

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Raquel Beatriz Gomes

**Análise Comparativa do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do
Concreto Estrutural**

Santa Cruz do Sul

2025

Raquel Beatriz Gomes

**Análise Comparativa do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do
Concreto Estrutural**

Trabalho de conclusão II apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade de
Santa Cruz do Sul - UNISC, como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheira
Civil.

Aprovada em: 09/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Christian Donin (Orientador)
Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

Prof. Henrique Rupp
Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

Prof. Dr. Eduardo Rizzatti
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Osmar e Cleci, e à minha irmã, Juliana, pelos ensinamentos, apoio e incentivo durante todos os anos dedicados aos estudos.

Ao meu sobrinho e afiliado, Arthur, que, mesmo com apenas 9 anos, sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio com um sorriso, um abraço ou uma palavra de incentivo.

Ao meu namorado, Felipe, pelo amor, cuidado e compreensão, além de todo o apoio e empenho para me auxiliar sempre que necessário, demonstrando presença e parceria em cada etapa.

Sou grata também ao meu orientador, Prof. Dr. Christian Donin pelos valiosos ensinamentos, pela dedicação de seu tempo, pela disponibilidade em orientar e pelo incentivo constante ao longo deste trabalho. Agradeço ainda pela disponibilização do Laboratório de Materiais e Estruturas PRO, bem como dos materiais essenciais para a realização dos ensaios que fundamentaram esta pesquisa.

Quero agradecer também a todos os meus amigos e colegas de curso, pela parceria, apoio, troca de conhecimentos e ajuda em cada etapa da minha trajetória acadêmica.

Agradeço ainda a coordenadora do curso, professora Leticia Diesel, pela sua disponibilidade e empenho durante toda a minha trajetória acadêmica.

A Universidade de Santa Cruz do Sul, e ao corpo docente pela infraestrutura, recursos e apoio durante minha formação acadêmica.

RESUMO

O módulo de elasticidade do concreto é um parâmetro fundamental para a avaliação do comportamento mecânico do concreto e influencia diretamente no dimensionamento e segurança das estruturas de concreto armado, já que, está associado à sua capacidade de resistir a deformação quando submetido a esforços de compressão. Este trabalho tem como objetivo comparar os métodos de determinação do módulo de elasticidade estático e dinâmico a partir de ensaios de compressão uniaxial e ensaios não destrutivos utilizando o método de frequências naturais de vibração. Além disso, busca-se comparar os resultados experimentais obtidos com estimativas teóricas fornecidas por diferentes normas técnicas — ABNT NBR 6118:2023, ACI 318-19, Eurocode 2 e o modelo de Popovics — avaliando a coerência e aplicabilidade dessas equações na prática.

Para a realização dos ensaios serão moldados corpos de prova de concreto com diferentes resistências à compressão. No ensaio não destrutivo será utilizada a técnica de excitação por impulso, onde o corpo de prova cilíndrico é primeiramente apoiado em cima do suporte nas posições iguais a $0,224h$ da extremidade (h é a altura) e após é posicionado o captador acústico e o dispositivo de impacto em lados opostos no centro do corpo de prova em relação ao plano de vibração, com o corpo de prova apoiado e ajustado deve acontecer a excitação do corpo de prova com a aplicação de um impacto único e captura da resposta acústica correspondente, após os resultados obtidos são realizados os cálculos para determinar o módulo de elasticidade dinâmico e a partir dele estimar o módulo de elasticidade estático. Já para o ensaio de compressão axial o corpo de prova é posicionado verticalmente em prensa hidráulica, com o auxílio de Neoprene nas suas extremidades para o acomodar melhor, e após é submetido a um carregamento axial crescente, enquanto os extensômetros de deslocamento mediram as deformações longitudinais. Com os resultados obtidos e a partir da curva de tensão-deformação, foi determinado o módulo de elasticidade estático.

Os resultados demonstraram que o módulo de elasticidade dinâmico apresentou, de forma geral, valores superiores ao módulo de elasticidade estático, confirmando a tendência descrita na literatura. Observou-se também a evolução dos módulos entre 7 e 28 dias indicando um comportamento uniforme entre os diferentes traços. As estimativas teóricas das normas apresentaram variações em relação aos resultados experimentais, refletindo as diferenças entre os modelos de estimativas e

os comportamentos observados nos ensaios. Assim conclui-se que o método dinâmico por frequências naturais de vibração demonstrou boa precisão e se mostrou adequado como técnica complementar aos ensaios estáticos.

Palavras-chave: Módulo de Elasticidade Estático; Módulo de Elasticidade Dinâmico; Ensaio de Compressão Uniaxial; método de frequências naturais de vibração; Concreto.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Comportamento típico da curva tensão-deformação do concreto e seus principais componentes.....	15
Figura 2 — Representação do módulo de deformação secante, E_{cs}	21
Figura 3 — Representação do módulo de elasticidade, tangente inicial (E_{ci}).....	21
Figura 4 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A.....	23
Figura 5 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia B.....	24
Figura 6 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade secante	26
Figura 7 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade secante pelo diagrama tensão-deformação.....	27
Figura 8 — Exemplo de aplicação das condições de contorno mecânicas para a realização do ensaio.	30
Figura 9 — ilustração da aplicação do impacto e captura da resposta acústica.	31
Figura 10 — Tronco de cone posicionado.....	34
Figura 11 — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump test).	34
Figura 12 — Prensa eletro-hidráulica marca Pavitest	35
Figura 13 — Equipamento utilizado no ensaio do módulo de elasticidade estático ...	36
Figura 14 — Sistema Sonelastic HZ	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Expressões para estimativa do módulo de elasticidade estático	28
Tabela 2 — Condições de contorno mecânicas ótimas para o modo de vibração flexional fundamental	30
Tabela 3 — Fator de correção de T em função de h/d para o coeficiente de Poisson igual a 0,20.....	32
Tabela 4 — Resultados experimentais do concreto A aos 7 dias	40
Tabela 5 — Resultados experimentais do concreto B aos 7 dias.....	40
Tabela 6 — Resultados experimentais do concreto C aos 7 dias	41
Tabela 7 — Resultados experimentais do concreto A aos 28 dias	41
Tabela 8 — Resultados experimentais do concreto B aos 28 dias	42
Tabela 9 — Resultados experimentais do concreto C aos 28 dias	42
Tabela 10 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 7 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto A	44
Tabela 11 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 7 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto B	44
Tabela 12 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 7 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto C	45
Tabela 13 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 28 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto A	45
Tabela 14 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 28 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto B	46
Tabela 15 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 28 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto C	46
Tabela 16 — Módulo de elasticidade estimado através da Norma ACI 318-19 aos 7 dias - Concreto A.....	47
Tabela 17 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 7 dias – Concreto B	47
Tabela 18 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 7 dias – Concreto C	48
Tabela 19 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 28 dias – Concreto A.....	48
Tabela 20 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 28 dias – Concreto B.....	49

Tabela 21 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 28 dias – Concreto C.....	49
Tabela 22 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 7 dias - Concreto A	50
Tabela 23 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 7 dias - Concreto B	50
Tabela 24 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 7 dias - Concreto C	50
Tabela 25 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 28 dias - Concreto A	51
Tabela 26 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 28 dias - Concreto B	51
Tabela 27 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 28 dias - Concreto C	51
Tabela 28 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 7 dias – Concreto A	52
Tabela 29 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 7 dias – Concreto B	52
Tabela 30 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 7 dias – Concreto C	53
Tabela 31 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 28 dias – Concreto A	53
Tabela 32 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 28 dias – Concreto B	54
Tabela 33 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 28 dias – Concreto C	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 — Comparativo entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico experimental aos 28 dias	56
Gráfico 2 — Comparativo entre o módulo de elasticidade estático experimental e estimado pela NBR 6118:2023 aos 7 dias	57
Gráfico 3 — Comparativo entre o módulo de elasticidade estático experimental e estimado pela NBR 6118:2023 aos 28 dias	59
Gráfico 4 — Comparativo entre o módulo de elasticidade estático experimental e o estimado pelo método de Popovics aos 28 dias	60
Gráfico 5 — Comparativo dos módulos de elasticidade experimentais e normativos aos 28 dias.....	62
Gráfico 6 — Comparativo dos módulos experimentais e normativos da NBR 6118:2023 para diferentes valores de α aos 28 dias.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

NBR — Norma Brasileira Regulamentadora

CP — Corpo de Prova

MPa — Megapascal

GPa — Gigapascal

E_{cs} — Módulo de elasticidade secante

E_{ci} — Módulo de elasticidade tangente inicial

E_{cd} — Módulo de elasticidade dinâmico

E_{cm} — Módulo de elasticidade médio

f_c — Resistência à compressão

f_{ck} — Resistência característica à compressão

f_{cm} — Resistência média à compressão

Hz — Hertz

h — Altura

s — Segundos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivos gerais.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Concreto Estrutural.....	13
2.1.1. Ensaio de caracterização	13
2.1.2. Ensaio não-destrutivo	15
2.2 Resistência à compressão Simples.....	16
2.2.1 Procedimentos de ensaio	17
2.2.2 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....	18
2.3 Definição do Módulo de Elasticidade.....	18
2.3.1 Método estático	20
2.3.2 Método dinâmico	28
3. METODOLOGIA	33
3.1. Caracterização dos materiais.....	33
3.2. Moldagem e cura dos corpos de prova.....	33
3.3. Determinação da resistência a compressão simples	35
3.4. Determinação do módulo de elasticidade estático	36
3.5. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através de ondas ultrassônicas	37
3.6. Estimativas teóricas do módulo de elasticidade.....	37
3.6.1. Estimativa segundo a NBR 6118:2023	37
3.6.2. Estimativa do módulo estático a partir do módulo dinâmico (Modelo de Popovics)	38
4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	39

4.1. Resultados experimentais.....	39
4.2. Resultados teóricos.....	43
4.3. Análise comparativa dos resultados.....	55
5. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS.....	68
APÊNDICE A – Tabelas complementares dos resultados experimentais.....	70

1. INTRODUÇÃO

O concreto, com a sua evolução, é o material mais utilizado nas obras devido a sua aplicabilidade, resistência mecânica e durabilidade — características que proporcionam maior segurança e viabilizam projetos de diferentes escalas. Isso permite a sua aplicação em diversas obras, desde edificações e pavimentos até obras de grande porte, como pontes e barragens.

Com a ampla utilização do concreto em projetos de grande porte, torna-se necessário o estudo das suas propriedades mecânicas, especialmente do módulo de elasticidade, que representa a rigidez do material.

O módulo de elasticidade é uma propriedade fundamental utilizada no cálculo de estruturas, especialmente na verificação dos estados limites de serviço, como deformações excessivas e fissuração. Atualmente o módulo de elasticidade ainda é considerado complexo e fonte de controvérsias, pois não depende apenas da resistência a compressão do concreto, mas também de diversos outros fatores, como o tipo de agregado, relação água/cimento, idade do concreto, entre outros.

No Brasil, a determinação do módulo de elasticidade do concreto é realizada conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 8522 – 1&2: 2021, que define os métodos para obtenção do módulo de elasticidade estático e dinâmico.

A determinação precisa do módulo de elasticidade do concreto é fundamental para a engenharia estrutural, pois esse parâmetro representa a rigidez do material diante dos esforços solicitantes.

Este estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto estrutural, com ênfase no ensaio dinâmico, utilizando diferentes classes de concreto e avaliando os resultados obtidos por meio de ensaios de compressão uniaxial e ensaios não destrutivos através do método das frequências naturais de vibração.

1.1 Justificativa

Além da resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto passou a ser cada vez mais importante devido aos avanços na qualidade dos concretos e tecnologias de produção, como agregados, aditivos químicos e cimento Portland. Essa evolução possibilitou a criação de concretos mais resistentes e duráveis, impactando diretamente a forma como se projetam e constroem estruturas. Com isso, os métodos de cálculo também evoluíram permitindo construções mais altas, com vãos maiores e elementos estruturais mais esbeltos. Essas mudanças exigem maior atenção as deformações reais do concreto, tornando essencial o conhecimento do módulo de elasticidade, que está relacionado ao comportamento não linear do concreto, influenciado pelas microfissuras e pela zona de transição entre pasta e agregado.

Por esta razão, além da resistência à compressão, projetistas passaram a especificar também o módulo de elasticidade em projetos.

Como o concreto tem um comportamento não linear é importante que seja determinado o módulo de elasticidade por meio de ensaios estáticos, mas também por ensaios não destrutivos, como o método dinâmico das frequências naturais de vibração, que vem ganhando destaque por sua rapidez, precisão e por não comprometer as amostras. Esse método fornece resultados mais precisos aos projetistas para que possam calcular as tensões de projeto, momentos e deflexões de estruturas complexas.

O conhecimento das propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade, é de fundamental importância para o dimensionamento e desempenho das estruturas de concreto. Essas informações são essenciais tanto na fase de projeto, para a segurança e durabilidade da estrutura, quanto em eventuais intervenções futuras, como nos casos de reforço estrutural.

A análise do comportamento elástico do concreto, com ênfase no módulo de elasticidade, em um Trabalho de Conclusão de Curso, é de fundamental importância, pois permite aprofundar os conhecimentos sobre desempenho estrutural do concreto, contribuindo para a formação profissional do aluno, e ampliando sua capacidade de aplicar esses conceitos em situações reais de projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto, com ênfase no método dinâmico, por meio dos ensaios de resistência à compressão e do método das frequências naturais de vibração, utilizando amostras de concreto com diferentes idades e resistências. Além disso, busca-se confrontar os resultados experimentais com as estimativas teóricas previstas em normas técnicas, avaliando a correlação entre os métodos e a sua aplicabilidade na engenharia estrutural.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os fundamentos teóricos do módulo de elasticidade dinâmico do concreto estrutural.
- Realizar ensaios de compressão uniaxial para a determinação do módulo de elasticidade estático, conforme a ABNT NBR 5739:2018.
- Determinar o módulo de elasticidade dinâmico através do método das frequências naturais de vibração, conforme a NBR 8522-2:2021, explorando a sua aplicação prática e potencial como técnica complementar ou alternativa aos métodos tradicionais.
- Calcular os módulos estimados por meio das normas NBR 6118:2023, Eurocode 2 e ACI 318-19, para fins de comparação com os valores experimentais.
- Avaliar a influência da idade e da resistência do concreto nas diferenças entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.
- Comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, destacando as particularidades e possíveis vantagens do ensaio dinâmico na determinação do módulo de elasticidade.
- Confrontar os resultados experimentais com as estimativas teóricas fornecidas por diferentes normas técnicas (NBR 6118:2023, ACI 318-19, Eurocode 2 e modelo de Popovics), verificando a coerência e aplicabilidade desses modelos na prática.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Concreto Estrutural

O concreto estrutural é, convencionalmente, um material composto por um aglomerante, pela combinação de um ou mais tipos de agregados e água. No estado fresco, o concreto deve apresentar propriedades de plasticidade que permitam o adequado transporte, lançamento e adensamento. Após o endurecimento, deve atender às exigências especificadas em projeto, especialmente quanto à resistência à compressão, módulo de elasticidade, entre outras propriedades.

O aglomerante hidráulico consiste em um material ligante, geralmente pulverulento, cuja pasta possui a capacidade de endurecer unicamente pela reação com a água, mantendo, após o endurecimento, desempenho satisfatório quando submetida a esforços mecânicos.

Os agregados, por sua vez, são materiais granulares, sem forma ou volume definidos, tipicamente inertes, com dimensões e propriedades adequadas ao uso em aplicações de engenharia.

A água é o solvente mais comumente empregado na produção de concretos. Além dela, é frequente a utilização de aditivos solventes, que são produtos químicos adicionados à mistura com a finalidade de modificar as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

A combinação desses materiais origina o composto denominado concreto estrutural. As partículas dos agregados são envolvidas por uma matriz porosa de pasta de cimento, havendo entre essas duas fases uma zona de transição, cada qual com características específicas. A interação entre os agregados, a pasta de cimento e a zona de transição exerce influência significativa nas propriedades do concreto.

A zona de transição entre a matriz e o agregado gráúdo tem papel determinante na resistência de concretos com resistências usuais. Ressalta-se, ainda, que a resistência à compressão é influenciada pela relação água/cimento da mistura.

2.1.1. Ensaio de caracterização

O desempenho do concreto para uso em estruturas e seus componentes costuma ser avaliado pela tensão de rupturas sob cargas de compressão, pelo módulo de elasticidade e também pela sua porosidade.

O módulo de elasticidade é obtido a partir de equações empíricas ou ensaios de compressão simples e também a partir de ensaios ultrassônicos que são normatizados pela NBR 8522-2:2021.

Para o ensaio de compressão simples é necessário realizar a moldagem de corpos de prova padronizados pelas normas técnicas. Um dos cuidados a serem adotados antes da realização do ensaio de compressão é a geometria da amostra, que deve apresentar uma relação entre o comprimento e a seção transversal adequada para resistir a flexão e a flambagem. Como o concreto é um material frágil a relação altura/diâmetro varia de 2 a 3. Além disso, os procedimentos de cura, moldagem, preparo para ensaio estão especificados na ABNT NBR 5738:2015.

O ensaio de compressão simples é realizado em uma prensa hidráulica, com alto nível de precisão, capaz de aplicar carga de forma contínua, sem choques e com velocidade controlada, conforme os parâmetros estabelecidos pela norma técnica.

