um objeto cilíndrico excitado longitudinalmente



Fonte: Adaptado Pereira e Otani (2017)

O acelerômetro é colocado em um dos bordos do CP, justamente onde a amplitude de vibração resultante do impacto é máxima. Nesta configuração de ensaio, o módulo de elasticidade é referente à direção do comprimento do corpo de prova, semelhante ao módulo de elasticidade obtido através de carregamento axial (CALLISTER, 2007).

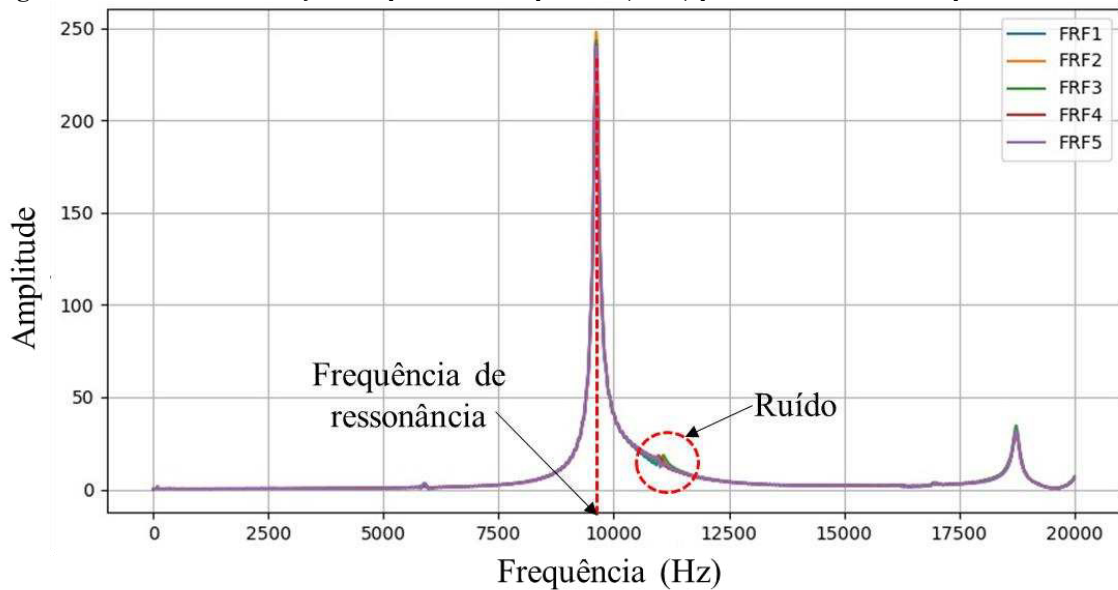
A norma americana ASTM C215 2019 - *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens* trata das metodologias de medição da frequência ressonante e estimativa do módulo de elasticidade do concreto utilizando CPs cilíndricos e prismáticos. Não existe norma brasileira que indique o procedimento para determinação do módulo de elasticidade através da frequência ressonante

de impacto.

Bezerra et al. (2022) desenvolveram um método para determinação da rigidez de diferentes materiais através da ressonância por impacto. O modelo consiste na aplicação de um impulso externo 5 vezes com um martelo automatizado, as ondas geradas são registradas por um acelerômetro, conforme configuração indicada na Figura 10 e Figura 11. A análise dos resultados é dada por uma Função de Resposta de Frequência (FRF) (Figura 12), ela representa a relação entre a saída (resposta) e entrada (excitação) de um sistema, ambos no domínio da frequência.

A Figura 12 indica a FRF para uma amostra de concreto convencional, após os 5 impactos (FRF1, FRF2, FRF3, FRF4 e FRF5), para esta amostra, a frequência onde observa-se a maior amplitude é próxima dos 10.000 Hz.

Figura 12 - Gráfico da Função Resposta de Frequência (FRF) para CC com idade superior a 100 dias



Fonte: Autor

O módulo de elasticidade ressonante é calculado através da Equação 14 (ASTM C215, 2019):

$$E_r = DLd^2M(n')^2 \quad (14)$$

Onde:

D é igual a 5,093 n.s² (kg.m²) para cilindros;

L é o comprimento (m);

d é o diâmetro (m);

M é a massa (kg);

n' é a frequência ressonante (Hz).

3.3. Efeitos da variação da amplitude de carregamento

Carregamentos cíclicos como abalos sísmicos, ações do vento e das marés podem levar a estrutura à falha sob tensões inferiores a carga de projeto (SAINI E SINGH, 2020; FELIX *et al.*, 2022). Este processo de deterioração da estrutura ao longo do tempo, exposto a vários ciclos de carga e descarga é conhecido como fadiga (SAINI E SINGH, 2020; SCHÖN, 2009). A fadiga pode ser observada após a aplicação de uma determinada quantidade de carregamento que cause fissuras ou leve a estrutura ao colapso (BAUER *et al.*, 2012).

Para a mecânica, o conceito de dano está relacionado ao surgimento de microfissuras que gere uma descontinuidade no material. Esta perda na área resistente, em macroescala, e perda de ligação do material, em microescala, está associada a redução da rigidez, conforme discutido na Seção 3.1. O dano por fadiga gera alterações na rigidez aparente do material de forma distribuída ao longo de seu volume (LEMAITRE, 1996).

Wöhler realizou uma série de experimentos com o intuito de verificar a degradação por carregamentos repetitivos. A curva de Wöhler ou diagrama S-N indica a relação entre a amplitude das tensões de carregamento e a quantidade de ciclos necessários para o colapso por fadiga. Quanto maior a tensão aplicada, menor a quantidade de ciclos necessários para a falha. A previsão de fadiga descrita por Wöhler é expressa pela Equação 15.

$$\frac{S_{\max}}{f_{t,f}} = d + e \log(N) \quad (15)$$

Onde,

$S_{\max}$ representa a tensão máxima aplicada;

$f_{t,f}$ indica a resistência à tração na flexão;

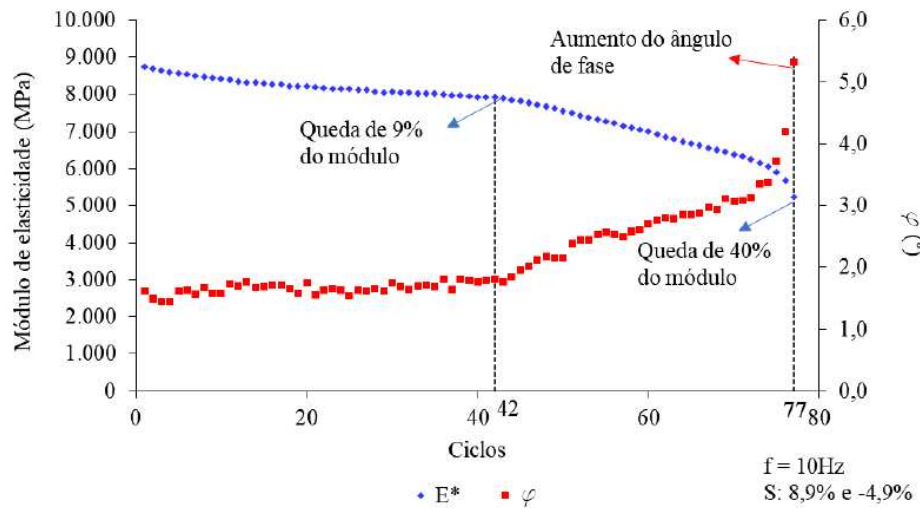
N é o número de ciclos;

d e e são parâmetros do material obtidos através de regressão de dados.

A Figura 13 indica uma curva característica de degradação no módulo de elasticidade de materiais cimentícios em função do número de ciclos. O eixo y aponta a amplitude do módulo de elasticidade, que decresce à medida que o número de ciclos aumenta, também é

observado o aumento do ângulo de fase (φ) com o aumento no número de ciclos.

Figura 13 - Exemplo de curva de degradação no módulo de elasticidade



Fonte: Noberto (2022)

A Figura 13 associa os efeitos do carregamento ao longo do tempo e identifica na estrutura a sequência dos danos gerados no corpo de prova. Este efeito é caracterizado pelo aparecimento de fissuras, geradas a partir da concentração de tensões nos pontos críticos da estrutura.

Segundo Medeiros (2022) o tipo de carregamento tem um impacto relevante no comportamento do material à fadiga. Kachkouch *et al.* (2022) corroboram o efeito combinado entre as condições de carregamento (amplitude e frequência) e aspectos físicos do material (umidade) e do ambiente (temperatura) nas propriedades mecânicas do concreto, o mesmo foi observado por Melo (2022). O fenômeno da fadiga não será objeto de estudo deste trabalho, somente a avaliação do efeito da amplitude de carregamento e as consequências decorrentes no módulo de elasticidade do concreto.

3.4. Efeitos da variação da frequência de carregamento

A relação entre tensão e deformação é influenciada pelo tempo no qual a carga é aplicada. Vasconcelos *et al.* (2018) explicam que sob tensão, os poros no concreto são comprimidos (ou expandidos, conforme tipo de carregamento aplicado), levando à movimentação de água e ar contidos neles. Nos casos em que o carregamento é lento, há tempo suficiente para que esses fluidos se movam, enquanto em carregamentos rápidos há diferentes condições de escoamento. Segundo Neville (2016), prolongar o tempo de carregamento pode

resultar em maiores deformações. No regime comprimido, a relação entre tensão e deformação é impactada pela velocidade de carregamento (BROOKS, 2015).

Em condições reais de carregamento, raramente as estruturas estarão submetidas a esforços com frequência constante (FERREIRA, 2011). Os efeitos da frequência de carregamento foram avaliados por Medeiros et al. (2015), observou-se que à medida que a frequência diminui, o módulo de elasticidade complexo é menor. Esse efeito também foi observado por diferentes autores (CHEN et al., 2022; FELIX et al, 2022; TARGINO, 2023) e pode ser explicado pelo rearranjo da microestrutura do concreto para frequências mais elevadas, aumentando a capacidade do material dissipar energia. Felix (2020) observou que o intervalo de tempo entre o início da fissuração até a ruptura do elemento decresce à medida que a frequência de carregamento também diminui, para uma mesma frequência o intervalo manteve-se fixo em níveis de tensão máxima distintos, desde que a relação entre as tensões máximas e mínimas fosse mantida.

