



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENG. ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JOÃO LUIS SOARES OLIVEIRA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE REAL E O  
TEÓRICO DE CONCRETOS DE FORTALEZA.**

**FORTALEZA**

**2019**

JOÃO LUIS SOARES OLIVEIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE REAL E O  
TEÓRICO DE CONCRETOS DE FORTALEZA.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

O47e Oliveira, João Luis Soares.  
Estudo comparativo entre o módulo de elasticidade real e o teórico de concretos de Fortaleza / João Luis Soares Oliveira. – 2019.  
53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

1. Concreto. 2. Resistência à compressão. 3. Módulo de elasticidade. I. Título.

CDD 620

---

JOÃO LUIS SOARES OLIVEIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE REAL E O  
TEÓRICO DE CONCRETOS DE FORTALEZA.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 26/11/2019

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. PhD Marcelo Silva Medeiros Junior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Mylene Melo Vieira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe, Cintia.

## AGRADECIMENTOS

No decorrer desses cinco anos de graduação muitas pessoas passaram pela minha vida, no qual algumas ganharam maior importância em relação às outras, porque influenciaram diretamente na minha caminhada e sou eternamente grato a isso. Este trabalho de conclusão de curso representa o término desta caminhada.

Começo agradecendo de forma especial a minha mãe, pelo seu amor, pela educação e ensinamento de vida que me concedeu, por sempre estar ao meu lado em minhas conquistas, por me encorajar diante das dificuldades e principalmente por ser responsável por tudo que sou hoje.

À minha namorada Drielly Braga pelo incentivo, compreensão e companheirismo, dando-me força para seguir adiante, mesmo nos momentos em que não podia estar presente.

A todos os meus professores que no decorrer da minha caminhada acadêmica sempre demonstraram interesse em ensinar, de forma especial aos docentes da escola Globomax e Joaquim Albano, além dos mestres e doutores da Universidade Federal do Ceará.

Aos funcionários do laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da UFC, em especial a Helano Wilson Pimentel pelos serviços prestados na execução dos ensaios, possibilitando assim a conclusão deste trabalho.

Ao professor Eduardo Cabral pela escolha do tema deste trabalho e pela excelente orientação no qual tornou-se possível o desenvolvimento desta pesquisa.

Às concreteiras Apodi, Supermix, Polimix e Engemix pela doação dos concretos utilizados neste trabalho.

A todos os funcionários da construtora R. Miranda que contribuíram no meu aprendizado profissional, possibilitando um contato direto com o ambiente da construção civil, em especial a Larissa Barbosa e aos engenheiros Ricardo Miranda e Alzir Lima.

## RESUMO

A modernização da arquitetura das edificações ocasiona diversos problemas de deformabilidade das estruturas, no qual se torna indispensável o conhecimento do módulo de elasticidade do concreto. Porém, os materiais empregados nos concretos no Brasil, em especial os agregados graúdos, apresentam grandes diversidades, no qual tornam os modelos de previsões normativos existentes incertos, podendo apresentar divergências entre si. Portanto, é necessária a adequação do modelo utilizado para a determinação do módulo de elasticidade, de modo que os resultados se aproximem do comportamento real da estrutura. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo estudar o módulo de elasticidade dos concretos produzidos por quatro concreteiras de Fortaleza, com base no procedimento da ABNT NBR 8522:2017 e comparar com seus respectivos valores teóricos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014. Os ensaios foram realizados para concretos com resistência característica de 25, 30 e 35 MPa, na idade igual a 28 dias. A partir dessa pesquisa foi proposta uma equação para cada concreteira analisada, incluindo um fator de correção, no qual por meio da resistência a compressão do concreto é possível estimar de forma mais precisa para a realidade local o valor do módulo de elasticidade do concreto, podendo ser utilizado pelos projetistas no cálculo estrutural.

**Palavras – chave:** Concreto. Resistência à compressão. Módulo de Elasticidade.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c do concreto.....	16
Figura 2 - A influência do ar incorporado sobre a resistência à compressão do concreto .....	17
Figura 3 - Influência da cura sobre a resistência do concreto .....	18
Figura 4 - Esquema da deformação do corpo de prova de concreto.....	19
Figura 5 - Esquema da deformação do corpo de prova de concreto.....	20
Figura 6 - Evolução da fissuração do concreto submetido a compressão axial .....	21
Figura 7 - Tipos de módulos de elasticidade .....	22
Figura 8 - Representação esquemática do carregamento para determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A - Tensão $\sigma_a$ fixa .....	24
Figura 9 - Fatores que afetam o módulo de deformação do concreto .....	26
Figura 10 - Curvas típicas de tensão–deformação de agregado, pasta endurecida e concreto submetidos a compressão uniaxial .....	26
Figura 11 - Influência da dimensão característica dos agregados graúdos no módulo de elasticidade. ....	28
Figura 12 - Preparação do concreto para análise. ....	34
Figura 13 - Preparação dos corpos de prova. ....	36
Figura 14 – Fluxograma da amostragem do estudo.....	37
Figura 15 - Cura dos corpos de prova.....	38
Figura 16 - Preparação das bases dos corpos de prova.....	38
Figura 17 - Modelo da prensa utilizada nos ensaios.....	39
Figura 18 – Detalhe do extensômetro ligado ao corpo de prova. ....	41
Figura 19 - Ensaio de módulo de elasticidade. ....	41
Figura 20 - Inconsistência do resultado do CP3 referente ao T05.....	44
Figura 21 - Inconsistência do resultado do CP1 referente ao T06.....	45
Figura 22 - Relação entre $E_{ci}$ e $f_c$ da Concreteira A .....	47
Figura 23 - Relação entre $E_{ci}$ e $f_c$ da Concreteira B .....	47
Figura 24 – Relação entre $E_{ci}$ e $f_c$ da Concreteira C .....	48
Figura 25 - Relação entre $E_{ci}$ e $f_c$ da Concreteira D .....	48



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulo de elasticidade de rochas utilizadas como agregados graúdos.....	27
Tabela 2 - Fator de correção do tipo de agregado .....	30
Tabela 3 - Tipos de cimento utilizados nos traços avaliados. ....	32
Tabela 4 – Tipos de agregados graúdos utilizados. ....	33
Tabela 5 - Tolerância para realização dos ensaios .....	39
Tabela 6 - Avaliação do ensaio à compressão pelo C <sub>Ve</sub> .....	40
Tabela 7 - Resultados f <sub>cm</sub> de todos os concretos.....	42
Tabela 8 - Resultados E <sub>cm</sub> experimental de todos os concretos. ....	43
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade. ....	46
Tabela 10 - Equações ajustadas dos resultados reais.....	49
Tabela 11 – Fator de correção $\alpha_e$ .....	50

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Justificativa.....	12
1.2	Objetivo geral.....	13
1.3	Objetivos específicos.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Resistência a compressão do concreto.....	14
2.1.1	<i>Definição de resistência à compressão</i> .....	14
2.1.2	<i>Determinação da resistência à compressão</i> .....	14
2.1.3	<i>Fatores que influenciam a resistência à compressão</i> .....	15
2.1.3.1	Relação água/cimento.....	15
2.1.3.2	Porosidade.....	16
2.1.3.3	Agregados.....	17
2.1.3.4	Cura.....	17
2.1.3.5	Forma e dimensão do corpo de prova.....	18
2.2	Módulo de elasticidade do concreto ( $E_c$ ).....	20
2.2.1	<i>Definição do módulo de elasticidade</i> .....	20
2.2.2	<i>Determinação do módulo de elasticidade</i> .....	22
2.2.3	<i>Fatores que influenciam o módulo de elasticidade</i> .....	25
2.2.3.1	Agregados graúdos.....	27
2.2.3.2	Matriz da pasta de cimento.....	28
2.2.3.3	Zona de transição.....	29
2.2.3.4	Parâmetros de ensaio.....	29
2.3	Relação entre a resistência compressão ( $f_c$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) do concreto.....	29
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	Coleta das amostras.....	32
3.2	Métodos de ensaios.....	36
4	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	42
4.1	Resistência à compressão.....	42
4.2	Módulo de Elasticidade.....	43
4.3	Relação entre $E_{ci}$ e $f_c$ .....	45
4.4	Valor do coeficiente $\alpha_e$ ajustado.....	49

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
5.1	Conclusões.....	51
5.1	Sugestões para pesquisas futuras.....	51
	REFERÊNCIAS .....	52

# 1 INTRODUÇÃO

Considerado atualmente como o principal material de construção, o concreto de cimento Portland se difundiu ao longo da história do desenvolvimento das sociedades. Segundo Helene e Andrade (2010), após sua descoberta no final do século XIX, o concreto passou a ser o material mais consumido pelo homem depois da água, dando um grande salto no desenvolvimento das civilizações. Por definição, o concreto é basicamente uma mistura de cimento, água e agregados graúdos e miúdos, no qual o cimento em contato com a água forma uma pasta aderente aos agregados, formando um sólido resistente.

No Brasil, o concreto armado é preferência de muitos construtores, devido a tradição construtiva ao longo da história, desse modo o conhecimento adequado das características do concreto, como sua resistência e deformação, é imprescritível, de modo a tornar o projeto estrutural mais próximo da resposta real da estrutura.

O concreto em seu estado endurecido apresenta algumas propriedades mecânicas importantes como sua resistência a compressão, no qual a resultante dos esforços existentes dentre do corpo deformável provoca uma redução do volume e o encurtamento do mesmo em uma determinada direção. Nunes (2005) afirma que a resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante deste material, a pesar de, em certos casos, outras características como permeabilidade, durabilidade e módulo de elasticidade possam ser mais importantes. Devido sua facilidade de obtenção, a resistência a compressão do concreto, segundo Helene e Andrade (2010), é a propriedade geralmente especificada nos projetos estruturais e no controle de qualidade. Com base nesse parâmetro, outras propriedades do concreto endurecido podem ser determinadas, como o módulo de elasticidade e a durabilidade, devido a interdependência das grandezas.

Com a necessidade de se construir edificações cada vez mais altas e esbeltas, garantindo segurança e durabilidade, foi necessário o desenvolvimento de técnicas construtivas, bem como a otimização das dosagens do concreto estrutural. No Brasil, durante várias décadas, os calculistas utilizavam resistências características variando de 10 a 25 MPa, mesmo com o advento das novas tecnologias do concreto. Porém, resistências maiores começaram a serem incorporados nos projetos, no qual juntamente com a esbeltez das estruturas, resultaram em valores maiores de deformações ao longo prazo, tornando-se praticamente obrigatório o controle do módulo de elasticidade do concreto no decorrer das obras (DJANIKIAN FILHO, 2010).

O módulo de elasticidade do concreto é uma propriedade difícil de ser mensurável, diferentemente da resistência a compressão, de modo que a especificação para o projeto do seu valor é obtida por meio de expressões empíricas, estabelecidas por diversas normas, com base no valor da resistência características a compressão (MELO NETO; HELENE, 2002). Porém, os valores adotados como determinístico absoluto pelos projetistas pode ocasionar diversos problemas nas obras, devido a não confirmação dos valores por parte do controle tecnológico, tornando as expressões incertas. Isso ocorre devido à grande diversidade dos materiais que constituem o concreto, principalmente os agregados graúdos, portanto, é necessário a adequação do modelo utilizado para a determinação do módulo de elasticidade, de modo que os resultados se aproximem da realidade local, conforme sugere Shehata (2005).

### **1.1 Justificativa**

Nos dias atuais o risco de ocorrer deformações excessivas nas edificações de concreto não pode ser desprezado, devido a necessidade de se construir edificações cada vez mais altas e esbeltas, garantindo segurança e desempenho das estruturas. Para tal, foi necessário o desenvolvimento de técnicas construtivas, bem como o conhecimento mais aprimorado dos materiais utilizados nos projetos. Tais deformações estão relacionadas diretamente com a rigidez do concreto, no qual é parametrizada através da determinação do módulo de elasticidade.

A simples interdependência das propriedades do concreto endurecido, permite que o módulo de elasticidade seja definido através dos valores da resistência a compressão do concreto, porém as equações sugeridas por diversas normas, apresentam divergências nos resultados, devido aos inúmeros fatores que influenciam o módulo de elasticidade, em especial, a natureza dos agregados graúdos.

Portanto, neste trabalho são propostas equações que estimam o módulo de elasticidade mais realista para os concretos fornecidos por centrais dosadoras de Fortaleza, por meio dos valores da resistência a compressão, além de coeficientes de ajustes para a adequabilidade da equações normativa, no qual poderá ser utilizado em projetos locais, por considerar a natureza dos agregados existentes nas regiões próximas.

## **1.2 Objetivo geral**

Comparar os valores obtidos dos módulos de elasticidade dos concretos produzidos por concreteiras de Fortaleza, com seus respectivos valores teóricos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014.