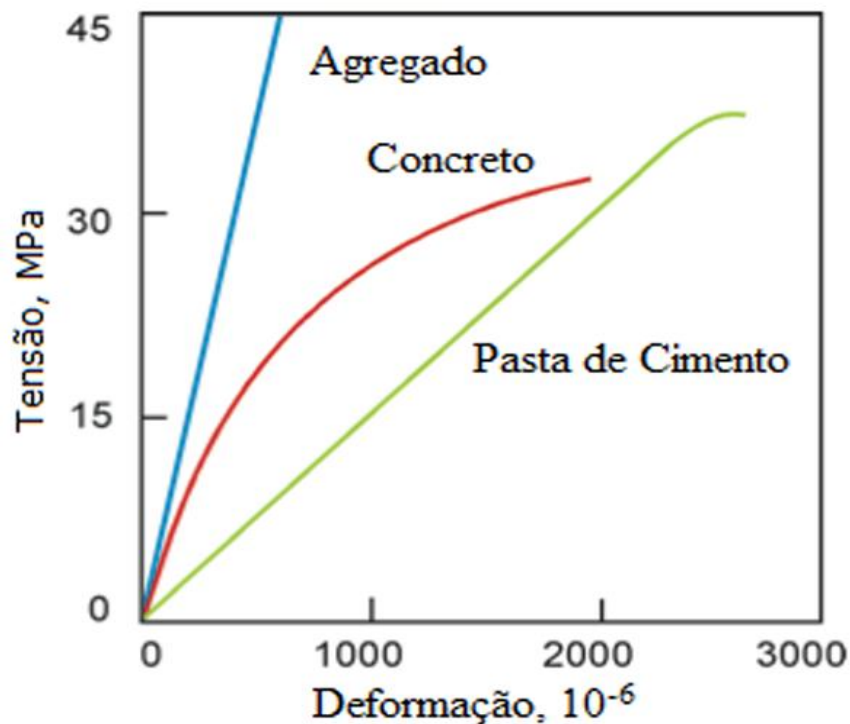
Durante o ensaio de compressão, a ruptura do corpo de prova de concreto acontece devido ao colapso das ligações internas do material. Mesmo que, em alguns casos, não se perceba uma ruptura visível na parte externa, internamente o concreto já atingiu um estado de deformação tão avançado que não é mais capaz de resistir a qualquer aumento de carga.

A partir dos dados de tensão e deformação obtidos no ensaio de compressão simples do concreto, é possível construir um gráfico com os seus resultados e a curva resultante é chamada de diagrama tensão-deformação. Esse diagrama é muito importante, pois é através dele que se obtêm dados da resistência à compressão do concreto independente da sua dimensão ou forma.

O diagrama tensão-deformação do concreto, numa determinada idade, varia conforme a composição dos materiais usados na mistura e a proporção entre eles. Além disso, características dos corpos de prova, como pequenas imperfeições e o modo como foram moldados, também influenciam nesse comportamento.

O seu comportamento no diagrama tensão-deformação é fortemente influenciado pela composição da sua mistura (água, cimento, areia e agregados), assim como pelas condições de cura, especialmente o tempo e a temperatura em que é mantido.

Figura 1 — Comportamento típico da curva tensão-deformação do concreto e seus principais componentes



Fonte: Informativo técnico – Sonelastic

2.1.2. Ensaios não-destrutivos

Para a determinação do módulo de elasticidade podemos utilizar também o método da frequência ressonante. Com esse método é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto e estimar o módulo de elasticidade estático. O método baseia-se na medição da frequência natural de vibração do elemento a ser analisado, quando este é submetido a vibrações longitudinais, transversais ou torcionais. Considerando a frequência natural de vibração, a massa e a geometria do corpo de prova, é possível estimar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

O método da frequência ressonante pode ser realizado por duas abordagens distintas: a ressonância forçada e as vibrações livres. Na primeira o Corpo de prova (CP) de dimensões e massa conhecidas, é fixado/apoiado e excitado por um vibrador acústico cuja frequência é variada continuamente. As vibrações se propagam na amostra, são captadas e intensificadas por um acelerômetro, e a amplitude dessas vibrações é então medida por um indicador adequado.

Alterando o apoio do corpo de prova, a posição do vibrador acústico e do acelerômetro, é possível medir as frequências ressonantes para a modalidade longitudinal, transversal e modalidade de torção, e assim, calcular o coeficiente de Poisson.

No ensaio de impacto, o CP é excitado por um dispositivo de impacto, a frequência natural de vibração gerada na amostra é captada e ampliada da mesma forma que no método da ressonância forçada.

Os métodos de frequência ressonante são de extrema importância para o estudo de uma boa parte dos materiais compostos e/ou viscoelásticos como é o caso do concreto, o que proporciona uma maior precisão dos resultados.

Uma das principais vantagens do uso dos métodos de ensaio não-destrutivos é a possibilidade de repetir o ensaio em caso de incertezas, a realização de novos ensaios em diferentes idades de cura e avaliar características relevantes do material, por exemplo, o nível de degradação e a sua rigidez. Isso pode ser feito em materiais no campo ou em condições de laboratório, com o objetivo de compreender melhor as propriedades do concreto.

2.2 Resistência à compressão Simples

A resistência à compressão de um material está relacionada a sua capacidade de suportar uma carga sem sofrer deformações excessivas ou falhas. Trata-se de uma propriedade intrínseca ao próprio material e é determinada através de ensaios padronizados pela NBR 5739:2018.

Nos concretos, a resistência à compressão simples é definida como a tensão máxima aplicada no CP (corpo de prova) que leva a desagregação do material que o compõe. Essa ruptura pode ocorrer na matriz da pasta de cimento ou no caso de concreto de alta resistência, no agregado graúdo.

A resistência à compressão do concreto é considerada a sua principal propriedade, sendo a base para a correlação com outras características mecânicas, como módulo de elasticidade, fluência, entre outros. Isso tudo de acordo com os critérios adotados pelas normas técnicas nacionais e internacionais.

A resistência à compressão do concreto é influenciada por diversos fatores, tais como, granulometria, resistência dos agregados, relação água/cimento (a/c), idade do concreto, formas e dimensões do CP (Corpo de prova), porosidade, entre outras. No que se refere a porosidade, a resistência mecânica do concreto tende a diminuir à

medida que a porosidade aumenta, uma vez que regiões mais porosas, como a zona de transição, tornam-se estruturalmente mais frágeis do que a matriz de cimento hidratado. A porosidade pode ser estimada com base na relação água/cimento e no grau de hidratação do cimento.

2.2.1 Procedimentos de ensaio

Segundo a NBR 5739:2018, a prensa utilizada para a execução do ensaio de compressão uniaxial deve possuir capacidade compatível com os corpos de prova a serem ensaiados, e a mesma deve ser classe 1 ou melhor. O corpo de prova cilíndrico deve apresentar suas faces limpas e planas, sendo posicionado de forma que, ao ser centralizado, seu eixo coincida com o da prensa hidráulica, garantindo que as forças aplicadas atuem diretamente sobre o centro.

O acionamento da prensa hidráulica deve se dar por meio de qualquer fonte estável de energia, de modo que a força aplicada seja contínua e sem choques

A prensa hidráulica, por sua vez, deve permitir o ajuste da distância entre os pratos de compressão antes do início do ensaio, facilitando tanto a introdução quanto o alinhamento adequado do corpo de prova entre eles. Esse deslocamento entre os pratos deve ser superior a altura do corpo de prova em pelo menos 15mm.

Após o início do ensaio, os pratos não podem mais se movimentar em nenhum sentido. Por esse motivo, as superfícies de assentamento esférico da rótula devem ser mantidas sempre limpas e lubrificadas. A lubrificação dessa superfície deve ser feita apenas com uma leve camada de óleo mineral comum, sendo vedada a utilização de graxas ou lubrificantes que contenham aditivos de alta pressão de contato.

Para a realização do ensaio deve ser determinada a medida do diâmetro da amostra com exatidão de $\pm 0,1\text{mm}$, pela medida de dois diâmetros, o mesmo deve ser feito para determinar a altura da amostra. Caso seja realizado o controle geométrico dos moldes da amostra conforme especificado pela NBR 5738:2015, pode ser dispensadas as medidas de diâmetro e altura, adotando assim as medidas nominais destes, desde que seja atendido o intervalo da relação h/d entre 1,94 e 2,06.

Para romper o corpo de prova através do ensaio de compressão deve ser em uma data específica respeitando as tolerâncias de tempo conforme descrito na tabela 1 da NBR 5739:2018.

2.2.2 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Para a realização do ensaio de compressão, devem ser moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme estabelece a NBR 5738:2015, a qual exige que, no caso de corpos de prova cilíndricos, a altura seja o dobro do diâmetro.

Antes de iniciar a moldagem dos corpos de prova, o molde utilizado deve ser revestido com uma fina camada de óleo mineral comum ou outro lubrificante que não apresente reação quando em contato com o cimento. A superfície onde os corpos de prova são apoiados durante a moldagem deve ser rígida, nivelada, horizontal e livre de vibrações e impactos que possam interferir na moldagem ou início de pega.

Durante a moldagem, o adensamento do concreto deve ser feito manualmente com o uso de uma haste apropriada. No caso de corpos de prova com diâmetro igual a 100mm recomenda-se aplicar 12 golpes consecutivos por camada. A norma recomenda a moldagem em duas camadas, com os golpes distribuídos uniformemente sobre toda a área do molde.

Após a moldagem, os corpos de prova devem ser imediatamente armazenados em local protegido, a fim de evitar a perda excessiva de água e protegê-los contra as intempéries. Se o corpo de prova estiver em condições de desmolde, este deve ocorrer após 24 horas.

Em seguida, os corpos de prova devem ser identificados corretamente e mantidos em uma câmara úmida, com umidade relativa mínima de 95% e temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, garantindo que toda a superfície fique exposta a essas condições.

2.3 Definição do Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é um parâmetro mecânico que proporciona a medida de rigidez de um elemento e está associado a propriedades mecânicas como tensão de escoamento, tensão de ruptura, temperatura, entre outras. É uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e da presença de defeitos, como poros e trincas.

O módulo de elasticidade é uma das mais importantes propriedades elásticas do concreto para a análise de impactos de manutenção e desempenho das estruturas de concreto e está intimamente relacionada com a propriedade da pasta de cimento, a

rigidez dos agregados selecionados e o método de determinação do módulo. Tal módulo pode ser considerado como a relação entre a tensão aplicada sobre um concreto e a sua capacidade de suportar as deformações, ou seja, retrata a sua rigidez. Quanto maior for o valor do módulo de elasticidade, menor será a sua deformação e melhor será a sua capacidade de suportar cargas sem deformações definitivas.

O módulo de elasticidade é comumente obtido a partir de equações empíricas ou por meio de ensaios de compressão simples, que exige aparatos e cuidados especiais devido a pequena deformação do concreto. A avaliação do módulo de Young no ensaio de compressão se aplicaria apenas a materiais que obedecem a lei de Hooke, segundo o qual a deformação elástica de um material sólido é proporcional a tensão aplicada.

Isso pode ser expresso pela seguinte equação:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade

σ é a tensão do material em MPa

ε é a deformação

No entanto, no caso do concreto, essa proporcionalidade tende a se perder à medida que os níveis de tensão aumentam, devido à sua natureza heterogênea e à presença de micro defeitos estruturais. Por isso, é comum a utilização de dois tipos distintos de módulo de elasticidade estático: o módulo tangente inicial (E_{ci}), que corresponde à inclinação da curva tensão-deformação no início do carregamento, e o módulo secante (E_{cs}), definido pela inclinação da reta que liga a origem a um ponto específico da curva. Essa distinção permite representar com mais precisão o comportamento real do concreto, que não apresenta uma relação perfeitamente linear entre carga e deformação ao longo de todo o ensaio.

Além dos módulos estáticos (secante e tangente), o módulo de elasticidade dinâmico também é utilizado para caracterizar o comportamento elástico do concreto, sendo obtido por métodos não destrutivos.

Para o cálculo aproximado do módulo de elasticidade, pode-se utilizar equações empíricas como a da NBR 6118-2023

$$E_{ci} = 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde

E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente inicial (MPa)

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto (MPa)

As equações empíricas das normas técnicas são geralmente usadas para estimar e analisar as propriedades mecânicas, principalmente quando não existem ensaios de concreto feito com os seus respectivos materiais caracterizados. Essas equações empíricas normalmente são em função da resistência à compressão, resistência característica, massa específica, dentre outras.

2.3.1 Método estático

O módulo de elasticidade estático é um parâmetro importante que representa a rigidez do concreto quando ele é submetido a um carregamento lento e constante como ocorre do ensaio de compressão simples. Este é um método de ensaio destrutivo, ou seja, o corpo de prova pode ser utilizado apenas uma vez.

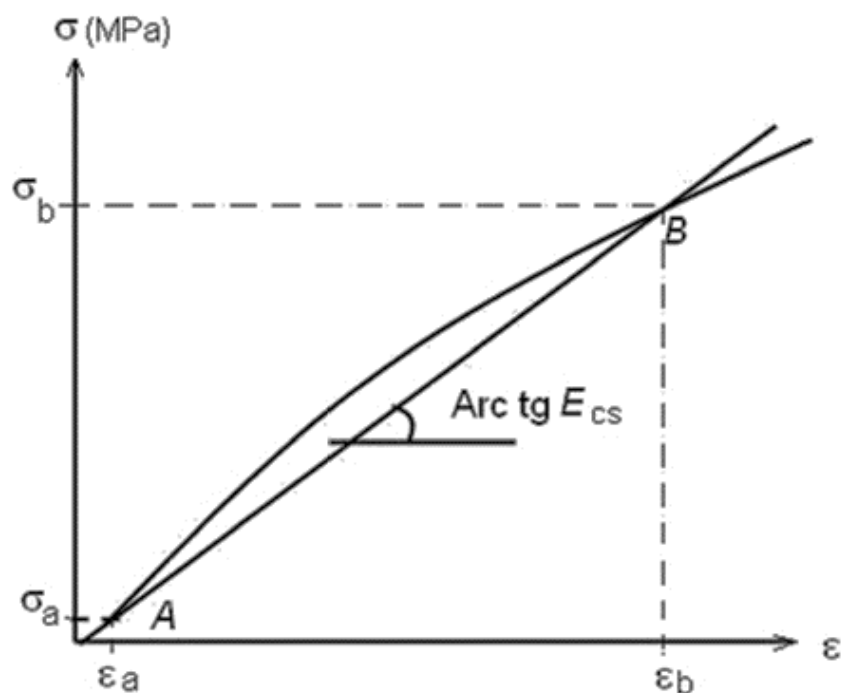
A determinação do módulo de elasticidade estático é dada a partir da inclinação da curva tensão-deformação sob carga uniaxial. No entanto, é importante destacar que essa curva, no caso do concreto, não é linear.

A NBR 8522-1&2:2021 estabelece os métodos para a determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Esses ensaios são realizados em Corpos de prova (CP) cilíndricos, que podem ser moldados ou extraídos diretamente de uma estrutura existente.

Esta norma define dois tipos principais de módulos de deformação: o módulo de deformação secante (E_{cs}) e o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).

O módulo de elasticidade secante (E_{cs}) corresponde ao coeficiente angular da reta secante que liga dois pontos específicos do gráfico tensão-deformação, o ponto A, correspondente a uma tensão de 0,5 MPa, e o ponto B, correspondente à tensão máxima atingida no ensaio.

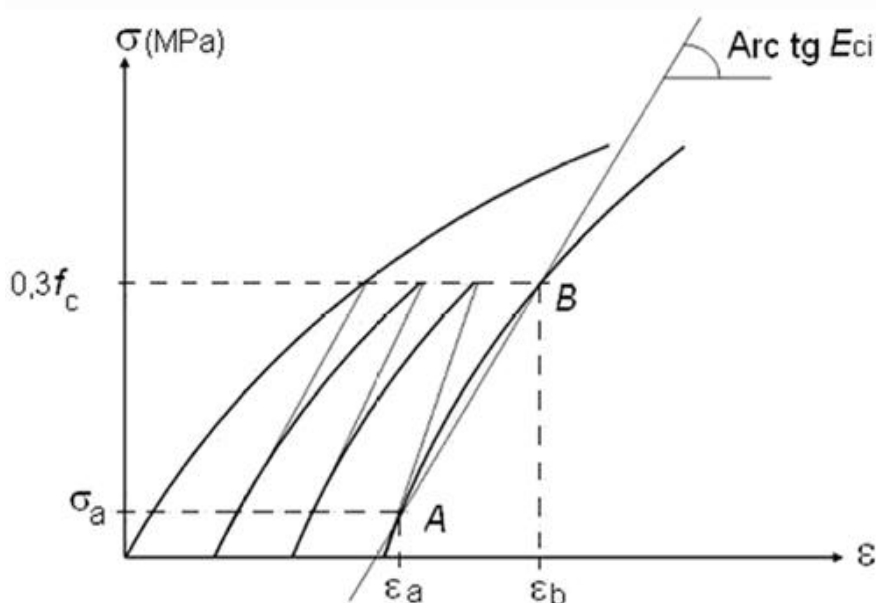
Figura 2 — Representação do módulo de deformação secante, E_{cs}



Fonte: NBR 8522-1:2021

O módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) é considerado equivalente ao módulo de deformação secante (E_{cs}), mas limitado ao trecho da curva 0,5 MPa e 30% da resistência a compressão do concreto, dentro das condições definidas pelo método de ensaio.