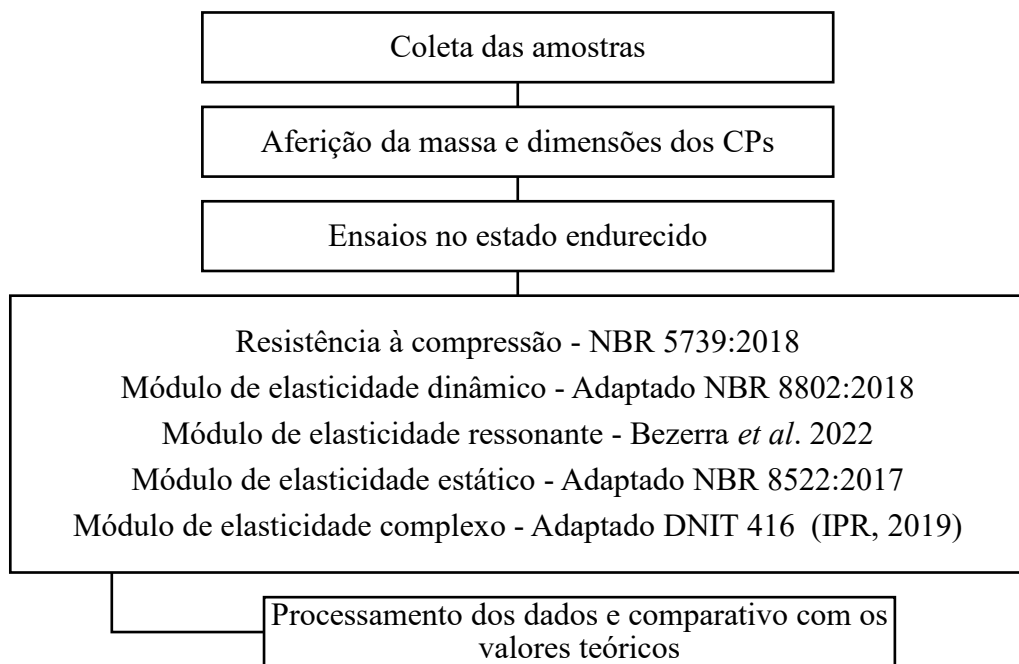
Para frequências acima de 10Hz observa-se um platô no valor absoluto do módulo complexo, não havendo, portanto, um aumento na rigidez significativo para frequências superiores a esta. De modo geral, a frequência está diretamente associada ao ângulo de fase e consequentemente ao módulo complexo, discutido no item 3.2.2.

A variação na frequência de carregamento pode afetar o módulo complexo do concreto, alterando sua capacidade de resistir aos carregamentos cíclicos. Portanto, é essencial o estudo e a consideração dessa propriedade quando há solicitação de carregamentos dinâmicos na estrutura.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

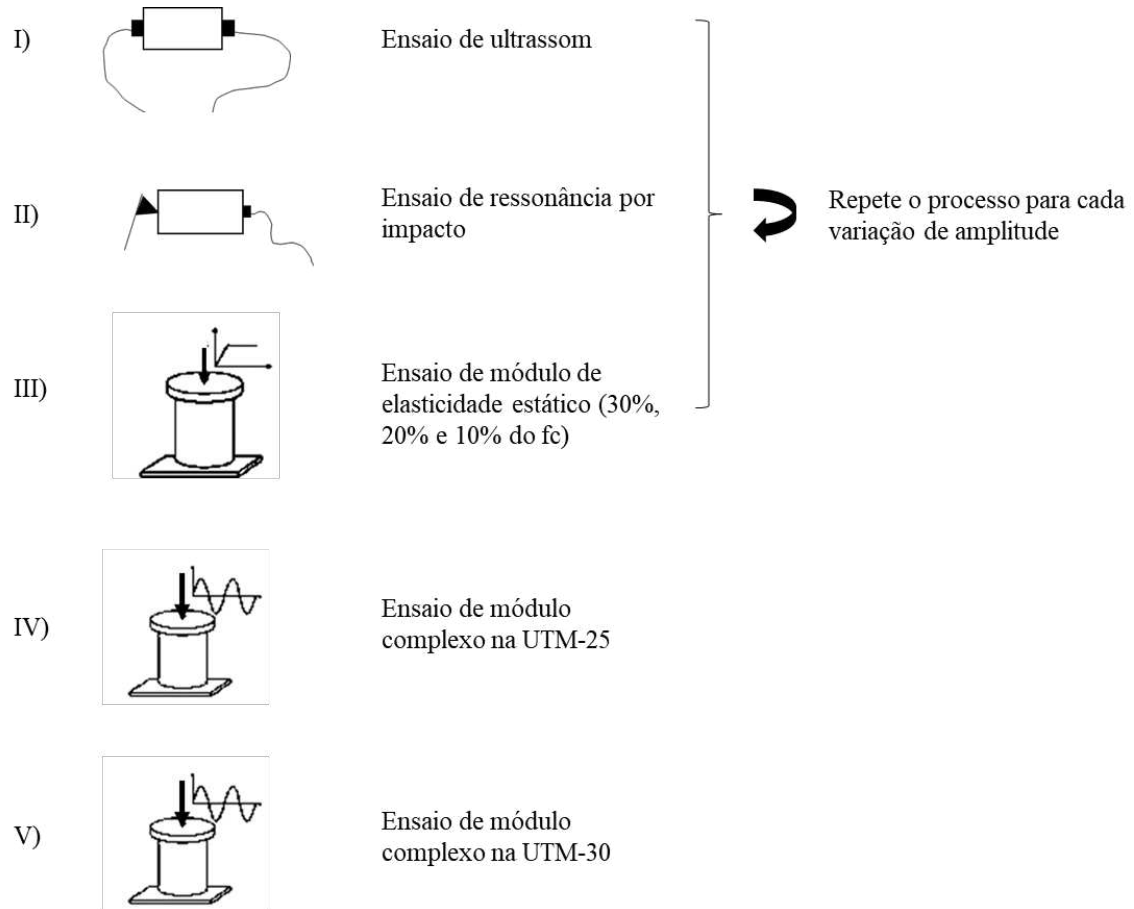
Esta seção aborda os materiais e métodos que foram empregados para a realização do estudo proposto. A Figura 14 apresenta um fluxograma resumindo as principais etapas do método. Na Figura 15 está disposta a sequência de ensaios para determinação do módulo de elasticidade. O detalhamento da cronologia dos ensaios e as adaptações realizadas serão descritos posteriormente.

Figura 14 - Fluxograma do método



Fonte: Autor

Figura 15 - Sequência de ensaios para determinação do módulo de elasticidade



Finaliza com os ensaios I e II.

Fonte: Autor

Os ensaios foram realizados no Campus do Pici – UFC, nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) e Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec), em parceria com o Grupo de Pesquisa em Reologia de Materiais – ReoM UFC.

4.1. Amostragem

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de concreto convencional, as amostras foram cedidas por uma construtora de Fortaleza, o concreto foi produzido por uma concreteira da região. A concreteira utiliza dosagem própria e não disponibiliza informações sobre a composição ou as propriedades dos materiais utilizados. Em decorrência disso, esta pesquisa não confirma o controle de qualidade dos materiais empregados.

Foi extraído um volume de cada caminhão betoneira e em seguida realizado o *Slump*

Test conforme as diretrizes da NBR 16889 (ABNT, 2020). Todas as amostras estão enquadradas na categoria S100, com abatimento 10 ± 2 cm. Os CPs foram moldados conforme as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015) em fôrma cilíndrica com dimensões de 100 mm x 200 mm, após 24h foram desmoldados e mergulhados em um tanque com água para a cura submersa. Foram separados 12 exemplares para a realização desta pesquisa.

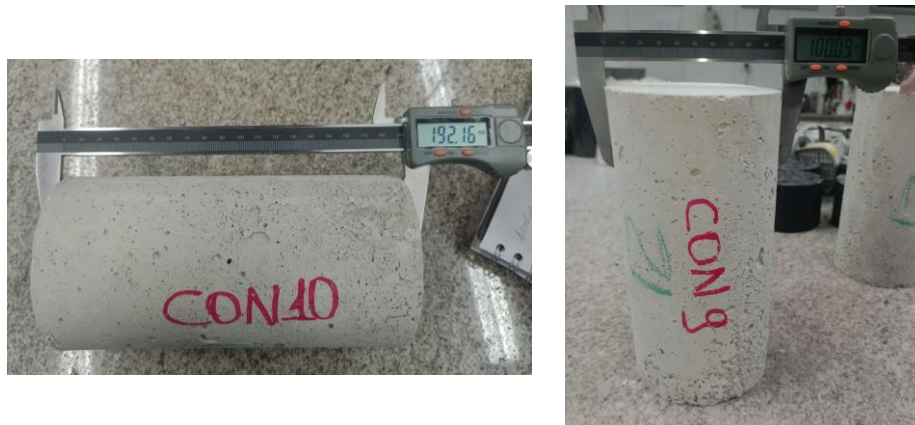
Figura 16- Corpos de prova utilizados para os ensaios de módulo de elasticidade



Fonte: Autor

Posteriormente, os CPs foram retificados, mantendo uma relação altura/diâmetro de aproximadamente 2. Os ensaios foram realizados no concreto com idade superior a 100 dias. Inicialmente duas amostras foram rompidas para determinação da resistência à compressão (f_c) segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), para a amostra 1 $f_{c1}=25,32$ MPa e para a amostra 2 $f_{c2}=30,18$ MPa, obtendo um f_c médio de 27,75 MPa. Este valor é necessário para identificação das cargas a serem utilizadas nos ensaios do módulo de elasticidade complexo e para a variação das amplitudes de carregamento no módulo de elasticidade estático.

As dimensões e a massa das 10 unidades restantes foram medidas, com 3 aferições para cada dimensão (ilustrado na Figura 17). Foi calculada uma média com os valores obtidos, que serão utilizadas na determinação do módulo de elasticidade dinâmico e módulo ressonante. Os resultados calculados estão dispostos na Tabela 1 com os desvios padrões para cada CP.

Figura 17 - Medições dos CPs

Fonte: Autor

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova

Item	Média do Diâmetro (mm)	Média Comprimento (mm)	Massa (g)
Con1	100,1 ± 0,09	196,7 ± 0,17	3422,5
Con2	100,5 ± 0,37	190,0 ± 0,17	3278,8
Con3	99,9 ± 0,47	184,1 ± 0,10	3234,7
Con4	101,0 ± 1,20	193,5 ± 0,9	3330,9
Con5	100,6 ± 0,19	192,7 ± 0,26	3312,9
Con6	99,7 ± 0,12	190,9 ± 0,47	3323,6
Con7	100,4 ± 0,51	194,9 ± 0,12	3373,6
Con8	100,6 ± 0,28	193,2 ± 0,21	3338,5
Con9	100,3 ± 0,28	194,9 ± 0,47	3399,1
Con10	100,3 ± 0,17	192,0 ± 0,13	3303,7

4.2. Ensaios mecânicos

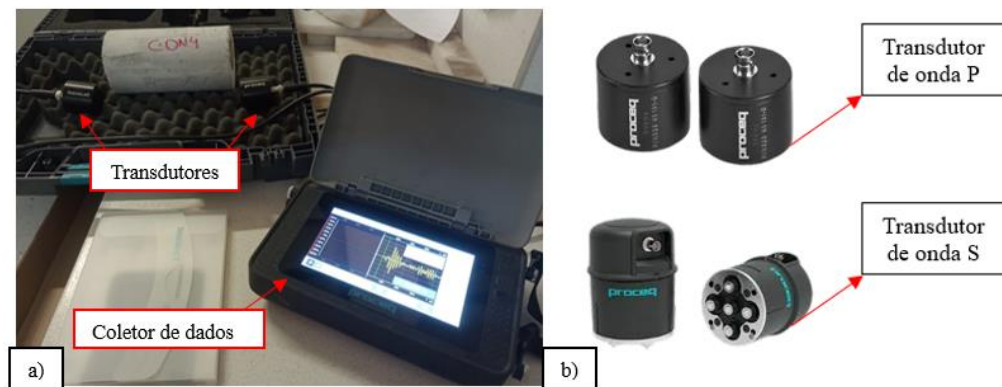
4.2.1. Módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade de pulso ultrassônico

O teste ultrassônico foi realizado utilizando o aparelho Pundit Lab com dois diferentes tipos de transdutores (Figura 18). Os transdutores de onda P com frequência nominal de 54 kHz e os transdutores de onda S com frequência nominal de 40 kHz. A metodologia de ensaio foi baseada na NBR 15630 (ABNT, 2008), que prescreve a determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade de pulso ultrassônico. Foram realizadas medições do tipo direta, onde o emissor e o receptor são colocados nas extremidades do corpo de prova a fim de garantir

máximo desempenho na transmissão do sinal, conforme mostrado nas Figuras 10 e 11. Anteriormente à realização dos ensaios o aparelho era calibrado com uma amostra cilíndrica de 25,4 μ s.

