

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Daniel Rauber

**ANÁLISE DOS MÉTODOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS PARA A
DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ESTRUTURAL**

Santa Cruz do Sul

2015

Daniel Rauber

**ANÁLISE DOS MÉTODOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS PARA A
DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ESTRUTURAL**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. M.Sc. Christian Donin
Orientador

Daniel Rauber

**ANÁLISE DOS MÉTODOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS PARA A
DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ESTRUTURAL**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz
do Sul para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

M. Sc. Christian Donin

Professor orientador – UNISC

M. Sc. Marco Antônio Pozzobon

Professor examinador – UNISC

Dr. Eduardo Rizzatti

Professor examinador - UFSM

Santa Cruz do Sul

2015

RESUMO

Com o avanço da idade das estruturas de concreto, o meio científico se viu forçado a buscar alternativas para determinar os parâmetros do concreto, sem que este processo provoque dano ao material, ou gerando o mínimo de dano possível ao concreto e aos demais materiais estruturais. Neste trabalho elaborou-se uma pequena revisão de alguns métodos de análises em estruturas de concreto, como a extração de testemunhos, esclerometria, *pulloff*, *pullout*, penetração de pinos e pacometria. Após a revisão, realizou-se a comparação entre resultados de resistência superficial, utilizando o esclerômetro, e a resistência à compressão, determinada rompendo-se corpos de prova de um mesmo concreto. Além disso, valendo-se de metodologias encontradas na NBR 6118:2007, NBR 6118:2014, ACI 318-14 e EUROCODE 2, foi determinado o módulo de elasticidade em função das resistências encontradas, comparando-se o resultado com o módulo de elasticidade real verificado por extensômetro. Constatou-se que o esclerômetro fornece resultados de resistência consistentes, mesmo não devendo ser empregado para uma análise definitiva do concreto. Também se verificou que o esclerômetro pode ser utilizado como ferramenta para o controle tecnológico do módulo de elasticidade do concreto, visto que a resistência superficial obtida pode ser utilizada em fórmulas previstas em norma com resultados aproximados do experimental, principalmente na metodologia de cálculo apresentada pela NBR 6118:2014, com os resultados mais aproximados.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade; resistência à compressão; esclerometria; ensaios não destrutivos; patologias.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação para agregado, pasta de cimento e concreto	21
Figura 2 - Representação esquemática do módulo de deformação secante	30
Figura 3 - Representação esquemática do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial.....	31
Figura 4 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade pela metodologia A.....	32
Figura 5 - Ruptura à compressão de concretos com resistência de até 40 MPa	35
Figura 6 - Modo real e aparente de ruptura do concreto	36
Figura 7 - Resistências médias esperadas de testemunhos extraídos em diferentes alturas de um pilar.....	38
Figura 8 - Detalhes esclerômetro Schmidt – Tipo N.....	41
Figura 9 – Esquema simplificado do funcionamento mecânico do esclerômetro	42
Figura 10 - Modelo simplificado do funcionamento mecânico do esclerômetro	43
Figura 11 - Dados do osciloscópio utilizado por Akashi T. e Amasaki S.	45
Figura 12 - Tensões de compressão no êmbolo de impacto.....	46
Figura 13 - Correlação entre os ensaios de esclerometria e resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	48
Figura 14 - Representação esquemática do ensaio pulloff	50
Figura 15 - Correlação entre os ensaios de pulloff e resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	54
Figura 16 - Esquemática do ensaio pullout.....	55
Figura 17 - Técnica para ensaio pullot em estruturas já executadas	56
Figura 18 - Zonas de tensão durante o ensaio pullout	57
Figura 19 - Zona danificada no ensaio de penetração de pino.....	59
Figura 20 - Influência do tipo de agregado na relação entre comprimento exposto e resistência à compressão.....	60
Figura 21 - Faixa máxima de medição possível do aparelho da Profoscope (sem a interferência de outras barras)	63
Figura 22 - Moldagem dos corpos de prova de concreto	66
Figura 23 – Corpos de prova moldados da primeira edificação	67

Figura 24 - Ensaio esclerométrico em corpo de prova	69
Figura 25 - Ensaio esclerométrico em estrutura de concreto	70
Figura 26 - Ensaio realizado em três alturas distintas do pilar	71
Figura 27- Esclerômetro utilizado.....	72
Figura 28 - Extensômetro fixado ao corpo de prova.....	73
Figura 29 - Extensômetro utilizado.....	74
Figura 30 - Rompimento de corpo de prova.....	76
Figura 31 - Diagrama tensão-deformação para a edificação 1.....	80
Figura 32 - Diagrama tensão-deformação para a edificação 2.....	81
Figura 33 - Diagrama tensão-deformação para a edificação 3.....	81
Figura 34 - Comparação dos valores de resistência obtidos.....	88
Figura 35 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 1	91
Figura 36 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 2	92
Figura 37 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 3	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de agressividade ambiental (CAA)	17
Tabela 2 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental	18
Tabela 3 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica do concreto (considerando o uso do granito como agregado graúdo)	22
Tabela 4 - Classes de consistência.....	25
Tabela 5 - Número de camadas para a moldagem de corpos de prova.....	26
Tabela 6 - Fator de correção empregados para diferentes relações h/d.....	27
Tabela 7 - Resistência relativa do concreto de acordo com o tipo de cimento e idade	37
Tabela 8 - Correção da resistência do concreto em diferentes relações h/d.....	39
Tabela 9 - Número de corpos de prova necessários para a análise de estruturas de concreto armado	40
Tabela 10 - Valores de resistência encontrados para os corpos de prova.....	79
Tabela 11 – Valores de módulo de elasticidade experimental	82
Tabela 12 - Valores de resistência superficial obtidos por ensaio esclerométrico in loco	83
Tabela 13 - Ensaio esclerométrico em alturas distintas de pilar.....	84
Tabela 14 – Comparação dos resultados de resistência.....	87
Tabela 15 - Resistências utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade	89
Tabela 16 – Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 1	90
Tabela 17 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 2	91
Tabela 18 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 3	92

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. ÁREA E LIMITAÇÃO DO TEMA	13
3. JUSTIFICATIVA	14
4. OBJETIVOS	15
4.1. Geral.....	15
4.2. Específicos	15
5. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
5.1. Introdução	16
5.2. Durabilidade das estruturas de concreto	17
5.3. Propriedades do concreto	19
5.3.1. Resistência à compressão	19
5.3.2. Resistência à tração.....	19
5.3.3. Módulo de elasticidade.....	20
5.3.3.1. Considerações apresentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas 21	
5.3.3.2. Considerações sobre normas internacionais de concreto	23
5.4. Parâmetros normativos visando o controle das propriedades do concreto	24
5.4.1. Moldagem e cura de corpos de prova de concreto	24
5.4.2. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos	27
5.4.3. Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.....	28
5.4.4. Módulo de elasticidade experimental segundo a NBR 8522:2008	29
5.5. Métodos de testes em estruturas	33
5.5.1. Destrutivos	34
5.5.1.1. Extração de testemunho	34
5.5.2. Não destrutivos (NDT).....	40
5.5.2.1. Esclerometria.....	40

5.5.2.1.1. Pesquisas/estudos sobre esclerometria	49
5.5.2.2. <i>Pulloff</i>	50
5.5.2.3. <i>Pullout</i>	54
5.5.2.4. Penetração de pinos	58
5.5.2.5. Pacometria.....	62
6. MATERIAIS E MÉTODOS	64
6.1. Introdução	64
6.2. Moldagem e cura dos corpos de prova	65
6.2.1. Procedimentos	65
6.2.2. Equipamentos	67
6.2.3. Características	68
6.3. Ensaio esclerométrico	68
6.3.1. Procedimentos para as medições realizada em laboratório.....	68
6.3.2. Procedimentos para as medições realizadas <i>in loco</i>	69
6.3.3. Equipamentos	72
6.3.4. Características	72
6.4. Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade	73
6.4.1. Procedimentos	73
6.4.2. Equipamentos	74
6.4.3. Características	75
6.5. Ensaio de compressão em laboratório	75
6.5.1. Procedimentos	75
6.5.2. Equipamentos	76
6.6. Cálculo do módulo de elasticidade em função da resistência através de procedimentos normativos	76
7. RESULTADOS.....	78
7.1. Caracterização geral das amostras de concreto	78

7.2. Resultados obtidos nos ensaios de compressão e esclerometria em corpo de prova 78	
7.3. Resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade ...	79
7.4. Resultados obtidos por ensaio esclerométrico <i>in loco</i>	82
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
8.1. Análise da caracterização geral das amostras de concreto	84
8.2. Análise dos resultados obtidos nos ensaios de compressão e esclerometria em corpo de prova	85
8.3. Análise dos resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade	85
8.4. Análise dos resultados obtidos por ensaio esclerométrico <i>in loco</i>	86
8.5. Comparação e análise dos resultados de resistência	86
8.6. Comparação e análise dos resultados de módulo de elasticidade	89
9. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
9.1. Conclusões.....	95
9.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO.....	100

1. INTRODUÇÃO

Por anos o concreto foi um dos materiais mais utilizados na área da construção, sendo considerado um componente ideal e imutável. Contudo, na segunda metade do século XX, estudos mostraram que dificilmente o concreto chegava em um século de vida em plenas condições de integridade. Com a idade das estruturas de concreto armado avançando, o meio científico e tecnológico se viu obrigado a direcionar seus estudos para realizar uma avaliação do estado do concreto. Os significativos avanços tecnológicos que se sucederam contribuíram de maneira fundamental para as análises de estruturas na área da construção civil, principalmente com o aprimoramento dos ensaios não destrutivos (NDT), que possibilitam avaliar parâmetros fundamentais do concreto, principalmente sua resistência à compressão, em qualquer idade e com nível de dano ínfimo ou mesmo inexistente, além de possuírem um custo relativamente baixo. (SILVA *et al*, 2013).