Figura 3 — Representação do módulo de elasticidade, tangente inicial (E_{ci})



Fonte: NBR 8522-1:2021

Segundo a NBR 8522-1:2021 na ausência de ensaios pelos métodos estáticos, o módulo de elasticidade (E_{ci}) pode ser estimado através do módulo dinâmico (E_{cd}), previsto na NBR 8522-2:2021, proporcionando uma exatidão igual ou até mesmo superior àquela obtida pelos métodos estáticos, isso acontece pois o método das frequências naturais de vibração apresenta maior precisão do que os métodos estáticos, o que compensa a incerteza associada a correlação entre os dois métodos.

Para a realização do ensaio do módulo de elasticidade estático tangente inicial, é necessário moldar pelo menos cinco corpos de prova idênticos (mesmo formato e dimensões), sendo dois deles utilizados para medir a resistência a compressão do concreto, etapa essencial para determinar corretamente os níveis de carregamento que serão aplicados no ensaio do módulo de elasticidade. O corpo de prova é posicionado axialmente na prensa hidráulica, sendo submetido à aplicação gradual de carga de compressão até a sua ruptura, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR 5739:2018. Com base na medida dos resultados de resistência à compressão, define-se o valor da resistência à compressão média, que é usado como referência para os demais cálculos.

Após obtida a resistência à compressão, deve ser posicionado um corpo de prova na prensa de forma centralizada entre os pratos de acordo com a NBR 5739:2018 e deve permanecer centralizado geometricamente, de forma que o seu eixo coincida com o eixo de aplicação de carga.

A norma NBR 8522-1:2021 apresenta duas alternativas para a determinação do módulo de elasticidade estático tangente inicial: as metodologias A e B. Em ambas, os ensaios devem ser conduzidos com uma velocidade de aplicação de carga e descarga controlada, entre 0,30 e 0,60 MPa/s, com valor nominal de 0,45 MPa/s.

Metodologia A – Com tensão σ_a fixa

O procedimento tem início com o posicionamento correto do corpo de prova na prensa hidráulica. Realizam-se três ciclos consecutivos de carregamentos e descarregamentos, aplicando carga até que se atinja $0,3f_c$, valor obtido previamente no ensaio de compressão uniaxial. Após cada carregamento, descarrega-se até uma força mínima próxima a zero.

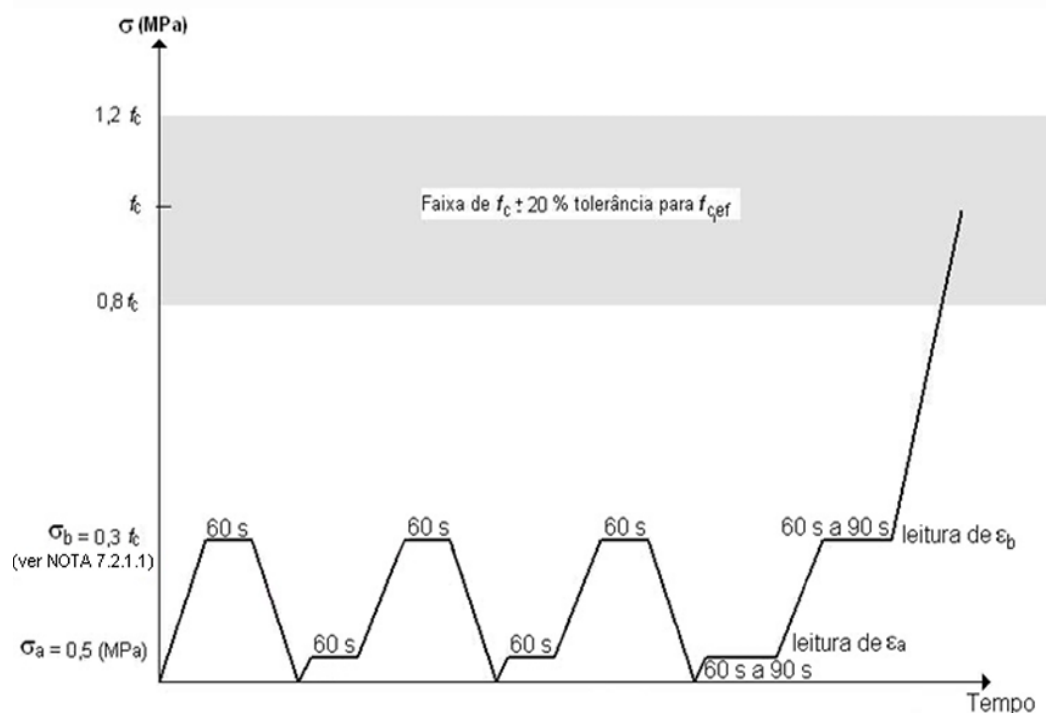
Concluída essa etapa inicial, aplica-se uma tensão de 0,5 MPa mantendo-se esse nível por 60 s. Em seguida, carrega-se até $0,3f_c$ e, novamente, mantém-se esse patamar por mais 60 s antes de aliviar a carga até próxima a zero. Devemos então repetir todo o processo novamente.

Na repetição, deve-se aplicar novamente 0,5 MPa por 60 s, registrando os dados do carregamento em até 30 s. Após isso, o corpo de prova é carregado uma última vez até atingir $0,3f_c$, com coleta dos dados também em até 30s.

Com a leitura das deformações completa, o CP pode ser carregado até a ruptura com a mesma taxa de aplicação de carga, permitindo a determinação da resistência efetiva ($f_{c,ef}$).

Se a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) diferir em mais de 20% da resistência convencional (f_c), os resultados do corpo de prova não são confiáveis e não podem ser considerados nos cálculos.

Figura 4 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A



Fonte: NBR 8522-1:2021

Metodologia B – Deformação específica ϵ_a fixa

O procedimento tem início com o posicionamento correto do corpo de prova na prensa hidráulica, garantindo alinhamento e contato uniforme entre as superfícies. Na primeira etapa, aplica-se uma carga até atingir $0,3f_c$, mantendo esse nível por 60s. Em seguida a carga é aliviada até uma força mínima próxima a zero.

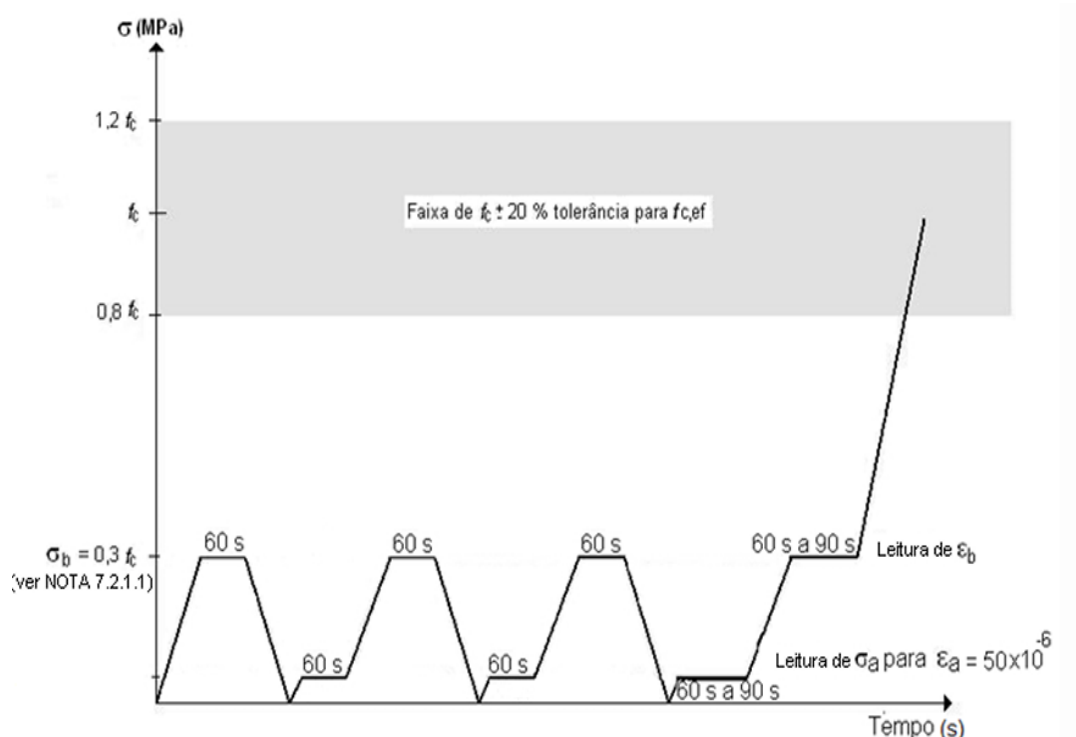
Na sequência, realiza-se um novo carregamento, desta vez até que o corpo de prova atinja a deformação específica $\epsilon_a = 50 \times 10^{-6}$, mantendo-se nesse patamar por 60s, seguido novamente por alívio da carga até próximo de zero. Esse procedimento deve ser repetido mais duas vezes, totalizando três ciclos. Durante esses ciclos, é necessário registrar as forças correspondentes no intervalo máximo de 30 s.

Concluída essa fase, o corpo de prova é carregado mais uma vez até $0,3f_c$, permanecendo nesse nível por 60 s, com coleta de dados também em até 30 s. com os registros obtidos, calcula-se a tensão σ_a correspondente a deformação ϵ_a .

Por fim, o corpo de prova é carregado até a ruptura com a mesma taxa de aplicação de carga, possibilitando a determinação da resistência efetiva ($f_{c,ef}$).

Se a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) diferir em mais de 20% da resistência convencional (f_c), os resultados do corpo de prova não são confiáveis e não podem ser considerados nos cálculos.

Figura 5 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia B



Fonte: NBR 8522-1:2021

Para o cálculo do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}), através dos dois métodos citados a cima, tensão fixa e deformação fixa, utiliza-se as formulas a seguir respectivamente:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 3}$$

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

σ_a a tensão correspondente a deformação específica de 50×10^{-6} (MPa);

σ_b a tensão maior que corresponde a $0,3f_c$ (MPa);

ε_a é a deformação específica média dos CPs sob tensão de 0,5 MPa;

ε_b é a deformação específica média dos CPs sob tensão de $0,3f_c$.

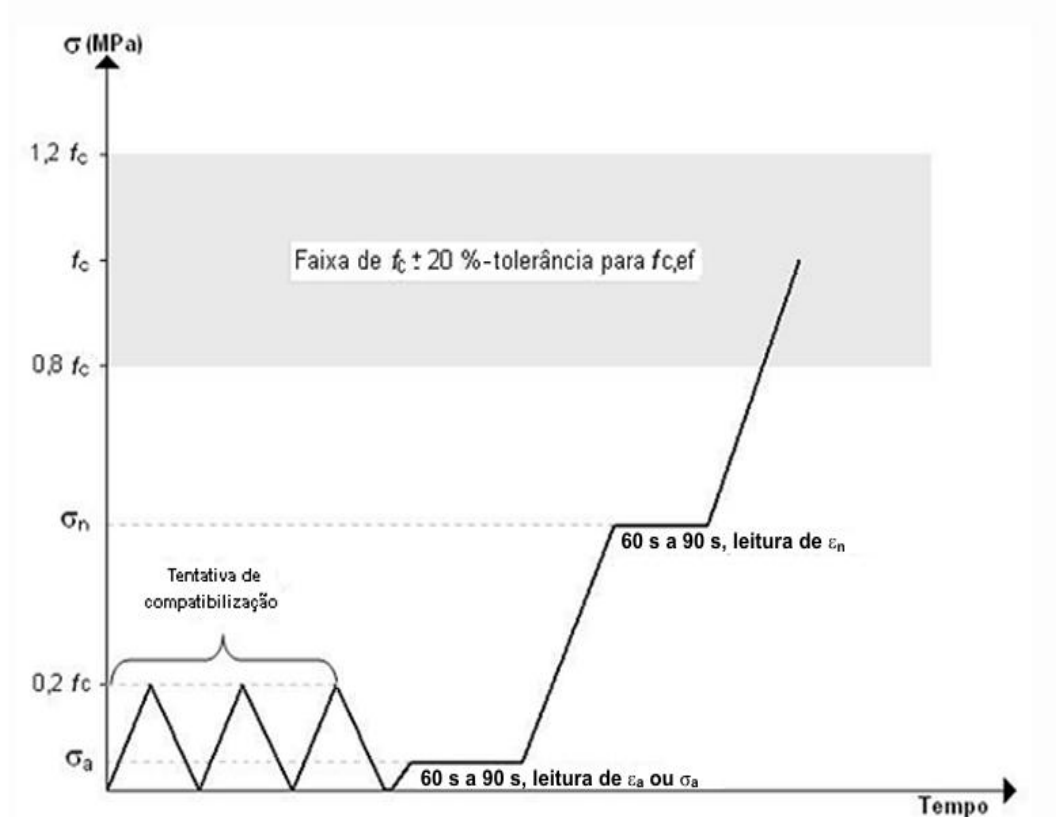
Para a determinação do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) também deve-se utilizar os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 8522-1:2021, o ensaio se inicia com a aplicação de uma carga máxima de 20% da resistência prevista para ruptura do CP, caso a diferença da medição seja maior do que as deformações lidas, deve-se efetuar o descarregamento e o CP deve ser ajustado novamente para que fique exatamente centrado, o ajuste deve ser feito com movimentos circulares. Após o ajuste é aplicado o carregamento e verifica-se as informações, caso não tenha atingido os 20% da resistência prevista, o procedimento é repetido até conseguir o ajuste necessário.

Na primeira etapa após os ajustes, é efetuado o carregamento até a força correspondente a tensão de 0,5 MPa (σ_a) e mantem-se nesse nível por 60 s, registrando as deformações lidas em, no máximo, 30 s. Em seguida o CP é carregado até a sua tensão limite superior (σ_n) mantendo nesse nível por 60 s, registrando novamente as deformações obtidas em, no máximo, 30 s.

Como alternativa, pode-se também carregar o CP até a deformação específica (ε_a) de 50×10^{-6} e manter o carregamento por 60 s, registrando em seguida a força lida em, no máximo, 30 s, que corresponde a tensão básica σ_a . Em seguida é aplicado um carregamento até a tensão desejada pelo profissional e mantido por 60 s, registrando novamente em, no máximo, 30 s, que corresponde a tensão (σ_n)

Após registrar todas as informações necessárias, aplica-se o carregamento até a sua ruptura, obtendo assim a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) do corpo de prova. Se a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) diferir em mais de 20% da resistência convencional (f_c), os resultados do corpo de prova não são confiáveis e não podem ser considerados nos cálculos.

Figura 6 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade secante



Fonte: NBR 8522-1:2021

Para a realização do cálculo para a determinação do módulo de elasticidade secante, utiliza-se a seguinte equação:

$$E_{cs,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_n - \sigma_a}{\epsilon_n - \epsilon_a} 10^{-3} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

σ_n é a tensão especificada, expressa em megapascal (MPa);

σ_a a tensão de 0,5 MPa ou a tensão correspondente a deformação específica de 50×10^{-6} ;

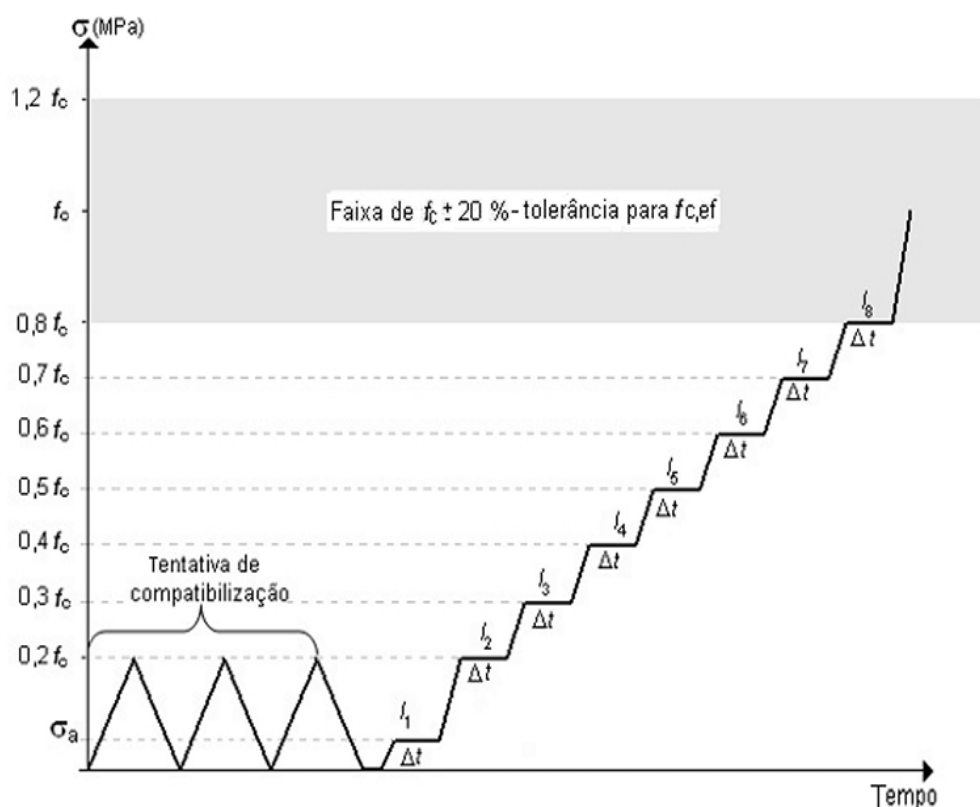
ϵ_n é a deformação específica de cada corpo de prova sob a tensão especificada;

ϵ_a é a deformação específica de cada corpo de prova sob a tensão de 0,5 MPa ou a tensão correspondente a deformação específica de 50×10^{-6} .