As medições de velocidade de pulso ultrassônico, tanto para onda P como para onda S, foram intercaladas com os ensaios de módulo de elasticidade complexo e módulo de elasticidade estático, com o intuito de avaliar a possível degradação no módulo de elasticidade que poderia ser atribuída aos ensaios anteriores. No total, realizaram-se cinco séries de verificações. O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado conforme descrito na seção 3.2.3.

Figura 18 - a) Equipamento de teste ultrassônico. b) Transdutores utilizados para aferição do ToF das ondas P e ondas S

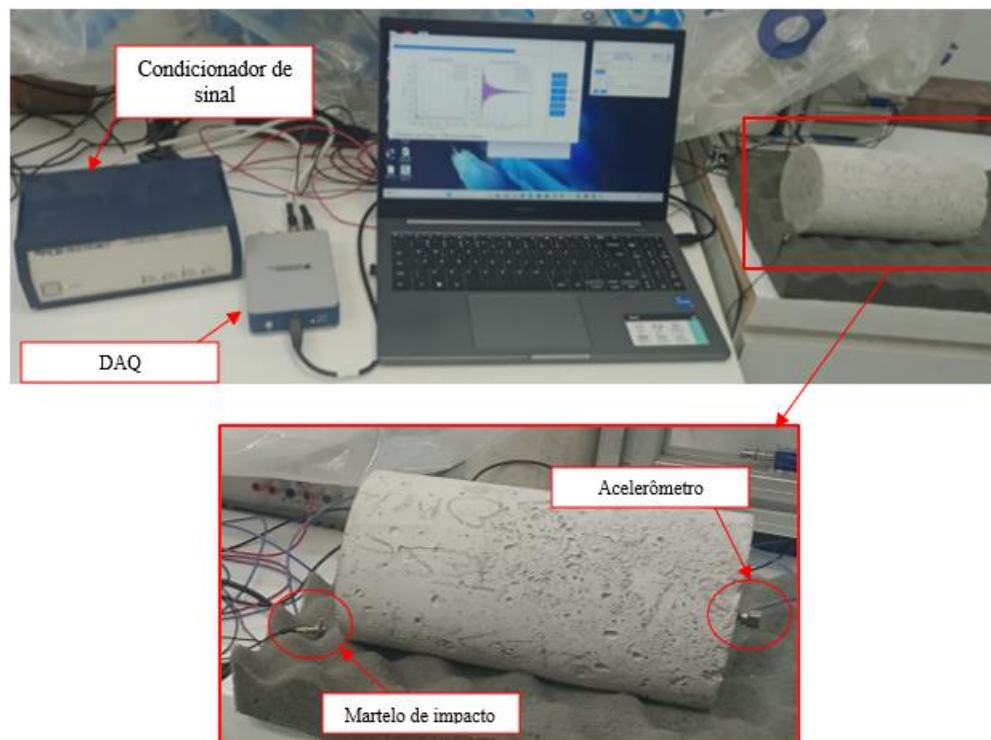


Fonte: Autor

4.2.2. Módulo de elasticidade ressonante

O ensaio de ressonância por impacto tomou como base o método desenvolvido por Bezerra *et al.* (2022). O modelo consiste na aplicação em sequência de 5 impactos com um martelo em uma das bases do corpo de prova, as ondas geradas são captadas por um acelerômetro colado na outra extremidade do CP, conforme configuração apresentada nas Figuras 10 e 11. O martelo e o acelerômetro são conectados a um condicionador de sinais, que se liga a um aparelho de aquisição de dados (DAQ) e finalmente a um computador, a disposição do ensaio está indicada na Figura 19.

Figura 19 - Configuração do ensaio de ressonância por impacto



Fonte: Autor.

Os sinais são registrados em um *software*, nele o valor temporal captado pelo acelerômetro é transformado para o domínio da frequência (FRF), assim como discutido na seção 3.2.1. A partir da resposta em frequência emprega-se a metodologia da ASTM C215 para calcular o E_r (Equação 14), utilizando a frequência de ressonância juntamente com os dados de massa e dimensões do corpo de prova.

4.2.3. Módulo de elasticidade estático

O ensaio de módulo estático seguiu as diretrizes da NBR 8522 (ABNT, 2021). Para a execução dos ensaios foi utilizada uma prensa eletromecânica EMIC (Figura 20a) com extensômetros acoplados nos CPs (Figura 20b), capazes de medir as deformações. Foram realizadas 3 baterias de testes, inicialmente foi obtido o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), que corresponde, segundo a norma, ao módulo secante entre uma tensão fixa ($\sigma = 0,5$ MPa) e 30% da resistência característica à compressão do concreto. Optou-se pela Metodologia A – onde mantém-se a tensão constante. Foram aplicados os ciclos de carga e descarga, conforme apresentado na Figura 5. O carregamento é aplicado a uma velocidade de 45 ± 15 MPa/s, ao longo de 4 etapas, cada uma com duração de 60 s, intercalando entre o carregamento de 30% e a tensão de 0,5 MPa. Finalmente são anotadas as deformações nos carregamentos de

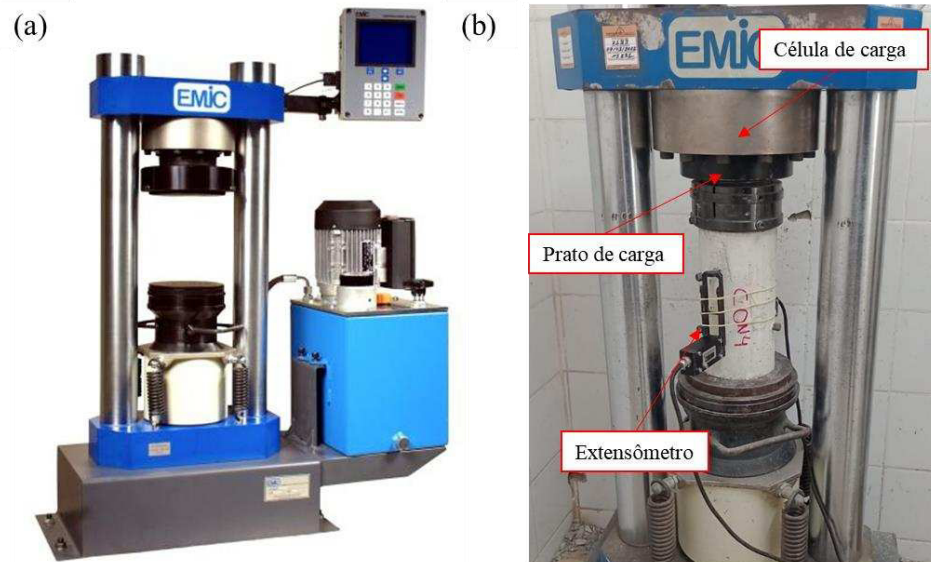
interesse e é possível obter o módulo de elasticidade estático através da Equação 3.

A segunda bateria de ensaios consistiu na aplicação de 20% da resistência característica do concreto, a fim de identificar os efeitos da variação da amplitude de carregamento no valor do módulo de elasticidade. Foi seguido o mesmo procedimento indicado anteriormente. Já a terceira etapa foi realizada com 10% do f_c do concreto, adotando as mesmas premissas dos carregamentos anteriores. O valor médio das cargas utilizadas está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Cargas utilizadas nos ensaios de módulo de elasticidade estático

Amplitude	30% do f_c	20% do f_c	10% do f_c
Carga aplicada (N)	65.393,65	43.595,77	21.797,88

Figura 20 - a) Prensa EMIC b) montagem do ensaio de módulo de elasticidade estático



Fonte: Autor

4.2.4. Módulo de elasticidade complexo

Para a determinação do módulo de elasticidade complexo do concreto, adotou-se como referência a norma do DNIT 416 (2019). Os testes foram conduzidos utilizando a prensa servo-hidráulica UTM-25 e UTM-30, que aplicam um carregamento senoidal de compressão. Em virtude das restrições de carga das máquinas, os testes foram realizados aplicando uma tensão máxima próxima a 10% do valor médio do f_c do concreto. Os critérios de entrada utilizados no ensaio estão apresentados na Tabela 3. Variou-se a frequência de carregamento a fim de se determinar o impacto desta propriedade na rigidez do concreto. Todos os corpos de prova foram ensaiados com idade de 129 dias.

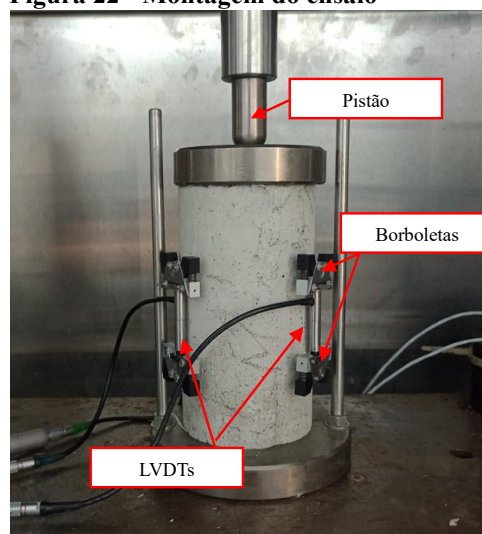
Tabela 3 - Parâmetros para determinação do módulo complexo

Frequência (Hz)	25	10	3	1	0,3	0,1	0,03
Nº de ciclos	20	20	10	10	5	5	5
Tensão máx (kPa)	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
Tensão mín (kPa)	280	280	280	280	280	280	280

Para a execução dos ensaios, previamente são colados os *targets*, 3 pares equidistantes no terço médio do CP, conforme mostrado na Figura 21. Em cada par de *target* são encaixadas as borboletas e em seguida acoplados os LVDTs. O pistão é o responsável pela aplicação das cargas. A montagem do ensaio está ilustrada na Figura 22.