Habitualmente, o método mais utilizado para avaliar a resistência do concreto é a extração de testemunhos, um ensaio em que corpos de prova são rompidos em prensas e utilizados como parâmetro para determinar a resistência de toda uma estrutura. Contudo, Bottega (2010) lembra que a prática demonstra que o concreto *in situ* é um meio heterogêneo, sendo necessária uma considerável gama de testemunhos para uma avaliação mais precisa. Além disso, a extração pode danificar uma estrutura, podendo chegar ao ponto de comprometer o desempenho da peça estrutural, caso os esforços atuantes não sejam considerados (SILVA *et al*, 2013).

Além das análises para que possa ser feita a verificação da integridade do concreto, é preciso considerar que, assim como as pessoas, as estruturas de concreto armado também podem ser agredidas por agentes patológicos que causam uma degradação pontual na estrutura, podendo evoluir até o colapso geral da unidade. Os ensaios não destrutivos auxiliam na detecção e diagnóstico de defeitos e anomalias, elucidando manifestações como trincas, rachaduras ou flechas excessivas, além de detectar e localizar corrosão de armaduras ou mesmo vazios em elementos de concreto armado (SILVA *et al*, 2013).

Outro ponto fundamental e que deve ser considerado para possa ser realizada uma melhor análise das estruturas é o módulo de elasticidade do concreto, que

determina a rigidez do material. A propriedade influencia de maneira fundamental o concreto, visto que determina a deformação dos elementos sob determinada tensão. Contudo, historicamente o módulo de elasticidade tende a não ser verificado por ensaios, não deixando claro se o módulo utilizado nas etapas de projeto foi atendido *in loco*, pondo em risco a segurança e deformabilidade da estrutura.

Tendo estes aspectos em mente, o engenheiro civil deve estar capacitado a analisar, diagnosticar e recuperar estruturas de concreto, evitando as eventuais notícias de desabamento de edifícios, quedas de lajes, viadutos e patologias em obras já prontas ou em execução. Garantindo, assim, a integridade dos ocupantes das edificações.

2. ÁREA E LIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho foi desenvolvido na área de estruturas e construção civil, valendo-se de conhecimentos angariados em diversas disciplinas do curso, como Construção II, Patologia de Estruturas de Concreto Armado, Resistência dos Materiais Avançada, Concreto Armado I e Concreto Armado II. A pesquisa delimita-se no estudo de métodos usuais de avaliação das estruturas de concreto armado, visando angariar o máximo de conhecimento sobre cada ensaio, levando em consideração sua precisão, recomendações e fatores que influenciam nos resultados obtidos.

3. JUSTIFICATIVA

Acidentes em estruturas de concreto armado ocorrem muito provavelmente desde que o método construtivo teve início. Os fatores causadores variam entre concepção, projeto, execução ou mesmo alguma ocorrência incomum de utilização. Com o intuito de realizar um estudo das estruturas para determinar sua resistência, foram desenvolvidos diversos métodos de ensaio para verificação do concreto. Cada ensaio apresenta diferentes características, como grau de precisão, aparelhagem, tempo de execução, tratamento dos dados, danos à estrutura e custos.

Tendo isso em mente, o trabalho visa conhecer os métodos mais comuns de ensaio em estruturas de concreto armado, apresentando suas vantagens, desvantagens, aplicações comuns e seu grau de precisão quando comparados a métodos destrutivos considerados mais precisos, como o rompimento de testemunho.

Além disso, o trabalho tem como objetivo utilizar um método não destrutivo para verificar se as propriedades de resistência e deformabilidade do concreto definidas na fase de projeto estão sendo atendidas, garantindo a segurança e a durabilidade da estrutura, ou mesmo já visando algum reforço ou recuperação estrutural em caso de patologias.

4. OBJETIVOS

4.1. Geral

Caracterizar os principais métodos destrutivos e não destrutivos de ensaio que visam a determinação das propriedades do concreto estrutural, como resistência à compressão e módulo de elasticidade.

4.2. Específicos

- Caracterizar os principais métodos de ensaio destrutivos e não destrutivos de estruturas de concreto armado;
- Buscar em referencial bibliográfico o funcionamento detalhado de cada método, avaliando o grau de precisão de cada um;
- Descrever o modo de operação de cada método, apresentando as situações onde cada ensaio é solicitado;
- Aplicar e comparar algum método estudado para um caso real de uma estrutura, apresentando vantagens e desvantagens do ensaio quando aplicado ao caso analisado;
- Comparar os resultados de resistência superficial obtidos utilizando o esclerômetro com os resultados obtidos no ensaio de compressão de corpos de prova;
- Comparar os resultados obtidos seguindo os modelos para cálculo de módulo de elasticidade definidos pelas normas da ABNT, ACI e EUROCODE em função da resistência com os resultados obtidos de maneira experimental.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

5.1. Introdução

De acordo com Cánovas (1988), os ensaios informativos foram desenvolvidos para que seja possível avaliar a qualidade de uma estrutura de concreto que se encontra em execução, em serviço ou fora, ou até mesmo em casos que alguma falha ou acidente tenha ocorrido. Além disso, em determinados casos, a resistência estimada do concreto não atinge aos parâmetros estabelecidos de resistência característica. Este aspecto implica na necessidade de uma avaliação da resistência real da estrutura, para que seja possível verificar a possibilidade de ocorrer alguma espécie de patologia quando ocorre a solicitação.

Outro caso comum é a mudança de utilização da estrutura, fazendo com que a carga de serviço seja alterada e acabe por se tornar superior à carga considerada durante o dimensionamento da estrutura. Nestes casos, uma avaliação para verificar a resistência real da peça de concreto deve ser executada, tendo como objetivo verificar a eventual necessidade de algum reforço com o intuito atender às novas solicitações. Já nos eventuais casos em que a estrutura não está atendendo aos estados de serviço, com deformações excessivas, abertura de fissuras ou até mesmo algum tipo de recalque acima do estabelecido por norma, ensaios devem ser executados para que possa ser estabelecida a causa das patologias (CÁNOVAS, 1988).

Por fim, é possível determinar a resistência residual dos elementos que consistem as estruturas que sofreram alguma ação acidental não prevista durante a execução ou utilização, como incêndio, impactos durante ou após a execução, sobrecarga eventual não prevista no dimensionamento, etc. Nestes casos, é necessário apurar a resistência do aço e do concreto para determinar a necessidade de algum reforço, reparo ou mesmo uma demolição. Para que todos estes ensaios possam ser executados de maneira adequada, diversas normas foram elaboradas para garantir maior precisão nos resultados obtidos, como ACI, ASTM, DIN, ABNT e BS (CÁNOVAS, 1988).

Ainda segundo o autor, são definidos os principais parâmetros que devem ser abordados para que seja possível realizar uma análise de segurança de uma estrutura são a resistência à compressão-tração e módulo de elasticidade do concreto, tração, alongamento e ruptura do aço e curvas de tensão-deformação de ambos os materiais.

5.2. Durabilidade das estruturas de concreto

A NBR 6118:2014 regulamenta que as estruturas de concreto armado devem ser projetadas com o objetivo de manter a sua segurança, estabilidade e aptidão durante toda a vida útil prevista, considerando as condições ambientais aplicáveis e utilizando-a dentro dos conformes estabelecidos pelo projetista. Em se tratando do conceito de vida útil, é entendido que se trata do período em que não é necessária nenhuma intervenção significativa, mas considerando possíveis reparos causados por danos acidentais.

A estrutura de concreto armado sofre constantemente ações provenientes do meio em que está exposta, sendo necessário classificar a classe de agressividade da estrutura de acordo com a Tabela 1 (ABNT NBR 6118:2014).

Tabela 1 - Classe de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
	I	Fraca	Rural Submersa
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Para evitar a corrosão do aço, é necessário dar uma significativa atenção à qualidade do concreto e ao cobrimento da armadura, especialmente na região das fissuras transversais à armadura principal, dada a possibilidade de corrosão sob tensão. Caso a fissura tenha uma abertura característica acima das previstas em norma, é possível que haja uma corrosão acentuada nesse ponto. Caso o nível de fissuração esteja abaixo do limite estabelecido em norma, este é satisfatório para atender as exigências de durabilidade e não se caracteriza como patologia (ABNT NBR 6118:2014).

A Tabela 2 define o valor máximo da fissuração para o concreto em diferentes situações.

Tabela 2 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente
^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1). NOTAS 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2. 2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens. 3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.			

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

Já em armaduras passivas, a NBR 6118:2014 define que a abertura máxima de fissuras deve ficar na ordem de 0,2 mm a 0,4 mm. Abaixo disso não apresenta risco de corrosão das armaduras.

5.3. Propriedades do concreto

5.3.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão caracterizada na NBR 6118:2014 refere-se aos resultados obtidos ao ensaiar-se corpos de prova cilíndricos em prensa. A idade destes corpos de prova varia e, quando não for indicada, refere-se à idade de 28 dias. A moldagem dos corpos de prova e seu rompimento devem estar de acordo com as normas NBR 5738:2015 e NBR 5739:2007, respectivamente.