## **1.3 Objetivos específicos**

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar adequabilidade da equação normativa com a realidade local;
- b) propor equações para estimar o módulo de elasticidade através da resistência a compressão dos concretos das principais concreteiras de Fortaleza;
- c) propor valores para o coeficiente que expressa a natureza dos agregados graúdos das pedreiras locais para as principais concreteira de Fortaleza.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado todo o embasamento teórico inerente ao objetivo desta pesquisa, no qual as propriedades do concreto endurecido, tais como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, serão abordados, sendo discutidos seus conceitos, formas de obtenção em laboratórios, e os principais fatores que os influenciam, além da relação das duas propriedades.

### 2.1 Resistência a compressão do concreto

#### 2.1.1 Definição de resistência à compressão

Sendo considerada por muitos a principal propriedade do concreto endurecido, a resistência à compressão está diretamente relacionada com a tensão máxima necessária para causar a ruptura. De acordo com Helene e Andrade (2010), para o projeto de estruturas de concreto armado, o projetista especifica uma resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), no qual é definida como valor de referência e adotado nos cálculos, sendo associado a um nível de confiança de 95%.

#### 2.1.2 Determinação da resistência à compressão

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 5739:2018 descreve um método de ensaio para corpos de provas cilíndricos de concreto para a obtenção da sua resistência à compressão. Tal método consiste em ensaiar um corpo de prova de concreto, previamente dosado, preparado e curado, utilizando uma prensa, no qual quando posicionado será submetido a um carregamento com velocidade constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s até que ocorra uma queda de força que indica sua ruptura. Conforme Mehta e Monteiro (2014), o corpo de prova, mesmo sem sinais visíveis de fratura externa, é considerado rompido quando não suportar uma carga maior, isso ocorre devido ao estado avançado de fissuração interna atingido.

A resistência a compressão é determinada por meio da Equação 01:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (01)$$

Sendo  $f_c$  a resistência a compressão (MPa),  $F$  é a força máxima alcançada (N) e  $D$  é o diâmetro do corpo de prova (mm).

### **2.1.3 Fatores que influenciam a resistência à compressão**

#### **2.1.3.1 Relação água/cimento**

Alguns pesquisadores da ciência dos materiais afirmam que a relação água/cimento, ou simplesmente relação  $a/c$ , não é suficientemente importante, porém, na prática segundo Neville (2016) é o fator mais correlacionado com a resistência do concreto. Tal relação é regida pela Lei de Abrams, expressada pela Equação 02:

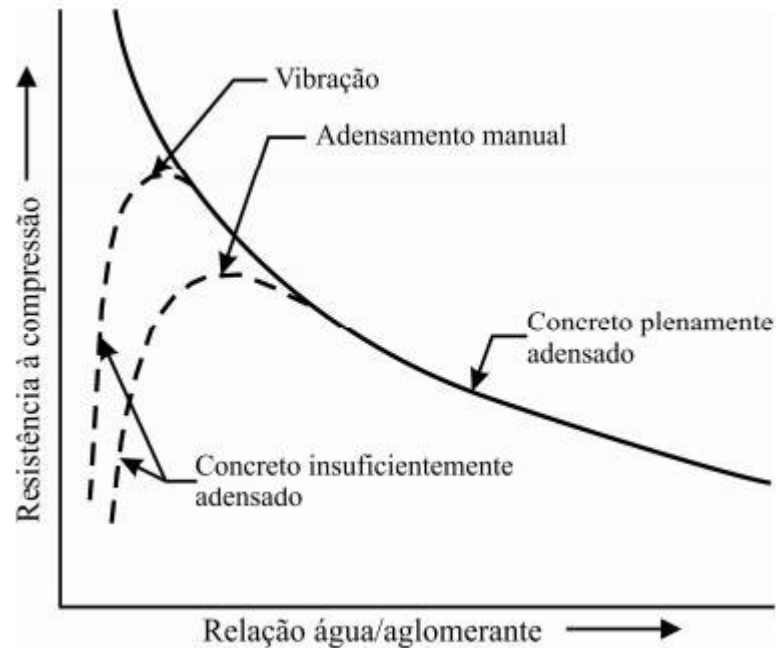
$$f_c = \frac{k_1}{k_2 a/c} \quad (02)$$

No qual  $a/c$  é a relação água/cimento vindo da dosagem,  $k_1$  e  $k_2$  são constantes empíricas e  $f_c$  é a resistência a compressão do concreto. Tal relação entre  $a/c$  e a resistência do concreto pode ser facilmente explicada através da diminuição progressiva da resistência devido ao aumento da porosidade com o aumento da relação  $a/c$  (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

De acordo com Neville (1997), *apud* Kummer (2016), no instante em que o concreto está plenamente adensado, a sua resistência é considerada inversamente proporcional a relação  $a/c$ , como mostrado na Figura 1. Porém, tal correlação é limitada para relações  $a/c$  muito baixas, no qual o concreto deixa de ser fluido, sendo necessário o adensamento manual ou por meio de vibração.



Figura 1 - Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c do concreto.



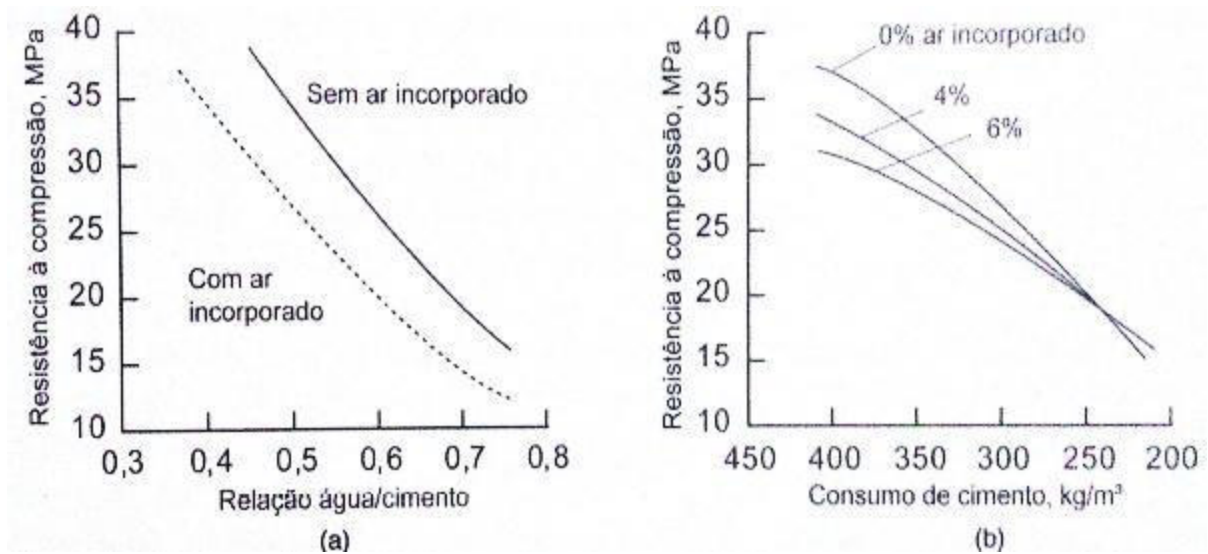
Fonte: Neville (1997)

### 2.1.3.2 Porosidade

A porosidade no concreto é o principal limitador de sua resistência, pois a mesma é influenciada principalmente pelo volume de vazios contido nele. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a relação a/c determina a porosidade contida na pasta de cimento na maioria dos casos, porém, quando na massa de concreto é incorporado ar, sendo através de aditivos incorporadores de ar, ou por meio de um mau adensamento, a porosidade também aumenta e a resistência a compressão diminui.

Segundo Kummer (2016), considerando uma certa relação água/cimento, concretos dosados com alto teor de cimentos apresentam uma perda significativa da resistência com o aumento do volume de ar incorporado, entretanto, concretos com menor teor de cimento, conseqüentemente de menor resistência, tendem a apresentar menor perda de resistência, como apresentado na Figura 2 (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 2 - A influência do ar incorporado sobre a resistência à compressão do concreto



Fonte: Metha e Monteiro (2014).

### 2.1.3.3 Agregados

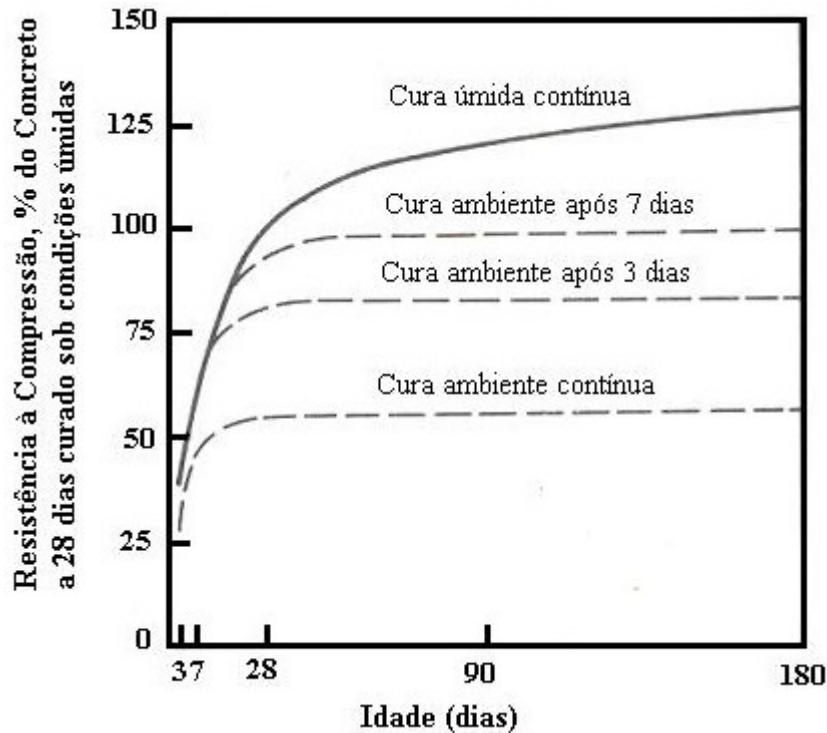
De acordo com Neville (2016), a resistência do concreto devido ao agregado graúdo depende também da relação  $a/c$ , no qual nota-se que com o aumento da relação  $a/c$ , a influência do agregado graúdo na resistência a compressão diminui, principalmente devido ao efeito da resistência da pasta de cimento hidratada prevalecer. A resistência a compressão do concreto pode aumentar por meio do agregado, conforme apresentado por Li (2011), por meio de utilização de agregados graúdo com granulometria bem definida, no qual ocorre a diminuição do número de vazios. Com relação a forma do agregado, podemos afirmar que os mesmos com formas angulares e superfícies ásperas, resultam no aumento da resistência.

### 2.1.3.4 Cura

A cura adequada do concreto é extremamente importante para a obtenção de uma resistência satisfatória, no qual é resultado da combinação do tempo, temperatura e umidade do concreto após o seu lançamento. Tal procedimento é realizado para promover a hidratação do cimento. A temperatura de cura do concreto controla o grau de hidratação do cimento, podendo influenciar a resistência final, no qual em geral, quanto menor a temperatura, menor será a resistência do concreto. A umidade também é um fator importante para a cura, no qual

a resistência do concreto não aumenta com a idade, a não ser por meio da cura úmida, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Influência da cura sobre a resistência do concreto



Fonte: Metha e Monteiro (2014, p. 64) *apud* Kummer (2016).

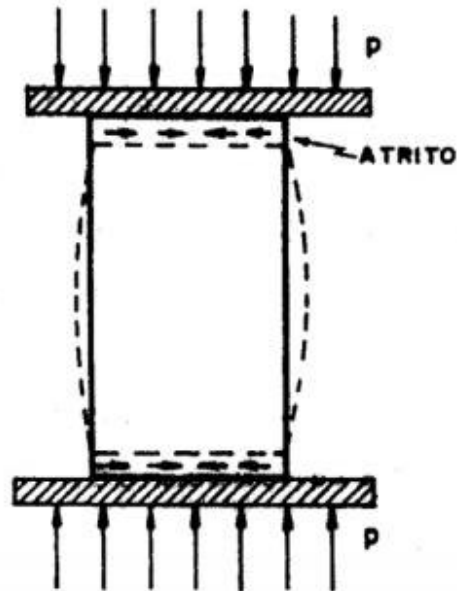
A ABNT NBR 14931:2004 estabelece os seguintes objetivos para a realização da cura do concreto nas primeiras idades: evitar a perda de água, garantir uma superfície com resistência adequada, assegurar a formação de uma capa superficial durável. De acordo com Bresolin (2016) existem diversas técnicas de cura eficientes, como exemplo a cura úmida, cura submersa, cura ao ar e cura por aspersão, porém levando-se em consideração questões financeiras e culturais a cura em pequenas construções consiste unicamente na molhagem do concreto. Para Bauer (1994), a cura submersa do concreto é sem dúvida o método ideal, porém sua aplicação é restrita a práticas de laboratórios. A ABNT NBR 5738:2015 estabelece como padrão, juntamente com a cura úmida, a cura por submersão com a utilização de hidróxido de cálcio saturado em água.