Figura 21 - Colagem dos targets

Fonte: Autor

Figura 22 - Montagem do ensaio

Fonte: Autor

4.3. Sequência de ensaios

Para determinação da influência da amplitude e frequência de carregamento no módulo de elasticidade do concreto, foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Realização do ensaio de resistência à compressão utilizando 2 CPs;
- 2) Determinação dos valores de referência do módulo de elasticidade ressonante e módulo dinâmico por pulso ultrassônico em 10 CPs;
- 3) Ensaio de módulo de elasticidade estático na EMIC com 30% do f_c calculado, nos 10 CPs;
- 4) Determinação dos valores de referência do módulo de elasticidade ressonante e módulo dinâmico por pulso ultrassônico nos 10 CPs, após os 30% de carregamento no módulo de elasticidade estático;
- 5) Ensaio de módulo de elasticidade estático com 20% do f_c calculado, nos 10 CPs;
- 6) Determinação dos valores de referência do módulo de elasticidade ressonante e módulo dinâmico por pulso ultrassônico nos 10 CPs, após os 20% de carregamento no módulo de elasticidade estático;
- 7) Ensaio de módulo de elasticidade estático com 10% do f_c calculado, nos 10 CPs;
- 8) Determinação dos valores de referência do módulo de elasticidade ressonante e módulo dinâmico por pulso ultrassônico nos 10 CPs, após os 10% de carregamento no módulo de elasticidade estático;
- 9) Execução do ensaio de módulo complexo na UTM-25 nos 10 CPs;
- 10) Execução do ensaio de módulo complexo na UTM-30 nos 10 CPs;
- 11) Determinação dos valores de referência, para a variação de frequência e carregamento, do módulo de elasticidade ressonante e módulo dinâmico por pulso ultrassônico nos 10 CPs;
- 12) Ruptura dos 10 corpos de prova por compressão axial simples.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção aborda os resultados obtidos com os ensaios não destrutivos (para avaliar a degradação do módulo) descritos nos itens 3.2.3. e 3.2.4. e ensaios mecânicos (investigar influência da variação da frequência e amplitude de carregamento), assim como o comparativo com os valores normatizados.

5.1. Influência da amplitude de carregamento

São apresentados os valores dos módulos de elasticidade obtidos pela realização de ensaios de módulo de elasticidade estático, módulo ressonante e módulo dinâmico por pulso ultrassônico.

A Tabela 4 indica o resultado médio ($\pm$ desvio padrão) obtido através dos ensaios de módulo de elasticidade estático, considerando 10 CPs. Inicialmente foi aplicado um carregamento de 30% do f_c , em seguida e intercalado com os ensaios de módulo ressonante e de módulo dinâmico por pulso ultrassônico, foi realizado o mesmo ensaio com as amplitudes de carregamento de 20% do f_c e 10% do f_c , para concreto convencional com idade superior a 100 dias. Entre os carregamentos de 30% e 20% da amplitude, há uma diminuição de aproximadamente 3,0% no módulo de elasticidade estático. As amostras exibiram um módulo de elasticidade estático superior na amplitude de carregamento de 10%, em comparação aos demais carregamentos.

Tabela 4 - Valor médio do módulo de elasticidade estático nas diferentes amplitudes de carregamento para CC com idade superior a 100 dias

Amplitudes	30%	20%	10%
$E_{ci,i}$ (GPa)	$25,6 \pm 0,8$	$24,8 \pm 0,9$	$26,4 \pm 1,3$

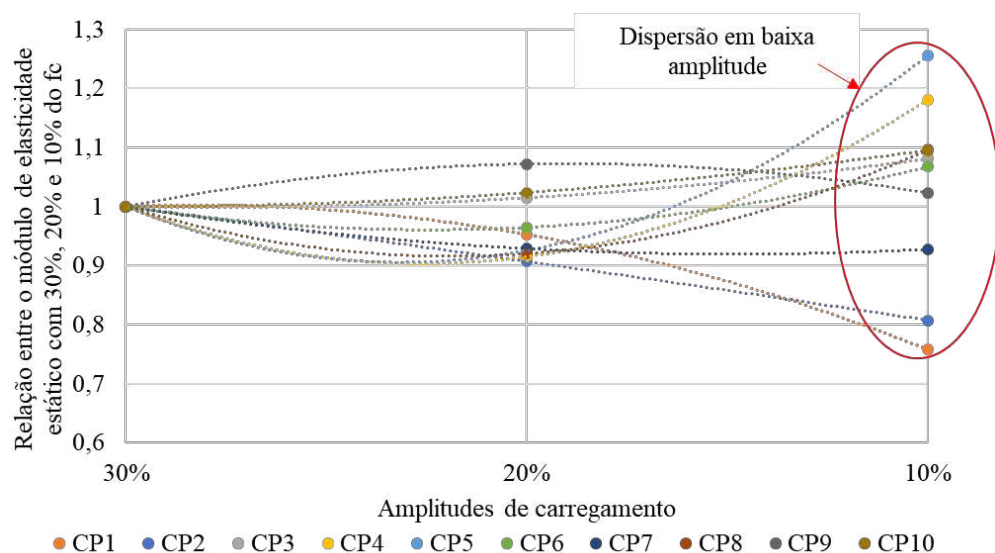
A tabela 5 apresenta os resultados individuais de cada CP. Os valores destacados em vermelhos são *outliers*, determinados através da regra do intervalo interquartil (IQR). O IQR é a indiferença entre o terceiro quartil (Q3) e o primeiro quartil (Q1). Os pontos de dados são considerados *outliers* se estiverem abaixo de $Q1 - 1.5 * IQR$ ou acima de $Q3 + 1.5 * IQR$. Os valores discrepantes foram desconsiderados da análise.

Tabela 5 - Resultados para módulo de elasticidade estático nas diferentes amplitudes de carregamento para CC (concreto convencional) com idade superior a 100 dias

Amostras	Módulo de elasticidade estático (GPa)		
	Amplitudes de carga		
	30% do fc	20% do fc	10% do fc
C1	26,61	25,35	20,17
C2	26,88	24,38	21,71
C3	25,10	25,47	27,13
C4	21,68	19,85	25,61
C5	21,86	20,24	27,46
C6	25,92	25,01	27,67
C7	25,78	23,95	23,92
C8	25,24	23,23	27,67
C9	24,41	26,17	24,98
C10	24,53	25,11	26,88

A Figura 23 indica que houve maior dispersão nos valores em amplitudes baixas de carga, o que pode ser atribuído à operação próxima do limite de precisão da máquina de ensaio. A prensa EMIC utilizada possui capacidade de aplicação de carga mínima de 15 kN, os ensaios foram realizados com uma carga próxima a este valor, potencialmente contribuindo para a variabilidade observada nos resultados.

Figura 23 - Relação entre as medições do módulo de elasticidade estático com a variação das amplitudes de carregamento



Fonte: Autor

A Tabela 6 apresenta os resultados de módulo dinâmico por pulso ultrassônico das amostras. As colunas indicam as leituras realizadas de referência (Ref) e após os ensaios de módulo de elasticidade estático (com 30%, 20% e 10% do fc do concreto). O coeficiente de

Poisson foi calculado conforme discutido no item 3.2.3. dispensando a necessidade de estimar um valor, a média calculada foi de 0,33, superior ao valor comumente adotado de 0,2. O valor mais alto do coeficiente de Poisson indica que o concreto é mais deformável lateralmente ou menos rígido nesta direção transversal quando carregado na direção longitudinal. De modo geral, percebe-se a variação no módulo à medida que o carregamento diminui.

Tabela 6 - Resultados para o módulo de elasticidade dinâmico. Valores de referência e após carregamento com 30%, 20% e 10% do f_c

Amostras	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			
	Amplitudes de carga			
	Ref.	30%	20%	10%
C1	28,93	27,71	26,94	27,29
C2	26,55	25,40	25,74	25,40
C3	28,33	27,20	27,17	27,17
C4	23,83	22,55	22,82	22,69
C5	26,02	24,63	25,07	24,33
C6	28,75	27,89	27,34	28,38
C7	27,35	26,18	26,02	26,28
C8	26,20	25,68	25,46	25,72
C9	27,87	26,90	26,62	27,12
C10	26,25	25,35	25,01	25,32

De modo geral, o módulo dinâmico reduz em relação ao valor de referência para todas as amplitudes de carga aplicadas. A variação nos resultados indica possíveis evidências de danos localizados ou alterações na microestrutura do concreto.

Os resultados do ensaio de ressonância por impacto estão dispostos na Tabela 7. Os valores foram separados por ordem de leitura, indicando os dados de referência e após ensaios de módulo de elasticidade estático com variação do carregamento. Assim como observado nos demais ensaios, existe uma relação direta entre o carregamento e a redução do módulo de elasticidade.

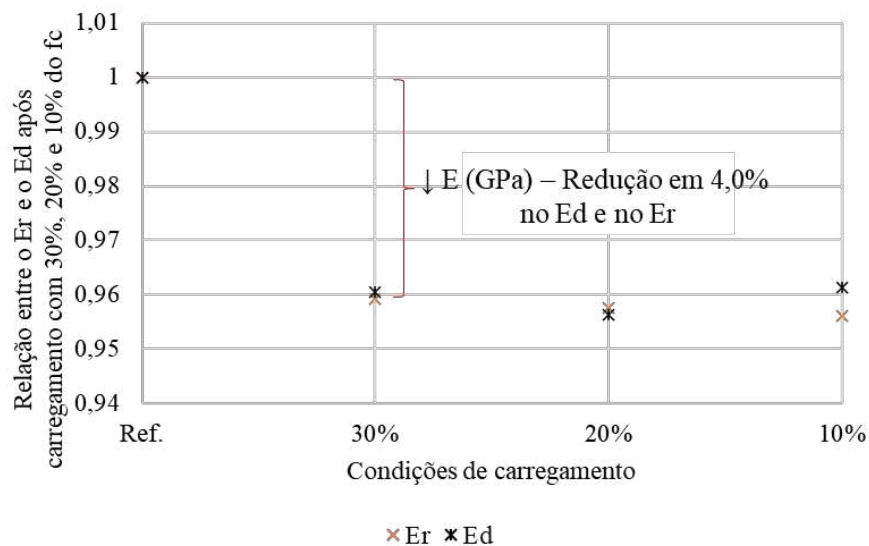
Tabela 7 - Resultados para o módulo de elasticidade ressonante. Valores de referência e após carregamento com 30%, 20% e 10% do f_c

Amostras	Módulo de Elasticidade Ressonante (GPa)			
	Amplitudes de carga			
	Ref.	30%	20%	10%
C1	30,63	29,59	29,45	29,77
C2	28,08	27,13	26,84	27,18
C3	30,76	29,75	29,52	29,91
C4	24,60	23,32	23,05	23,34
C5	26,81	25,23	25,10	24,69
C6	31,22	29,85	30,12	29,78
C7	29,42	28,08	28,28	28,05
C8	—*	28,01	27,89	27,89
C9	29,99	28,16	28,31	27,81
C10	28,63	27,33	27,50	27,16

*Valor perdido devido erro no salvamento dos dados, desconsiderado da análise

A Figura 24 ilustra o efeito da amplitude de carregamento ao aplicar uma carga estática de 30% da resistência última à compressão, indicando uma redução de 4,0 % tanto para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) quanto para o módulo ressonante (E_r), esta redução pode ser atribuída a danificação na microestrutura do concreto após o carregamento. Para as amplitudes menores (20% do f_c e 10% do f_c) não foram observados efeitos adicionais e os módulos se mantiveram praticamente constantes.