5.3.2. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração direta do concreto é difícil de ser executados devido às propriedades do mesmo, sendo mais usual em elementos maleáveis, como o aço, portanto é comum utilizar os ensaios de resistência à tração indireta $f_{ct,sp}$ e resistência à tração na flexão $f_{ct,f}$, que devem ser obtidos com os ensaios de compressão diametral (*splitting test*) e de tração na flexão, respectivamente (ABNT NBR 6118:2014).

A resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada $0,9 f_{ct,sp}$, $0,7 f_{ct,f}$ ou, na falta destes valores, pode ser considerado o seu valor médio ou característico utilizando as seguintes equações, que utilizam como base o valor de f_{ck} (ABNT NBR 6118:2014):

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (1)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (2)$$

- Para concretos de classe até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (3)$$

- Para concretos de classes C55 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1+0,11f_{ck}) \quad (4)$$

onde

- Todos os valores de resistência são expressos em megapascal (MPa)

sendo

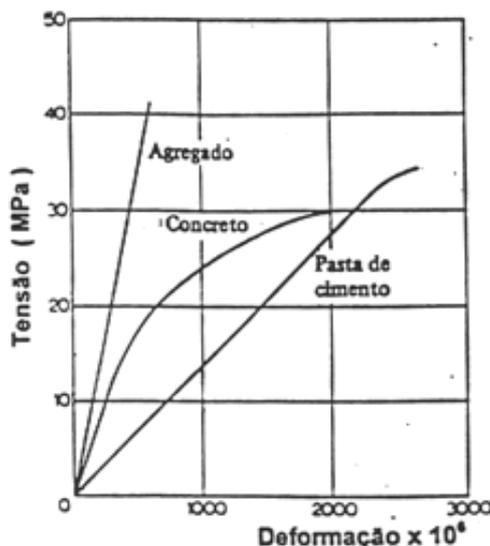
- $f_{ckj} \geq 7$ MPa

5.3.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto E_{ci} consiste na relação entre as tensões aplicadas no material e a deformação resultante no mesmo devido a tais tensões. A NBR 6118:2014 considera que o módulo de deformação tangente inicial é uma reta paralela à do diagrama verdadeiro do gráfico tensão-deformação ou, quando não houver, aplicada à tangente da curva de origem do concreto. Já o conceito de módulo de elasticidade secante trata de substituir o diagrama real por um fictício, da origem até o ponto de carregamento previsto (ABNT NBR 6118:2014; PINHEIRO *et al*, 2004; VASCONCELOS, 2009).

Vasconcelos (2009) lembra que há muita discrepância entre os resultados fornecidos pelos ensaios para a determinação do diagrama tensão-deformação, dadas as diferentes condições de ensaio, como temperatura, velocidade do aumento das cargas, tempo de aplicação das cargas e teor de umidade. Por exemplo, a velocidade do carregamento influi nos poros do concreto, no caso de um carregamento lento, há um fluxo de fluido no interior do material (seja de ar ou água), alongando ou distendendo os poros de maneira distinta a um carregamento rápido, podendo afetar os resultados. Além disso, por ser um meio heterogêneo, constituído de agregado e pasta de cimento, a deformação do concreto sempre se dará de maneira intermediária ao comportamento dos materiais que o compõe. Quando uma tensão é aplicada, o agregado, por ser mais rígido, absorve quase todo o carregamento e deforma-se, transferindo, então, o carregamento para a pasta de cimento, que começa a se destacar do agregado.

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação para agregado, pasta de cimento e concreto



Fonte: Mehta e Monteiro *apud* Vasconcelos (2009)

5.3.3.1. Considerações apresentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas

O módulo de elasticidade experimental deve ser estabelecido por ensaio descrito na NBR 8522:2008, sendo executado aos 28 dias de idade. Contudo, quando não forem realizados tais ensaios, podem ser utilizadas as seguintes equações para estimar o módulo de elasticidade inicial, levando em conta a natureza dos agregados (ABNT NBR 6118:2014):

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa}; \quad (5)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa}. \quad (6)$$

sendo:

- $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio
- $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse
- $\alpha_E = 0,9$ para calcário
- $\alpha_E = 0,7$ para arenito

onde:

- Todos os valores de módulo de elasticidade e resistência são expressos em megapascal (MPa).

A nova versão da NBR 6118:2014 apresenta um fator importante que a difere da sua versão anterior quando analisada a fórmula para a determinação do módulo de elasticidade, que é a presença de um fator que considera a influência do agregado. Como pôde ser verificado na Figura 1, esse fator inclui de maneira significativa a deformação do concreto.

O módulo de elasticidade secante, E_{cs} , utilizado nas etapas de projeto para determinar os esforços solicitantes e realizar a verificação dos estados limites de serviço, pode ser adotado unicamente para avaliação de uma estrutura, para tração e para compressão. De acordo com a norma, seu valor é obtido por (PINHEIRO *et al*, 2004):

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (7)$$

sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1 \quad (8)$$

A NBR 6118:2014 apresenta valores arredondados que podem ser empregados no projeto estrutural. Estes valores estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica do concreto (considerando o uso do granito como agregado graúdo)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

Para idades entre 7 e 28 dias, a NBR 6118:2014 estabelece as seguintes expressões para estimar o módulo de elasticidade do concreto, substituindo f_{ck} por f_{cj} :

Para concretos com f_{ck} de 20 MPa a 45 MPa:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{c(t)}}{f_c} \right]^{0,5} \cdot E_{ci} \quad (9)$$

Para concretos com f_{ck} de 50 MPa a 90 MPa:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{c(t)}}{f_c} \right]^{0,3} \cdot E_{ci} \quad (10)$$

5.3.3.2. Considerações sobre normas internacionais de concreto

Assim como o estabelecido pela NBR 6118:2014, as principais normas possuem diferentes métodos para determinar o módulo de elasticidade do concreto, caso não sejam realizados os ensaios específicos para este fim.

A norma do American Concrete Institute para estruturas do concreto, denominada ACI 318-14, estabelece a seguinte equação para a determinação do módulo de elasticidade do concreto no caso de concreto com massa específica normal:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (11)$$

sendo:

E_c = módulo de elasticidade do concreto

f'_c = resistência característica do concreto aos 28 dias, em megapascal (MPa)

Com relação aos resultados obtidos por ensaios experimentais de corpos de prova, a ACI 318-14 considera o valor equivalente ao verificado até o carregamento de $0,45 f_c$. Além disso, assume como corretos valores com um desvio entre $0,8.E_c$ e $1,2.E_c$.

Já o European Committee for Standardization, para projetos estruturais de estruturas de concreto, denominado EUROCODE 2, estabelece as seguintes equações para a obtenção do módulo de elasticidade secante e tangente:

$$E_{cm} = 22. \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad (12)$$

$$E_c = 1,05. E_{cm} \quad (13)$$

sendo:

E_c = módulo de elasticidade tangente de um concreto com densidade normal

E_{cm} = módulo de elasticidade secante de um concreto com carregamento de até $0,4 f_{cm}$.

Como lembra Helene (2014) e pode ser verificado analisando-se as equações, não há unanimidade entre os métodos, o que pode ocasionar uma falta de compreensão entre projetistas de países distintos. Além disso, os diferentes pontos que podem ser adotados para o traçado da reta, em função da norma e em função da resistência adotada, seja média ou característica, influencia no coeficiente angular, gerando diferença no valor do módulo de elasticidade adotado. Ainda é necessário lembrar que estudos apresentados pelo autor, realizados por Montija (2007) e Bittencourt *et al.* (2014), verificaram uma variabilidade da ordem de 10% a 15% em ensaios realizados em diferentes laboratórios do Brasil.

5.4. Parâmetros normativos visando o controle das propriedades do concreto

5.4.1. Moldagem e cura de corpos de prova de concreto

Para a moldagem e cura dos corpos de prova de concreto a NBR 5738:2015 estabelece os parâmetros normativos vigentes. Tais parâmetros serão seguidos para as amostras de concreto coletadas e ensaiadas neste trabalho.

As dimensões do corpo de prova cilíndricos devem ser tais que a altura seja igual ao dobro do diâmetro, sendo permitidos corpos de prova com 10 cm, 15 cm e 20 cm de diâmetro, com variação de 1%, e alturas com variação de 2%. Já o molde

utilizado para sua confecção deve ser constituído de material não absorvente e não reativo com cimento, garantindo a estanqueidade e evitando a perda de água, além de ser aberto na extremidade superior para permitir a desmoldagem do concreto sem que o mesmo seja danificado. A base, de material rígido, deve garantir a planeza da amostra dentro do limite de 0,05 mm.

A haste utilizada para o adensamento do concreto deve ser constituída de aço, com superfície plana, extremo semiesférico e com diâmetro de 16 mm. O ensaio para a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone deve ser executado seguindo as orientações da NBR NM 67:1998, antes da moldagem dos corpos de prova. Dados os valores obtidos, a NBR 5738:2015 orienta o adensamento dos corpos de prova conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classes de consistência

Classe	Abatimento mm	Método de adensamento
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 220$	Manual
S220	$A \geq 220$	

Fonte: ABNT NBR 5738:2015

Os moldes devem ser lubrificados utilizando, por exemplo, óleo mineral, e devem dispor de identificação sempre que necessário no fundo de cada unidade. O concreto deve ser adicionado com concha em U, distribuindo-o de maneira simétrica, e com regularização utilizando a haste de aço. O número de golpes e quantidade de camadas deve ser conforme orienta a Tabela 5, dadas as dimensões básicas do molde e o tipo de adensamento empregado. As camadas dispostas devem possuir volume semelhante e ser adensadas com a haste, sendo que a primeira camada deve ter toda a sua espessura atravessada, mas sem golpear a base em demasia. A camada posterior deve ter sua espessura total atravessada, com a haste ainda penetrando cerca de 2 cm na camada anterior. Além disso, última camada é constituída de volume excessivo de concreto, completando inteiramente o molde e,

após adensada, deve ter seu excesso removido por rasamento com a borda do molde, valendo-se de régua metálica (ABNT NBR 5738:2015).