O módulo de elasticidade secante (E_{cs}) pode ser determinado conforme as diretrizes da NBR 8522-1:2021, por meio de um procedimento que simula o

comportamento estrutural durante o carregamento inicial. Nesse ensaio, utiliza-se a inclinação da reta secante traçada na curva tensão-deformação, obtida sem aplicação de carga prévia no ponto de controle (CP). Esse módulo pode ser calculado para intervalos de tensão compreendidos entre $0,2f_c$ e $0,8f_c$, desde que o CP não tenha sido previamente carregado. Após a análise, o corpo de prova é submetido a ruptura, sendo os resultados confrontados com os valores obtidos no ensaio de compressão axial simples.

Figura 7 — Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade secante pelo diagrama tensão-deformação.



Fonte: NBR 8522-1:2021

De acordo com Metha e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade dinâmico pode ser estimado com base no módulo de elasticidade tangente inicial, sendo geralmente de 20% a 40% superior ao módulo de elasticidade estático (E_{ci}) para concretos de baixa, média e alta resistência respectivamente.

Nos casos onde não é possível realizar os ensaios, pode-se estimar o módulo de elasticidade estático do concreto em função do f_{ck} de projeto ou então da

resistência média esperada após os 28 dias de cura do corpo de prova, utilizando as equações apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 — Expressões para estimativa do módulo de elasticidade estático

NORMA	MÓDULO TANGENTE	MÓDULO SECANTE
ABNT NBR 6118:2023*	$E_{ci} = \alpha_e * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$ para f_{ck} de 20Mpa a 50Mpa $E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{\frac{1}{3}}$ para f_{ck} de 55Mpa a 90Mpa	$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci}$ $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{ck}}{80}\right)\right] * E_{ci}$
MODEL CODE 2010*	$E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{\frac{1}{3}}$ $E_{ci}(t) = \left(e^{\left\{s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right]\right\}}\right)^{0,5} * E_{ci}$	$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci}$ $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{cm}}{88}\right)\right] * E_{ci}$
ACI 318-19**	-	$E_{ci} = 0,043 * \omega_c^{1,5} * \sqrt{f'_c} \text{ (Mpa)}$ para ω_c entre 1440 e $\frac{2500kg}{m^3}$ $E_c = 4700 * \sqrt{f_c} \text{ (Mpa)}$ p concreto de massa especifica normal
EUROCODE 2	$E_{ci} \approx 1,05 * E_{cm} \text{ (Estimativa do módulo tangente)}$ $E_{ci}(t) = \left(e^{\left\{s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right]\right\}}\right)^{0,5} * E_{cm}$	$E_{cm} = 22 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \text{ (fcm em Mpa)}$ $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,2}$

Fonte: Elaboração própria, com base nas normas ABNT NBR 6118:2023, fib MODEL CODE 2010, ACI 318-19, EUROCODE 2 e literatura especializada.

Como pode-se observar na tabela acima, a equação para estimar o módulo de elasticidade varia de acordo com o país ou norma adotada. Essa diversidade de expressões normativas acaba sendo um desafio em projetos que envolvem profissionais de países distintos, sendo necessário uma padronização prévia entre as partes envolvidas.

2.3.2 Método dinâmico

A análise do módulo de elasticidade dinâmico é de suma importância para a engenharia pois representa a rigidez do concreto quando submetido a impactos, vibrações ou ondas mecânicas. Existem diversas formas de determinar esse

parâmetro, incluindo métodos destrutivos, não-destrutivos e também o uso de equações empíricas que relacionam o módulo de elasticidade com outras propriedades do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro, 2008, em análises estruturais sujeitas a ações dinâmicas, como terremotos ou impactos, o uso do módulo de elasticidade dinâmico é mais apropriado. Esse módulo pode ser obtido de forma mais precisa por meio de ensaios não destrutivos, como os métodos ultrassônicos.

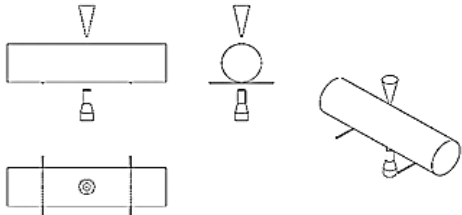
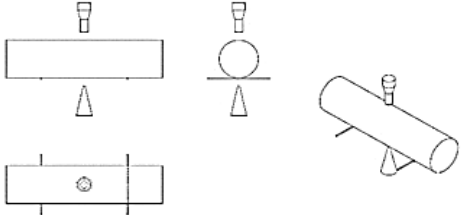
O módulo de elasticidade dinâmico pode ser determinado através de dois métodos de ensaio não destrutivos, sendo o primeiro a velocidade da propagação de pulsos ultrassônicos através do material, e o segundo é o ensaio de frequência ressonante. O primeiro método se baseia na relação estabelecida por Rayleigh entre a velocidade de propagação de som em determinada amostra, na massa específica e em suas características elásticas. O segundo método se baseia na determinação da frequência natural de vibração do material a ser analisado quando submetemos o mesmo a vibrações longitudinais, transversais ou torcionais. Se conhecida a massa e a geometria do corpo de prova, utilizando então o valor da frequência natural de vibração, pode ser estimado o módulo de elasticidade dinâmico.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto deve ser realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 8522-2:2021. Essa norma específica os métodos de ensaio para a avaliação das propriedades dinâmicas do concreto por meio de técnicas não destrutivas, como a medição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Para a realização do ensaio deve-se determinar primeiramente a massa, o diâmetro e a altura do corpo de prova (CP). O diâmetro é encontrado realizando duas medições na metade da altura da amostra e a altura da amostra deve ser determinada também com duas medições. A margem admissível de erro para o diâmetro é de 1% e para a altura de 2%.

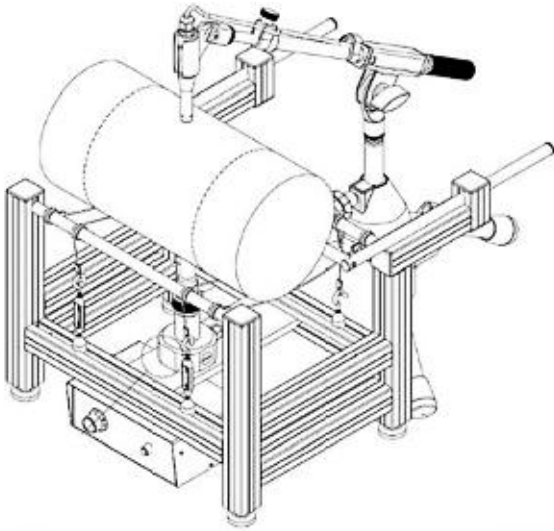
Após conhecida a geometria e massa do corpo de prova, este deve ser apoiado nas posições $0,224h$ (h =altura) para que vibre livremente no modo flexional fundamental. A margem admissível de erro para o posicionamento é de $\pm 0,01h$. A norma recomenda que o captador acústico e o martelo de impacto sejam instalados exatamente no centro do corpo de prova em relação ao plano de vibração e em lados opostos. Esse posicionamento é mais eficaz para o modo de vibração flexional fundamental e minimiza a excitação de outros modos de vibração.

Tabela 2 — Condições de contorno mecânicas ótimas para o modo de vibração flexional fundamental

Posição do impacto e captação	Esquema de realização do ensaio
Opção 1 Excitação por cima com a captação por baixo, ambas no centro do corpo de prova ou testemunho. Cabos ou apoios na posição 0,224 h.	
Opção 2 Excitação por baixo com captação por cima, ambas no centro do corpo de prova ou testemunho. Cabos ou apoios na posição 0,224 h.	
Legenda Excitação:  Captação: 	

Fonte: NBR 8522-2:2021

Figura 8 — Exemplo de aplicação das condições de contorno mecânicas para a realização do ensaio.

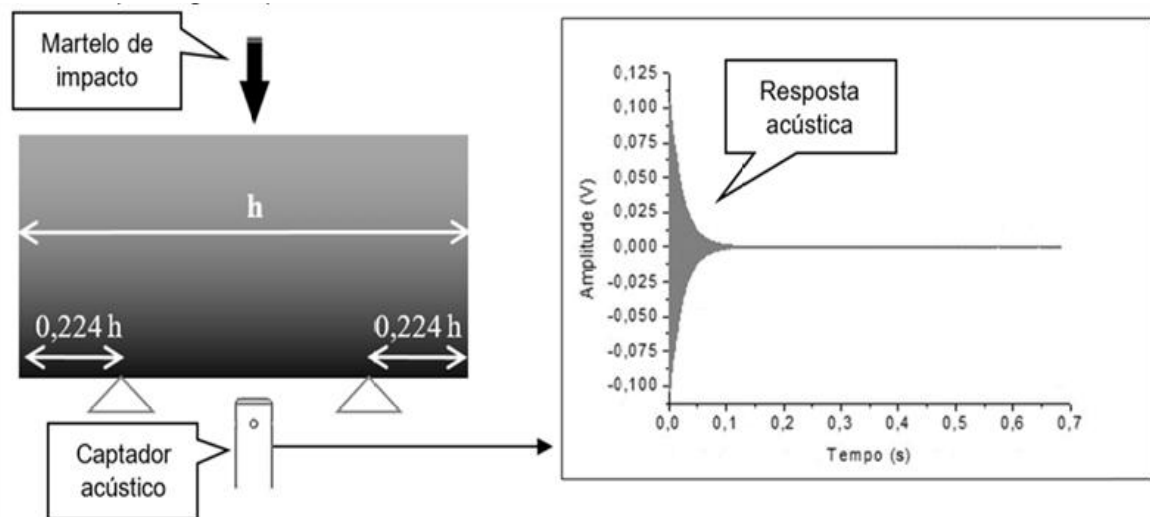


Fonte: NBR 8522-2:2021

Na terceira etapa do ensaio, com o corpo de prova já posicionado da maneira correta, deve ser aplicado um impacto único e exatamente no centro do corpo de prova (CP), captando em seguida a resposta acústica correspondente com o captador acústico. A intensidade do impacto de excitação é desprezível em corpos de prova

que não sofreram com solicitações mecânicas acima do limite elástico ou choques térmicos.

Figura 9 — ilustração da aplicação do impacto e captura da resposta acústica.



Fonte: NBR 8522-2:2021

A resposta acústica obtida é submetida a uma análise de frequências, a fim de determinar a frequência característica do material. Considerando que as condições de contorno mecânicas aplicadas durante o ensaio fossem as ótimas recomendadas pela norma para o modo flexional fundamental, a frequência correspondente será a de maior amplitude.

Pode-se observar também, na figura 9, a análise da resposta acústica obtida por meio da transformada rápida de Fourier. O sinal no domínio do tempo é mostrado à esquerda, enquanto sua correspondente distribuição de frequências aparece à direita. A frequência associada a flexão geralmente se destaca como primeiro pico de maior amplitude, tipicamente localizado na faixa de aproximadamente 6 kHz.

A partir dos resultados obtidos calcula-se o módulo de elasticidade dinâmico conforme a norma NBR 8522-2:2021 utilizando a seguinte equação:

$$E_{cd} = 1,6067 \cdot \frac{h^3 \times m \times f_f^2}{d^4} \times T \times 10^{-9} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

E_{cd} , é o módulo de elasticidade dinâmico, expresso em gigapascal (GPa);

h , é a altura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

d , é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

m , é a massa do corpo de prova, expressa em gramas (g);

f_r , é a frequência de ressonância flexional fundamental, expressa em Hertz (Hz);

T , é o fator de correção para o modo de vibração flexional fundamental (adimensional).

Os fatores de correção T são dados na tabela a baixo em função da razão h/d , considerando o coeficiente de Poisson igual a 0,20

Tabela 3 — Fator de correção de T em função de h/d para o coeficiente de Poisson igual a 0,20

h/d	1,94	1,95	1,96	1,97	1,98	1,99	2,00	2,01	2,02	2,03	2,04	2,05	2,06
T	2,18	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13	2,12	2,11	2,1	2,09	2,08	2,07	2,06

Fonte: NBR 8522-2:2021

Conforme a NBR 8522-2:2021 o resultado do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) reportado deve ser igual à média dos resultados individuais apresentado com dois algarismos significativos, expresso em gigapascal (GPa). A dispersão máxima entre um resultado individual e a média destes resultados é de 5%. Quando a dispersão máxima for superior a 5% apresentar no relatório apenas os resultados individuais.

3. METODOLOGIA

O presente estudo consiste em uma análise comparativa entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico, utilizando corpos de prova de concreto com diferentes resistências à compressão. Para isso, serão moldados os corpos de prova e, então, realizados ensaios destrutivos de compressão uniaxial, que permitirão determinar o módulo de elasticidade estático, e ensaios não destrutivos, baseados no método das frequências naturais de vibração, para a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico. Após a obtenção dos resultados em ambos os ensaios, será realizada uma comparação que possibilitará avaliar a correlação entre os dois módulos de elasticidade em função da resistência do concreto.

Todos os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais PRO pertencente ao Prof. Dr. Christian Donin, onde se encontram os equipamentos utilizados nas etapas descritas a seguir.

3.1. Caracterização dos materiais

O concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova foi do tipo usinado, fornecido por central dosadora. Foram obtidas informações sobre a procedência e as características dos materiais empregados em sua produção, garantindo o controle e a padronização do material analisado. A brita de graduação 0 e 1 tem origem no interior do município de Vera Cruz, proveniente da Mineração Linha Andreas, enquanto a areia foi obtida na cidade de Rio Pardo, extraída do Areal Rauber. O cimento empregado na mistura foi do tipo Votoran CP II-F40, sendo a dosagem complementada com aditivos de alta performance, visando à melhoria das propriedades do concreto.

3.2. Moldagem e cura dos corpos de prova

Antes da moldagem dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test), com o objetivo de verificar a consistência do concreto fresco e assegurar que o material apresentasse condições adequadas para moldagem e adensamento. Esse procedimento constitui uma etapa importante do controle de qualidade, permitindo avaliar a uniformidade do traço e identificar variações que possam comprometer o desempenho do concreto, garantindo assim a confiabilidade dos resultados nos ensaios subsequentes de resistência e módulo de elasticidade.

Figura 10 — Tronco de cone posicionado



Fonte: Autor

Figura 11 — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump test).



Fonte: Autor

Em seguida, foram moldados 30 corpos de prova cilíndricos, divididos em três lotes de diferentes resistências, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O adensamento foi realizado manualmente em duas camadas, cada uma compactada com 12 golpes da haste, conforme a NBR 5738:2015. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram durante as primeiras 24 horas em local seguro, sobre superfície horizontal rígida e livre de vibrações, também em conformidade com a NBR 5738:2015.

Decorrido esse período inicial, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em recipiente com água, garantindo assim as condições adequadas de cura.

3.3. Determinação da resistência a compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram conduzidos em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739:2018. Os ensaios foram executados em prensa eletro-hidráulica servo controlada, equipada com sistema de controle CPA (Carregamento Progressivo Automático), marca Pavitest, classe 1, com capacidade de carga de 200 toneladas. O carregamento foi aplicado de forma contínua, sem choques, mantendo velocidade de carregamento constante de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Na figura 12 apresenta-se a prensa eletro-hidráulica utilizada nos ensaios.

Figura 12 — Prensa eletro-hidráulica marca Pavitest



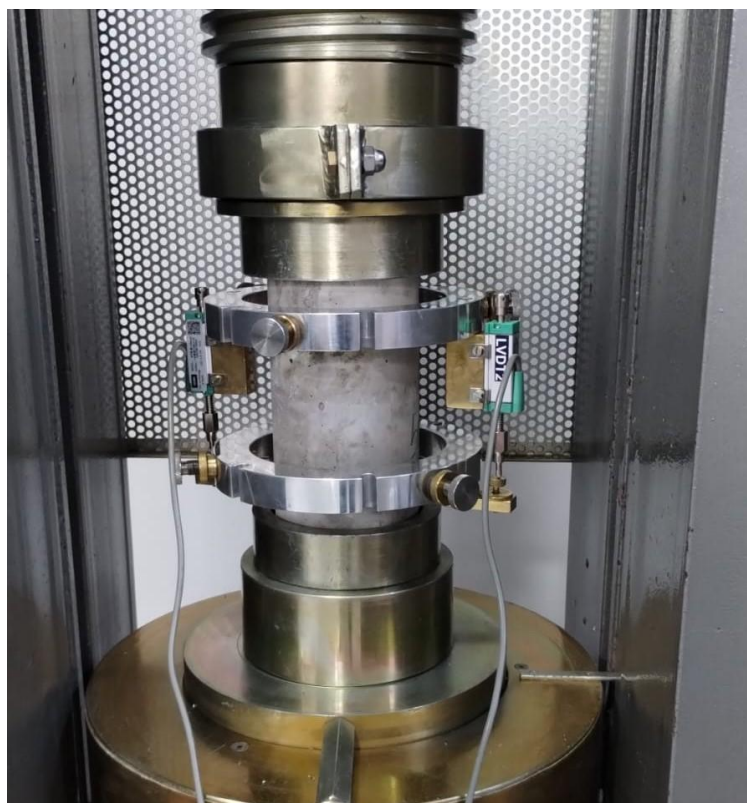
Fonte: Autor

3.4. Determinação do módulo de elasticidade estático

Os ensaios de módulo de elasticidade estático foram conduzidos em prensa eletro-hidráulica da marca Pavitest, classe 1, com capacidade de carga de 200 toneladas, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 8522-1:2021. As deformações do concreto foram registradas por sensores integrados no equipamento e transmitidas em tempo real ao software para análise.