Figura 24 - Diferença entre a medição de referência do E_d e do E_r após carregamento com as amplitudes de 30%, 20% e 10% do f_c no módulo de elasticidade estático

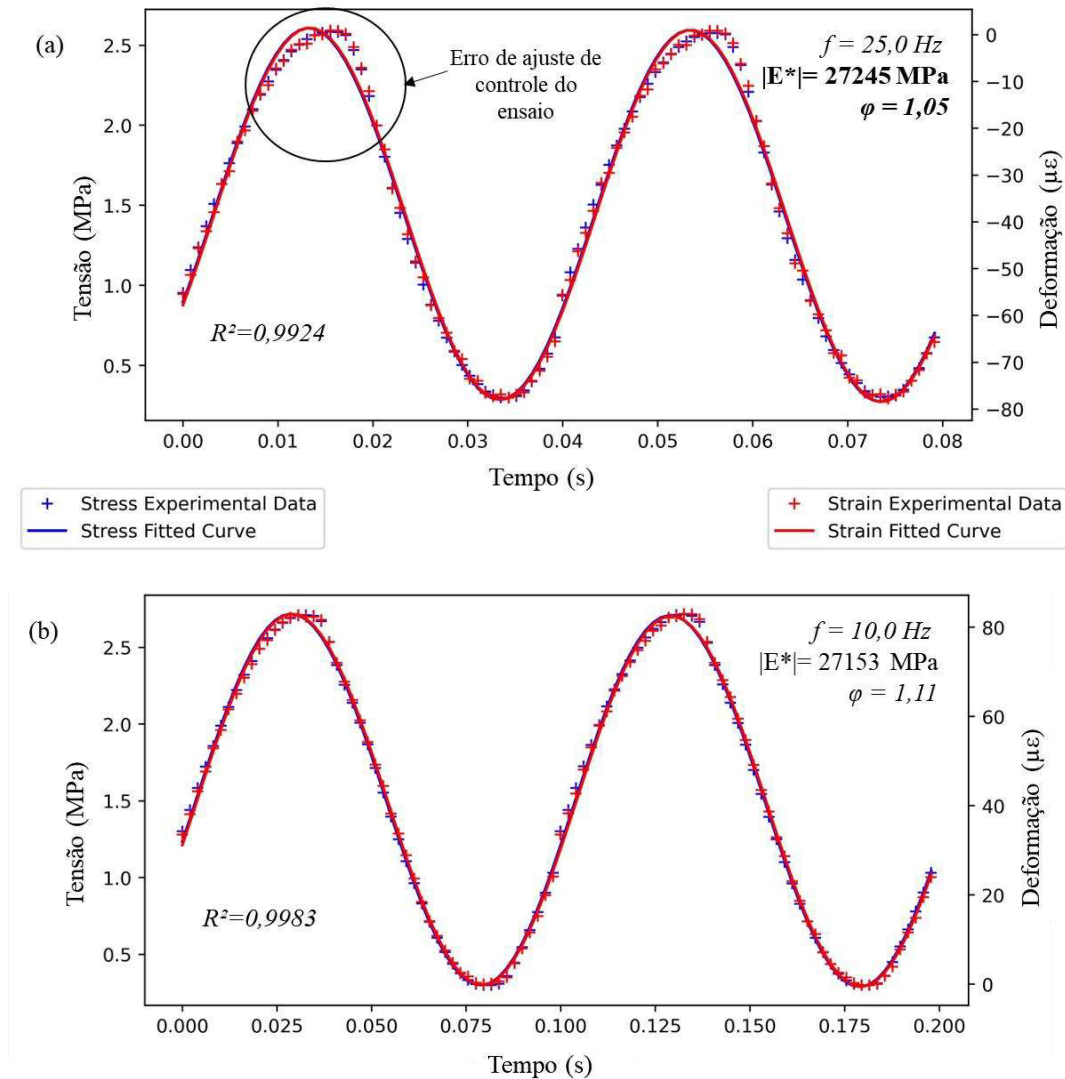


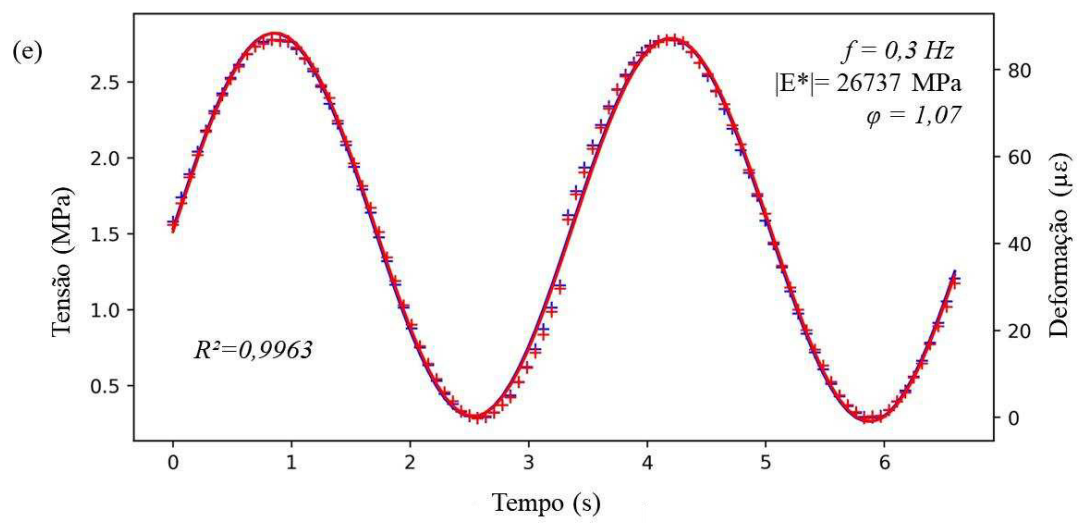
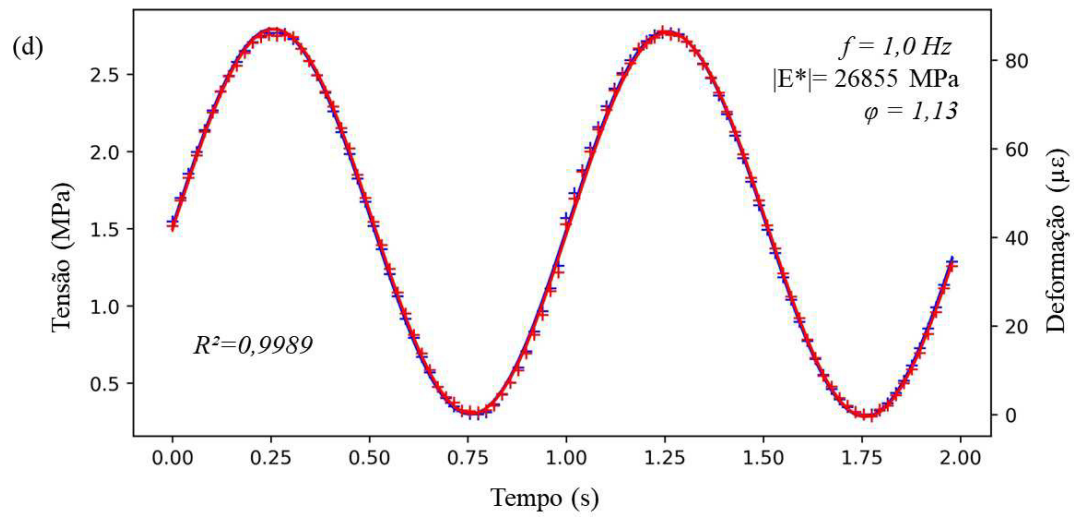
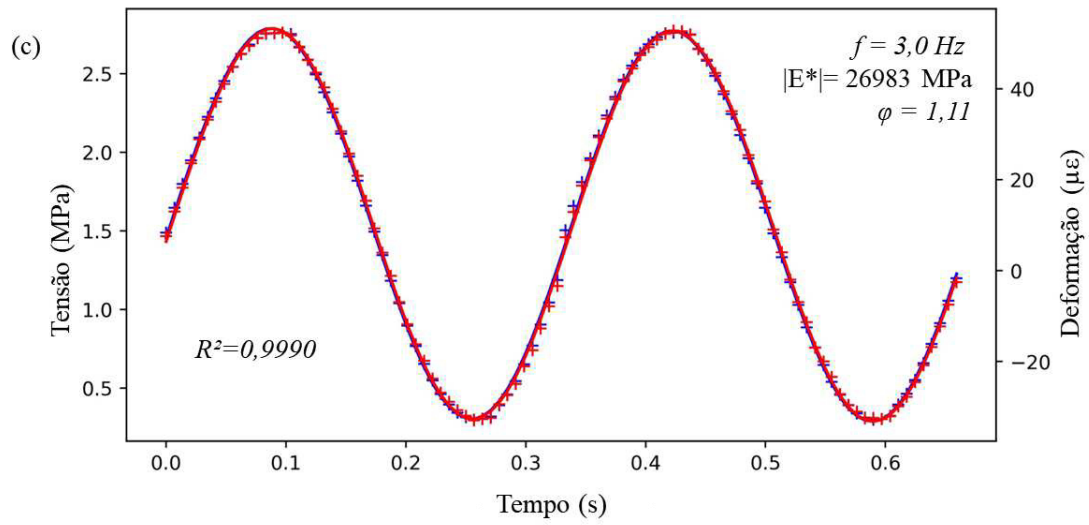
Fonte: Autor