Tabela 5 - Número de camadas para a moldagem de corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	–	–
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450 ^b	3	–	–

^b Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta Tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

^c No caso de dimensão básica de 450 mm, somente é permitido adensamento mecânico.

Fonte: ABNT NBR 5738:2015

Ainda seguindo as orientações da norma, após a moldagem os corpos de prova, eles devem ser imediatamente locados em local horizontal e coberto pelas primeiras 24 h, livre de vibrações que possam interferir em sua forma ou propriedades durante o início de pega e cura inicial. Dadas as primeiras 24 h, o concreto pode ser transportado para o local de ensaio, desmoldados e imersos em água até que a idade de rompimento seja atingida.

Uma vez atingida a idade de 28 dias, os corpos de prova são retirados da cura úmida e submetidos à retificação ou capeamento, de modo a tornar as superfícies dos mesmos planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova.

5.4.2. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

Para a execução do ensaio de compressão do corpo de prova cilíndrico, deve ser utilizada prensa que atende aos valores máximos admissíveis propostos pela NBR NM ISSO 7500-1. A estrutura deve possuir a capacidade de aplicar força de maneira controlada sobre o corpo de prova ensaiado, possuindo um prato fixo e outro realizando um movimento perpendicular a este. O acionamento da máquina deve se dar por fonte contínua, garantindo a estabilidade da aplicação da força e evitando choques que possam influenciar no ensaio. Os pratos devem possuir ajuste necessário e distância entre faces suficiente para posicionar o corpo de prova devidamente. O sistema de medição de força deve garantir precisão aos dados medidos, indicando a força máxima atingida na ruptura.

Os pratos da máquina não devem apresentar desvios de planicidade e devem possuir, em sua menor dimensão, um diâmetro mínimo 4% superior ao maior diâmetro do corpo de prova. O prato inferior da máquina deve apresentar rigidez tal que sua deformação máxima durante o ensaio não ultrapasse 0,0125 mm a cada 150 mm de diâmetro.

O paquímetro utilizado para a determinação das dimensões do corpo de prova deve possuir resolução mínima de 0,1 mm. Com o equipamento deve ser realizada a verificação de h/d dos corpos de prova, com o intuito de verificar se o valor se encontra entre os valores de 1,94 e 2,02. Caso o valor seja inferior, deve ser aplicado fator de correção, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Fator de correção empregados para diferentes relações h/d

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87
NOTA Os índices correspondentes à relação h/d não indicada podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.					

Fonte: ABNT NBR 5739:2007

Antes da verificação da relação h/d, os corpos de prova devem ter suas bases capeadas ou retificadas, sendo devolvidos à cura úmida assim que possível, onde permaneceram até a idade do ensaio. O diâmetro para o cálculo dos corpos de prova deve ser obtido por meio da média de dois diâmetros medidos na metade da altura do corpo de prova, com tolerância de $\pm 0,1$ mm. Já a altura deve ser medida sobre seu eixo longitudinal, incluindo o capeamento, se for o caso, com precisão de $\pm 0,1$ mm.

Os corpos de prova, rompidos aos 28 dias de idade, devem ficar dentro da tolerância de idade permitida pela NBR 5739:2007, de 24 h.

Antes do início de cada ensaio, as faces dos pratos e dos corpos de prova devem ser limpas e secas, centralizando, então, o corpo de prova no prato inferior, fazendo com que a resultante de força passe pelo seu centro. O carregamento aplicado pela máquina deve ocorrer de forma contínua até o final do ensaio, sem a ocorrência de choques, com velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Quando ocorre uma queda brusca de força, o carregamento deve ser cessado e o ensaio finalizado.

A resistência à compressão deve ser calculada através da expressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (14)$$

onde:

f_c é a resistência à compressão, em MPa

F é a força máxima alcançada, em N

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm

5.4.3. Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão

Para a determinação da resistência superficial do concreto valendo-se do ensaio esclerométrico, a ABNT fornece os parâmetros essenciais para ensaio através da NBR 7584:2012.

A NBR 7584:2012 sugere que os pontos em que o ensaio é realizado devem ter tido contato direto com a forma, sendo assim planas e, preferencialmente, verticais. Antes da execução do ensaio, a superfície deve ser preparada por meio de polimento com disco de carborundum com movimentos circulares, removendo posteriormente a poeira a seco. Além disso, no caso das vigas, as regiões inferiores no meio do vão devem ser evitadas, bem como superiores próximas aos apoios. Já no caso das lajes, os ensaios devem ser executados em elementos com no mínimo 100 mm de espessura, garantindo sua rigidez e eliminando fenômenos de ressonância, vibração ou dissipação de energia. Todos os ensaios devem ser afastados no mínimo 50 mm das arestas dos elementos.

Nos locais de ensaio devem ser executados 16 golpes, sendo que todos os pontos devem possuir entre si uma distância mínima de 30 mm, além de nenhum impacto ocorrer duas vezes no mesmo local.

A aplicação do aparelho se dá de maneira ortogonal à área de ensaio, pressionando a barra de percussão contra o ponto no ensaiado até que a mesma desapareça no corpo do esclerômetro, liberando o martelo, que ricocheteia no maciço de concreto. Após o ricochete, o aparelho fornece o índice esclerométrico.

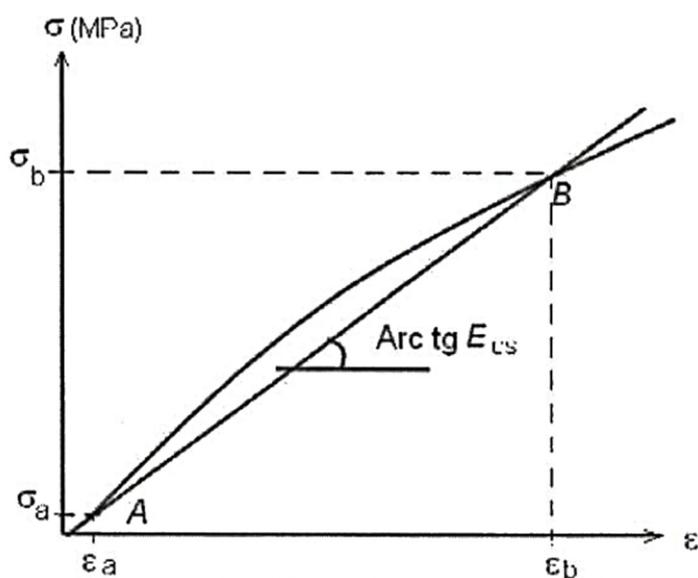
Com os resultados obtidos em cada local de ensaio, deve ser calculada a média aritmética respectiva. Após calculada, todos os pontos individuais com afastamento maior que 10 % da média devem ser desconsiderados, recalculando-se uma nova média. O ensaio só é validado se restasse um mínimo de cinco valores individuais, destoando entre si em menos de 10 %. Após obtido o índice, o valor da resistência superficial pode ser encontrado após correção em função do ângulo empregado no aparelho durante o ensaio, verificando-se a curva de calibração fornecida pelo fabricante do equipamento.

5.4.4. Módulo de elasticidade experimental segundo a NBR 8522:2008

Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto através de extensômetro, a ABNT regulamenta os parâmetros de ensaio através da NBR 8522:2008.

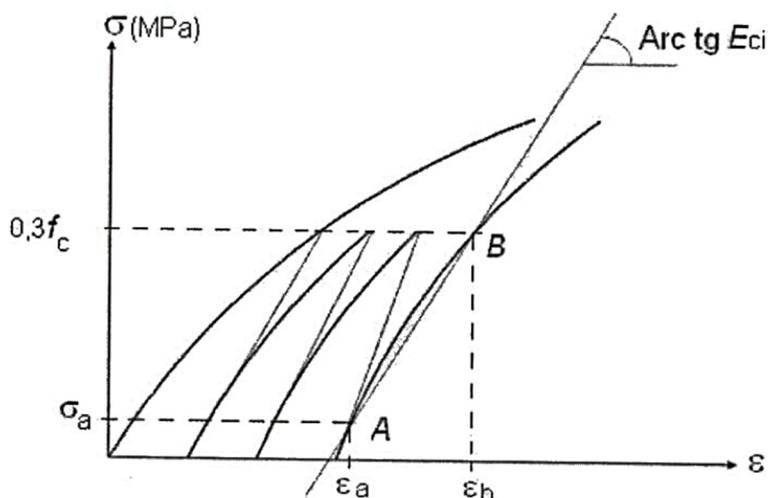
A norma define como E_{cs} o módulo de deformação secante do concreto, que se trata de uma propriedade do concreto cujo valor é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica. A reta é dada pelo traçado entre os pontos A e B, assinalados abaixo, iniciados na tensão σ_a e na tensão considerada no ensaio, conforme pode ser visto na Figura 2. Já o valor de módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial, dado por E_{ci} , é o módulo de deformação secante entre a tensão σ_a e 30 % do valor de f_c .