#### 2.1.3.5 Forma e dimensão do corpo de prova

Com a aplicação da carga, o corpo de prova encurta e dilata transversalmente. Entretanto, o atrito impede que a deformação do corpo de prova na proximidade dos pratos da

máquina de ensaio acompanhe aquela da região central, resultando em uma deformação como apresentada na Figura 4, portanto o tamanho e forma dos corpos de prova tem significativa influência nos resultados dos ensaios de resistência à compressão.

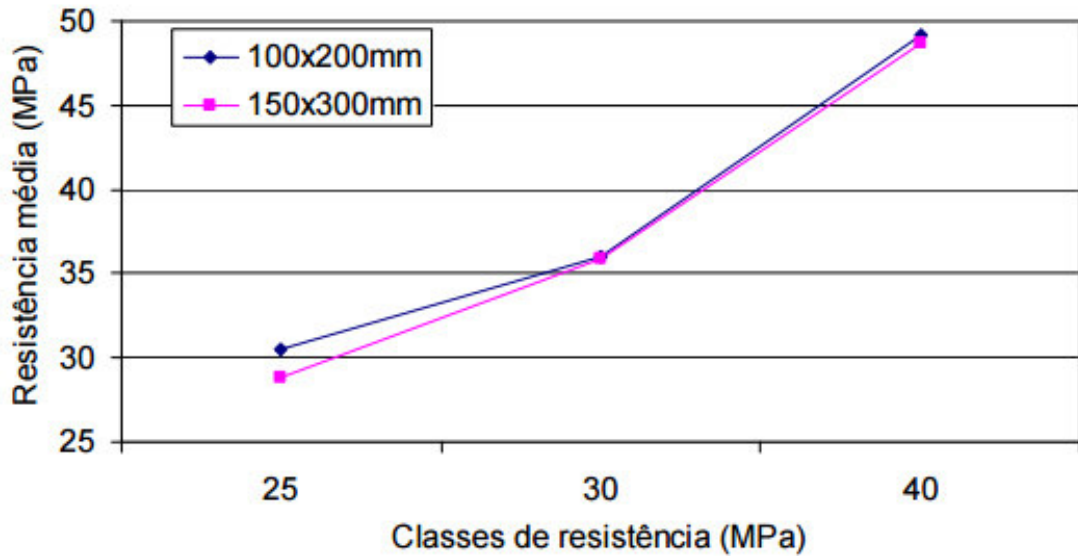
Figura 4 - Esquema da deformação do corpo de prova de concreto



Fonte: Almeida (2002).

Um dado importante consiste em que os corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, os quais são padronizados no Brasil, na proporção 1:2, não apresentam diferenças significativas de resultados, conforme estudos já realizados, como de Martins (2008), que comparou os resultados de resistência a compressão obtidos em concretos de várias classes de resistências, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema da deformação do corpo de prova de concreto



Fonte: Martins (2008)

## 2.2 Módulo de elasticidade do concreto ( $E_c$ )

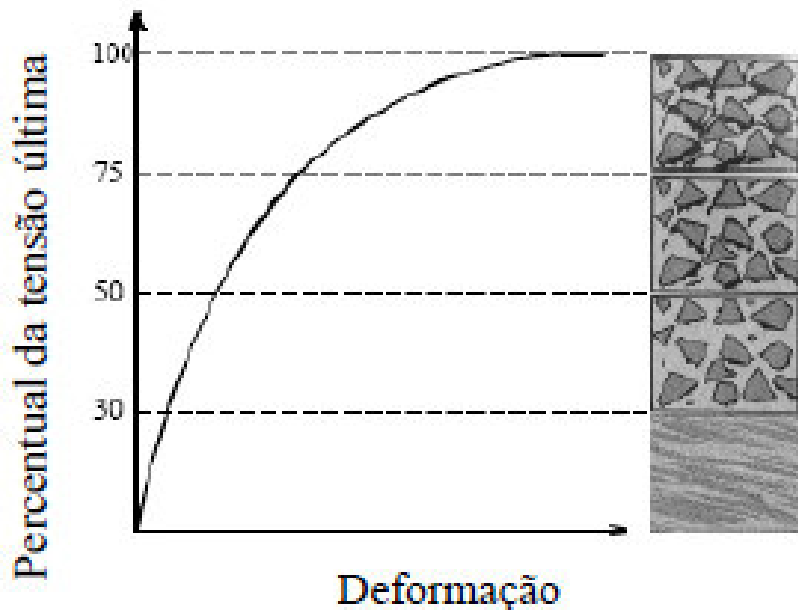
### 2.2.1 Definição do módulo de elasticidade

Dentre os diversos tipos de materiais utilizados para construções, alguns deles quando submetidos a carregamentos apresentam uma relação linear entre a tensão e a deformação, sendo denominados linearmente elásticos. Materiais que não obedecem a esta relação, são denominados não-linearmente elástico, conforme apresentado no estudo de Djanikian Filho (2010). No decorrer da aplicação do carregamento, existe um instante em que a tensão produz uma deformação permanente, no qual é chamado de limite elástico. Para Metha e Monteiro (2014) a não linearidade da relação tensão–deformação é explicada pelo processo de microfissuração progressiva do concreto sob carga.

O processo de microfissuração é definida por quatro estágios de comportamento do concreto submetido a compressão, como apresentado na Figura 6. Antes do advento da aplicação da carga, já se encontram presentes microfissuras na zona de transição entre a matriz da pasta de cimento e o agregado graúdo, que são geradas durante o processo de endurecimento da pasta e causadas pela exsudação, retração por secagem, entre outros. Para Metha e Monteiro (1994) estas fissuras permanecem estáveis e a curva tensão – deformação é aproximadamente linear para resistências abaixo de 30% da carga última. A partir que a tensão de compressão aumenta, acima de 30% da carga última, as microfissuras começam a

aumentar em comprimento e abertura, fazendo com que ocorra um desvio sensível na linha reta da curva tensão-deformação. Para tensões entre 50 e 75% da carga última, é visível a formação de fissuras na matriz da pasta de cimento, indicando um sistema instável, fazendo com que a curva tensão-deformação fique menos inclinada. Tensões acima de 75% da carga última ocorrem a formações de grandes deformações, no qual as fissuras se comunicam entre si, indicando o início do colapso do material.

Figura 6 - Evolução da fissuração do concreto submetido a compressão axial



Fonte: Metha e Monteiro (1994)

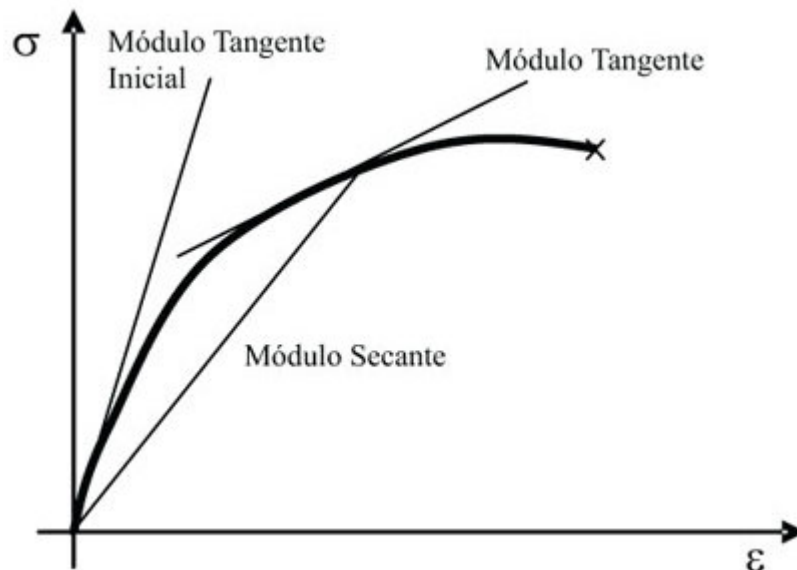
Após o encerramento da aplicação das cargas, a deformação desaparecerá parcialmente, retornando ao seu estado inicial, sendo essa propriedade do material denominada de elasticidade. Porém, o concreto é um material não homogêneo e não dúctil, possuindo uma capacidade de deformação pequena, no qual resulta geralmente em deformações permanentes. Assim, segundo Metha e Monteiro (2014), o módulo de deformação do concreto pode ser explicado como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro limite adotado, e é obtido pela declividade da curva tensão-deformação sob um carregamento uniaxial.

Como o concreto é um material não-linear, a curva tensão-deformação do mesmo apresenta pelo menos três tipos de módulos de elasticidade, no qual na literatura são citados o módulo tangente inicial, secante e tangente, sendo muitas vezes interpretados erroneamente. De forma resumida, Metha e Monteiro (2014) destacam que:

- a) Módulo tangente inicial: é o módulo de deformação elástico e imediato para uma linha tangente a curva tensão-deformação traçada a partir da origem, ou seja, é o coeficiente angular da reta tangente a curva partindo da origem;
- b) Módulo secante: é o módulo de deformação estático e imediato, dado pela inclinação de uma linha traçada da origem até um percentual de  $f_c$ , no qual geralmente é utilizado 40% da resistência a compressão;
- c) Módulo tangente: é o módulo de deformação estático e imediato, dado pela inclinação de uma linha traçada em qualquer intervalo da curva tensão-deformação.

Na Figura 7 é apresentado graficamente os diferentes tipos de módulo de elasticidade.

Figura 7 - Tipos de módulos de elasticidade



Fonte: Araujo, Guimarães e Geyer (2012)

### 2.2.2 Determinação do módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade ou módulo de Young, existem métodos estáticos e dinâmicos, que são regulamentados por normas técnicas. A norma brasileira de projetos de concreto armado, ABNT NBR 6118:2014 especifica que tal parâmetro do concreto seja determinada por meio dos procedimentos recomendados pela

ABNT NBR 8522:2017 no qual apresenta a metodologia do ensaio de deformação tangente inicial e deformação secante.

Para a realização do ensaio tangente inicial é necessário a preparação dos corpos de prova (CPs), no qual são necessárias cinco amostras, sendo destas, três para o ensaio de módulo de elasticidade e dois para ensaio de resistência a compressão. Tais amostras são previamente moldados e curados de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 5738:2015. O ensaio inicia-se com a determinação da resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ) em dois CPs, com base nos procedimentos da ABNT NBR 5739:2018. Em seguida, é realizado o ensaio do módulo tangente inicial, atendendo a velocidade de carregamento e descarregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, com base em umas das seguintes metodologias:

- a) Metodologia A - Tensão  $\sigma_a$  fixa: a amostra é posicionada no centro da prensa e submetida a uma sequência de três carregamentos e descarregamentos sucessivos. No primeiro ciclo, o CP é carregado até a tensão  $0,3f_c$  (limite elástico), mantendo-se por 60 segundos e aliviado em seguida até a tensão próxima a zero. No segundo ciclo, o CP é carregado até a tensão de 0,5 MPa e mantido por 60 segundos e então novamente carregado até  $0,3f_c$  e mantido pelo mesmo tempo e aliviado até a tensão próxima a zero. Esse ciclo é realizado por mais uma vez, e no instante do último alívio de tensão, carrega-se o CP até 0,5 MPa por 60 segundos e registra-se a deformação específica básica ( $\epsilon_a$ ), em seguida, carrega-se novamente até  $0,3f_c$  por 60 segundos e registra-se a deformação sob a tensão maior ( $\epsilon_b$ ). Por fim, leva-se o corpo de prova a ruptura, de forma a produzir a resistência efetiva.
- b) Metodologia B - Deformação específica  $\epsilon_a$  fixa: o procedimento é semelhante ao de tensão fixa, no qual ao invés de carregar até a tensão de 0,5MPa, o CP é submetido a um carregamento até a deformação específica de  $5 \times 10^{-6}$  e mantido por 60 segundos. Ao final dos três ciclos, registram-se as mesmas deformações, sendo a específica básica, no instante da deformação de  $50 \times 10^{-6}$  e a deformação sob a tensão maior. Por fim, leva-se o corpo de prova a ruptura, de forma a produzir a resistência efetiva.