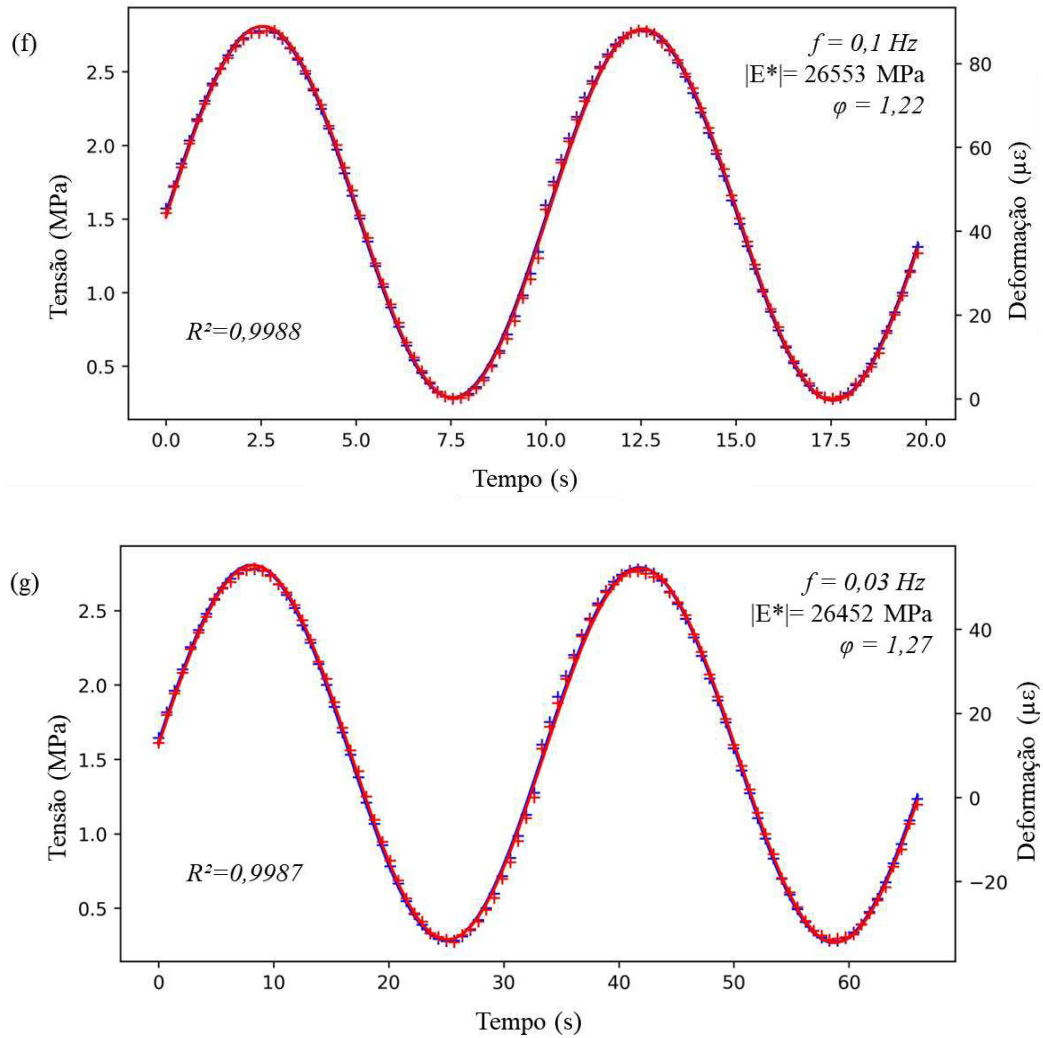
5.2. Influência da frequência de carregamento

A Figura 25 apresenta as curvas de tensão e deformação referente ao módulo complexo do concreto, a amplitude ensaiada equivale à aproximadamente 10% do f_c , a Tabela 8 aponta os valores individuais para cada CP na UTM-25, enquanto a Tabela 9 indica os resultados obtidos através da UTM-30. A redução no valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$, em média $2,40\% \pm 2,9\%$ (UTM-25) e $2,32\% \pm 1,3\%$ (UTM-30), entre a frequência de 25 Hz e 0,03 Hz, sugere que o concreto se torna menos rígido à medida que a frequência de carregamento diminui, consistente com o comportamento de materiais viscoelásticos.

Figura 25 - Curva de tensão e de deformação do concreto referente ao valor absoluto do módulo complexo via compressão, nas diferentes frequências de ensaio a) Frequência de 25,0 Hz b) Frequência de 10,0 Hz c) Frequência de 3,0 Hz d) Frequência de 1,0 Hz e) Frequência de 0,3 Hz f) Frequência de 0,1 Hz g) Frequência de 0,01 Hz







Fonte: Autor

Para frequências acima de 10Hz observa-se um platô no valor absoluto do módulo complexo, não havendo, portanto, um aumento na rigidez significativo para frequências superiores a esta, o mesmo efeito foi observado por Targino *et al.* (2023).

Tabela 8 - Resultados para o valor absoluto do módulo complexo nas diferentes frequências de ensaio para os 10 CPs na UTM - 25

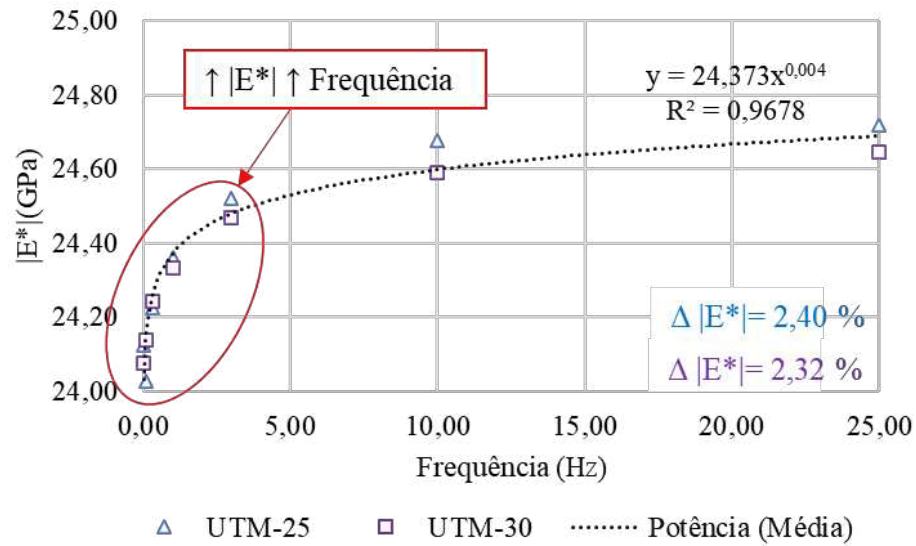
Amostras	Valor Absoluto do Módulo Complexo (GPa)						
	Frequência (Hz)						
	25	10	3	1	0.3	0.1	0.03
C1	26,82	26,79	26,62	26,41	26,20	25,93	25,76
C2	26,66	26,72	26,52	26,33	26,22	26,08	26,20
C3	27,24	27,15	26,98	26,85	26,74	26,55	26,45
C4	20,67	20,62	20,47	20,38	20,30	20,15	20,03
C5	21,41	21,43	21,28	21,14	20,96	20,81	20,57
C6	26,60	26,53	26,44	26,32	26,33	26,08	27,77
C7	24,23	24,18	24,02	23,91	23,75	23,66	23,75
C8	25,86	25,85	25,79	25,70	25,71	25,63	25,72
C9	23,89	23,76	23,52	23,20	22,90	22,41	22,08
C10	23,81	23,75	23,55	23,38	23,15	22,99	22,93

Tabela 9 - Resultados para o valor absoluto do módulo complexo nas diferentes frequências de ensaio para os 10 CPs na UTM - 30

Amostras	Valor Absoluto do Módulo Complexo (GPa)						
	Frequência (Hz)						
	25	10	3	1	0.3	0.1	0.03
C1	27,71	27,64	27,52	27,39	27,29	27,16	27,13
C2	23,25	23,47	23,32	23,13	22,95	22,79	22,69
C3	26,29	26,13	25,92	25,76	25,76	26,11	26,66
C4	20,77	20,63	20,52	20,43	20,27	20,16	20,00
C5	20,54	20,49	20,40	20,30	20,18	20,12	20,08
C6	26,00	25,92	25,83	25,76	25,72	25,56	25,36
C7	26,15	26,07	25,95	25,84	25,67	25,53	25,38
C8	25,24	25,17	25,05	24,86	24,79	24,61	24,39
C9	27,07	26,95	26,89	26,70	26,63	26,40	26,24
C10	23,45	23,43	23,29	23,16	23,15	22,94	22,81

A Figura 26 ilustra a variação média entre os resultados obtidos nas duas prensas servo-hidráulicas. Observa-se que os valores calculados são semelhantes, com uma variação média de 0,25%. Os ensaios foram realizados considerando uma tensão máxima $S_{max} = 10\%$ do f_c , para as mesmas frequências e números de ciclo.

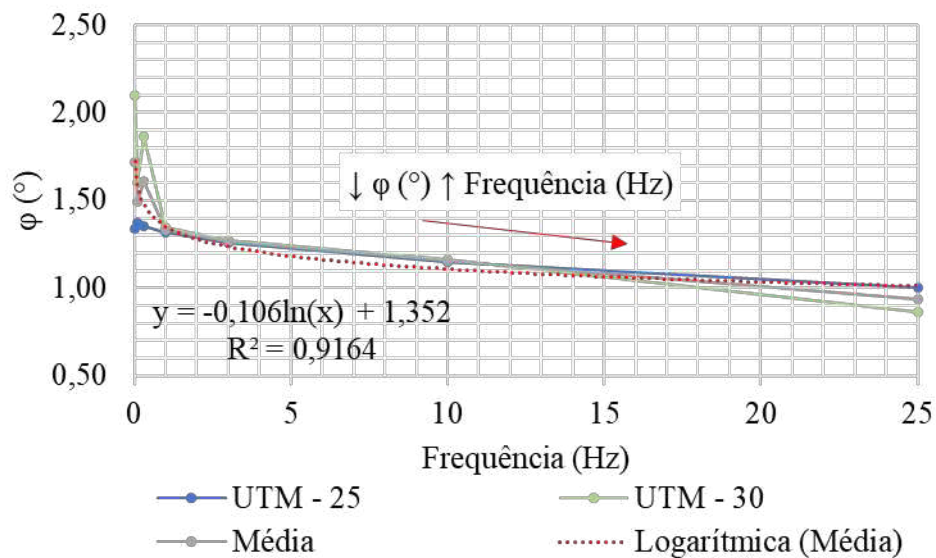
Figura 26 - Variação média do $|E^*|$ nas diferentes frequências para as prensas UTM-25 e UTM-30



Fonte: Autor

Como discutido anteriormente, o ângulo de fase (φ) é uma medida do deslocamento temporal entre as curvas de tensão e deformação nos materiais com comportamento viscoelástico. Em geral, o aumento do ângulo de fase com a diminuição da frequência (Figura 27) corresponde ao comportamento viscoso, isso é esperado pois em baixas frequências os efeitos viscoelásticos têm mais tempo para se manifestar.