Figura 2 - Representação esquemática do módulo de deformação secante



Fonte: ABNT NBR 8522:2008

Figura 3 - Representação esquemática do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial



Fonte: ABNT NBR 8522:2008

Para a medição dos valores de deformações causados pelo crescimento progressivo de carga nos corpos de prova, deve ser utilizado aparelho que possa medir tais deformações de maneira precisa e eficiente. Além disso, devem ser utilizados um mínimo de duas bases de medida, posicionadas de maneira que sejam equidistantes entre si ao longo do perímetro do corpo de prova. O comprimento entre estas bases de medida deve ser de no mínimo $2/3 d$ e no máximo igual a uma medida de diâmetro (d). Os corpos de prova utilizados devem atender ao descrito na NBR 5738, com dimensões, preparo e armazenamento de acordo com a norma.

Para a determinação do módulo de elasticidade, a norma prevê que devem ser rompidos previamente dois corpos de prova para que a resistência do concreto possa ser definida, podendo, assim, estimar de maneira mais precisa a resistência equivalente à 30 % de f_c . Já para a determinação do módulo de elasticidade propriamente dito, devem ser rompidos três corpos de prova.

Uma das metodologias apresentadas pela norma e que será utilizada neste trabalho estabelece o procedimento tendo como a tensão σ_a como valor fixo.

Em uma primeira etapa, o ensaio se dá por um carregamento até a tensão correspondente superior σ_b , equivalente a 30 % da tensão de ruptura por um período

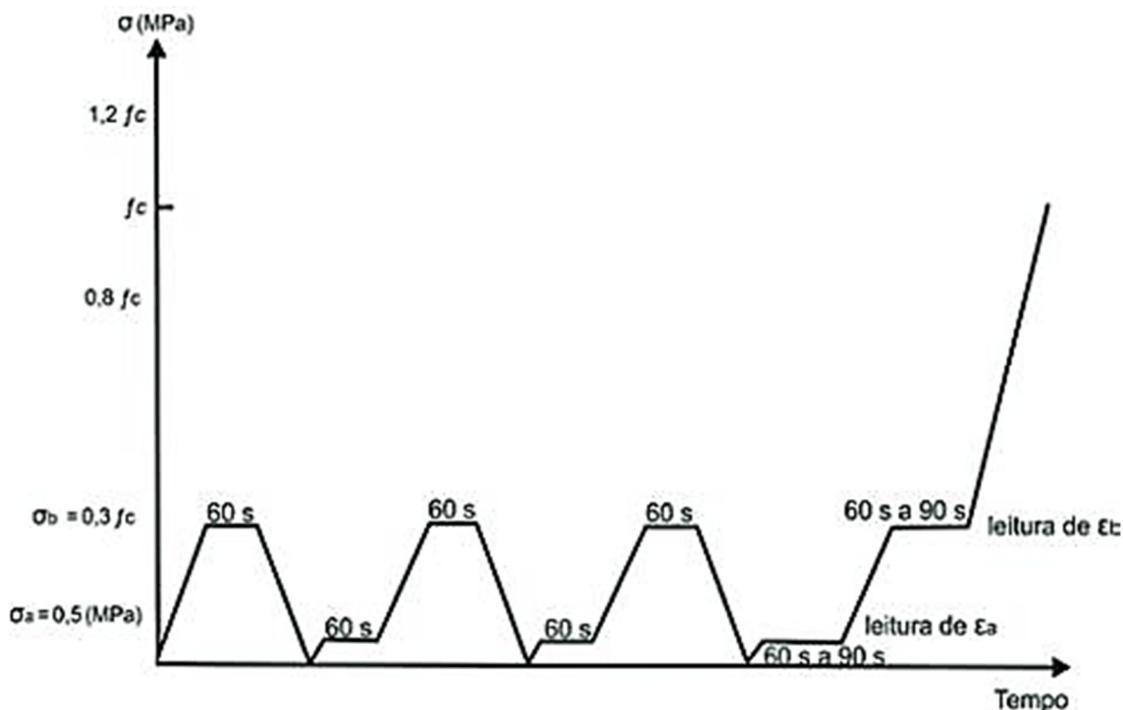
de 60 s. Em seguida, sem perder contato com o corpo de prova, a máquina de ensaio deve reduzir a força até um valor próximo de zero.

Após a conclusão da primeira etapa, inicia-se a segunda, aplicando-se a tensão σ_a de 0,5 MPa por um período de 60 s. Uma vez completo o período de carregamento, a força deve ser aumentada até atingir o valor de σ_b , mantendo o carregamento pelos mesmos 60 s e, dado o período de carga, reduzir o carregamento a um ponto próximo a zero novamente. A segunda etapa deve ser executada duas vezes.

Por fim, o corpo de prova deve ser carregado pela tensão σ_a novamente, de 0,5 MPa e mantida nesse nível por 60 s, registrando-se a deformação ϵ_a em até 30 s. Em seguida, o corpo de prova deve ser carregado com σ_b por 60 s, registrando-se a deformação ϵ_b em até 30 s.

Após as leituras, o aparelho pode ser removido e deve ser dado prosseguimento ao carregamento até atingir um valor de $f_{c,ef}$. Caso este valor diferir em mais de 20 % de f_c , o ensaio deve ser desconsiderado.

Figura 4 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade pela metodologia A



Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}), em gigapascal, utiliza-se a equação:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b^{-0,5}}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (15)$$

onde:

σ_b é a tensão maior aplicada, em megapascal, correspondente a $0,3 f_c$;

0,5 é a tensão σ_a , em megapascal;

ε_b é a deformação média dos corpos de prova sob a maior tensão, sendo $\varepsilon = \Delta L/L$;

ε_a é a deformação média dos corpos de prova sob a menor tensão, de 0,5 MPa.

Além disso, é necessário ressaltar que os valores de deformação individuais não devem diferir em mais de 5 % das deformações médias. Caso este fato ocorra, a amostra deve ser desconsiderada.

5.5. Métodos de testes em estruturas

Com a necessidade de obter-se dados sobre a resistência do concreto, foram desenvolvidos diversos ensaios visando correlacionar fatores obtidos (como a dureza superficial, por exemplo) com a resistência real do concreto ou mesmo obter a resistência à compressão diretamente por meio da ruptura por compressão de um corpo de prova. De acordo com Bottega (2010), dos métodos de análise do concreto, o método destrutivo de ensaio de compressão de testemunhos é o que pode ser considerado mais preciso na obtenção de resultados, já que a resistência é obtida diretamente, sem a necessidade de correlação entre diferentes propriedades do concreto. Contudo, alguns fatores dificultam a sua realização, como locais com grande concentração de armaduras que impedem a extração do corpo de prova, elementos estruturais com dimensões insuficientes para a extração de testemunhos, concreto com resistência muito baixa ou que já se apresenta fissurado ou ainda peças pré-moldadas, já que podem ter sua utilização inviabilizada pela extração. Além disso,

Cánovas (1988) e Fusco (1995) ressaltam alguns fatores que podem distorcer os resultados do ensaio e que serão abordados no item 5.5.1.

Já os ensaios não destrutivos visam obter alguma propriedade do concreto *in situ*, sem que seja causado nenhum dano significativo à peça estrutural, e utilizar esta propriedade para determinar a resistência do concreto propriamente dito. Contudo, sua precisão é relativa, uma vez que diversos fatores podem vir a influenciar o resultado do ensaio além de haver, em determinados casos, uma certa dificuldade em traçar uma correlação precisa entre a grandeza medida pelo ensaio e a resistência real do concreto avaliado (BOTTEGA, 2010).

Devido a estas imprecisões, Carneiro (1975) e Bottega (2010) sugerem que sejam realizados no mínimo dois ensaios, combinando um ensaio não destrutivo com um destrutivo ou mesmo combinando dois ensaios não destrutivos para que haja um certo grau de precisão nos resultados obtidos.

5.5.1. Destrutivos

5.5.1.1. Extração de testemunho

Os testemunhos são corpos de prova, normalmente em formato cilíndrico, extraídos de estruturas de concreto ou então segmentos do aço utilizado na estrutura. Estas amostras devem ser sujeitas a ensaios que visam determinar sua resistência à compressão, tração, módulo de deformação e diagrama de tensão-deformação do concreto e, no caso do aço, resistência à tração, módulo de deformação e diagrama de tensão-deformação (CÁNOVAS, 1988).

Cánovas (1988) estabelece que, durante a concretagem de uma peça estrutural, os corpos de prova de controle devem ser extraídos diretamente de cada caminhão betoneira e moldados por pessoal especializado, que devem submeter cada corpo de prova a condições de cura em condições ótimas. Já os corpos de prova extraídos do elemento estrutural de concreto foram submetidos à transporte, colocação, compactação e cura não tão ideais. Isso implica em uma diferença de resistência entre a amostra de concreto e do testemunho extraído da estrutura, que tende a aumentar sua discrepância de acordo com a resistência do concreto.