De forma geral, para a ABNT NBR 8522:2017 o módulo de elasticidade é a deformação no concreto quando submetido às tensões de 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. Essa tensão inicial de 0,5 MPa é utilizada para diminuir os efeitos da presença de imperfeições nos corpos de prova, da variabilidade das máquinas de ensaios e do processo de

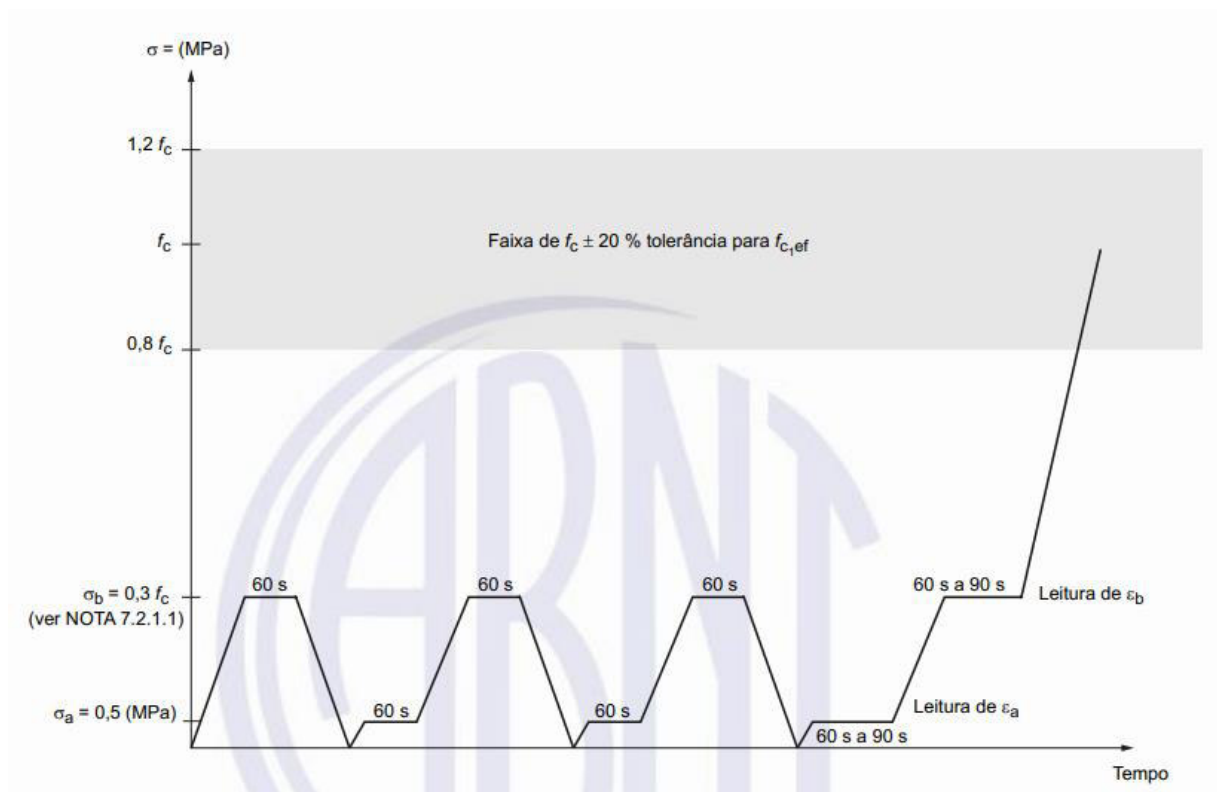


acomodação dos pratos do topo e da base da prensa e do corpo de prova, uma vez que ainda não havia sido submetido a qualquer tipo de tensão. Tais fatores podem gerar uma distorção inicial no traçado das curvas tensão-deformação. Os 30% da carga última já foi explicado anteriormente, no qual se refere ao estado inicial de microfissuração do concreto, que atende ao limite de elasticidade.

A validação do ensaio, segundo a NBR 8522:2017, é garantida caso a resistência efetiva ( $f_{c,ef}$ ) esteja dentro da faixa limite de  $f_c \pm 20\%$ . Caso não seja atendido, os resultados do corpo de prova não são confiáveis e não podem ser considerados no cálculo.

De forma resumida, a Figura 8 apresenta o esquema da sequência dos carregamentos e descarregamentos para as duas metodologias apresentadas pela ABNT NBR 8522:2017.

Figura 8 - Representação esquemática do carregamento para determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A - Tensão  $\sigma$  fixa



Fonte: ABNT NBR 8522:2017, p.9

Portanto, o módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) para as duas metodologias, tensão fixa e deformação fixa, é calculado pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (03)$$

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \quad (04)$$

Sendo:

$\sigma_a$  a tensão correspondente a deformação específica de  $50 \times 10^{-6}$  (MPa);

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

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos CPs sob tensão de 0,5 MPa;

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

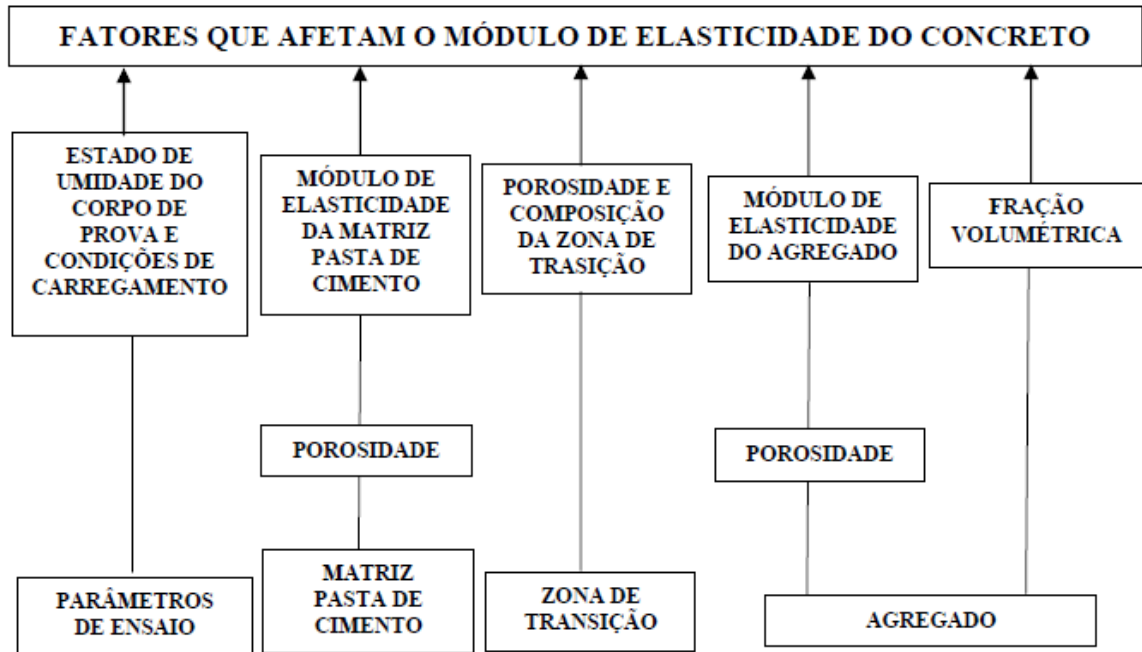
O módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) também pode ser determinado por meio dos procedimentos estabelecidos na NBR 8522:2017, no qual o método consiste em simular uma estrutura no seu primeiro carregamento, por meio do coeficiente angular da reta secante da curva tensão-deformação obtido sem o carregamento prévio no CP. O módulo secante, então, pode ser conhecido a qualquer tensão específica entre  $0,2f_c$  e  $0,8 f_c$ , sem o carregamento prévio no CP. Em seguida, a amostra é submetida a sua ruptura total, sendo seu resultado validado com os já realizado no ensaio de resistência a compressão.

De acordo com a NBR 6118:2014, o módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ ) pode ser usado nos projetos na avaliação do comportamento global da estrutura e para os cálculos de perdas de protensão. Para a avaliação do comportamento dos elementos estruturais ou seções transversais, pode ser adotado um módulo único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante.

### ***2.2.3 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade.***

O concreto é uma rocha artificial produzida pelo homem, no qual é composto por várias parcelas de materiais, sendo assim sua estrutura heterogênea e multifásica. Desse modo, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), a fração volumétrica e o módulo da matriz da pasta e dos agregados, além das propriedades da zona de transição na interface, determinam o comportamento elástico do concreto. A Figura 09 resume os principais fatores que afetam o módulo de deformação do concreto, de acordo com Mehta e Monteiro (2014).

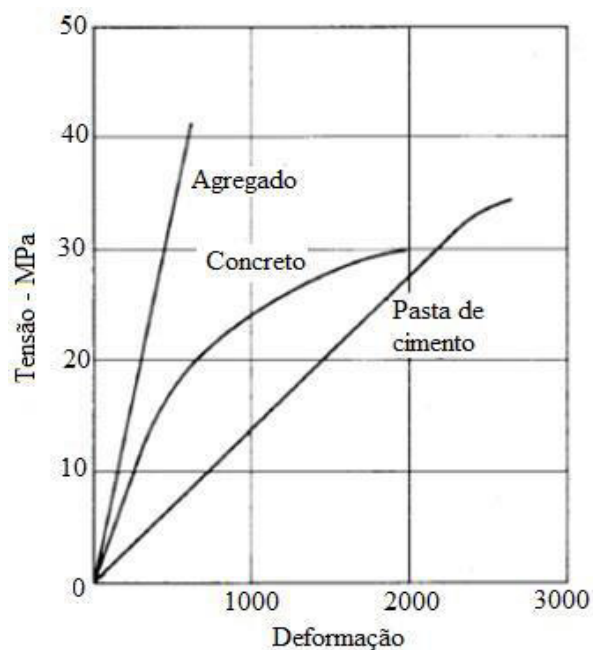
Figura 9 - Fatores que afetam o módulo de deformação do concreto



Fonte: Nunes (2005)

A Figura 10 mostra a diferença entre as curvas típicas de tensão–deformação de agregado, pasta endurecida e concreto submetidos a compressão uniaxial, no qual possuem influência significativa no módulo de elasticidade do concreto.

Figura 10 - Curvas típicas de tensão–deformação de agregado, pasta endurecida e concreto submetidos a compressão uniaxial



Fonte: Neville (1997).

### 2.2.3.1 Agregados graúdos

Para a resistência a compressão do concreto, os agregados graúdos não apresentam influência significativa nos resultados. No caso do módulo de elasticidade, segundo Neville (2013), os agregados graúdos apresentam influência considerável, no qual essa comprovação advém dos módulos de elasticidades dos próprios agregados, bem como de suas frações volumétricas no concreto, que alcançam a marca de 75% do volume total.

Na Tabela 1, é apresentado os principais tipos de rochas utilizados como agregados graúdos para a produção do concreto, bem como seus respectivos módulos de elasticidade. Vale ressaltar que para valores mais baixos de resistência à compressão, os agregados graúdos são mais resistentes e menos deformáveis do que a pasta de cimento endurecida, em geral menos resistente (MARCHI, 2011).

Tabela 1 – Módulo de elasticidade de rochas utilizadas como agregados graúdos.

<b>TIPO DE ROCHA</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)</b>
Arenito	20-40
Basalto	60-100
Calcário	30-50
Gnaisse	40-70
Granito	40-70
Quartzito	50-100
Xisto	25-40

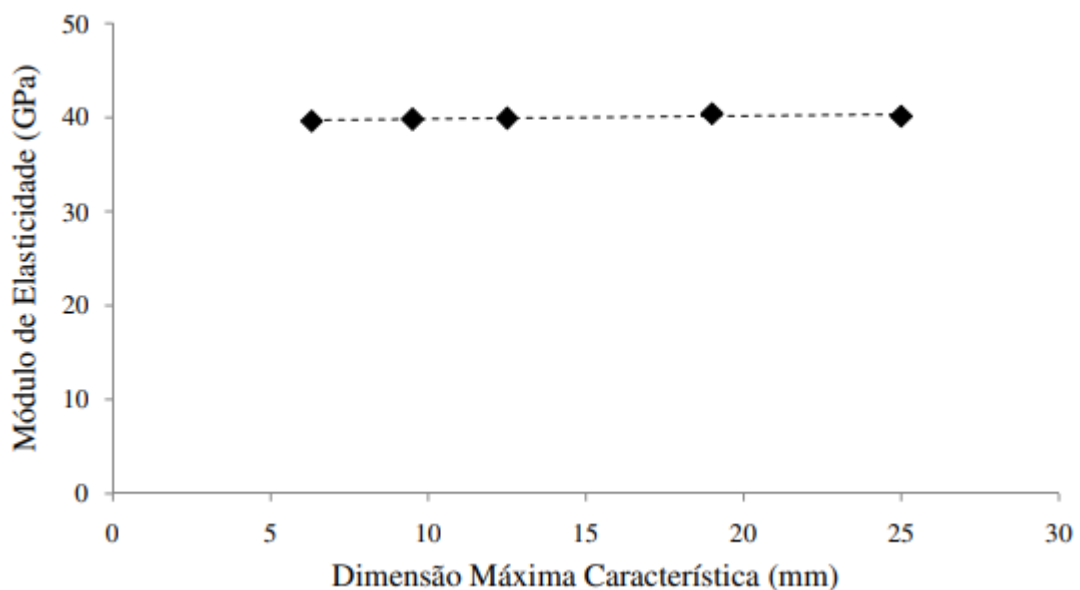
Fonte: adaptado de Sbrighi (2005) *apud* Marchi (2011).