Para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade estático, é necessário determinar inicialmente a resistência à compressão dos corpos de prova. Para isso, alguns corpos de prova foram submetidos à ruptura em ensaio de compressão simples do concreto. O valor obtido neste ensaio é inserido no software da prensa para calibrar o carregamento, garantindo que os ensaios de módulo de elasticidade sejam conduzidos de forma adequada. Em seguida, os corpos de prova podem ser submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade, conforme os procedimentos descritos na NBR 8522-1:2021. A figura 13 apresenta o equipamento utilizado no ensaio descrito anteriormente.

Figura 13 — Equipamento utilizado no ensaio do módulo de elasticidade estático



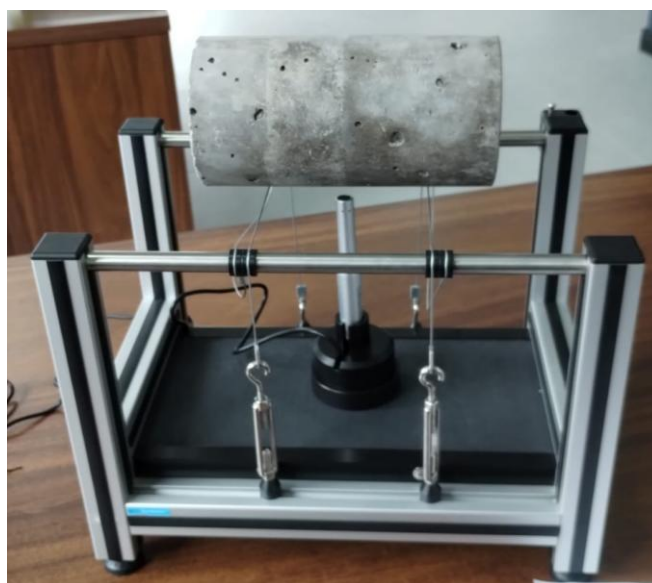
Fonte: Autor

3.5. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através de ondas ultrassônicas

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto por meio de ondas ultrassônicas, foi utilizado o sistema Sonelastic HZ, que emprega a Técnica de Excitação por Impulso.

Para a realização do ensaio, inicialmente são determinadas as dimensões e a massa do corpo de prova, sendo realizadas medições precisas para posterior marcação das linhas nodais, localizadas na posição $0,224 \cdot h$. Em seguida, o corpo de prova é cuidadosamente apoiado no equipamento, apoiando-se precisamente sobre essas linhas nodais, e o impacto é aplicado no centro por meio do pulsador. A resposta vibratória gerada é capturada pelo sistema, e os dados obtidos são processados pelo software, que calcula automaticamente o módulo dinâmico do material e estima o estático. A figura 14 apresenta o equipamento utilizado no ensaio descrito anteriormente.

Figura 14 — Sistema Sonelastic HZ



Fonte: Autor

3.6. Estimativas teóricas do módulo de elasticidade

3.6.1. Estimativa segundo a NBR 6118:2023

De acordo com o item 8.2.8 da norma NBR 6118:2023 – Projeto de Estruturas de Concreto, o módulo de elasticidade do concreto pode ser estimado em função da

resistência característica à compressão e do tipo de agregado graúdo utilizado. Essa estimativa é empregada em situações em que não há ensaio direto do módulo, permitindo uma aproximação adequada para o dimensionamento estrutural.

A Expressão para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial aos 28 dias, é dada por:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}, \text{ para concretos com } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad \text{Equação 7}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ para concretos com } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad \text{Equação 8}$$

E_{ci} – Módulo de elasticidade tangente inicial (MPa);

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto (MPa);

α_e – Coeficiente que depende do tipo de rocha utilizada como agregado graúdo, sendo:

1,2 para basalto;

1,0 para granito ou gnaiss;

0,9 para calcário;

0,7 para arenito.

Para idades inferiores a 28 dias, a NBR 6118:2023 estabelece expressões que permitem estimar o módulo de elasticidade do concreto a partir da relação entre as resistências características à compressão nas idades consideradas, conforme as equações a seguir:

$$E_{ci}(t) = \left(\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right)^{0,5} \times E_{ci}, \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \text{Equação 9}$$

$$E_{ci}(t) = \left(\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right)^{0,3} \times E_{ci}, \text{ para concretos com } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad \text{Equação 10}$$

3.6.2. Estimativa do módulo estático a partir do módulo dinâmico (Modelo de Popovics)

As correlações entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico têm sido amplamente estudadas na literatura, geralmente a partir de modelos empíricos ajustados com base em ensaios experimentais. Entre as diferentes propostas,

destaca-se o modelo desenvolvido por Popovics (1975), que considera a influência da densidade aparente do concreto na relação entre os dois módulos.

O modelo de Popovics apresenta a vantagem de ser aplicável a diferentes tipos de concreto e agregados, além de evitar a dependência de ajustes específicos de curva. Nesse modelo, o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) é estimado a partir do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) e da densidade aparente (ρ), conforme a equação a baixo:

$$E_{ci} = \frac{0,4275 \times E_{cd}^{1,4}}{\rho} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade tangente inicial (GPa);

E_{cd} = Módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

ρ = Densidade aparente (g/cm³).

Esse modelo permite converter o módulo dinâmico obtido por métodos não destrutivos em uma estimativa do módulo estático, utilizado no dimensionamento estrutural.

4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos ensaios realizados, este capítulo apresenta os resultados e a análise dos resultados referentes a resistência à compressão simples, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico através de ondas ultrassônicas, organizados de forma a possibilitar a análise comparativa entre os parâmetros.

4.1. Resultados experimentais

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples e de módulo de elasticidade, estático e dinâmico, para os concretos A, B e C, ensaiados aos 7 e 28 dias de idade. Para cada propriedade, foram avaliados corpos de prova individuais, sendo calculadas as médias e os desvios padrão, de forma a possibilitar uma análise comparativa entre as diferentes idades de cura.

Tabela 4 — Resultados experimentais do concreto A aos 7 dias

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	17,90	16,50	16,50	16,70	16,30	16,78	0,64
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	28,30	31,90	32,60	30,93	2,31
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	31,82	31,75	31,65	31,93	32,23	31,88	0,22

Fonte: Autor

Observa-se que, aos 7 dias, o concreto A apresentou resistência à compressão média de 16,78MPa, acompanhada do módulo de elasticidade estático médio de 30,93 GPa e módulo de elasticidade dinâmico médio de 31,88 GPa. Nota-se uma boa consistência entre os valores obtidos, com baixos desvios padrão, indicando uniformidade entre os corpos de prova e comportamento coerente com a idade de cura inicial.

Tabela 5 — Resultados experimentais do concreto B aos 7 dias

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	41,50	40,00	43,00	41,10	41,40	41,40	1,07
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	-	28,30	28,60	28,45	0,21
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	35,10	35,12	34,36	34,63	35,21	34,88	0,37

Fonte: Autor

Observa-se que o concreto B apresentou resistência média à compressão de 41,40 MPa, módulo de elasticidade estático médio de 28,45 GPa e módulo de elasticidade dinâmico médio de 34,88 GPa. Nota-se que os resultados de resistência são significativamente superiores aos do concreto A na mesma idade de cura, indicando uma mistura de maior desempenho mecânico. Além disso, os baixos valores de desvios padrão obtidos demonstram boa uniformidade entre os corpos de prova, evidenciando consistência nos ensaios e homogeneidade do material.

Tabela 6 — Resultados experimentais do concreto C aos 7 dias

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	53,10	54,30	54,50	52,40	53,20	53,50	0,88
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	41,10	46,60	43,20	43,63	2,78
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	43,50	43,29	43,90	44,17	43,35	43,64	0,38

Fonte: Autor

O concreto C apresentou resistência média à compressão de 53,50 MPa, módulo de elasticidade estático médio de 43,63 GPa e módulo de elasticidade dinâmico médio de 43,64 GPa. Esses valores indicam um desempenho expressivamente superior em relação aos concretos A e B na mesma idade de cura, demonstrando maior rigidez e capacidade resistente. Os resultados gerais mostram coerência e confirmam a boa qualidade do concreto.

Após a apresentação e análise dos resultados aos 7 dias de idade, procede-se à avaliação dos concretos A, B e C aos 28 dias. Essa etapa é fundamental, pois representa o período de referência para a resistência característica do concreto, conforme estabelecido pelas normas técnicas. Os ensaios realizados permitem observar o desenvolvimento das propriedades mecânicas ao longo do tempo e avaliar a relação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade, estático e dinâmico, com o avanço da cura.

Tabela 7 — Resultados experimentais do concreto A aos 28 dias

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	19,90	18,70	18,40	18,70	19,80	19,10	0,70
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	30,80	31,70	39,20	33,90	4,61
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	31,20	32,91	33,24	33,19	33,25	32,76	0,88

Fonte: Autor

Aos 28 dias o concreto A apresentou resistência média à compressão de 19,10 MPa, módulo de elasticidade estático médio de 33,90 GPa e módulo de elasticidade dinâmico médio de 32,76 GPa. Em comparação aos resultados de 7 dias, observa-se um aumento moderado na resistência e no módulo estático, indicando continuidade no processo de hidratação e ganho de rigidez. De modo geral, o concreto A

apresentou comportamento compatível com concretos de baixa a média resistência, com evolução esperada das propriedades ao longo do tempo de cura.

Tabela 8 — Resultados experimentais do concreto B aos 28 dias

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)		45,00	44,60	43,00	45,50	44,58	0,94
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	40,20	38,40	31,90	36,83	4,37
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	36,47	36,04	36,23	36,46	36,16	36,27	0,19

Fonte: Autor

O concreto B apresentou resistência média à compressão de 44,58 MPa, módulo de elasticidade estático médio de 36,83 GPa e módulo de elasticidade dinâmico médio de 36,27 GPa. Em relação aos resultados de 7 dias, observa-se um pequeno acréscimo na resistência à compressão, indicando que o concreto já havia atingido grande parte da sua capacidade resistente na idade inicial. O módulo de elasticidade estático apresentou aumento expressivo, refletindo maior rigidez do material após o período completo de cura. Os baixos desvios padrão, especialmente para o módulo de elasticidade dinâmico, evidenciam boa uniformidade e consistência entre os corpos de prova ensaiados.

Tabela 9 — Resultados experimentais do concreto C aos 28 dias

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	61,50	60,90	59,40	62,30	61,90	61,20	1,13
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	39,00	40,10	51,00	43,37	6,63
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	42,43	42,58	42,13	44,28	42,43	42,77	0,86

Fonte: Autor

O concreto C apresentou resistência média à compressão de 61,20 MPa, módulo de elasticidade estático médio de 43,37 GPa, e módulo de elasticidade dinâmico médio de 42,77 GPa. Em relação aos resultados de 7 dias, observa-se um ganho significativo de resistência, indicando um concreto de bom desempenho estrutural. O desvio padrão do módulo estático foi mais elevado, sugerindo certa dispersão dos

resultados individuais, mas ainda assim, os valores médios obtidos confirmam o comportamento consistente e a superioridade do concreto C em comparação aos demais traços analisados.

De modo geral, os concretos apresentaram comportamentos distintos quanto às propriedades mecânicas avaliadas. O concreto A mostrou ganho moderado de resistência entre 7 e 28 dias, característico de concretos de menor resistência. O concreto B teve desempenho intermediário, com maiores valores de resistência e rigidez em relação ao A, enquanto o concreto C apresentou os melhores resultados, evidenciando um material de alto desempenho e boa uniformidade.

Com base nos resultados apresentados, foram também avaliadas a variação percentual dos módulos de elasticidade entre as idades de 7 e 28 dias e a dispersão dos valores obtidos em cada idade de cura. Essas análises complementares permitem compreender tanto a evolução das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo quanto o grau de uniformidade dos ensaios realizados.

As tabelas correspondentes a essas análises encontram-se apresentadas no **Apêndice A**, onde são apresentadas a variação dos módulos de elasticidade, estático e dinâmico, entre 7 e 28 dias, e a dispersão dos resultados em torno das médias de cada concreto.

4.2. Resultados teóricos

Nesta etapa, são apresentados os resultados teóricos do módulo de elasticidade do concreto, obtidos a partir das expressões recomendadas por diferentes normas técnicas, como a NBR 6118:2023, ACI 318-19, Eurocode 2 e também através do modelo proposto por Popovics.

As estimativas foram realizadas a partir da resistência individual à compressão simples de cada corpo de prova e em alguns casos específicos através da média, conforme os resultados obtidos nos ensaios realizados aos 7 e 28 dias de cura.

Tabela 10 – Estimativa do módulo de elasticidade aos 7 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto A

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	17,90	16,50	16,50	16,70	16,30	16,78	0,64
Módulo de elasticidade estimado segundo a NBR 6118:2023 (GPa)	-	-	26,80	30,15	29,58	28,82	1,79

Fonte: Autor

Os valores teóricos do módulo de elasticidade para o concreto A aos 7 dias foram estimados a partir de resistências individuais a compressão obtida no ensaio correspondente, utilizando a relação prevista na NBR 6118:2023. O módulo de elasticidade estático médio obtido foi de 28,82 GPa, com variação entre 26,80 GPa e 30,15 GPa e desvio padrão de 1,79 GPa. Apesar das pequenas diferenças nas resistências à compressão, observou-se uma variação nos valores estimados do módulo de elasticidade estático entre os corpos de prova, refletindo a sensibilidade da equação normativa a variações individuais de resistência.

Tabela 11 – Estimativa do módulo de elasticidade aos 7 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto B

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	41,50	40,00	43,00	41,10	41,40	41,40	1,07
Módulo de elasticidade estimado segundo a NBR 6118:2023 (GPa)	-	-	-	27,67	27,28	27,47	0,27

Fonte: Autor

Para o concreto B, módulo de elasticidade estático médio obtido foi de 27,47 GPa, com variação entre 27,67 GPa e 27,28 GPa e desvio padrão de 0,27 GPa, indicando consistência na aplicação da expressão normativa e coerência com as resistências utilizadas no cálculo.

Tabela 12 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 7 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto C

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	53,10	54,30	54,50	46,60	43,20	50,34	5,14
Módulo de elasticidade estimado segundo a NBR 6118:2023 (GPa)	-	-	39,37	40,30	36,09	38,59	2,21

Fonte: Autor

Analisando os resultados do concreto C aos 7 dias podemos observar que o módulo médio obtido foi de 38,59 GPa, com variação entre 36,09 GPa e 40,30 GPa e desvio padrão de 2,21 GPa. Apesar de algumas inversões individuais entre resistência e módulo de elasticidade estático em certos corpos de prova, os resultados apresentam comportamento coerente e consistente para a idade de cura de 7 dias.

Após a avaliação dos resultados aos 7 dias, procede-se com a avaliação dos resultados para os concretos A, B e C aos 28 dias, permitindo observar a evolução do módulo de elasticidade estático estimado em função do ganho de resistência à compressão e do desenvolvimento da rigidez do material ao longo do período de cura.

Tabela 13 — Estimativa do módulo de elasticidade aos 28 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto A

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	19,90	18,70	18,40	18,70	19,80	19,10	0,70
Módulo de elasticidade estimado segundo a 6118:2023 (GPa)	29,98	29,06	28,83	29,06	29,90	29,26	0,57

Fonte: Autor

Aos 28 dias, o concreto A apresentou resistência à compressão média de 19,10 MPa e módulo de elasticidade estático médio estimado de 29,26 GPa, com variação entre 28,83 GPa e 29,98 GPa e desvio padrão de 0,57 GPa. Os resultados estimados apresentam baixa dispersão, indicando consistência na aplicação da expressão normativa e coerência com as resistências à compressão utilizadas.

Tabela 14 – Estimativa do módulo de elasticidade aos 28 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto B

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	44,80	45,00	44,60	43,00	45,50	44,58	0,94
Módulo de elasticidade estimado segundo a 6118:2023 (GPa)	44,98	45,08	44,88	44,07	45,33	44,76	0,64

Fonte: Autor

Analizando os resultados, o concreto B apresentou resistência à compressão média de 44,58 MPa e módulo de elasticidade estático médio estimado de 44,76 GPa, com variação entre 44,07 GPa e 45,33 GPa e desvio padrão de 0,64 GPa. Os valores estimados apresentam baixa dispersão, indicando boa consistência do modelo normativo.

Tabela 15 – Estimativa do módulo de elasticidade aos 28 dias segundo a NBR 6118:2023 – Concreto C

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	61,50	60,90	59,40	62,30	61,90	61,20	1,13
Módulo de elasticidade estimado segundo a 6118:2023 (GPa)	50,28	50,14	49,80	50,46	50,37	50,21	0,26

Fonte: Autor

Os valores teóricos do módulo de elasticidade para o concreto C aos 28 dias mostraram uma excelente uniformidade entre os corpos de prova, com resistência média à compressão de 61,20 MPa e módulo de elasticidade estático médio estimado de 50,21 GPa, com variação de 49,80 GPa a 50,46 GPa e desvio padrão de apenas 0,26 GPa. A variação mínima observada entre os corpos de prova reflete a relação direta com as resistências individuais à compressão, evidenciando a consistência e a qualidade do concreto.

De forma geral, os resultados obtidos pelo cálculo do módulo de elasticidade estático conforme a NBR 6118:2023 mostraram valores consistentes entre os corpos de prova, com variações compatíveis com as diferenças individuais de resistência à compressão.

A seguir, apresentam-se os resultados teóricos obtidos segundo a norma americana ACI 318-19, permitindo uma análise comparativa entre as normas. As tabelas a seguir detalham os valores estimados do módulo de elasticidade para cada corpo de prova aos 7 e 28 dias, incluindo médias e desvios padrões, evidenciando as variações individuais.