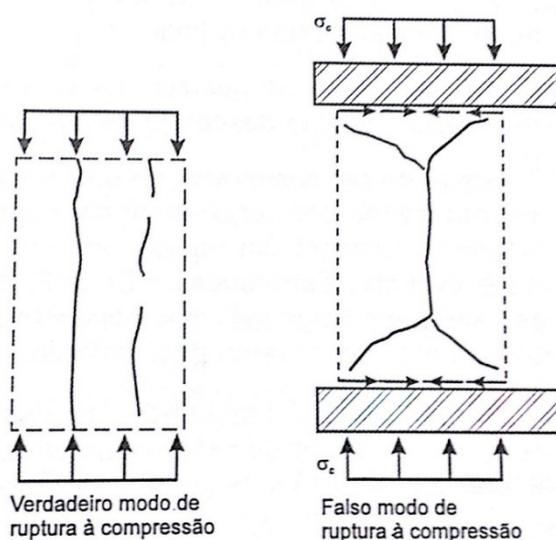
O autor ainda apresenta os principais parâmetros que têm influência direta na resistência dos testemunhos extraídos. Os testemunhos, quando rompidos, muitas vezes apresentam valores diferentes dos esperados quando comparados aos ensaios com corpos de prova de controle, aos ensaios por outros métodos ou mesmo quando comparados a corpos de prova do mesmo lote. Estes parâmetros levantados pelo autor são importantes como referência para explicar algum possível resultado que seja discrepante do esperado ou que não siga o padrão que o lote apresenta. Desta forma é possível citar os referidos parâmetros:

a) Influência da resistência característica do concreto

O grau de influência que o f_{ck} do concreto apresenta varia conforme a resistência. Para concretos de 20 MPa, a diferença entre os corpos de prova de controle e os testemunhos costuma ser de 5% a 10%, para concretos de 30 MPa, 10% a 20%, já para concretos de 40 MPa ou mais, de 15% a 30%.

Além disso, Fusco (1995) lembra que concretos com resistência à compressão da ordem de até 40 MPa se comportam de maneira diferente quando ensaiados. O fato de o agregado ser mais resistente que a matriz de argamassa faz com que surjam tensões de tração transversais, resultando em microfissuras que acabam diminuindo a resistência do concreto.

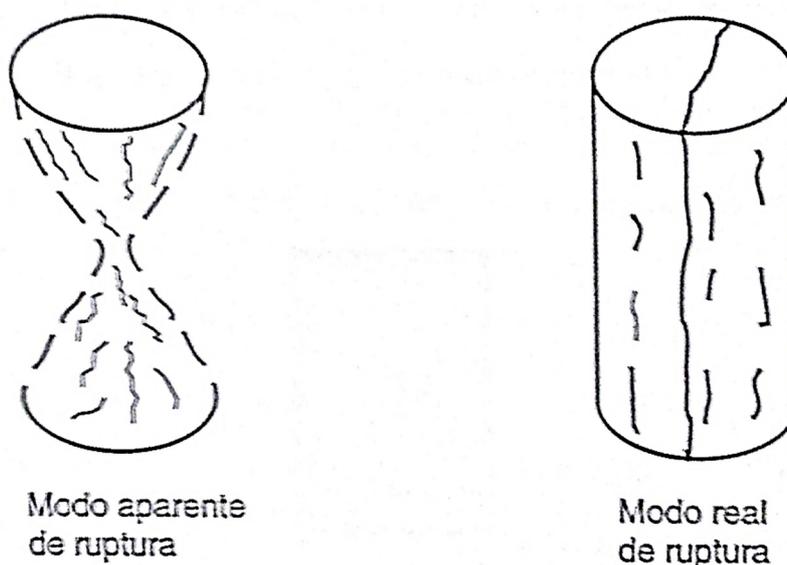
Figura 5 - Ruptura à compressão de concretos com resistência de até 40 MPa



Fonte: Fusco (1995)

Além disso, a ruptura aparente em formato de cone que costuma ocorrer se dá devido ao atrito do topo dos corpos de prova com a prensa de ensaio. A forma cônica, portanto, é devido ao atrito, aliado à microfissuração do corpo de prova. A ruptura real do corpo de prova deve se dar por intermédio de fraturas paralelas ao campo de aplicação da tensão de compressão. A fase de microfissuração é longa e antecede a ruptura final.

Figura 6 - Modo real e aparente de ruptura do concreto



Fonte: Fusco (1995)

b) Influência das dimensões e forma de extração do corpo de prova

A resistência do concreto dos testemunhos extraídos tende a ser menor do que a resistência real da estrutura, mesmo que este seja parte integrante dela. Isto se deve principalmente às dimensões do corpo de prova e às condições de contorno após a extração do testemunho, como microfissura e corte do agregado graúdo. Contudo, algumas normas levam estes fatores em conta, recomendando que os resultados das amostras sejam multiplicados por um fator que varia de 1,10 a 1,15.

c) Influência da idade do concreto na resistência obtida

É fundamental que o concreto tenha idade superior a 14 dias caso tenha sido utilizado cimento Portland comum. Esta medida evita microfissurações durante a

extração do testemunho. A idade tem grande influência na resistência do concreto, visto que este tende a ganhar resistência com o passar do tempo devido à hidratação dos componentes ativos do cimento. Por este motivo, o tipo de cimento influencia de maneira significativa a resistência do concreto, além das condições de temperatura e umidade que ele é exposto. O cimento Portland comum possui uma resistência maior em idades inferiores aos 28 dias do que os cimentos pozolânicos e de alto forno, porém estes dois últimos acabam por adquirir uma resistência maior passados os 28 dias.

Peterson *apud* Cánovas (1988) elaborou um quadro comparativo entre os diferentes tipos de cimento e sua influência na resistência do concreto em diferentes idades.

Tabela 7 - Resistência relativa do concreto de acordo com o tipo de cimento e idade

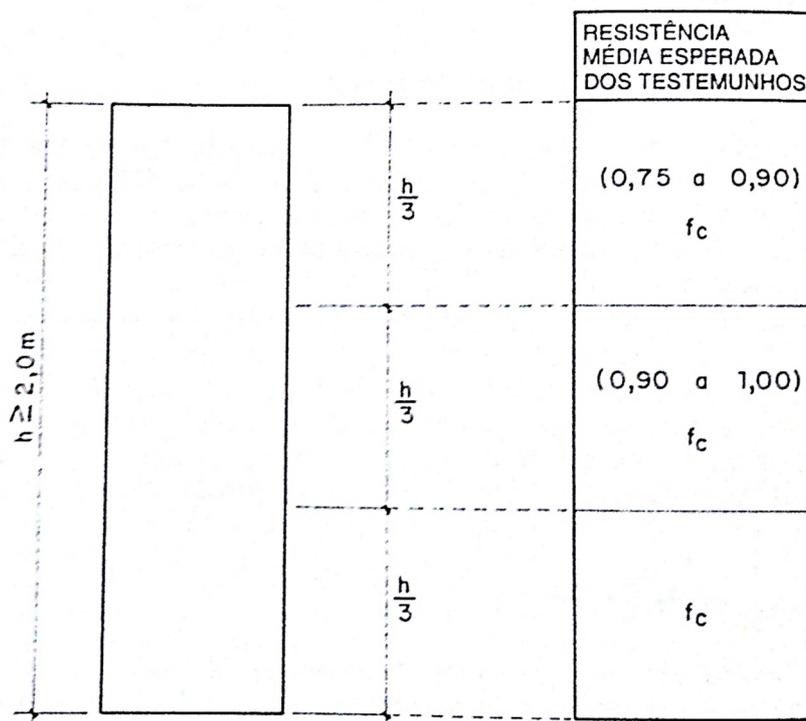
Tipo de cimento	Resistência relativas						
	7 dias	14 dias	28 dias	3 meses	6 meses	1 ano	> 2 anos
Portland médio	0,7	0,89	1	1,1	1,15	1,18	1,2
Alta resistência inicial	0,8	0,92	1	1,1	1,12	1,13	1,15
Pozolânicos e siderúrgicos	-	0,7	1	1,4	1,5	1,6	1,7

Fonte: Cánovas (1988)

d) Altura da extração do testemunho

É necessário lembrar que a resistência em peças de concreto verticais, como pilares e paredes, tende a variar devido a fenômenos comuns em peças de concreto, como exsudação e segregação, como demonstra a Figura 7.

Figura 7 - Resistências médias esperadas de testemunhos extraídos em diferentes alturas de um pilar



Fonte: Cánovas (1988)

e) Dimensão do corpo de prova

Quanto às dimensões dos corpos de prova, a NBR 7680:2015 – Parte 1 define que a relação altura/diâmetro deve ser igual a dois, com um diâmetro mínimo de 10 cm. Contudo, como lembra Cánovas (1988), em diversos casos a extração não consegue atender tal critério, tendo em vista que as dimensões da peça estrutural não permitem, como é o caso de lajes. Nestes casos, deve-se estimar a resistência do elemento como se a relação altura/diâmetro fosse igual a dois e aplicando-se, posteriormente, o fator de correção correspondente especificado na Tabela 8, semelhante ao encontrado na NBR 5739:2007.

Tabela 8 - Correção da resistência do concreto em diferentes relações h/d

Relação $\frac{h}{d}$	Fator de correção		
	ASTM C42-77	BS 1881-70	UNE 7242
2,00	1,00	1,00	1,00
1,75	0,98	0,98	0,98
1,50	0,96	0,96	0,96
1,25	0,93	0,94	0,94
1,00	0,87	0,92	0,85

Fonte: Cánovas (1988)

f) Orientação do testemunho

Outro fator que influencia na resistência do concreto é a direção da extração com relação à concretagem e compactação, podendo gerar uma diminuição de 5% a 8% na resistência caso a extração seja transversal

g) Presença de armadura

A falta de um levantamento prévio da posição de armadura por meio de um pacômetro, que pode fazer com que uma barra de aço seja extraída com o testemunho e interfira no resultado devido à perda de aderência entre o aço e o concreto durante o corte.