Na região do estado do Ceará, em termos de tipos de rocha, possui uma grande variedade que contribuem no aspecto morfológico de sua região. De acordo com a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais–CPRM (2003), a região do Ceará apresenta uma predominância de rochas do cristalino pré-cambriano, sendo cerca de 19% de rochas ígneas que constituem o granito, e aproximadamente 54% de rochas metamórficas, no qual o gnaisse ganha destaque. É importante ressaltar que as rochas metamórficas são formadas a partir das rochas ígneas, logo o gnaisse é originado do granito.

A porosidade dos agregados graúdos é um fator importante que afeta o módulo de elasticidade do concreto, como apresentado por Metha e Monteiro (2014). A rigidez do agregado é determinada pela porosidade, no qual controla a capacidade do agregado de inibir deformações da matriz da pasta de cimento.

Com relação a influência da dimensão característica dos agregados no resultado do módulo de elasticidade do concreto, não existe na literatura um consenso. Porém, para Rohden (2011), a dimensão máxima característica do agregado graúdo não influenciou no módulo de elasticidade de um mesmo concreto dosado com diferentes tamanhos de agregados (ver Figura 11).

Figura 11 - Influência da dimensão característica dos agregados graúdos no módulo de elasticidade.



Fonte: Rohden (2011).

### 2.2.3.2 Matriz da pasta de cimento.

O módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento é determinado por sua porosidade, no qual os fatores como a relação  $a/c$  e o grau de hidratação do cimento afetam diretamente o módulo de elasticidade do concreto (METHA; MONTEIRO, 2014).

Garantindo-se uma boa trabalhabilidade do concreto, uma diminuição da relação  $a/c$ , além de promover uma maior resistência a compressão, causa um aumento significativo do módulo de elasticidade. O grau de hidratação do cimento é diretamente proporcional a uma cura bem realizada, no qual ocorre o aumento simultâneo da resistência a compressão e do módulo de elasticidade, sendo este último, um crescimento mais rápido, de acordo com Neville (2013).

### 2.2.3.3 Zona de transição

A zona de transição geralmente possui menor resistência do que a matriz da pasta de cimento, no qual é a região entre as partículas dos agregados graúdos e a pasta. Nesta região, é comum a presença de vazios capilares, microfissuras e cristais, que contribuem para o aumento do módulo de elasticidade do concreto. A lenta interação química entre a pasta de cimento e o agregado graúdo gera a redução da porosidade da zona de transição, no qual explica o fato de que o módulo de elasticidade apresenta uma taxa de crescimento maior do que a resistência à compressão (METHA e MONTEIRO, 2014).

### 2.2.3.4 Parâmetros de ensaio.

Shehata (2005) apresenta que, entre os parâmetros que influenciam o resultado do módulo de deformação relacionado ao procedimento de ensaio estão o teor de umidade do corpo de prova, a velocidade de aplicação do carregamento, e os instrumentos de medição da deformação. Segundo Neville (2013), os corpos de prova ensaiados em condições úmidas apresentam um módulo de elasticidade maior em cerca de 15%, com relação aos corpos de prova testados em condições secas.

A velocidade do carregamento está diretamente ligada aos resultados dos módulos de deformações, devido o concreto não ser um material perfeitamente elástico. Desse modo, quanto mais rápido for a aplicação da carga, menor será a propagação das fissuras e acomodação das deformações, logo o módulo de elasticidade será maior.

O tipo de instrumento utilizado para o registro das deformações constitui em uma grande fonte de variabilidade dos resultados. Existem diversos tipos de instrumentos para a medição de deformação, sendo o mais utilizado os transdutores resistivos ou extensômetros elétricos tipo *strain gages* de aderência superficial, de imersão ou de ancoragem. Os mesmos são instalados no terço médio do corpo de prova e captam as deformações durante o ensaio.

## 2.3 Relação entre a resistência compressão ( $f_c$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) do concreto.

Devido à grande complexidade da realização do ensaio de módulo de elasticidade, na sua falta, a ABNT NBR 6118:2014 permite que sejam utilizadas as expressões por ela proposta em modelos simplificados que correlacionam os valores da resistência a compressão

para a determinação do módulo de deformação. Tais expressões possuem base empírica, no qual foram formuladas por meios de ensaios realizados no passado, com equipamentos ultrapassados, e com concretos com características completamente diferentes das atuais. Porém, tais expressões são válidas e utilizadas nos dias atuais.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto pode ser estimado, aos 28 dias, por meio das Equações 05 e 06:

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (05)$$

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \cdot \alpha_e \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{\frac{1}{3}} \quad (06)$$

A Equação 05 refere-se aos concretos com  $f_{ck}$  entre 20 e 50 MPa, e a Equação 06 para  $f_{ck}$  de 55 até 90 MPa. O  $f_{ck}$  é a resistência característica do concreto, obtido por meio de uma análise estatística, com 95% de grau de confiança. O fator  $\alpha_e$  é uma correção de acordo com a natureza do agregado graúdo utilizado no concreto, sendo apresentado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Fator de correção do tipo de agregado

<b>TIPO DE AGREGADO</b>	<b><math>\alpha_E</math></b>
Basalto e diabásico	1,2
Granito e gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Fonte: adaptado da NBR 6118:2014

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 ainda sugere que para o módulo de elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas do projeto, especificamente na determinação dos esforços solicitantes e verificação dos estados limites de serviço, deve ser utilizado a Equação 07:

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} \quad (07)$$

Martins (2008) realizou um estudo experimental em concretos produzidos com agregados graúdos de origem granítica, comparando a influência do tamanho dos corpos de provas no resultado do módulo de elasticidade do concreto. Para corpos de prova de tamanho 100 x 200 mm foi sugerido a Equação 08 para estimar o módulo de elasticidade tangente

inicial a partir da resistência à compressão. Tal equação é válida para resistência à compressão ( $f_c$ ) entre 20 e 50 MPa.

$$E_{ci} = 10,467 \cdot f_c^{0,2693} \quad (08)$$

De tal forma como apresentada pela ABNT NBR 6118:2014 e por Martins (2008), existem diversos modelos de previsão para estimar o módulo de deformação por meio da resistência a compressão do concreto, no qual de um modo geral essas expressões seguem o seguinte modelo apresentado na Equação 09:

$$E_c = k_1 \cdot f_c^{k_2} \quad (09)$$

Sendo  $k_1$  um fator resultante de todos os parâmetros relativos as variáveis do concreto, como os agregados graúdos, e  $k_2$  varia entre 0,3 e 0,5 (SHEHATA, 2011).



### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada será um estudo experimental em corpos de prova de concretos, com o intuito de analisar os valores do módulo de elasticidade, bem como a relação da mesma com a resistência a compressão. As amostras serão produzidas por quatro usinas de concreto, localizadas em Fortaleza e região metropolitana, moldadas *in loco*.

Para o estudo, foi realizado um contato com quatro das principais concreteiras que fornecem concretos estruturais para obras de Fortaleza e região metropolitana, sendo solicitada a programação de saídas dos concretos de classes de resistências C20 a C50. Devido à dificuldade de se obter algumas dessas resistências, optou-se por analisar os concretos de classe C25, C30 e C35, abrangendo assim a grande maioria dos concretos distribuídos nas obras de Fortaleza e região metropolitana. Para todas as classes de resistências serão produzidos concretos com a mesma classe de abatimento, S100.

#### 3.1 Coleta das amostras

Cada uma das quatro concreteiras analisadas apresentam materiais e dosagens dos concretos diferentes, o que leva a algumas incertezas com relação a homogeneidade dos concretos fornecidos a nível local. De forma geral, foram utilizados três diferentes tipos de cimento, CP II E, CP IV e CP V-ARI, conforme descrito na Tabela 03.

Tabela 3 - Tipos de cimento utilizados nos traços avaliados.

CONCRETEIRAS	IDENTIFICAÇÃO	CLASSE DE RESISTÊNCIA	TIPO DE CIMENTO
A	T01	C25	CP IV
	T02	C30	CP IV
	T03	C35	CP IV
B	T04	C25	CP II E
	T05	C30	CP V-ARI
	T06	C35	CP II E
C	T07	C25	CP II E
	T08	C30	CP II E
	T09	C35	CP II E

CONCRETEIRAS	IDENTIFICAÇÃO	CLASSE DE RESISTÊNCIA	TIPO DE CIMENTO
D	T10	C25	CP II E
	T11	C30	CP II E
	T12	C35	CP II E

Fonte: Autor

Com relação aos tipos de agregados miúdos utilizados nos concretos, cada usina apresenta suas particularidades, sendo de forma geral utilizados dois tipos: Areia média natural (Areia de rio) e Pó de pedra. Tais agregados são bastante utilizados nos concretos distribuídos em Fortaleza e região metropolitana.

Os agregados graúdos a serem utilizados são de origem granítica e gnaisse, características do estado do Ceará. Tais agregados possuem dimensão máxima característica distintas, sendo a Brita #0 com  $D_{máx} = 12,5$  mm e a Brita #1 com  $D_{máx} = 19,0$  mm. Algumas amostras de concretos foram produzidas com os dois tipos de agregados (Tabela 4), com proporções específicas de cada traço das concreteiras.

Tabela 4 – Tipos de agregados graúdos utilizados.

CONCRETEIRAS	CLASSE DE RESISTÊNCIA	TIPOS DE AGREGADOS
A	C25	80% B0 e 20% B1
	C30	80% B0 e 20% B1
	C35	80% B0 e 20% B1
B	C25	B0
	C30	B1
	C35	B0
C	C25	80% B0 e 20% B1
	C30	80% B0 e 20% B1
	C35	80% B0 e 20% B1
D	C25	80% B0 e 20% B1
	C30	80% B0 e 20% B1
	C35	80% B0 e 20% B1

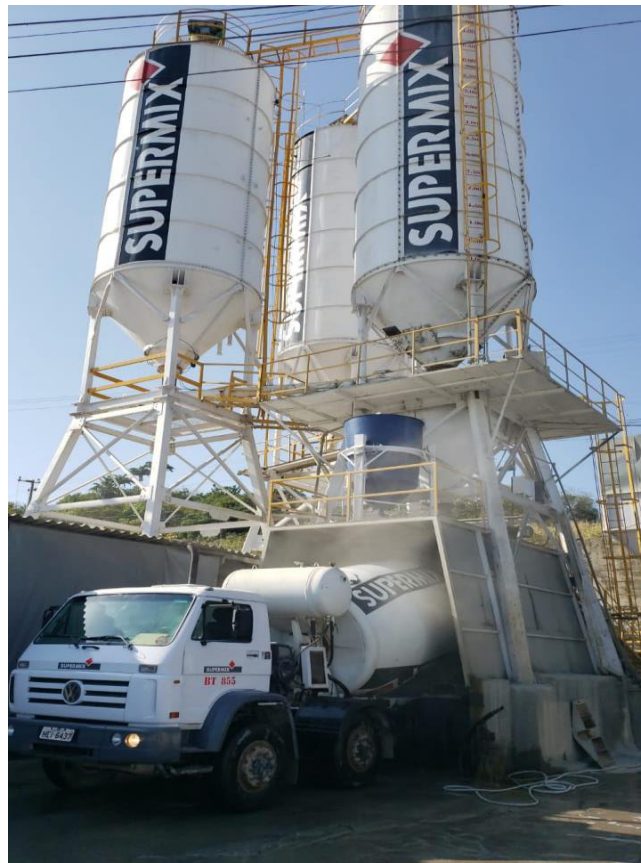
Fonte: Autor

A água que foi utilizada para a preparação dos concretos nas usinas está de acordo com a ABNT NBR 15900-1:2009, proveniente de poços profundos instalados nas usinas. Ainda, foi utilizado aditivo plastificante polifuncional nos concretos, com dosagens específicas de cada traço das concreteiras.

A caracterização dos materiais constituintes utilizados para fabricação dos concretos está de acordo com os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas, como informado pelas concreteiras em estudo. Os traços dos concretos em análise não foram disponibilizados pelas centrais dosadoras.

Todos os materiais empregados na confecção dos traços nas usinas foram dosados em massa com o auxílio de uma balança automatizada, instalada na central, que por meio de esteiras encaminha os materiais até o caminhão betoneira, sendo em seguida realizada a mistura, com rotação limite de  $14 \pm 2 \text{ rpm}$  (Figura 12). Em geral, os caminhões utilizados nas usinas possuem capacidade de produzir  $9\text{m}^3$  de concreto. Todos os processos de preparação dos concretos produzidos para esse estudo estão de acordo com a ABNT NBR 7212:2012.

Figura 12 - Preparação do concreto para análise.