Tabela 16 – Módulo de elasticidade estimado através da Norma ACI 318-19 aos 7 dias - Concreto A

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	17,90	16,50	16,50	16,70	16,30	16,78	0,64
Módulo de elasticidade estimado segundo a norma ACI 318-19 (GPa)	19,88	19,09	19,49	19,21	18,98	19,22	0,26

Fonte: Autor

Observa-se que os resultados estimados conforme a norma americana ACI 318-19 aos 7 dias apresentaram valores de módulo de elasticidade estático próximos entre si, com média de 19,22 GPa, com variação de 18,98 GPa e 19,88GPa e desvio padrão de 0,26 GPa. A baixa dispersão observada indica boa consistência nas estimativas normativas e estabilidade no comportamento previsto do concreto.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 7 dias – Concreto B

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	41,50	40,00	43,00	41,10	41,40	41,40	1,07
Módulo de elasticidade estimado segundo a norma ACI 318-19 (GPa)	30,28	29,73	30,00	30,13	30,24	30,12	0,12

Fonte: Autor

Aos 7 dias, o concreto B apresentou módulo de elasticidade estático médio estimado de 30,12 GPa, com variação entre 29,73 GPa e 30,28 GPa e desvio padrão de apenas 0,12 GPa. Os valores estimados apresentam baixa dispersão, indicando uma excelente consistência do modelo normativo.

Tabela 18 – Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 7 dias – Concreto C

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	53,10	54,30	54,50	46,60	43,20	50,34	5,14
Módulo de elasticidade estimado segundo a norma ACI 318-19 (GPa)	34,25	34,63	34,44	32,08	30,89	32,47	1,81

Fonte: Autor

Os resultados estimados demonstram boa coerência entre os valores obtidos, com resistência média à compressão de 50,34MPa, com o módulo de elasticidade estático médio de 32,47 GPa, variando de 30,89 GPa a 34,63GPa e um desvio padrão de 1,81 GPa. Observa-se uma variação moderada entre os corpos de prova, associada às diferenças individuais de resistência, mas ainda compatível com um comportamento uniforme para a idade de cura analisada.

Na sequência, apresenta-se as tabelas com os valores estimados de módulo de elasticidade estático segundo a norma americana ACI 318-19, para os corpos de prova aos 28 dias de idade, incluindo as médias e desvios padrões correspondentes, com o intuito de avaliar a evolução das propriedades mecânicas do concreto em relação aos resultados obtidos aos 7 dias.

Tabela 19 – Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 28 dias – Concreto A

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	19,90	18,70	18,40	18,70	19,80	19,10	0,70
Módulo de elasticidade estimado segundo a norma ACI 318-19 GPa)	20,97	20,32	20,16	20,32	20,91	20,47	0,40

Fonte: Autor

Os resultados obtidos aos 28 dias indicam um aumento na resistência à compressão e, conseqüentemente, nos valores estimados do módulo de elasticidade em comparação aos resultados de 7 dias. O valor de resistência à compressão média obtida aos 28 dias foi de 19,10 MPa, com módulo de elasticidade estático médio de 20,47 GPa, variando de 20,32 GPa a 20,97 GPa, com desvio padrão de 0,40 GPa, observa-se baixa dispersão entre as estimativas, indicando comportamento previsível e coerente do concreto na idade de cura analisada.

Tabela 20 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 28 dias – Concreto B

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	44,80	45,00	44,60	43,00	45,50	44,58	0,94
Módulo de elasticidade estimado segundo a norma ACI 318-19 (GPa)	31,46	31,53	31,39	30,82	31,70	31,30	0,45

Fonte: Autor

Os resultados obtidos aos 28 dias para o concreto B indicam valores consistentes, com resistência média à compressão de 44,58 MPa e módulo de elasticidade estático médio de 31,30 GPa, variando de 30,82 GPa a 31,39 GPa e desvio padrão de 0,45 GPa, refletindo pequenas variações entre os corpos de prova e comportamento uniforme para a idade de cura analisada.

Tabela 21 — Módulo de elasticidade estimado através da norma ACI 318-19 aos 28 dias – Concreto C

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	61,50	60,90	59,40	62,30	61,90	61,20	1,13
Módulo de elasticidade estimado segundo a norma ACI 318-19 (GPa)	36,86	36,68	36,22	37,10	36,98	36,77	0,47

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para o concreto C aos 28 dias indicam uma boa uniformidade entre os corpos de prova, com resistência à compressão média de 61,20 MPa e módulo de elasticidade médio de 36,77 GPa, variando de 36,68 a 37,10 GPa e desvio padrão de 0,47 GPa. A baixa dispersão dos valores estimados indica comportamento homogêneo do concreto e confirma a coerência das propriedades previstas para a idade de cura analisada.

Dando continuidade à análise, apresentam-se os resultados teóricos obtidos segundo a norma Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004), que estabelece uma expressão para o cálculo do módulo de elasticidade médio do concreto (E_{cm}), em função da resistência à compressão média. Como a norma não fornece uma equação específica para o módulo de elasticidade estático inicial (E_{ci}), adotou-se um fator multiplicativo de 1,05 sobre o valor de módulo de elasticidade médio (E_{cm}), conforme prática

observada em estudos comparativos, de modo a estimar o módulo inicial e possibilitar a análise em conjunto com as demais normas.

As tabelas a seguir apresentam os resultados de módulo de elasticidade obtidos para os concretos A, B e C aos 7 e aos 28 dias, de acordo com o procedimento descrito.

Tabela 22 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 7 dias - Concreto A

	Média
Compressão simples (MPa)	16,78
Módulo de elasticidade estimado segundo o Eurocode 2	26,98

Fonte: Autor

A estimativa pelo Eurocode 2 resultou em um módulo de elasticidade médio de 26,98 GPa, valor condizente com a idade de 7 dias do concreto e o procedimento de cálculo adotado.

Tabela 23 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 7 dias - Concreto B

Corpo de prova	Média
Compressão simples (MPa)	41,40
Módulo de elasticidade estimado segundo o Eurocode 2	35,38

Fonte: Autor

A estimativa segundo o Eurocode 2 resultou em um módulo de elasticidade médio de 35,38 GPa, valor ligeiramente superior ao experimental, indicando uma tendência de superestimação pela norma para a idade de 7 dias.

Tabela 24 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 7 dias - Concreto C

Corpo de prova	Média
Compressão simples (MPa)	53,50
Módulo de elasticidade estimado segundo o Eurocode 2	38,20

Fonte: Autor

A estimativa segundo o Eurocode 2 resultou em um módulo de elasticidade médio de 38,20 GPa, valor compatível com o desempenho esperado do concreto B na idade de 7 dias

Dando continuidade à análise, são apresentados a seguir os resultados estimados do módulo de elasticidade para os concretos aos 28 dias, obtidos conforme o procedimento descrito anteriormente. Esses valores permitem observar o comportamento do material em idade mais avançada de cura.

Tabela 25 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 28 dias - Concreto A

Corpo de prova	Média
Compressão simples (MPa)	19,10
Módulo de elasticidade estimado segundo o Eurocode 2	28,05

Fonte: Autor

A estimativa resultou em um módulo de elasticidade médio de 28,05 GPa, segundo o Eurocode 2, indicando um valor inferior ao experimental em 28 dias, nesse caso que o concreto A apresentou um comportamento ligeiramente mais rígido do que o previsto pelas expressões normativas.

Tabela 26 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 28 dias - Concreto B

Corpo de prova	Média
Compressão simples (MPa)	44,58
Módulo de elasticidade estimado segundo o Eurocode 2	36,17

Fonte: Autor

A estimativa resultou em um módulo de elasticidade médio de 36,17 GPa, sendo muito próximo ao resultado experimental em 28 dias, indicando um comportamento condizente com a evolução esperada das propriedades do concreto B.

Tabela 27 — Módulo de elasticidade estimado segundo a norma europeia Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) aos 28 dias - Concreto C

Corpo de prova	Média
Compressão simples (MPa)	61,20
Módulo de elasticidade estimado segundo o Eurocode 2	39,78

Fonte: Autor

O módulo de elasticidade médio estimado segundo as expressões normativas foi de 39,78 GPa, sendo ligeiramente menor do que o módulo de elasticidade estático obtido experimentalmente, indicando que o concreto C apresentou um comportamento mais rígido do que o previsto pela expressão normativa, embora ainda compatível com o desempenho esperado.

Dando continuidade à análise, apresentam-se a seguir os resultados estimados do módulo de elasticidade estático obtidos a partir dos valores do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando a relação empírica proposta por Popovics. Essa correlação permite estimar o módulo estático com base em medições dinâmicas, considerando a influência das propriedades internas do concreto e a relação não linear entre os dois parâmetros.

Tabela 28 – Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 7 dias – Concreto A

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	41,50	40,00	43,00	41,10	41,40	41,40	1,07
Módulo de elasticidade estático estimado pelo dinâmico (Popovics)	22,67	22,64	22,61	22,90	23,05	22,85	0,22

Fonte: Autor

A estimativa resultou em um módulo de elasticidade estático médio de 22,85 GPa e um desvio padrão de 0,22 GPa, evidenciando baixa dispersão entre os corpos de prova. Esse comportamento indica boa consistência nos resultados obtidos a partir da correlação de Popovics, sendo uma estimativa conservadora para o concreto A aos 7 dias de idade quando comparado aos resultados experimentais.

Tabela 29 – Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 7 dias – Concreto B

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	41,50	40,00	43,00	41,10	41,40	41,40	1,07
Módulo de elasticidade estático estimado pelo Dinâmico (Popovics)	26,27	26,38	25,83	25,89	26,38	26,03	0,30

Fonte: Autor

A estimativa resultou em um módulo de elasticidade estático médio de 26,03 GPa e um desvio padrão de 0,30 GPa, evidenciando baixa dispersão entre os corpos de prova. O modelo de Popovics apresenta um resultado conservador para o concreto B aos 7 dias de idade.

Tabela 30 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 7 dias –
Concreto C

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	53,10	54,30	54,50	46,60	43,20	50,34	5,14
Módulo de elasticidade estático estimado pelo Dinâmico (Popovics)	34,34	33,95	34,61	34,82	34,03	34,48	0,41

Fonte: Autor

A estimativa resultou em um módulo de elasticidade estático médio de 34,48 GPa, sendo conservador em relação ao resultado experimental. O desvio padrão de 0,41 GPa, apresenta baixa variação entre os corpos de prova.

A seguir, apresentam-se os resultados estimados do módulo de elasticidade estático para os concretos A, B e C na idade de 28 dias, obtidos a partir do módulo de elasticidade dinâmico utilizando a correlação proposta por Popovics (2008). Esses valores permitem avaliar a evolução do comportamento mecânico do concreto ao longo do período de cura.

Tabela 31 — Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 28 dias –
Concreto A

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	17,90	16,50	16,50	16,70	16,30	16,78	0,64
Módulo de elasticidade estático estimado pelo Dinâmico (Popovics)	22,46	23,84	23,90	24,04	24,14	24,03	0,12

Fonte: Autor

O módulo de elasticidade estático médio do concreto A aos 28 dias foi de 24,03 GPa, com desvio padrão de 0,12 GPa apresentando baixa variação entre os resultados. Os resultados obtidos pelo modelo de Popovics se mostraram conservadores quando comparados aos resultados experimentais obtidos para o concreto A aos 28 dias.

Tabela 32 – Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 28 dias – Concreto B

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	44,80	45,00	44,60	43,00	45,50	44,58	0,94
Módulo de elasticidade estático estimado pelo Dinâmico - Popovics	27,83	27,59	27,65	27,93	27,72	27,77	0,15

Fonte: Autor

O módulo de elasticidade estático médio do concreto B aos 28 dias foi de 27,77 GPa, com desvio padrão de 0,15 GPa, evidenciando baixa variação entre os corpos de prova e indicando que a estimativa pelo modelo de Popovics se mantém conservadora frente aos resultados experimentais.

Tabela 33 – Módulo de elasticidade estático estimado por Popovics aos 28 dias – Concreto C

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)	Média	Desvio Padrão
Compressão simples (MPa)	61,50	60,90	59,40	62,30	61,90	61,20	1,13
Módulo de elasticidade estático estimado pelo Dinâmico (Popovics)	33,40	33,36	32,76	34,77	33,08	33,54	1,08

Fonte: Autor

O módulo de elasticidade estático médio do concreto C aos 28 dias foi de 33,54 GPa, com desvio padrão de 1,08 GPa, indicando maior dispersão entre os corpos de prova, possivelmente decorrente das variações nas resistências à compressão. Mas, ainda assim, a estimativa através do modelo de Popovics continua sendo conservadora em relação os resultados experimentais.

De forma geral, ao analisar os resultados dos módulos de elasticidade aos 7 dias para os concretos A, B e C, pode-se observar que o módulo de elasticidade estático aumenta acompanhando com a resistência à compressão. Comparando as estimativas teóricas, observa-se que a NBR 6118:2023 apresenta valores próximos do experimental, especialmente para concretos de baixa resistência e média resistência, enquanto o ACI 318-19 tende a subestimar concretos de baixa resistência e aproxima-se melhor para concretos intermediários. O Eurocode 2 apresenta valores intermediários, levemente subestimando concretos de baixa resistência e

superestimando os intermediários. O modelo de Popovics fornece estimativas mais conservadoras, sempre abaixo dos valores experimentais. Em geral, a NBR 6118:2023 forneceu a estimativa mais consistente com os resultados experimentais para a idade de 7 dias.

Aos 28 dias, os resultados experimentais mostraram aumento do módulo de elasticidade com a resistência à compressão. Comparando as estimativas teóricas, a NBR 6118:2023 tende a subestimar concretos de baixa resistência como o concreto A, e superestimar concretos de alta resistência como o concreto C, fornecendo valores próximos aos experimentais para concretos intermediários como o concreto B. O Eurocode 2 fornece estimativas relativamente próximas dos resultados experimentais, destacando-se no concreto B, onde se aproximou muito do valor experimental. O método de Popovics apresentou valores conservadores, sempre inferiores aos experimentais. De forma geral, aos 28 dias, o Eurocode 2 apresentou estimativas próximas aos resultados experimentais para os concretos B e C, enquanto a NBR 6118:2023 se aproximou mais do concreto A, enquanto Popovics forneceu uma estimativa mais conservadora do módulo de elasticidade, tendendo a subestimar em todos os concretos.

Pode-se concluir que, entre as normas analisadas, a NBR 6118:2023 foi a que apresentou melhor ajuste global aos resultados experimentais, mostrando coerência tanto aos 7 quanto aos 28 dias. O Eurocode 2 demonstrou desempenho satisfatório em concretos de alta resistência, mas com maior variação entre idades. Já o modelo de Popovics manteve caráter conservador, e o ACI 318-19 apresentou maior dispersão em relação aos valores experimentais.

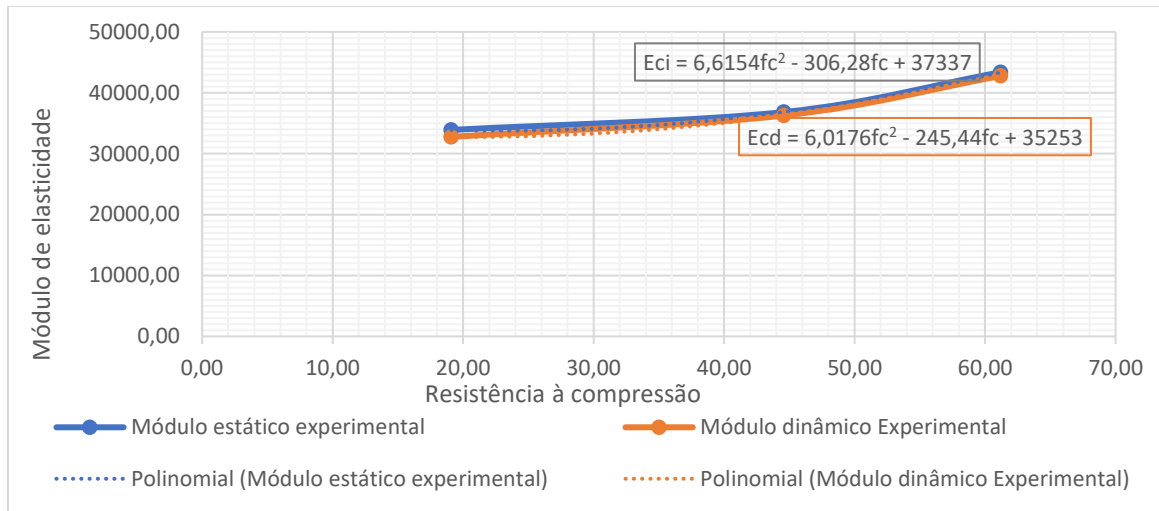
4.3. Análise comparativa dos resultados

Este capítulo compara os resultados experimentais do módulo de elasticidade do concreto com estimativas da NBR 6118:2023, do Eurocode e do modelo de Popovics. Os gráficos elaborados mostram padrões de comportamento, proximidade das normas em relação aos dados experimentais e possíveis desvios.

A análise considera diferentes idades de cura e ensaios: módulo estático (E_{ci}), medido em prensa hidráulica, e módulo dinâmico (E_d), obtido através de ondas ultrassônicas no equipamento Sonelastic. Isso permite interpretar de forma integrada o desempenho do concreto e avaliar a precisão das normas frente à variabilidade dos resultados.

Para iniciar a análise comparativa, o gráfico a seguir apresenta valores experimentais de módulo de elasticidade estático e do módulo dinâmico aos 28 dias, permitindo observar diretamente o comportamento dos concretos ensaiados.