Quanto à posição da extração dos corpos de prova, Cánovas (1988) define que os testemunhos devem ser zoneados, com uma distância entre si suficiente para que representem massas diferentes de um mesmo lote de concreto. Já em estruturas concluídas, é recomendado a utilização de esclerômetro ou ultrassom para que seja possível identificar os diferentes lotes de concreto. O número de corpos de prova não possui critério fixo, variando conforme a norma seguida.

Tabela 9 - Número de corpos de prova necessários para a análise de estruturas de concreto armado

Norma	Nº corpos de prova
ACI 318-71 e ACI 301-72	Três testemunhos por zona analisada
ACI 437-67	Dois testemunhos para componentes com vãos até 7,2 m e áreas até 58,1 m ²
Concrete Society	Quatro testemunhos por zona analisada
DIN 1048-78	Doze para testemunhos com menos de 100 mm de diâmetro e o agregado graúdo for de até 16 mm e seis caso o diâmetro seja maior que 100 mm

Fonte: Cánovas (1988)

5.5.2. Não destrutivos (NDT)

Com o intuito de elucidar o funcionamento de alguns dos métodos de ensaio não destrutivos em estruturas de concreto, serão abordados alguns dos principais métodos empregados na análise de concreto. O estudo irá abranger os métodos de ensaio esclerométrico, ensaio de *pulloff*, ensaio de *pullout*, ensaio de penetração de pinos e pacometria, caracterizando seu funcionamento, grau de precisão e aplicabilidade.

5.5.2.1. Esclerometria

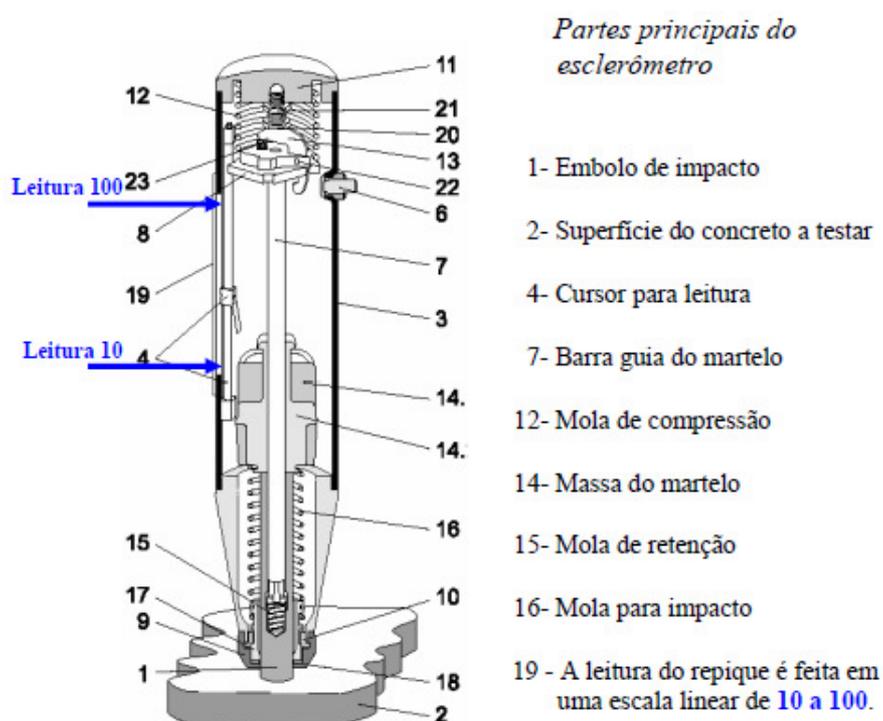
O martelo de Schmidt, conhecido como esclerômetro, é um equipamento desenvolvido pelo engenheiro suíço Ernest Schmidt e tem como principal função medir a resistência superficial do concreto e correlacionar com sua resistência à compressão (THOMAZ, 2011). Apresenta a grande vantagem de ser um ensaio rápido e econômico, podendo ser realizado em diversos pontos da estrutura, e apresentando uma precisão comparável aos ensaios de resistência a compressão (CARNEIRO, 1975). Contudo, segundo Teodoru *apud* Evangelista (2002), apresenta a desvantagem de avaliar somente a resistência superficial do concreto, de uma

camada entre 30 mm e 50 mm, e que é utilizada para representar todo o concreto em teste.

Por este motivo, Carneiro (1975) define que o modelo mais aconselhável para a averiguação da resistência e controle do concreto de uma estrutura é a utilização da esclerometria em uma grande quantidade de pontos, aliada a extração de testemunhos em alguns desses pontos.

A Figura 8 apresenta o detalhamento de um esclerômetro, com suas principais partes constituintes.

Figura 8 - Detalhes esclerômetro Schmidt – Tipo N

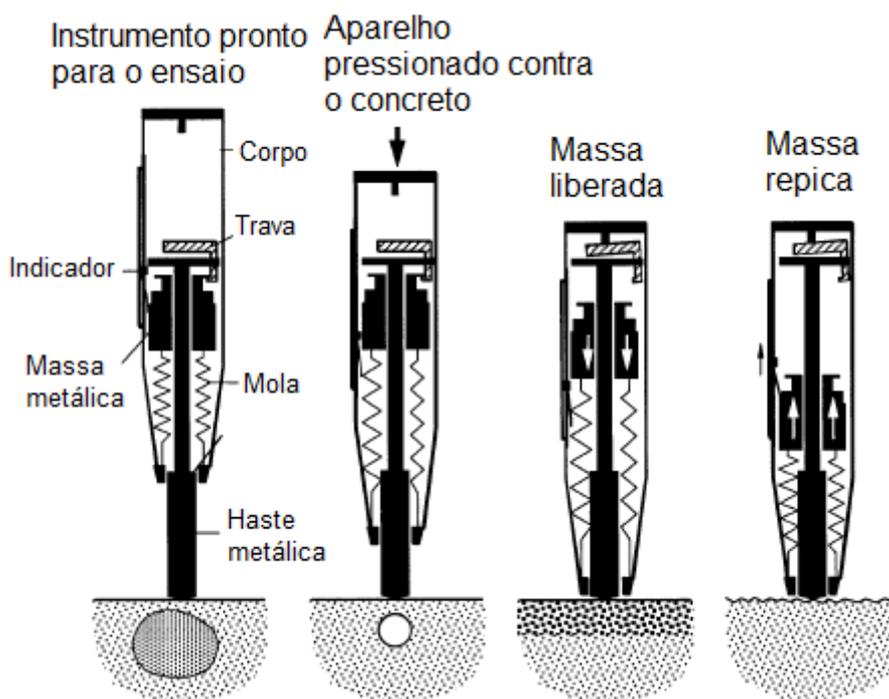


Fonte: Thomaz (2011)

A utilização do equipamento é realizada de forma simples: o esclerômetro deve ser posicionado perpendicularmente ou, dependendo das especificações do equipamento, em ângulo de 45° em relação à superfície a ser ensaiada. Após o posicionamento correto, o operador pressiona o esclerômetro contra a superfície, fazendo com que massa metálica se choque contra uma haste metálica, que por sua vez impacta no concreto. O ricochete ocasionado é proporcional à dureza da superfície específica analisada. O aparelho fornece ao operador o valor do Índice

Esclerométrico (IE), que depende do valor da energia cinética antes e depois do impacto, verificando o quanto desta energia é absorvida pelo concreto, visto que a energia absorvida está relacionada à resistência e à rigidez do concreto. O IE fornecido pelo aparelho é verificado em uma curva conveniente, elaborada em laboratório com corpos de prova do concreto analisado, ou em tabela fornecida pelo fabricante, sendo então possível determinar a resistência do concreto na região do ensaio (BOTTEGA, 2010; ACI 228 *apud* EVANGELISTA, 2002).

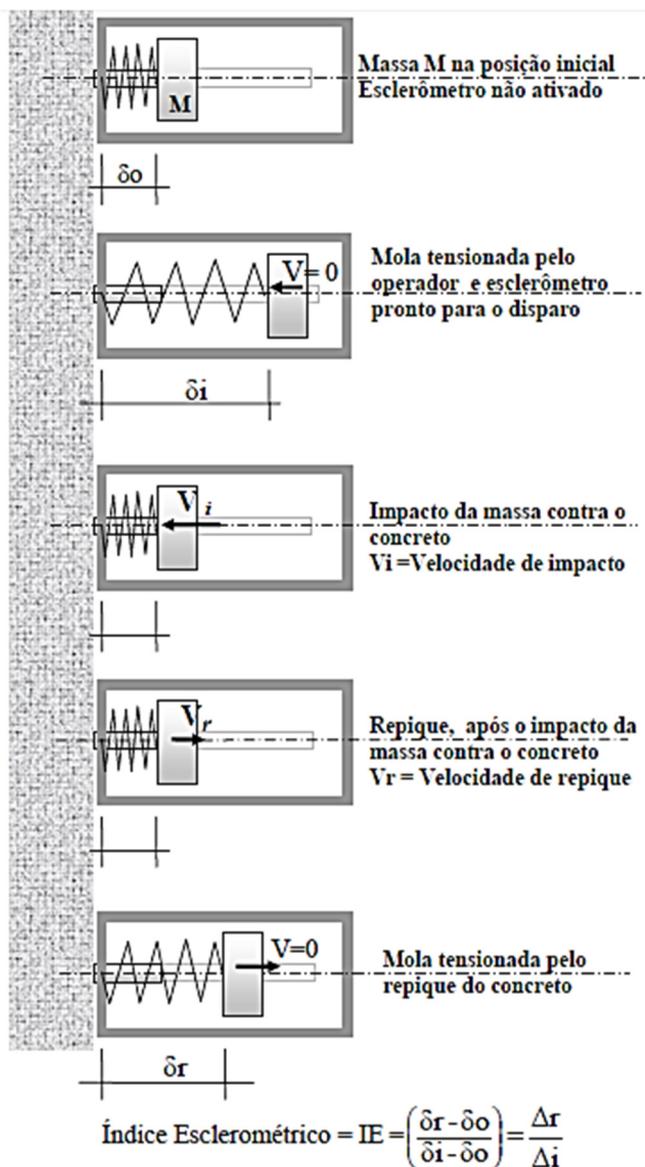
Figura 9 – Esquema simplificado do funcionamento mecânico do esclerômetro



Fonte: ACI 228.1R-03, adaptado pelo autor

Thomaz (2011) também apresenta um modelo simplificado do funcionamento mecânico, representado na Figura 10, aliado aos parâmetros utilizados pelo aparelho para a determinação do IE.