Após a execução dos procedimentos de preparação dos concretos nas usinas, foram extraídos uma fração do volume de concreto dos caminhões betoneiras de cada traço a ser analisado em cada concreteira e em seguida realizado o ensaio de Slump test, de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 67:1998. Todas as amostras estão enquadradas na classe de abatimento S100, ou seja, com slump de  $10 \pm 2$  cm. Após a validação da consistência da amostra de concreto no estado fresco foi realizado a moldagem dos corpos de prova cilíndrico (Figura 13), de acordo com os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 5738:2015, como descrito a seguir:

- a) Primeiramente, os moldes e suas bases devem ser revestidas internamente com uma camada de óleo lubrificante;
- b) Na amostra deve proceder uma prévia remistura para garantir a uniformidade e em seguida colocar o concreto dentro dos moldes em duas camadas;
- c) O adensamento deve ser feito de forma manual com uma haste de aço com seu extremo em forma de semiesfera. Para cada camada deve se aplicar um total de 12 golpes, em movimentos circulares. Ao final dos golpes, procede uma leve batida na face externa, até o fechamento dos vazios;
- d) Após o adensamento deve ser feito o rasamento da superfície com a borda do molde, com o auxílio da colher de pedreiro;
- e) Por fim, os corpos de prova ficam em repouso por 24 hrs para cura inicial, após esse período, devem ser desformados e colocados em cura até a data de ensaio.

Figura 13 - Preparação dos corpos de prova.

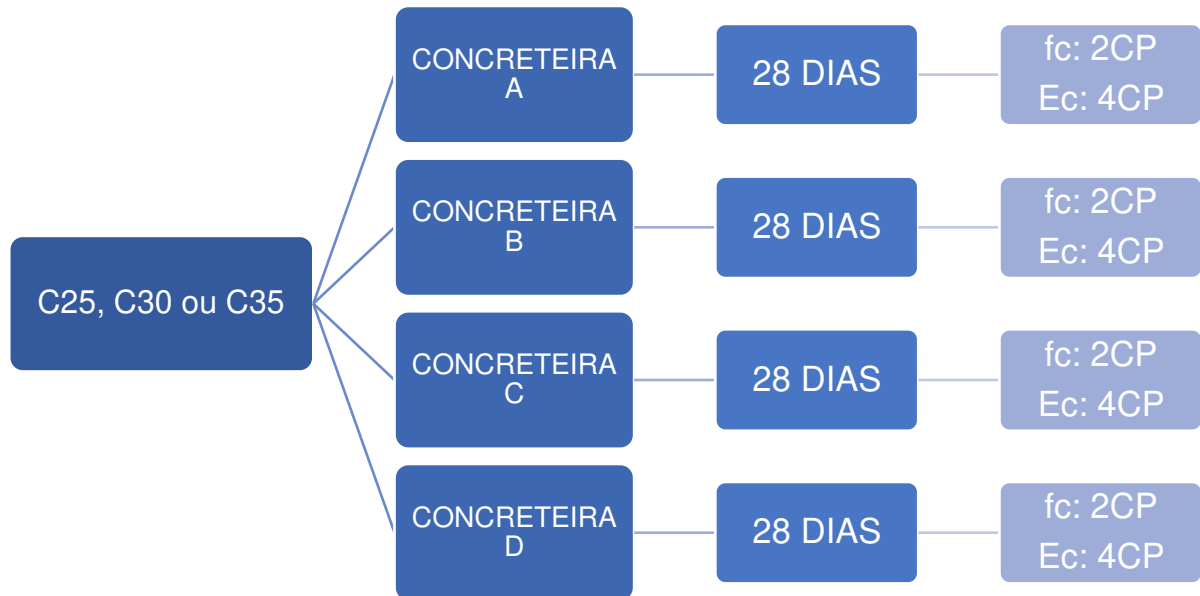


Fonte: Autor

### 3.2 Métodos de ensaios

Para cada concreteira em estudo (Concreteira A, Concreteira B, Concreteira C e Concreteira D) foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para cada classe de resistência a ser analisada. Os corpos de prova de concreto possuem as dimensões de 10 cm (diâmetro) x 20 cm (altura). Foi adotado a idade de 28 dias para a realização dos ensaios. Ao total foram obtidas 72 amostras (Figura 14), que foram encaminhadas para o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Universidade Federal do Ceará, no qual foram realizados os procedimentos de cura, preparação das amostras, determinação da resistência a compressão e módulo de elasticidade.

Figura 14 – Fluxograma da amostragem do estudo.



Fonte: Autor.

Para a cura das amostras de concreto foi optado pela utilização do método da cura úmida (Figura 15), com os corpos de prova submersos em um tanque com uma solução saturada de hidróxido de cálcio, a uma temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  como sugerido na NBR 5738:2015. A preparação das amostras para a realização dos ensaios consistiu em retificar as bases (Figura 16), por meio de uma retifica mecânica de eixo vertical, com dispositivo auxiliar que garantiu a perpendicularidade da superfície. Tal procedimento tem como objetivo de tornar plano a base do corpo de prova, de modo a receber o carregamento de forma uniforme.

Figura 15 - Cura dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Preparação das bases dos corpos de prova.



Fonte: Autor

Para a determinação da resistência a compressão foram utilizados 2 corpos de prova de cada concreteira, para cada uma das classes de resistências. Seguindo os procedimentos da NBR 5739:2018 foi utilizado uma prensa EMIC (ver referência do modelo da prensa) com capacidade de 100.000 kgf (Figura 17). Os corpos de prova foram rompidos à compressão na idade de 28 dias, sendo algumas amostras ensaiadas respeitando a tolerância de 24 horas (Tabela 5), devido a logística do laboratório. Os resultados das resistências a compressão dos concretos tornaram viáveis a realização da determinação do módulo de elasticidade tangente inicial, conforme apresentado na ABNT NBR 8522:2017.

Figura 17 - Modelo da prensa utilizada nos ensaios



Fonte: Logismarket (2019).

Tabela 5 - Tolerância para realização dos ensaios

IDADE DE ENSAIO	TOLERÂNCIA PERMITIDA
	(h)
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

Fonte: adaptado da NBR 5739:2018



De acordo com a NBR 5738:2018, em seu anexo B, a avaliação do desempenho do ensaio à compressão pode ser feita através da análise de parâmetros estatísticos como o desvio padrão ( $s$ ) e o coeficiente de variação ( $CVe$ ). Na Tabela 6 são apresentadas a classificação da eficiência do ensaio pelo coeficiente de variação, baseadas em níveis variando de 1 a 5.

Tabela 6 - Avaliação do ensaio à compressão pelo  $CVe$

<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>
<b>Excelente</b>	<b>Muito bom</b>	<b>Bom</b>	<b>Razoável</b>	<b>Deficiente</b>
$CVe \leq 3,0$	$3,0 < CVe \leq 4,0$	$4,0 < CVe \leq 5,0$	$5,0 < CVe \leq 6,0$	$CVe > 6,0$

Fonte: Adaptação da NBR 5739:2018 anexo B

Para a determinação do módulo de elasticidade, foram utilizados 4 corpos de prova de cada concreteira, para cada classe de resistência, sendo utilizado a metodologia A de cálculo. Com a mesma prensa, os corpos de provas foram ensaiados aplicando-se uma sequência de três ciclos de carga partindo de 0,5 MPa até 30% da carga última. A carga última refere-se ao valor médio da resistência à compressão dos 2 corpos de prova ensaiados. As deformações do concreto foram medidas por meio de extensômetros elétricos *strain gages*, de ancoragem do tipo *clip gage*, fixados nas amostras (Figura 18 e 19). Ao fim dos ciclos, os corpos de prova foram rompidos.

Figura 18 – Detalhe do extensômetro ligado ao corpo de prova.



Fonte: Autor

Figura 19 - Ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Nesse capítulo será apresentado os resultados e discursões dos ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade de todos os concretos produzidos para esta análise experimental. É apresentado também os resultados da relação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade, bem como a comparação do mesmo com os valores teóricos da ABNT NBR 6118:2014. Por fim, será apresentado o valor real do coeficiente  $\alpha_e$ , de modo a corrigir os valores encontrados do  $E_{ci}$ .

### 4.1 Resistência à compressão

A Tabela 7 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão, referente as amostras CP01 e CP02 de cada classe de resistência das empresas em análise.

Tabela 7 - Resultados  $f_{cm}$  de todos os concretos.

CONCRETEIRAS	TRAÇO	CLASSE DE RESISTÊNCIA	$f_{cm}$ (MPa)	$sd$ (MPa)	$CV_e$ (%)	$30\% f_{cm}$ (MPa)
A	T01	C25	32,07	2,54	7,922	9,62
	T02	C30	40,50	0,206	0,509	12,15
	T03	C35	43,19	1,142	2,645	12,96
B	T04	C25	32,34	0,693	2,144	9,70
	T05	C30	27,10	0,704	2,600	8,13
	T06	C35	39,28	0,613	1,563	11,78
C	T07	C25	32,11	1,335	4,158	9,63
	T08	C30	32,33	1,338	4,137	9,70
	T09	C35	33,53	0,151	0,451	10,06
D	T10	C25	30,46	0,690	2,268	9,14
	T11	C30	31,70	3,250	10,25	9,51
	T12	C35	30,02	1,368	4,557	9,01

Fonte: Autor.

Para a idade de 28 dias foi encontrado para o grupo de classe de resistência C25 uma faixa de resistência à compressão de 30,46 a 32,34 MPa. Para a classe C30 os valores

médios da resistência à compressão variaram de 27,10 a 40,50 MPa e para a classe C35, a faixa de resistência foi de 30,02 a 43,19 MPa.

De acordo com os resultados apresentados verificamos que o desempenho do ensaio à compressão dos corpos de prova de concreto foi satisfatório, no qual de acordo com coeficiente de variação apenas o T01 e o T11 se encontram no nível 5 (Deficiente), com base na classificação apresentada anteriormente na Tabela 6. De toda a amostragem cerca de 58% se encontram no nível 1 (Excelente). Com base nos valores das resistências à compressão média foram calculados os valores de tensão a serem utilizadas no ensaio de módulo de elasticidade, no qual se refere ao limite de elasticidade do concreto na curva tensão-deformação, ou seja, 30% da carga última.

#### 4.2 Módulo de Elasticidade

Como o objetivo desse trabalho foi investigar o módulo de elasticidade dos concretos fornecidos por concreteiras de Fortaleza, não houve a fixação de nenhum parâmetro da composição dos concretos estudados. Os valores médios obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade dos quatro corpos de prova de cada classe de resistência das concreteiras analisadas são apresentados na Tabela 8.

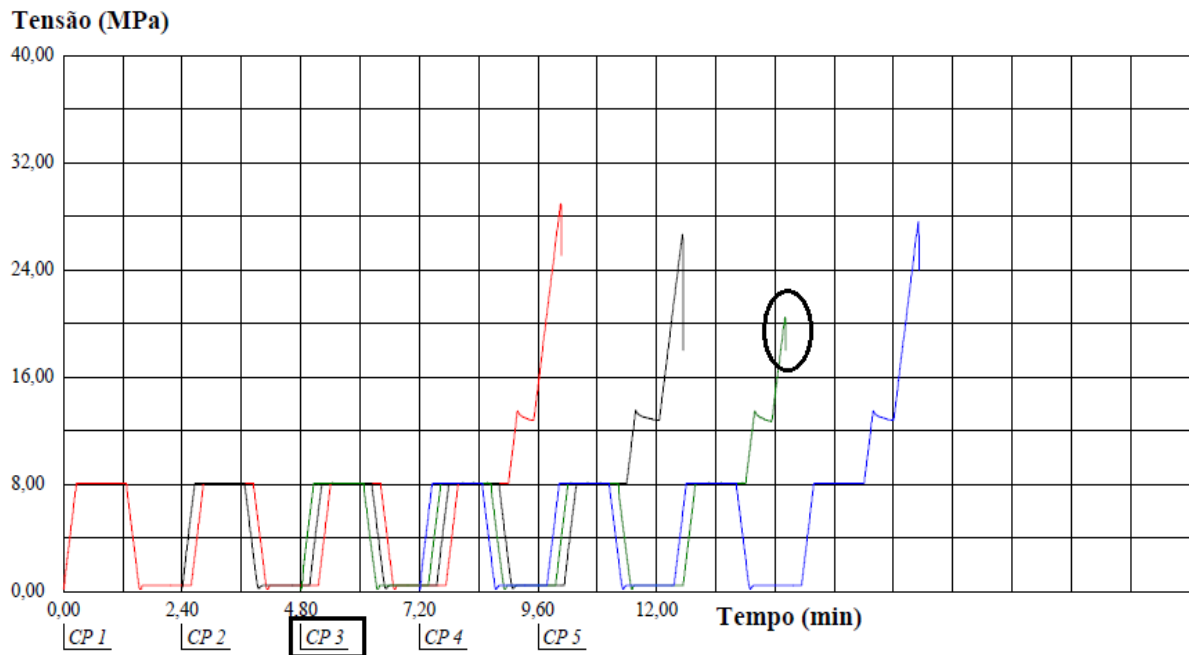
Tabela 8 - Resultados Ecm experimental de todos os concretos.