Figura 27 - Efeito da frequência no ângulo de fase do concreto

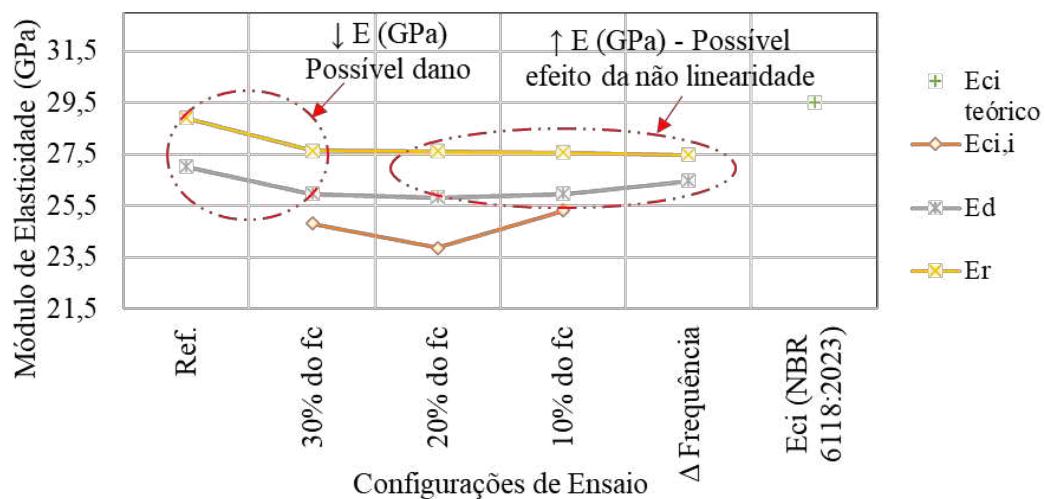


Fonte: Autor

5.3. Técnicas de ensaio

Nesta seção realizou-se uma comparação entre três técnicas experimentais (ensaio de módulo de elasticidade estático, ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por pulso ultrassônico e ensaio de ressonância por impacto) na obtenção do módulo de elasticidade. Foram incluídos os dados das diferentes amplitudes de carregamento no módulo de elasticidade estático (30%, 20% e 10% do f_c). Para o módulo dinâmico por pulso ultrassônico preserva-se a técnica utilizada anteriormente, considerando a metodologia TIBLA, para determinação do tempo de voo (ToF) da onda S e cálculo do coeficiente de Poisson. O E_{ci} foi calculado conforme Equação 3, para um f_{ck} de 30 MPa. Para o E_r e o E_d foram apresentados os valores de referência (Ref.), os dados referentes às variações da amplitude de carregamento e os valores após os ensaios nas UTMs (Δ Frequência). A Figura 28 resume os resultados encontrados nas diferentes condições de carregamento e para cada mecanismo analisado.

Figura 28 - Equalização dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Autor

O módulo de elasticidade ressonante é maior que o módulo de elasticidade dinâmico, a diferença entre as curvas corresponde em média a 6,02% das amplitudes. Isso pode ser explicado pela necessidade de se determinar o coeficiente de Poisson no ensaio de pulso ultrassônico, enquanto o ensaio de ressonância por impacto é menos dependente das propriedades do material. Os ensaios não destrutivos (ensaio de módulo ressonante e ensaio de ultrassom) apresentaram o valor do módulo de elasticidade maior em todas as amplitudes de carregamento do que o ensaio de módulo de elasticidade estático, concordando com a literatura

(NEVILLE, 2016; MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. J. M. 2014; POPOVICS, 2008). O mesmo é observado para o valor absoluto do módulo complexo em todas as frequências ensaiadas.

Após o ensaio de módulo de elasticidade estático com carga de 30% do f_c , observou-se uma redução de 4,0% nos módulos ressonante e dinâmico, indicando um possível dano no material ensaiado.

A previsão do módulo pelo método proposto na NBR 6118 (ABNT, 20223) superou todas as demais medições. Efeito também observado por Oliveira, 2019.

5.4. Variação do coeficiente de Poisson

O valor médio do coeficiente de Poisson calculado (ν_c) a partir da Equação 13 foi de $\nu_c = 0,328$. A Tabela 10 aponta os valores obtidos para cada medição.

Tabela 10 - Coeficiente de Poisson calculado a partir das ondas S

Amostra	Medição				
	Ref	30%	20%	10%	Δ freq
C1	0,32	0,33	0,34	0,34	0,32
C2	0,33	0,33	0,34	0,34	0,33
C3	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
C4	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
C5	0,33	0,34	0,34	0,34	0,33
C6	0,32	0,33	0,33	0,33	0,32
C7	0,32	0,32	0,32	0,30	0,32
C8	0,31	0,33	0,33	0,32	0,31
C9	0,32	0,33	0,34	0,32	0,32
C10	0,32	0,33	0,33	0,32	0,32

Fonte: Autor

Entre o valor de referência (pré-ensaios de módulo de elasticidade estático) e a última medição (após ensaios nas UTMs), observou-se um aumento de 1,55 % no valor do coeficiente de Poisson. A diferença entre o valor medido e o adotado na literatura, de $\nu_n = 0,2$ é considerável. A Tabela 11 apresenta os valores do módulo de elasticidade dinâmico calculado através da Equação 7 adotando-se $\nu_n = 0,2$, conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023). Praticamente não houve variação no módulo de elasticidade dinâmico calculado com $\nu_n = 0,2$, em relação as amplitudes de carregamento, mas deve-se notar o importante efeito no valor estimado de módulo de elasticidade. Quando comparado ao módulo dinâmico utilizando os coeficientes calculados (E_{dc}) o valor do módulo dinâmico normativo (E_{dn}), supera todas as medições. Nesse caso, o resultado indicaria uma rigidez superestimada, com uma variação

média de 25%.

Tabela 11 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico utilizando $\nu=0,2$

Módulo de elasticidade dinâmico ($\nu_n = 0,2$) (GPa)					
Amostra	Medição				
	Ref	30%	20%	10%	Δ freq
C1	37,77	36,78	37,19	38,21	37,36
C2	35,62	33,78	35,71	35,24	35,71
C3	37,40	36,21	36,79	36,81	36,64
C4	31,66	30,37	31,01	30,57	34,56
C5	34,98	33,83	34,50	34,35	32,21
C6	36,80	36,87	36,23	38,50	36,71
C7	34,89	33,49	33,95	32,05	34,37
C8	32,94	34,76	34,17	33,41	34,32
C9	36,44	35,88	36,54	35,09	36,68
C10	33,39	33,47	33,34	32,31	33,18

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com o intuito de determinar se há variação significativa entre as medições. Para o conjunto de dados analisados, o p-valor da ANOVA é 0,937, que é maior que o nível de significância adotado de 0,05. Isso indica que estatisticamente não há diferença significativa entre os valores do módulo de elasticidade dinâmico utilizando $\nu_n = 0,2$ nas categorias de medição (Ref., 30% do f_c , 20% do f_c , 10% do f_c e Δ frequência).

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Os estudos a respeito do módulo de elasticidade do concreto são úteis para prever o comportamento da estrutura em situações de serviço e entender como diferentes condições de carregamento podem influenciar o comportamento estrutural do material. Este trabalho buscou avaliar a influência da amplitude e da frequência de carregamento no concreto, utilizando diferentes técnicas experimentais. Os ensaios não destrutivos (ressonância por impacto e módulo dinâmico por pulso ultrassônico) serviram para identificar se houve ou não dano no material em virtude dos carregamentos aplicados. A partir dos resultados encontrados, pôde-se depreender as seguintes conclusões:

- O módulo de elasticidade complexo aumentou com o aumento da frequência de carregamento, apresentando uma variação de 2,40% na UTM-25 e 2,32% na UTM-30, para uma amplitude de carregamento de 10% do f_c ;
- Não houve variações significativas entre os ensaios de módulo complexo realizados na UTM – 25 e na UTM – 30;
- Através do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por pulso ultrassônico, observou-se uma diferença significativa entre o coeficiente de Poisson usualmente adotado na literatura ($\nu=0,2$) e aqueles calculados através da relação das ondas de compressão e ondas de cisalhamento. A variação das magnitudes dos módulos foi em média 25%;
- Investigou-se o dano decorrente das amplitudes de carregamento em ensaios estáticos de módulo de elasticidade, utilizando como medida em pequenas deformações os dados do módulo de elasticidade ressonante e módulo dinâmico. Observou-se que, para as cargas mais elevadas (30% do f_c), houve uma maior degradação do módulo de elasticidade, chegando a cerca de 5%. No entanto, para as amplitudes menores (20% e 10% do f_c), o valor do módulo de elasticidade manteve-se praticamente constante;
- A variação no módulo de elasticidade estático foi maior com a aplicação da carga correspondente a 30% do f_c . Com a redução do carregamento para 20% do f_c e 10% do f_c , observou-se um acréscimo no valor do $E_{ci,j}$. Conforme discutido, para menores amplitudes o módulo de elasticidade estático tende a ser maior.

- O módulo de elasticidade teórico, calculado a partir da metodologia da NBR 6118 (ABNT, 2023), tanto na determinação do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) quanto na utilização do coeficiente de Poisson sugerido para carregamentos de magnitude $0,5f_c$, apresentou valores superiores a todas as técnicas de ensaios analisadas.

Como sugestões de pesquisas futuras, destacam-se:

- Realizar a variação da frequência de carregamento em amplitudes superiores a 30% do f_c , adaptando a geometria dos corpos de prova;
- Investigar o efeito associado de diferentes propriedades do concreto (composição, geometria de corpo de prova) e condições de ensaio no valor do módulo de elasticidade do concreto;
- Estudar o efeito do envelhecimento e de condições ambientais prolongadas (assim como temperatura e umidade) no módulo de elasticidade do concreto, através de diferentes técnicas experimentais;
- Aplicar as técnicas não destrutivas (ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por pulso ultrassônico e ensaio de ressonância por impacto) de medição e análise do módulo de elasticidade em estruturas de concreto em serviço, com o intuito de avaliar a aplicabilidade e precisão dos métodos em campo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT. **NBR 8802**: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. **NBR 16889**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influence of the type of measuring device in determining the static modulus of elasticity of concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 5, p. 555 – 575, 2012.

ARAGON, G.; A. ARAGON; A. SANTAMARIA; A. ESTEBAN E F. FIOL. (2019) **Physical and mechanical characterization of a commercial rendering mortar using destructive and non-destructive techniques**. Construction and Building Materials, v. 224, p. 835-849. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.034]

BAHR, O. et al. **Youngs modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations**. Materials and Design, v. 45, p. 421– 429, 2013. [https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.070]

BARBOSA, A. H. **Contribuição ao estudo sobre a obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2010.

BAUER, E.; BEZERRA, L. M.; UCHÔA, J. C. B.; CHAGAS, S. V. M. **Estudo do comportamento à fadiga das argamassas e sua relação com as patologias e danos nas fachadas**. Patologia dos materiais e elementos construtivos. (4º Congresso de patologia y rehabilitación de edificios). PATORREB 2012.