Gráfico 1 – Comparativo entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico experimental aos 28 dias



Fonte: Autor

O gráfico 1 apresenta curvas de tendência ajustadas que permitem estimar o módulo de elasticidade em função da resistência à compressão.

As relações obtidas podem ser expressas pelas seguintes equações:

Estimativa para o módulo de elasticidade estático:

$$E_{ci} = 6,6154 \times f_c^2 - 306,28 \times f_c + 37337 \quad \text{Equação 12}$$

Estimativa para o módulo de elasticidade dinâmico:

$$E_{cd} = 6,0176 \times f_c^2 - 245,44 \times f_c + 35253 \quad \text{Equação 13}$$

Sendo:

E_{ci} – Módulo de elasticidade estático

E_{cd} – Módulo de elasticidade dinâmico

f_c – Resistência à compressão

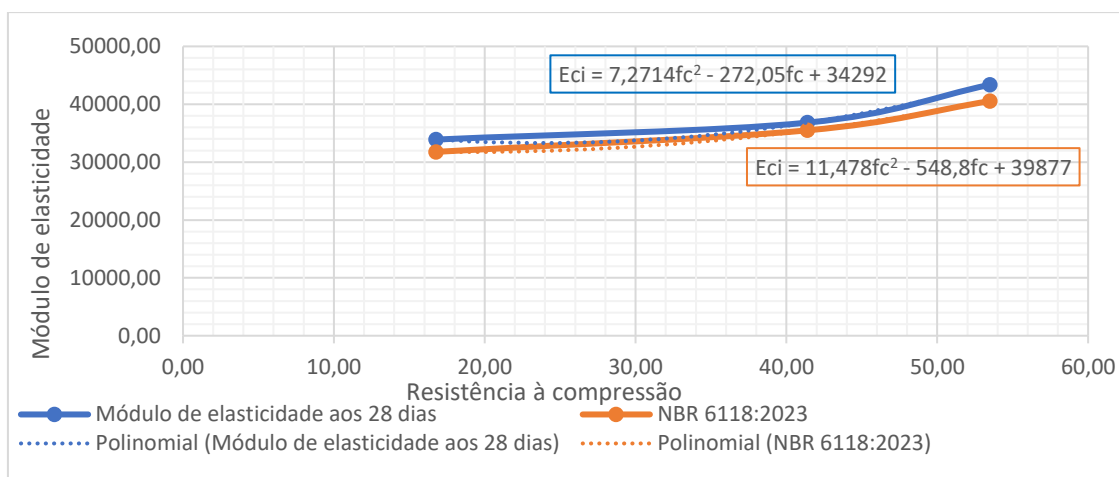
As Equações 12 e 13 correspondem às curvas de tendência apresentadas no gráfico e permitem dar continuidade à análise dos resultados.

Pode-se observar a comparação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico experimental aos 28 dias, em função da resistência à compressão dos concretos ensaiados. Os pontos apresentam os valores experimentais médios de cada concreto, enquanto as linhas de tendência polinomiais ajustadas evidenciam o comportamento médio dos dados.

Observa-se que o módulo de elasticidade estático apresentou valores ligeiramente superiores ao módulo de elasticidade dinâmico para todas as resistências analisadas. Ambos os módulos aumentaram com a resistência à compressão, e o comportamento quadrático das curvas ajustadas confirma as relações apresentadas no gráfico. As expressões polinomiais apresentadas demonstram forte correlação entre as variáveis, permitindo estimar o módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão (ou inversamente) dentro da faixa analisada.

Dando continuidade à análise, o gráfico 2 apresenta a comparação entre os valores experimentais de módulo de elasticidade estático aos 7 dias e os valores estimados segundo a expressão normativa apresentada pela NBR 6118:2023. Essa etapa permite avaliar diferenças entre o comportamento real e o previsto pela norma.

Gráfico 2 — Comparativo entre o módulo de elasticidade estático experimental e estimado pela NBR 6118:2023 aos 7 dias



Fonte: Autor

As relações polinomiais apresentadas no gráfico podem ser expressas pelas seguintes equações:

Estimativa com base nos resultados experimentais para o módulo de elasticidade estático aos 7 dias:

$$E_{ci} = 7,2714 \times f_c^2 - 272,05 \times f_c + 34292 \quad \text{Equação 14}$$

Estimativa segundo a NBR 6118:2023 para o módulo de elasticidade estático aos 7 dias:

$$E_{ci} = 11,478 \times f_c^2 - 548,8 \times f_c + 39877 \quad \text{Equação 15}$$

Sendo:

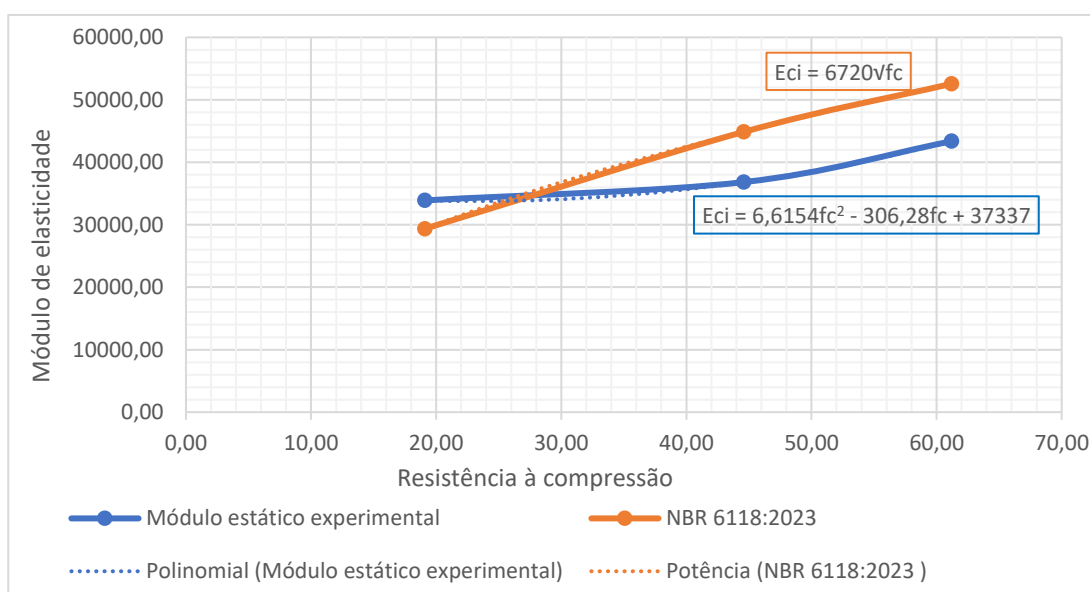
E_{ci} – Módulo de elasticidade estático

f_c – Resistência à compressão

Observa-se que, aos 7 dias, os valores experimentais de módulo de elasticidade apresentam boa proximidade com os estimados pela NBR 6118:2023, embora ligeiramente superiores para todas as resistências analisadas. Ambos os conjuntos de dados exibem crescimento não linear com o aumento da resistência à compressão, evidenciado pelas curvas polinomiais ajustadas. Essa tendência confirma a correlação entre o ganho de rigidez e o aumento da resistência do concreto, indicando que, mesmo em idades iniciais, o modelo normativo fornece estimativas coerentes com o comportamento experimental. As equações polinomiais apresentadas no gráfico demonstram elevada correlação entre os resultados, reforçando a consistência entre os valores experimentais e os previstos pela NBR 6118:2023 dentro da faixa de resistência analisada.

O gráfico 3, apresenta a comparação entre o módulo de elasticidade estático experimental e o estimado pela NBR 6118:2023 aos 28 dias, o que possibilita visualizar a evolução do módulo do concreto na fase final de cura e o previsto pela norma.

Gráfico 3 – Comparativo entre o módulo de elasticidade estático experimental e estimado pela NBR 6118:2023 aos 28 dias



Fonte: Autor

Da mesma forma, para o gráfico 3 também foram adicionadas as equações de tendência ajustadas aos dados.

Para os valores experimentais, o ajuste que melhor representou o comportamento foi uma função polinomial, expressa por:

$$E_{ci} = 6,6154 \times f_c^2 - 306,28 \times f_c + 37337 \quad \text{Equação 16}$$

Já para os valores estimados conforme a NBR 6118:2023, a tendência foi representada por uma função potencial, dada por:

$$E_{ci} = 6720 \times \sqrt{f_c} \quad \text{Equação 17}$$

Sendo:

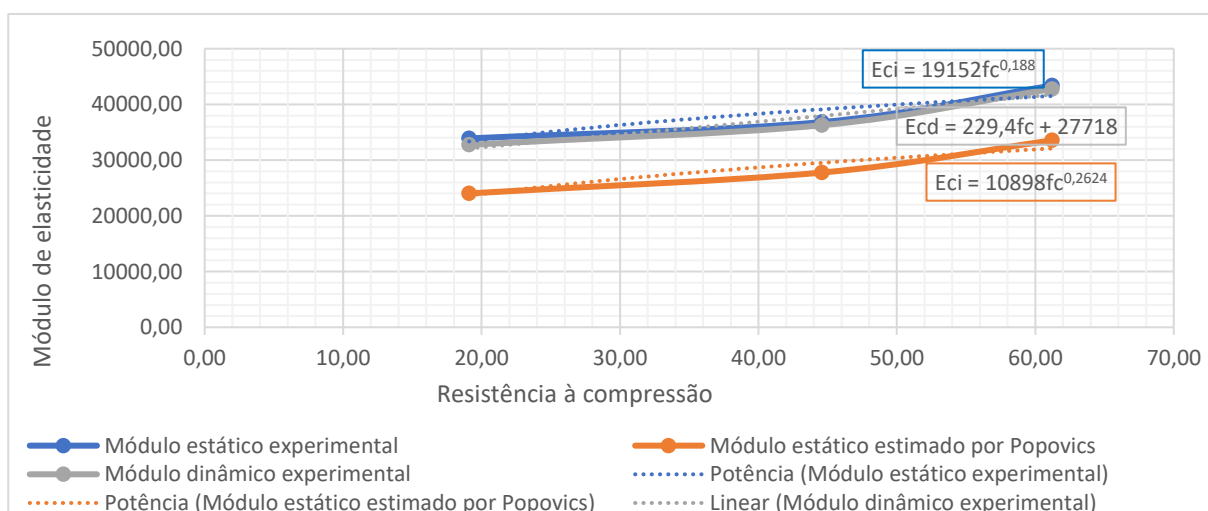
E_{ci} – Módulo de elasticidade estático

f_c – Resistência à compressão

Diferentemente do comportamento aos 7 dias, a norma passou a superestimar os valores experimentais, especialmente para concretos de maior resistência e subestimar os valores para concretos de baixa e média resistência. Ainda assim, ambas as curvas indicam tendência crescente, reforçando a correlação positiva entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. As equações apresentadas no gráfico (modelo polinomial para os valores experimentais e modelo potencial para os valores normativos) demonstram forte correlação entre o conjunto de dados, evidenciando que o comportamento previsto pela NBR 6118:2023 mantém coerência geral com o observado experimentalmente, apesar das variações em diferentes faixas de resistência.

Após a comparação entre os resultados experimentais e as estimativas normativas, é possível ampliar a análise considerando modelos teóricos alternativos. Entre eles, destaca-se o modelo proposto por Popovics, no qual o módulo de elasticidade estático do concreto é estimado através do módulo dinâmico determinado experimentalmente por meio de ensaios ultrassônicos.

Gráfico 4 — Comparativo entre o módulo de elasticidade estático experimental e o estimado pelo modelo de Popovics aos 28 dias



Além disso, as equações de tendência ajustadas aos dados do Gráfico 4 também foram apresentadas, permitindo uma análise quantitativa do comportamento observado. Para o módulo de elasticidade estático experimental, o ajuste que melhor representou os dados foi uma função potencial, expressa por:

$$E_{ci} = 19152 \times f_c^{0,188} \quad \text{Equação 18}$$

Para o módulo de elasticidade dinâmico experimental, o comportamento foi representado por uma função linear, dada por:

$$E_{cd} = 229,4 \times f_c + 27718 \quad \text{Equação 19}$$

Já para o módulo de elasticidade estático estimado pelo modelo de Popovics, o ajuste mais adequado também foi uma função potencial, expressa por:

$$E_{ci} = 10898 \times f_c^{0,2624} \quad \text{Equação 20}$$

Sendo:

E_{ci} – Módulo de elasticidade estático

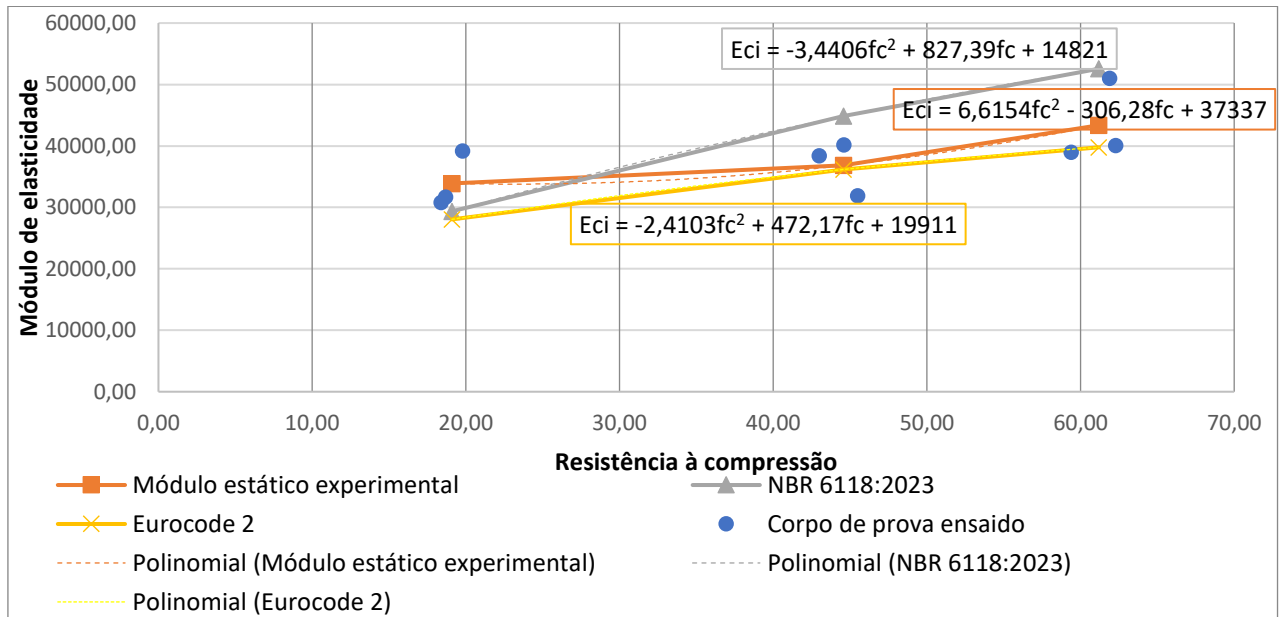
E_{cd} – Módulo de elasticidade dinâmico

f_c – Resistência à compressão

Pode-se observar que ambos os módulos aumentam com a resistência à compressão. O modelo de Popovics apresentou tendência compatível com o comportamento experimental, embora tenha subestimado os resultados de módulo estático. Essa diferença pode estar relacionada ao caráter conservador da equação proposta por Popovics. De modo geral, o método apresentou boa concordância com os resultados obtidos, confirmando a sua aplicabilidade para estimativas preliminares do módulo de elasticidade. As equações apresentadas no gráfico, ajustadas por modelos potencial e linear, demonstram elevada correlação entre as variáveis, indicando que, apesar de apresentar valores inferiores aos experimentais, o modelo de Popovics reproduz adequadamente a tendência de crescimento do módulo de elasticidade com o aumento da resistência à compressão,

O gráfico 5 apresenta a comparação entre os valores experimentais de módulo de elasticidade estático aos 28 dias e as estimativas obtidas pelas expressões da NBR 6118:2023 e do Eurocode 2. Além das curvas médias, são mostrados os corpos de prova ensaiados, permitindo observar a dispersão dos resultados obtidos no ensaio em relação aos normativos.