CONCRETEIRAS	TRAÇO	CLASSE DE RESISTÊNCIA	EXPERIMENTAL	
			Ecm (GPa)	sd (GPa)
A	T01	C25	33,07	1,561
	T02	C30	33,33	1,268
	T03	C35	34,55	2,419
B	T04	C25	29,80	2,475
	T05	C30	27,38	1,037
	T06	C35	32,51	0,665
C	T07	C25	21,74	0,889
	T08	C30	20,04	0,834
	T09	C35	21,64	1,633
D	T10	C25	22,90	2,531
	T11	C30	29,90	0,780
	T12	C35	28,85	5,017

A classe de resistência C25 apresentou valores médios de módulo de elasticidade aos 28 dias na faixa de 21,74 a 33,07 GPa, a classe C30 apresentou valores de 20,04 até 33,33 GPa e a classe C35 apresentou valores de 21,64 até 34,55 GPa.

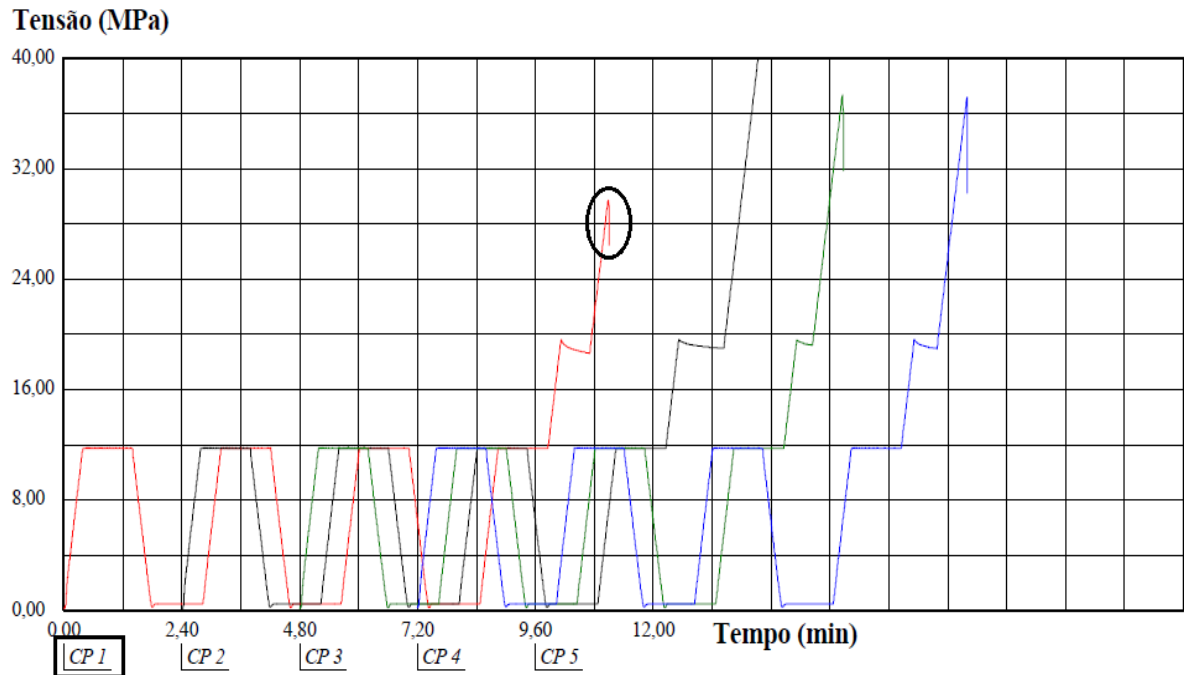
Com relação a validação dos resultados apenas os traços T05 e T06 apresentaram divergências nos resultados, visto que em uma das amostras de cada traço, a resistência efetiva a compressão não respeitou o limite de tolerância de  $\pm 20\%$  da resistência à compressão média (Figura 20 e 21), como estabelecido na ABNT NBR 8522:2017. Dessa forma, tais resultados dos corpos de prova foram desconsiderados da análise. Todos os demais resultados foram validados de acordo com a ABNT NBR 8522:2017.

Figura 20 - Inconsistência do resultado do CP3 referente ao T05



Fonte: Autor.

Figura 21 - Inconsistência do resultado do CP1 referente ao T06.



Fonte: Autor.

### 4.3 Relação entre $E_{ci}$ e $f_c$

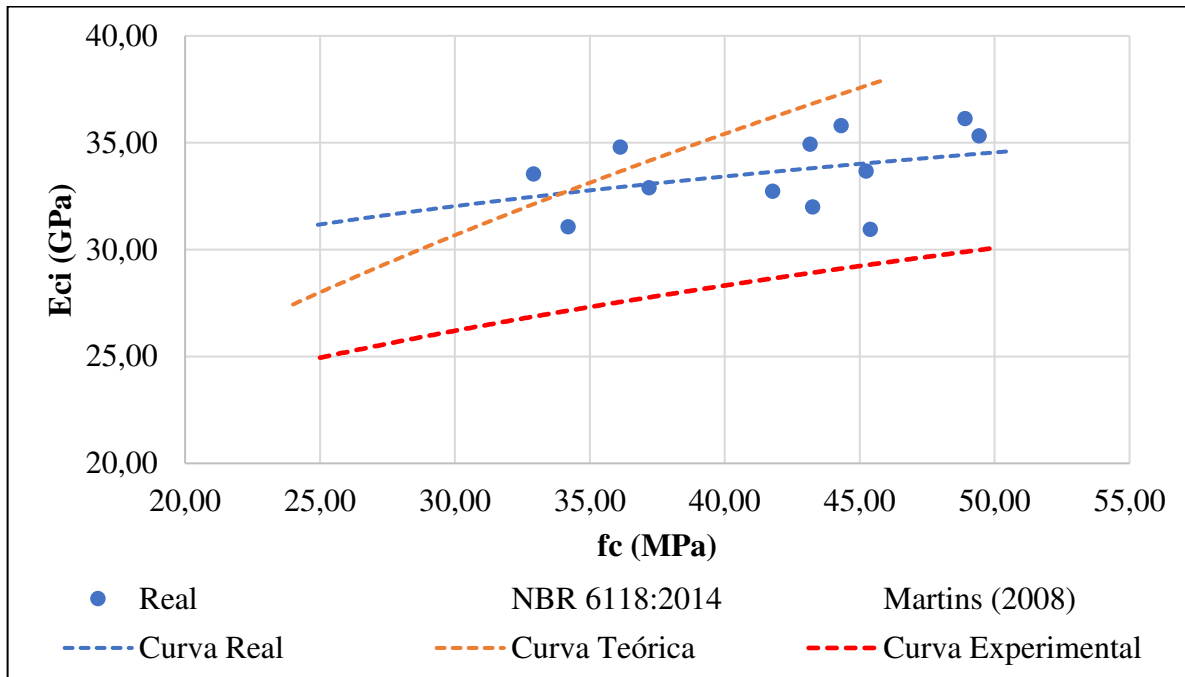
Nesse estudo experimental foi optado por ensaiar um corpo de prova a mais do que exigido na NBR 8522:2017, contribuindo ainda mais para a análise de previsão de tendência dos dados. Ao todo, foram realizados 48 ensaios de módulo de elasticidade, referente as amostras CP 03, CP04, CP 05 e CP 06 de cada classe de resistência das empresas analisadas. Ao fim do ensaio do módulo de elasticidade as amostras foram levadas à ruptura, registrando assim a resistência efetiva do corpo de prova ensaiado. Na Tabela 9 está apresentado o conjunto de dados encontrados. Como apresentado anteriormente, dois resultados não atenderam as recomendações de aceitação, sendo assim excluídas da análise. Os mesmos estão em destaque nos resultados da Concreteira B.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

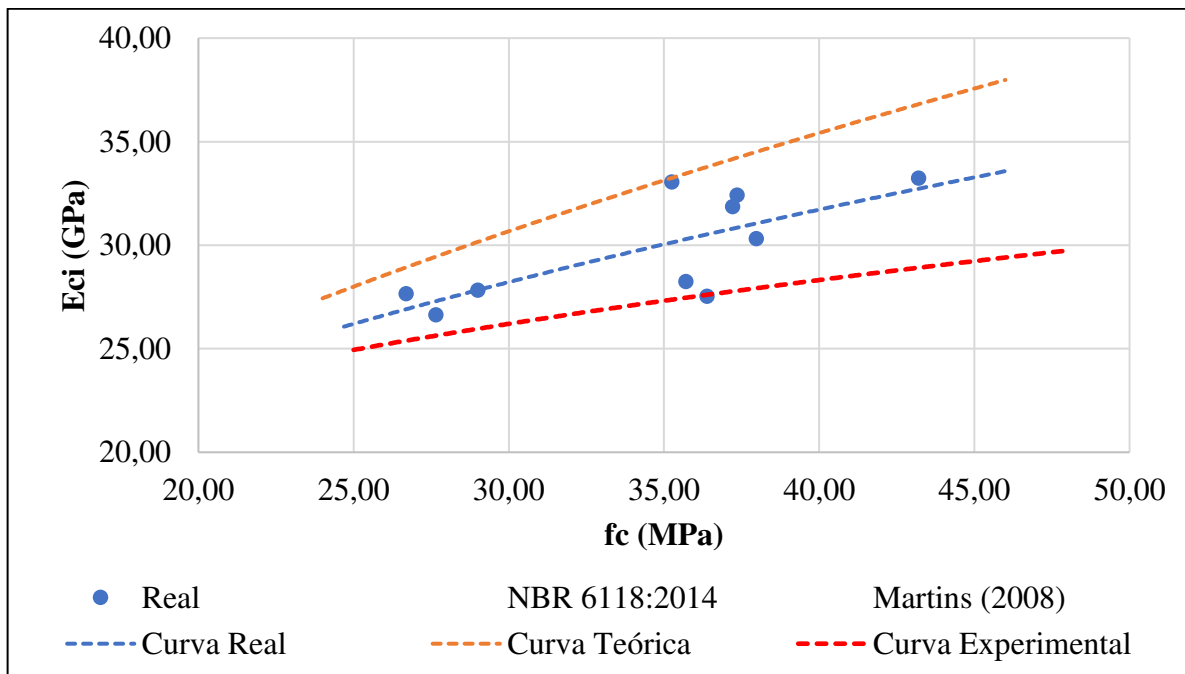
		CONCRETEIRA A		CONCRETEIRA B		CONCRETEIRA C		CONCRETEIRA D	
		fc,efetivo (MPa)	Eci (GPa)	fc,efetivo (MPa)	Eci (GPa)	fc,efetivo (MPa)	Eci (GPa)	fc,efetivo (MPa)	Eci (GPa)
C25	CP 03	37,20	32,89	36,39	27,54	31,01	20,82	28,93	19,92
	CP 04	34,19	31,06	35,71	28,26	34,31	21,34	28,12	23,04
	CP 05	32,92	33,54	37,98	30,32	33,83	21,90	31,09	26,09
	CP 06	36,13	34,79	35,25	33,06	32,68	22,90	29,65	22,54
C30	CP 03	45,24	33,67	29,00	27,83	29,34	19,35	32,12	30,69
	CP 04	41,78	32,73	26,69	27,67	30,00	20,46	29,53	28,81
	CP 05	43,26	31,99	<b>20,51</b>	<b>25,59</b>	31,11	21,00	36,10	30,04
	CP 06	43,16	34,92	27,65	26,65	28,19	19,33	34,92	29,99
C35	CP 03	48,91	36,12	<b>29,76</b>	<b>31,80</b>	33,62	23,96	33,18	32,46
	CP 04	49,43	35,32	43,20	33,24	35,43	20,45	28,67	28,21
	CP 05	45,39	30,95	37,36	32,43	34,94	21,59	24,42	21,99
	CP 06	44,31	35,79	37,21	31,87	32,03	20,56	31,34	32,72

Fonte: Autor.

Quando não forem realizados ensaios e não existirem dados mais precisos sobre os concretos a serem utilizados na obra, a ABNT NBR 6118:2014, (item 8.2.8), permite que o módulo de elasticidade seja estimado aos 28 dias através da resistência à compressão do concreto, utilizando a Equação 05 para concretos com  $f_{ck}$  entre 20 MPa e 50 MPa. Nas figuras 22, 23, 24 e 25 apresenta os gráficos do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão que compara os resultados desse estudo com a equação normativa, considerando o parâmetro  $\alpha_e$  igual a 1 por se tratar de granito, e ainda com a Equação 08, referente ao estudo de Martins (2008) que também utilizou granito em seus concretos. Com o software Statistica 7.0 foi realizado uma regressão não linear com os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, obtendo-se equações que melhor se ajustaram aos resultados, sendo apresentado no decorrer deste capítulo.