BEZERRA, A.; MELO, A.; FREITAS, I.; BABADOPULOS, L.; CARRET, J.; SOARES, J. **Determination of modulus of elasticity and poisons ratio of cementitious materials using s-wave measurements to get consistent results between static, ultrasonic and resonant testing**. Construction and Building Materials, v. 398, p. 132456 – 132456, 1 set. 2023. [<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132456>]

BEZERRA, A.; MONTEIRO, N.; AMARAL, C.; COELHO, A.; SILVEIRA, J.; BABADOPULOS, L.; SOARES, J. **Desenvolvimento de ensaio de ressonância por impacto para determinação de rigidez de diferentes materiais**. Transportes, v. 30, n. 3, p. 2757–2757, 31 dez. 2022. [<https://doi.org/10.14295/transportes.v30i3.2757>]

BRINSON, H.; BRINSON, L. **Polymer engineering science and viscoelasticity**. Springer US, 2008. [<https://doi.org/10.1007/978-0-387-73861-1>]

BROOKS, J.J., “**Elasticity of concrete**”, In: BROOKS, J.J., Concrete and Masonry Movements, chapter 4, Elsevier Inc., 2015.

CABRAL, L.; MONTEIRO, E.; HELENE, P. **Análise comparativa do módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas**. Revista ALCONPAT, v. 4, n. 2, p. 140–156, 30 maio 2014. [<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.65>]

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**. 7ª. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2007.

CAMARGO, M. V.; FERRARI, V. J. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 3, 2021. [<https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13047>]

CARRASCO, E. V. M.; MAGALHAES, M. D. C.; SANTOS, W. J. D.; ALVES, R. C.; MANTILLA, J. N. R. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, Belo Horizonte, v.131, p. 31-38, nov. 2016.

CARTZ, L. **Nondestructive Testing**. A S M International, 1995. ISBN 978-0-87170-517-4.

CERVO, T. C.; BALBO, J. T. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento portland para pavimentação**. 2004. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.

CHEN, X.; CHEN, N.; WEI, Z.; ZHANG, X.; YANG, F.; ZHAO, H.; YOU, M.; WANG, W. **Research on the influence of loading frequency on the dynamic response of concrete sleepers**. 2022. Appl Sci 12(14):7245. [<https://doi.org/10.3390/app12147245>]

CHEN, D. et al. **Degradation of dynamic elastic modulus of concrete under periodic temperature-humidity action**. Materials, 2020. 611. [<https://doi.org/10.3390/ma13030611>]

CHEN, X.; BU, J.; FAN, X.; LU, J.; XU, L. **Effect of loading frequency and stress level on low cycle fatigue behavior of plain concrete in direct tension**. Construction and Building Materials, v. 133, p. 367-375, 2017. [<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.085>].

CHU, H.; GAO, L.; QIN, J.; JIANG, J.; WANG, F. **Feasibility of producing ultra-high Performance concrete with high elastic modulus by steel chips: an experimental study**. Construction and Building Materials 375:130964. 2023. [<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130964>]

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. São Paulo, 1995. 286p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

EKIN, N.; UYANIK, O. Anisotropy of reinforced concrete from geophysical methods. **Science of sintering**, v. 53, n. 3, p. 323 – 345, 2021.

ELSHARIEF, A.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p.1837-1849, 2003. [[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9)].

EVANGELISTA JUNIOR, F.; MACEDO, F. C.; FARIAS, M. M. A methodology to assess the evolution of viscoelastic properties of hardened cement pastes through dynamic mechanical analysis. **Construction and building materials**, v. 226, p. 849 – 858, 2019.

FÉLIX, E.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Análise Experimental da Vida Útil à Fadiga de Concretos Submetidos à Compressão Cíclica de Baixa Frequência. **Revista Matéria**, 2022. [<https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-45017>]

FÉLIX, E.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Vida útil à fadiga do concreto: estudo experimental da influência das condições de carregamento e da resistência do material, **Revista ALCONPAT**, 2022, 12 (1), pp.-x. [DOI:<https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.562>]

FERREIRA, R. P. **Desenvolvimento de um software para o cálculo da vida em fadiga de um riser submetido a VIV**. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. – São Paulo, 85 p, 2011.

FU, C.; GUO, R.; LIN, Z.; XIA, H.; YANG, Y.; MA, Q. (2021) **Effect of nanosilica and silica fume on the mechanical properties and microstructure of lightweight engineered cementitious composites**. *Constr Build Mater* 298:123788. [https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123788]

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. **Construction and building materials**, v. 35, p. 361 – 367, 2012. [https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.047]

HELENE, P.R.L., **Relatório à ABCP: Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido**, Departamento de Engenharia de Construção Civil: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1998.

JAIN, K. L.; SANCHETI, G.; GUPTA, L. K. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. **Construction and building materials**, v. 252, n. 119075, p. 119075, 2020. [https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119075]

KACHKOUCHI, F. Z.; NOBERTO, C. C.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; MELO, A. R. S.; MACHADO, A. M. L.; SEBAIBI, N.; BOUKHELF, F.; EL MENDILI, Y. Fatigue behavior of concrete: a literature review on the main relevant parameters. **Construction and Building Materials**, 338, 127510, 2022. [https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127510]

LEMAITRE, J. A Course on Damage Mechanics. 2. ed. Springer, New York 1996.

LIANG, C.; YOU, J.; GU, F.; GAO, Y.; YANG, G.; HE, Z.; HOU, S.; DUAN, Z. **Enhancing the elastic modulus of concrete prepared with recycled coarse aggregates of different**

quality by chemical modifications. Const Build Mater 360:129590. 2022.
[<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129590>]

LIMA, G. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento.** [s.l: s.n.]. Disponível em:
[<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18291/000728116.pdf?sequence=1>].

LEAL, C. E. F. et al. **Comparação entre módulos de deformação de concretos nacionais produzidos com agregados graúdos de diferentes origens mineralógicas.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, 2020. [<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1207>].

MAKOOND, N.; L. Pela e C. Molins. (2019) **Dynamic elastic properties of brick masonry constituents.** Construction and Building Materials, v. 199, p. 756-770.
[DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.071.]

MARKERT, M.; KATZMANN, J.; BIRTEL, V.; GARRECHT, H.; STEEB, H. **Investigation of the influence of moisture content on fatigue behaviour of HPC by using DMA and XRCT.** Materials 2022, 15, 91.

MEDEIROS, A., **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MEDEIROS, A.; ZHANG, X.; RUIZ, G.; YU, R. C.; VELASCO, M. S. L. **Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete.** International Journal of Fatigue, [s.l.], v. 70, p.342-350, jan. 2015. Elsevier BV.
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.005>.]

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials.** 4^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional Publishing, 2013. 674 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. Sao Paulo: IBRACON, 2014. ISBN/ISSN 978-85-98576-21-3.

MELO, A. **Avaliação da influência da umidade e investigação do autoaquecimento na fadiga de concreto**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2022.

MELO, A. A.; HELENE, P. R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. São Paulo: IBRACON, 2002.

MURDOCK JW. **A critical review of research on fatigue of plain concrete**. University of Illinois Bulletin; v 62, No 62 1965. [<https://hdl.handle.net/2142/4538>]

MYRTJA, E.; SOUDIER, J.; PRAT, E., CHAUCHE, M. **fatigue deterioration mechanisms of high-strength grout in compression**. Construction and Building Materials, 270, 121387, 2021.

NEVILLE, A.M., **Propriedades do Concreto**, 5. ed., Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, M. A., **Tecnologia do Concreto**, São Paulo, 2ª edição, PINI, 2013.

NOBERTO, Camila C. **Avaliação do módulo de elasticidade de argamassas de revestimento utilizando diferentes métodos de ensaio com vistas a uma caracterização quanto à fadiga**. Dissertação (mestrado em engenharia civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

NUNES, G. **Avaliação da resistência e do módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil (REEC). Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. [DOI: 10.5216/reec.V17i1.70447]

OLIVEIRA, J. L. S. **Estudo comparativo entre o módulo de elasticidade real e o teórico de concretos de Fortaleza**. Projeto de graduação. Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

ONESCHKOW, N.; HÜMME, J.; LOHAUS, L. **Compressive fatigue behaviour of high-strength concrete in a dry and wet environment**. Construction and Building Materials, v. 262, p. 119700, nov. 2020. [<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119700>]

PEREIRA, A. H. A.; OTANI, L. B. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso**. ATPC Engenharia Física. [S.l.], p. 38. 2017.

POPOVICS, J. S. **A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete**. University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Report. 2008

SAINI, B. S.; SINGH, S. P. Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements. **Construction and Building Materials**, 264, 120233, 2020

SANTOS, A.; ARRUDA, A.; SILVA, T.; VITOR, P. **estudo comparativo entre valores teóricos e resultados experimentais de módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado graúdo**. Ambiente Construído, v. 17, p. 281–294, 2017. [<https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000300176>]

SCHÖN, C. G. **Mecânica dos Materiais: Apostila redigida para uso nos cursos “PMT2405- Mecânica dos Materiais” e “PMT5860- Teoria da plasticidade e da fratura dos materiais”** / – 4 ed. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo (2009). 391 p.

SHAMES, I. H. **Introduction to solid mechanics**. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1989.

SHKOLNIK, I.E. **Effect of Nonlinear Response of Concrete on Its Elastic Modulus and Strength**. Cement and Concrete Composites, Volume 27, pp. 747-757, 2005.

SHKOLNIK, I. E. **Evaluation of dynamic strength of concrete from results of static tests**. Journal of Engineering Mechanics, Volume 122(12), pp. 135-138, 1996.

SPÍNOLA, J. R. et al. **Estudo viscoelástico de misturas asfálticas frescas e envelhecidas com agregado sinterizado de argila calcinada**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, 2020. [<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1209>]

TARGINO, D.; HOLANDA, A.; HENRIQUEZ, P.; FREITAS, I.; BOUKHELF, F.; MEDILI, Y.; BABADOPULOS, L. **Complex Modulus characterization of an optimized binder with SCMs: proposition of an enhanced cement formulation to improve stiffness behavior**

and durability of mortars and concretes, 27 April 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2843013/v1>]

VASCONCELLOS, A.T. **Estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos**. Dissertação de M.Sc, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2018.

VINNE, J. **Estrutura interna do concreto**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/67966188-Estrutura-interna-do-concreto.html>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

ZANUY, C.; DE LA FUENTE, P.; ALBAJAR, L. **Effect of fatigue degradation of the compression zone of concrete in reinforced concrete sections**. Engineering Structures, v. 29, n. 11, p. 2908–2920, nov. 2007. [<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.030>.]

WANG, B.; GUPTA, R. Analyzing bond-deterioration during freeze-thaw exposure in cement-based repairs using non-destructive methods. **Cement and Concrete Composites**, Victoria, v. 115, p. 28-43, sep. 2021.

YOUNG, W.C.; BUDYNAS, R.G.; SADEGH, A.M. **Roark's formulas for stress and strain**. McGraw-Hill, Education. (2012).