Gráfico 5 – Comparativo dos módulos de elasticidade experimentais e normativos aos 28 dias



Fonte: Autor

As equações de tendência ajustadas aos dados do Gráfico 5 também foram apresentadas para permitir a análise quantitativa do comportamento observado. Para o módulo de elasticidade estático experimental, o ajuste que melhor representou os dados foi uma função polinomial, expressa por

$$E_{ci} = 6,6154 \times f_c^2 - 306,28 \times f_c + 37337 \quad \text{Equação 21}$$

Para o módulo de elasticidade estimado conforme a NBR 6118:2023, o comportamento foi representado por uma função polinomial, dada por:

$$E_{ci} = -3,4406 \times f_c^2 + 827,39 \times f_c + 14821 \quad \text{Equação 22}$$

Para o módulo de elasticidade estimado pelo Eurocode 2, o ajuste mais adequado também foi uma função polinomial, expressa por:

$$E_{ci} = -2,4103 \times f_c^2 + 472,17 \times f_c + 19911 \quad \text{Equação 23}$$

Sendo:

E_{ci} – Módulo de elasticidade estático

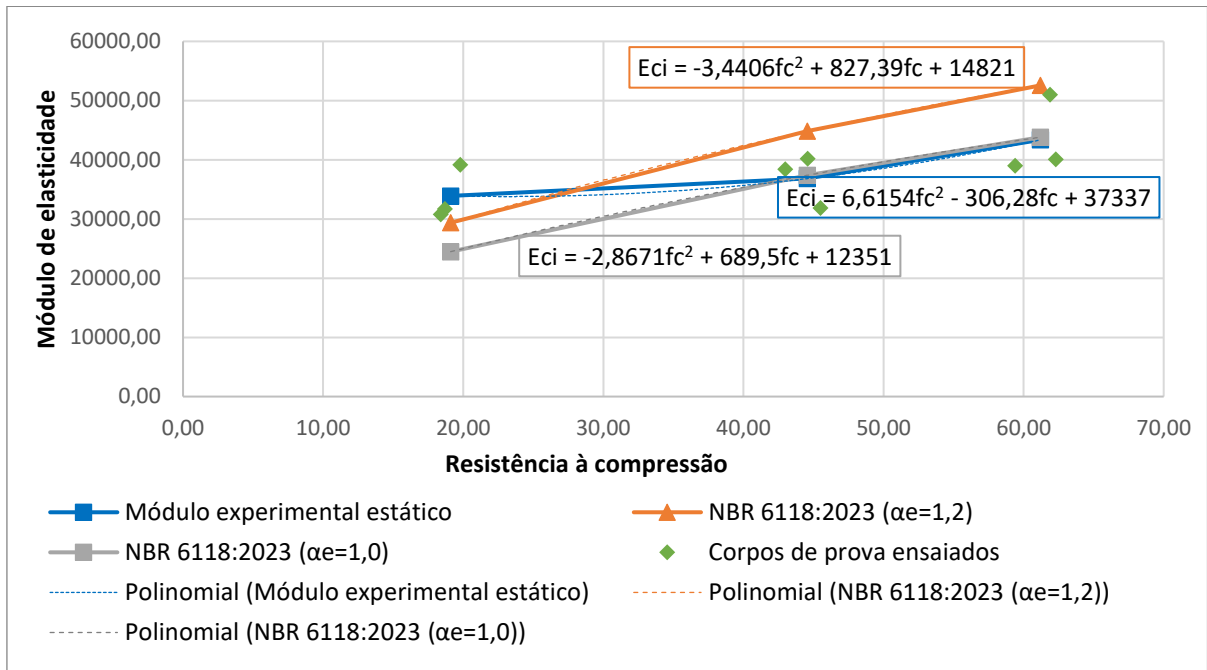
f_c – Resistência à compressão

Observa-se que os resultados experimentais do módulo de elasticidade estático se apresentam, em sua maioria, entre as estimativas fornecidas pelas normas NBR 6118:2023 e Eurocode 2, indicando boa coerência geral entre os valores obtidos em laboratório e os modelos teóricos. Nota-se que, para os concretos de menor resistência, os resultados experimentais situam-se acima dos valores previstos, evidenciando que a NBR 6118:2023 tende a subestimar o módulo nessa faixa. Por outro lado, para os concretos de maior resistência, verifica-se que a mesma norma tende a superestimar o módulo de elasticidade, enquanto os valores obtidos experimentalmente se aproximam da estimativa do Eurocode 2, que apresenta uma relação mais moderada entre resistência e rigidez.

De modo geral, a tendência polinomial ajustada aos resultados experimentais confirma esse comportamento, com crescimento mais acentuado do módulo em baixas resistências e posterior estabilização, comportamento condizente com o observado em concretos de diferentes classes de resistência. As equações apresentadas no gráfico demonstram forte correlação entre os dados experimentais e os modelos normativos, evidenciando que tanto a NBR 6118:2023 quanto o Eurocode 2 reproduzem adequadamente o comportamento global do módulo de elasticidade, com pequenas variações conforme a faixa de resistência analisada. Observa-se que a NBR 6118:2023 apresentou melhor correspondência para concretos de baixa e média resistência, enquanto a Eurocode 2 mostrou-se mais ajustada aos concretos de média e alta resistência, refletindo a diferença de calibração entre os modelos normativos.

Seguindo com a análise, o gráfico 6 apresenta a comparação entre os valores experimentais do módulo de elasticidade estático e os valores teóricos estimados pela NBR 6118:2023, considerando diferentes coeficientes de α_e . O parâmetro α_e é um fator de ajuste aplicado na equação da norma que busca representar de forma empírica, as variações no comportamento do concreto em função da sua composição, idade e condições de ensaio. Assim, a análise permite avaliar a adequação das estimativas normativas frente aos resultados obtidos experimentalmente, identificando qual valor de α_e conduz a uma melhor correlação com os dados reais.

Gráfico 6 – Comparativo dos módulos experimentais e normativos da NBR 6118:2023 para diferentes valores de α_e aos 28 dias



Fonte: Autor

As equações de tendência ajustadas aos dados do Gráfico 6 foram incluídas para permitir a análise quantitativa do comportamento observado. Para o módulo de elasticidade estático experimental, o ajuste que melhor representou os dados foi uma função polinomial, expressa por:

$$E_{ci} = 6,6154 \times f_c^2 - 306,28 \times f_c + 37337 \quad \text{Equação 24}$$

Para o módulo de elasticidade estimado conforme a NBR 6118:2023 com $\alpha_e=1,0$, o comportamento foi representado por uma função polinomial, dada por:

$$E_{ci} = -2,8671f_c^2 + 689,5 \times f_c + 12351 \quad \text{Equação 25}$$

Para o módulo de elasticidade estimado conforme a NBR 6118:2023 com $\alpha_e=1,2$, o ajuste mais adequado também foi uma função polinomial, expressa por:

$$E_{ci} = -3,4406 \times f_c^2 + 827,39 \times f_c + 14821 \quad \text{Equação 26}$$

Sendo:

E_{ci} – Módulo de elasticidade estático

f_c – Resistência à compressão

Observa-se que, para concretos de baixa e média resistência, até aproximadamente 30 MPa, a estimativa obtida com $\alpha_e = 1,2$ apresentou melhor concordância com os resultados experimentais. Por outro lado, para concretos de maior resistência, a utilização de $\alpha_e = 1,0$ resultou em valores mais próximos dos obtidos em ensaio, evidenciando que o aumento do coeficiente tende a superestimar o módulo de elasticidade nessa faixa de resistência. As equações polinomiais apresentadas no gráfico reforçam essa tendência, demonstrando que pequenas variações no coeficiente α_e influenciam significativamente a estimativa do módulo. De modo geral, observa-se que a adoção de $\alpha_e = 1,2$ fornece uma melhor representação para concretos de baixa e média resistência, refletindo a flexibilidade do modelo normativo em se ajustar a diferentes classes de concreto.

Ressalta-se que os concretos analisados foram produzidos com agregado graúdo de origem basáltica, para o qual a NBR 6118:2023 recomenda o uso de $\alpha_e = 1,2$. Ainda assim, observou-se que, para concretos de maior resistência, o coeficiente $\alpha_e = 1,0$ apresentou melhor ajuste aos resultados experimentais, indicando que a influência do tipo de agregado pode ser menos significativa em concretos de alta resistência. Dessa forma, conclui-se que o uso de $\alpha_e = 1,2$ é adequado para concretos até cerca de 30 MPa, enquanto, para resistências superiores, recomenda-se a adoção de $\alpha_e = 1,0$, proporcionando maior compatibilidade entre os valores normativos e experimentais.

Analisando de forma geral, os resultados demonstraram que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência à compressão, apresentando forte correlação entre os valores experimentais e os estimados pelas normas. A NBR 6118:2023 mostrou o melhor ajuste geral, com boa precisão para concretos de baixa e média resistência, enquanto o Eurocode 2 se aproximou mais dos resultados em concretos de média e alta resistência. O modelo de Popovics apresentou comportamento conservador, subestimando os valores experimentais, mas mantendo coerência na tendência. Verificou-se ainda que o coeficiente $\alpha_e = 1,2$ é mais adequado para concretos até cerca de 30 MPa, e $\alpha_e = 1,0$ para concretos de maior resistência.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo realizou uma análise comparativa entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto, utilizando diferentes classes de resistências e idades de cura. Os resultados mostraram que ambos os módulos de elasticidade aumentam acompanhando a resistência a compressão aos 7 e aos 28 dias, mantendo correlação direta entre a rigidez e a resistência mecânica do concreto.

Através das equações apresentadas no Gráfico 1 (Equação 12, para o módulo estático, e Equação 13 para o módulo dinâmico), verificou-se que é possível estimar o módulo de elasticidade estático e dinâmico dos corpos de prova a partir da resistência à compressão. As relações desenvolvidas demonstraram boa tendência de ajuste para os concretos estudados. Dessa forma, as expressões obtidas podem ser utilizadas como ferramentas de previsão para materiais com características semelhantes aos concretos produzidos na região de Santa Cruz do Sul, onde o agregado predominante é o basalto, desde que aplicadas dentro dos intervalos de resistência analisados neste estudo.

Observou-se que o módulo de elasticidade dinâmico apresentou valores ligeiramente superiores ao módulo estático aos 7 e 28 dias, comportamento associado à ausência de microfissuração induzida por carregamento no método dinâmico.

A comparação entre os valores experimentais e os valores estimados pelas normas técnicas evidenciou diferenças significativas. A equação da NBR 6118:2023 apresentou tendência de subestimar o módulo de elasticidade, principalmente para concretos de menores resistências e superestimar para concretos de maiores resistências. O Eurocode 2 apresentou melhor compatibilidade para concretos de maior resistência. Já o modelo de Popovics corrigiu parcialmente as discrepâncias entre os métodos, porém manteve uma leve subestimativa em relação aos valores experimentais, mostrando-se mais conservador.

As equações de regressão obtidas a partir dos dados experimentais mostraram-se, em alguns casos, mais coerentes do que a equação da NBR 6118:2023 para representar o comportamento dos concretos produzidos na região de Santa Cruz do Sul. Isso reforça a necessidade de ajustes regionais para parâmetros como o coeficiente α_e , que busca correlacionar módulo de elasticidade e resistência à compressão. Com base nos concretos ensaiados neste trabalho e nas equações obtidas no Gráfico 6, recomenda-se a adoção de $\alpha_e = 1,2$ para concretos das classes C25 a C30 e de $\alpha_e = 1,0$ para concretos das classes C35 a C40, garantindo maior

precisão nas estimativas do módulo de elasticidade para concretos produzidos em regiões onde o agregado predominante é o basalto.

De modo geral, a análise global confirma que o ensaio dinâmico, além de rápido e não destrutivo, constitui uma ferramenta eficiente e confiável para a estimativa do módulo de elasticidade do concreto, contribuindo significativamente para a precisão das análises e para maior confiabilidade no dimensionamento de projetos estruturais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Silvio Martins de. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. J. M. Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

RESISTÊNCIA à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END), Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 26, e13047, 2021. ISSN 1517-7076

Análise comparativa do Módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas. Revista ALCONPAT, c. 4, n. 2, 17p, maio-agosto. 2014.

Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 56, 2014, Natal, Anais... Natal: IBRACON, 2014.

SONELASTIC®. Determinação dos módulos de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso. Informativo técnico-científico. ATCP Engenharia Física, v. 1.5, 2021. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/images/downloads/ITC-07-IET-MOE-Concretos-PT-v1.5.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2015. Moldagem e cura de Corpos de Prova Cilíndricos e Prismáticos de concreto. Rio de Janeiro. 2015. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2018. Ensaio de compressão de Corpos de Prova. Rio de Janeiro. 2018. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1:2021. Concreto endurecido – Determinação dos Módulos de Elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos Estáticos à compressão. Rio de Janeiro. 2021. 30P.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8522-2:2021. Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro. 2021. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Rio de Janeiro. 2023. 260p

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). Farmington Hills, MI: ACI, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1. Brussels: CEN, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2013. (Bulletin 65/66, Vol. 1 and 2).

APÊNDICE A – Tabelas complementares dos resultados experimentais

Neste apêndice, são apresentadas as tabelas complementares referentes aos resultados experimentais obtidos nos ensaios de compressão simples e de módulo de elasticidade, estático e dinâmico, dos concretos A, B e C. As tabelas incluem a variação dos módulos entre as idades de 7 e 28 dias, bem como a dispersão dos resultados em relação às médias, permitindo uma análise mais detalhada do comportamento mecânico dos materiais avaliados.

Tabela A. 1 – Variação do concreto A - 7 para 28 dias

Corpo de Prova	CP1-> CP6	CP2->CP7	CP3->CP8	CP4->CP9	CP5->CP10
Compressão simples (MPa)	11,17%	13,33%	11,52%	11,98%	21,47%
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	8,83%	-0,63%	20,25%
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	-1,93%	3,65%	5,00%	3,93%	3,17%

Fonte: Autor

Tabela A. 2 – Variação do concreto B - 7 para 28 dias

Corpo de Prova	CP1-> CP6	CP2->CP7	CP3->CP8	CP4->CP9	CP5->CP10
Compressão simples (MPa)	7,95%	12,50%	3,72%	4,62%	9,90%
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	-	35,69%	11,54%
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	3,90%	2,62%	5,45%	5,30%	2,70%

Fonte: Autor

Tabela A. 3 – Variação do concreto C - 7 para 28 dias

Corpo de Prova	CP1-> CP6	CP2->CP7	CP3->CP8	CP4->CP9	CP5->CP10
Compressão simples (MPa)	15,82%	12,15%	8,99%	18,89%	16,35%
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	-5,11%	-13,95%	18,06%
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	-2,47%	-1,63%	-4,02%	0,24%	-2,12%

Fonte: Autor

Tabela A. 4 – Dispersão do módulo de elasticidade em relação à média aos 7 dias –
Concreto A

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)
Compressão simples (MPa)	17,90	16,50	16,50	16,70	16,30
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	28,30	31,90	32,60
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	31,82	31,75	31,65	31,93	32,23
Dispersão da resistência à compressão (%)	-6,67%	1,67%	1,67%	0,48%	2,86%
Dispersão do Módulo de elasticidade estático (%)	-	-	8,51%	-3,12%	-5,39%
Dispersão do Módulo de elasticidade dinâmico (%)	0,19%	0,40%	0,69%	-0,18%	-1,10%

Fonte: Autor

Tabela A. 5 – Dispersão do módulo de elasticidade em relação à média aos 7 dias –
Concreto B

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)
Compressão simples (MPa)	41,50	40,00	43,00	41,10	41,40
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	-	28,30	28,60
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	35,10	35,12	34,36	34,63	35,21
Dispersão da resistência à compressão (%)	-0,24%	3,38%	-3,86%	0,72%	0,00%
Dispersão do Módulo de elasticidade estático (%)	-	-	-	0,53%	-0,53%
Dispersão do Módulo de elasticidade dinâmico (%)	-0,62%	-0,68%	1,50%	0,73%	-0,93%

Fonte: Autor

Tabela A. 6 – Dispersão do módulo de elasticidade em relação à média aos 7 dias –
Concreto C

Corpo de prova	CP1 (7dias)	CP2 (7dias)	CP3 (7dias)	CP4 (7dias)	CP5 (7dias)
Compressão simples (MPa)	53,10	54,30	54,50	52,40	53,20
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	41,10	46,60	43,20
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	43,50	43,29	43,90	44,17	43,35
Dispersão da resistência à compressão (%)	0,75%	-1,50%	-1,87%	2,06%	0,56%
Dispersão do Módulo de elasticidade estático (%)	-	-	5,81%	-6,80%	0,99%
Dispersão do Módulo de elasticidade dinâmico (%)	0,32%	0,82%	-0,59%	-1,22%	0,67%

Fonte: Autor

Tabela A. 7 — Dispersão do módulo de elasticidade em relação à média aos 28 dias
– Concreto A

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)
Compressão simples (MPa)	19,90	18,70	18,40	18,70	19,80
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	30,80	31,70	39,20
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	31,20	32,91	33,24	33,19	33,25
Dispersão da resistência à compressão (%)	-4,19%	2,09%	3,66%	2,09%	-3,66%
Dispersão do Módulo de elasticidade estático (%)	-	-	9,14%	6,49%	-15,63%
Dispersão do Módulo de elasticidade dinâmico (%)	4,75%	-0,46%	-1,47%	-1,32%	-1,50%

Fonte: Autor

Tabela A. 8 — Dispersão do módulo de elasticidade em relação à média aos 28 dias
– Concreto B

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)
Compressão simples (MPa)	44,80	45,00	44,60	43,00	45,50
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	40,20	38,40	31,90
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	36,47	36,04	36,23	36,46	36,16
Dispersão da resistência à compressão (%)	-0,49%	-0,94%	-0,04%	3,54%	-2,06%
Dispersão do Módulo de elasticidade estático (%)	-	-	-9,14%	-4,25%	13,39%
Dispersão do Módulo de elasticidade dinâmico (%)	-0,54%	0,64%	0,12%	-0,53%	0,31%

Fonte: Autor

Tabela A. 9 — Dispersão do módulo de elasticidade em relação à média aos 28 dias
– Concreto C

Corpo de prova	CP6 (28dias)	CP7 (28dias)	CP8 (28dias)	CP9 (28dias)	CP10 (28dias)
Compressão simples (MPa)	61,50	60,90	59,40	62,30	61,90
Módulo de elasticidade estático (GPa)	-	-	39,00	40,10	51,00
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	42,43	42,58	42,13	44,28	42,43
Dispersão da resistência à compressão (%)	-0,49%	0,49%	2,94%	-1,80%	-1,14%
Dispersão do Módulo de elasticidade estático (%)			10,07%	7,53%	-17,60%
Dispersão do Módulo de elasticidade dinâmico (%)	0,80%	0,44%	1,49%	-3,52%	0,79%

Fonte: Autor



UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Av. Independência, 2293 - 96815-900 - Santa Cruz do Sul - RS
Fone: (51) 3717.7300 - Fax: (51) 3717.1855 - info@unisc.br - www.unisc.br