Figura 22 - Relação entre  $E_{ci}$  e  $f_c$  da Concreteira A

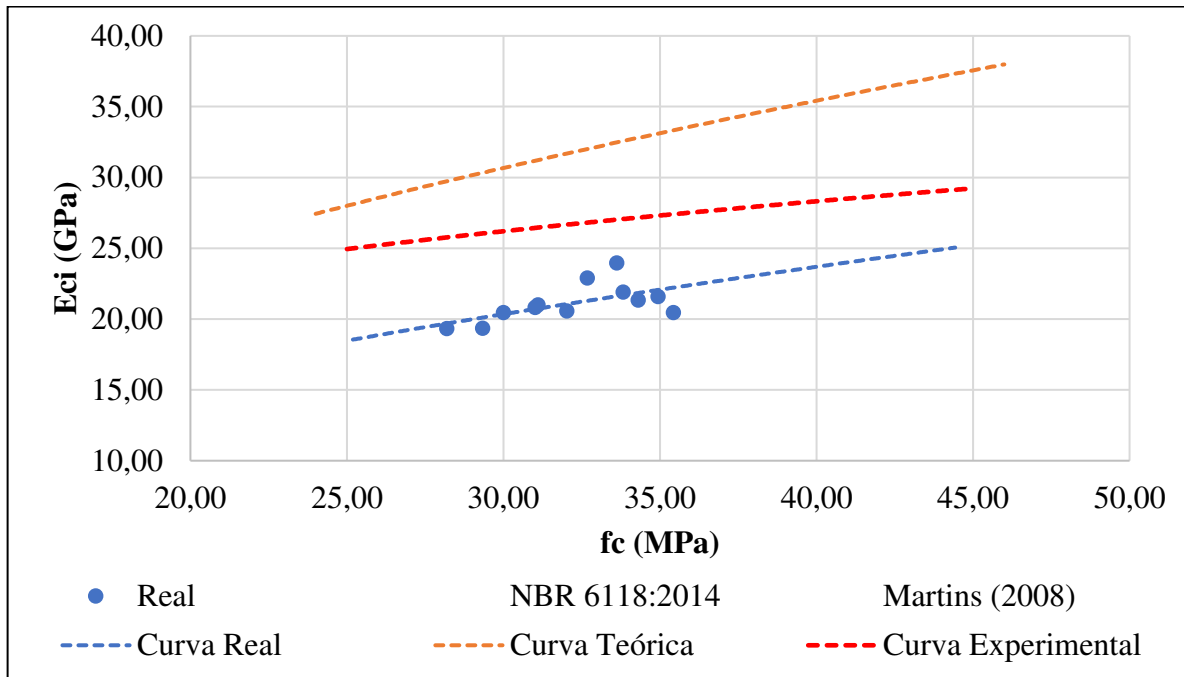
Fonte: Autor.

Figura 23 - Relação entre  $E_{ci}$  e  $f_c$  da Concreteira B

Fonte: Autor.

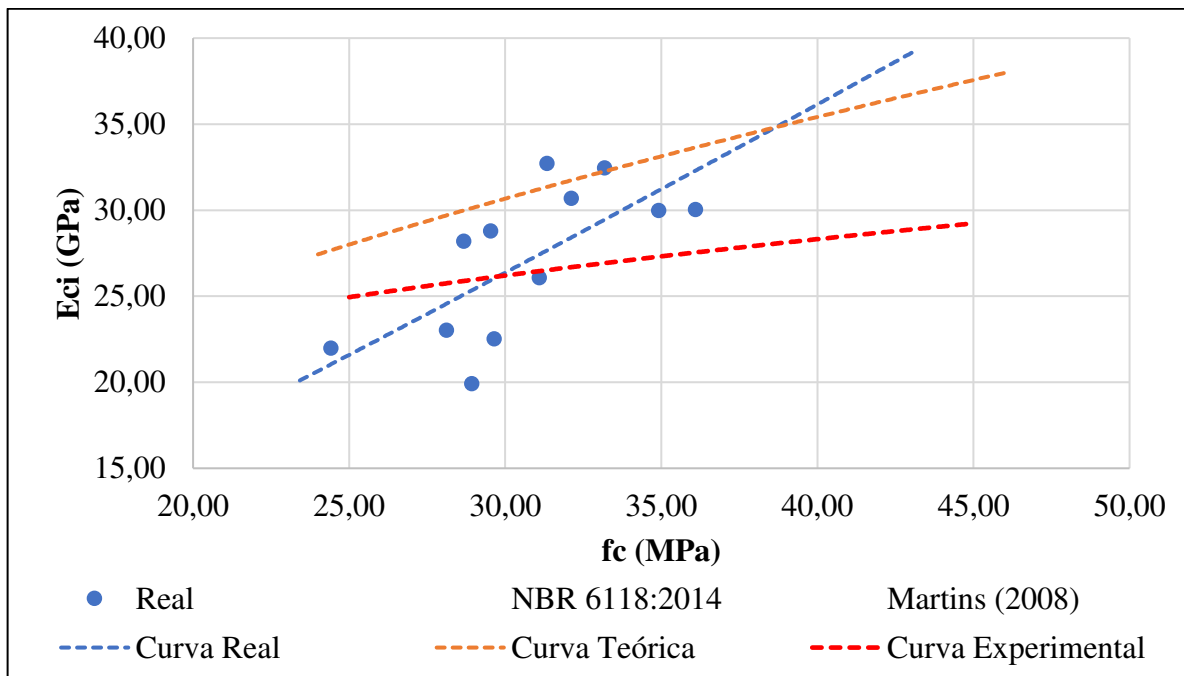


Figura 24 – Relação entre Eci e fc da Concreiteira C



Fonte: Autor.

Figura 25 - Relação entre Eci e fc da Concreiteira D



Fonte: Autor.

De forma geral, os gráficos da Figura 22, 23, 24 e 25 indicam que a expressão da ABNT NBR 6118:2014 superestima o valor de  $E_{ci}$  dos concretos usinados de Fortaleza. Em especial para a Concreteira A foi constatado que para resistências à compressão inferiores a 35 MPa, a equação normativa expressa bem a realidade local e para a concreteira D com resistências à compressão acima de 40 MPa, a expressão teórica resulta a valores satisfatório do módulo de elasticidade. Esses resultados obtidos indicam que podem ocorrer nas estruturas de concreto deformações não consideradas no cálculo estrutural.

Os resultados do estudo de Martins (2008) em geral são menores do que a presente pesquisa, no qual pode ser considerado mais conservador, por considerar maiores deformações. A concreteira C foi a que apresentou menores resultados do módulo de elasticidade em comparação aos resultados da ABNT NBR 6118:2014 e do estudo de Martins (2008), podendo ser explicado possivelmente pela natureza do agregado graúdo.

As equações obtidas de cada concreteira foram ajustadas utilizando o software Statistica 7.0 para verificar a expressão do tipo  $E_{ci} = k_1 f_c^{k_2}$ , forçando  $k_2$  igual a 0,5. Assim obteve-se os valores de  $k_1$ . Na Tabela 10 está apresentada todas as equações ajustadas.

Tabela 10 - Equações ajustadas dos resultados reais.

CONCRETEIRA	EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
A	$E_{ci} = 5,199 f_c^{0,5}$	9
B	$E_{ci} = 5,087 f_c^{0,5}$	10
C	$E_{ci} = 3,727 f_c^{0,5}$	11
D	$E_{ci} = 4,933 f_c^{0,5}$	12

Fonte: Autor.

#### 4.4 Valor do coeficiente $\alpha_e$ ajustado.

Para cada equação obtida de cada concreteira foram determinadas o valor do coeficiente  $\alpha_e$  ajustado. Comparando-se o valor de  $k_1$  com a equação normativa da ABNT NBR 6118:2014 (Equação 5), que é dado por  $\alpha_e \cdot 5600$ , determinou-se para cada concreteira o valor de  $\alpha_e$  corrigido para os concretos produzidos em Fortaleza (Tabela 11).

Tabela 11 – Fator de correção  $\alpha e$ 

<b>CONCRETEIRA</b>	<b><math>\alpha e</math></b>
A	0,928
B	0,908
C	0,666
D	0,881

Fonte: Autor.

Com base nos valores apresentados na Tabela 11 podemos constatar que o parâmetro  $\alpha e$  corrigido é menor do que o sugerido na NBR 6118:2014 ( $\alpha e = 1,0$  para granito e gnaisse). Tal parâmetro depende do tipo de rocha que compõem os agregados graúdos, no qual por meio dos resultados encontrados, esse valor para as rochas do tipo granito e gnaisse, características do Ceará, estão defasados com relação a norma.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Conclusões**

Este trabalho além a revisão bibliográfica que exprime todo o embasamento teórico dessa pesquisa, apresentou os resultados do estudo experimental que envolveu concretos produzidos por 4 concreteiras diferentes de Fortaleza. Devido as dificuldades de se encontrar resistências características superiores a 35 MPa, procurou-se então abranger os concretos com resistências à compressão variando dentro da faixa de uso mais comum (25, 30 e 35 MPa) e agregados graúdos típicos das pedreiras do Ceará. Ao todo, foram realizados 48 ensaios de módulo de elasticidade e 24 ensaios de resistência à compressão.

Nessa análise foi possível verificar que a expressão proposta pela NBR 6118:2014 para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial por meio da resistência à compressão aos 28 dias superestima os valores do módulo de elasticidade dos concretos produzidos em Fortaleza, chegando a apresentar uma diferença significativa. Essa defasagem pode implicar em erros no cálculo estrutural, por não considerar possíveis deformações advindas da estrutura no instante da desforma, por exemplo.

Por meio da Tabela 11, que apresenta os valores do parâmetro  $\alpha_e$ , será possível obter um valor mais preciso do módulo de elasticidade dos concretos produzidos em Fortaleza. Esse valor sendo utilizado no cálculo estrutural resultará em valores mais confiáveis, que expressa melhor o comportamento real da estrutura de concreto armado.

### **5.2 Sugestões para pesquisas futuras**

Para trabalhos futuros fica sugerido a realização de ensaios de módulo de elasticidade para diferentes idades do concreto, bem como a padronização de variáveis no traço dos concretos, como tipo de cimento, fração volumétrica dos agregados graúdos e adições. Fica sugerido o mesmo estudo para resistências características maiores, afim de se analisar a tendência do crescimento dos resultados. Por fim, o estudo da mineralogia dos agregados graúdos da região do Ceará será bastante relevante para a compressão do módulo de elasticidade do concreto produzido a nível local.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Notas de aula da disciplina de Concreto armado**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002. 24 p. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2019
- ARAUJO, Suélio da Silva; GUIMARÃES, Gilson Natal; GEYE, André Luiz Bortolacci. Influência do Tipo de Medição, do Tipo de Concreto e da Dimensão do Corpo de Prova Cilíndrico na Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.**, São Paulo, v. 5, n. 1, p.1-13, out. 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952012000500001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt#fig01](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000500001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt#fig01)>. Acesso em: 20 ago. 2019
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central - procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67/1998** – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5 ed. Distrito Federal: Ltc, 1994. 448p.
- BRASIL. Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará. Mapa na escala 1:500.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Fortaleza, 2003
- BRESOLIN, Gustavo. **Influência das técnicas de cura na resistência do concreto e análise da incorporação de cal hidratada na técnica de cura por aspersão periódica de água**. 2016. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

DJANIKIAN FILHO, João Gaspar. **Controle do módulo de elasticidade do concreto na estrutura com o uso de células de fluência**. 2010. 78 f. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: GERALDO CEHELLA ISAIA (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 29. p. 905-944.

KUMMER, Lucas Marcel. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de uma central dosadora de concreto de Lajeado/RS**. 2016. 67 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

LI, Zongjin. **Advanced Concrete Technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 521 p

LOGISMARKET (São José dos Pinhais). **Prensas compressão para concreto (EMIC PCE100C)**. Disponível em: <<https://www.logismarket.ind.br/instron-emic/prensas-compressao-para-concreto-pce-100c/4010244933-p.html>>. Acesso em: 22 jun. 2019.

MARCHI, Renata D'agostino de. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associado a fatores intrínsecos à produção do material**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <[https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-23032012-102942/publico/Dissertacao\\_RenataDeMarchi.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-23032012-102942/publico/Dissertacao_RenataDeMarchi.pdf)>. Acesso em: 24 maio 2019.

MARTINS, Danilo Gomes. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia-GO**. Goiânia: UFG, 2008.

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

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, J. M. Paulo. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p

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

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedade do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

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

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NUNES, Fábio W. G. **Avaliação da resistência e do módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

ROHDEN, Abrahão Bernardo. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** Porto Alegre: UFRGS, 2011.

SHEHATA, L. D. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** ed. G.C. Isaías. São Paulo: IBRACON, 2005.

SHEHATA, L. D. **Concreto: ciência e tecnologia.** ed. G. C. Isaia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011.