Figura 10 - Modelo simplificado do funcionamento mecânico do esclerômetro



Fonte: Thomaz (2011)

Carneiro (1975) define que devem ser realizados de dez a quinze golpes do instrumento, espaçados pelo menos em 3 cm, e em local em que a superfície que será ensaiada pelo esclerômetro deve ter sido limpa de impurezas por meio de fricção de um esmeril, além de lembrar que é necessário que a superfície tenha tido contato com a face de uma forma, já que ensaios realizados em superfícies livres, como a parte superior de uma laje ou viga, induzem a resultados incorretos. O autor também ressalta que pode ocorrer um grande erro de resultado no caso de utilizar-se o

aparelho em concretos com mais de 90 dias de idade ou com adensamento insuficiente.

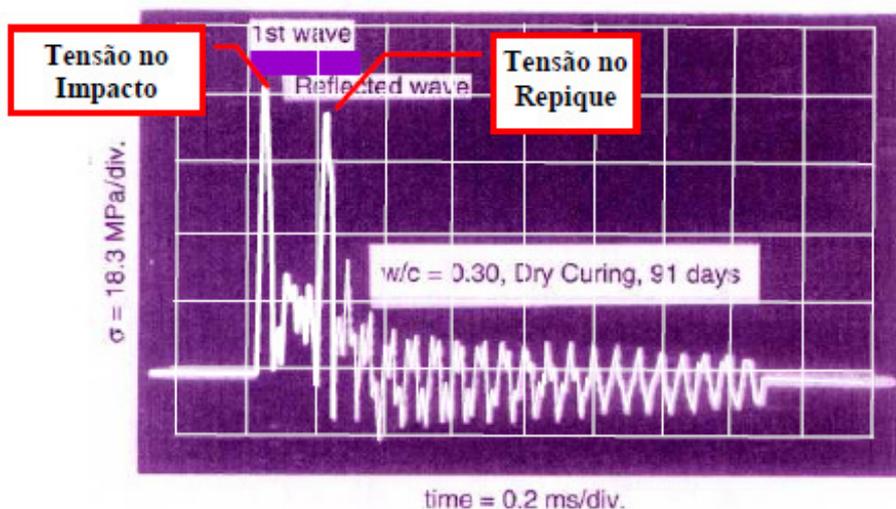
Ainda segundo o autor, é definido que deverão ser descartados até um terço dos golpes executados por serem demasiadamente discrepantes com os valores mais frequentes obtidos pelo aparelho. Leituras com IE elevados indicam que o equipamento golpeou diretamente o agregado gráudo do concreto. Já leituras com o IE mais baixo do que o frequente, indicam que uma bolha de ar ou um vazio na massa de concreto foi atingido. Os demais valores são utilizados para a obtenção do IE médio, que, por sua vez, é utilizado para determinar uma estimativa da resistência à compressão verificando uma curva de aferição, correspondente à probabilidade de 90% do concreto ter resistência superior à indicada pela curva. Na falta da curva específica do concreto analisado, elaborada a partir do rompimento de testemunhos deste concreto, poderão ser utilizadas as curvas fornecidas pelo fabricante do equipamento.

De acordo com Thomaz (2011) e Carneiro (1975), o ensaio padrão é realizado pelo modelo N-2 do equipamento, em posição horizontal e em superfícies verticais, aplicando-se uma carga de compressão no corpo de prova. Ainda, segundo Evangelista (2002), o impacto do esclerômetro não deve provocar vibração no concreto ensaiado, sendo necessária a fixação de peças pequenas para que a estimativa de resistência não seja influenciada.

Por se tratar de um método de ensaio muito utilizado, o ensaio esclerométrico é amplamente estudado, visando aprimorar os conhecimentos já adquiridos sobre o instrumento e melhorando a precisão nas leituras do aparelho.

Estudos realizados por Akashi T. e Amasaki S. *apud* Thomaz (2011) utilizaram um extensômetro elétrico localizado no êmbolo do esclerômetro, o que permitiu a eles verificar as tensões geradas neste ponto no momento de impacto com o concreto e durante o repique do aparelho. O osciloscópio, onde era possível verificar as leituras do extensômetro, apresentou um diagrama onde é possível identificar as tensões máximas durante o impacto e repique.

Figura 11 - Dados do osciloscópio utilizado por Akashi T. e Amasaki S.

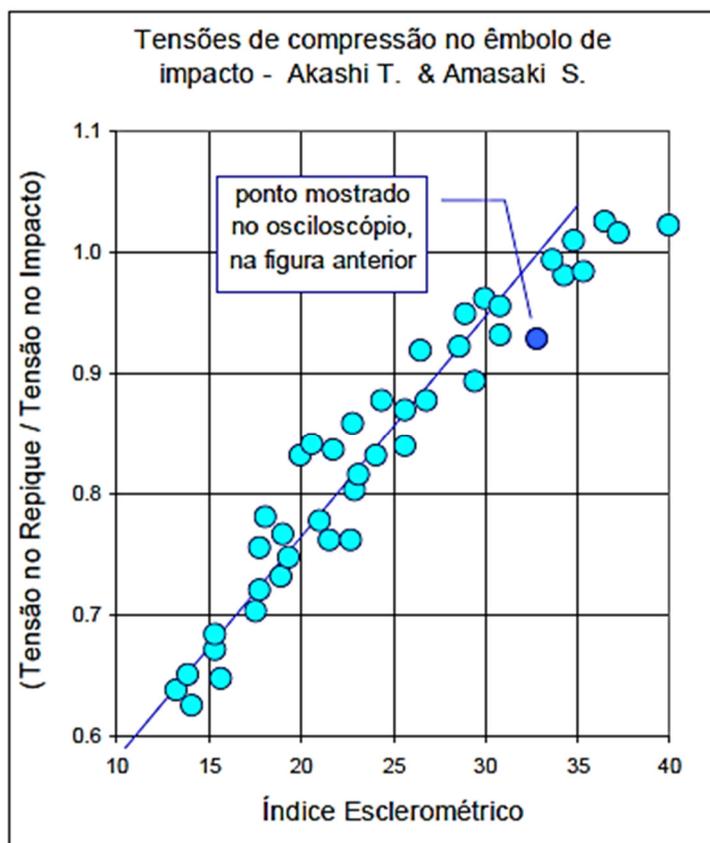


Fonte: Akashi T. & Amasaki S. *apud* Thomaz (2011)

No diagrama em questão, um concreto com fator água cimento de 0,3 e curado a seco por 91 dias foi ensaiado. É possível identificar a tensão de impacto, com valor de $\sigma_i = 75 \text{ MPa}$, seguido da tensão de repique, com valor de $\sigma_r = 70 \text{ MPa}$, e determinar a relação entre repique e impacto em 0,93.

O restante dos estudos realizados por Akashi T. e Amasaki S. *apud* Thomaz (2011) estão expressos na figura a seguir:

Figura 12 - Tensões de compressão no êmbolo de impacto



Fonte: Akashi T. e Amasaki S. *apud* Thomaz (2011)

Malhotra *apud* Evangelista (2002) estima que a resistência apresentada pelos ensaios do equipamento tenha uma precisão entre 15% a 20%, desde que os corpos de prova sejam moldados, curados e ensaiados em condições idênticas às usadas para a elaboração das curvas de correlação do concreto ensaiado. O autor ainda reforça que estes ensaios devem ser considerados um recurso adicional, não substitutos ao rompimento de corpo de prova.

Com base nos estudos realizados, foi constatada a influência de diversos fatores no IE. Danielleto (1986) afirma que alguns autores creem ser possível utilizar algum coeficiente para corrigir os resultados. Contudo, quanto mais fatores forem utilizados para a correção do IE, menos acurado será a precisão do índice, já que a combinação dos fatores não é considerada.

Dentre os fatores de influência mais relevantes encontrados, podemos citar:

a) Influência do agregado graúdo

Segundo estudos realizados por Evangelista (2002) e Danielleto (1986), um dos principais fatores que afeta o IE é o tipo de agregado graúdo do maciço de concreto ensaiado, mesmo para concretos com a mesma resistência, apresentando uma diferença considerável quando comparadas curvas de correlação de agregados normais com a de agregados leves. Essa diferença é maior em idades menores (3 dias) e com um menor fator a/c. Quanto ao tamanho máximo do agregado graúdo, a influência não é significativa, sendo mais perceptível ao 3º dia e chegando a valores entre 0% e 10%.

b) Influência do cimento

Evangelista (2002) afirma que outra grande diferença no IE ocorre quando um concreto que utilizou em sua confecção cimento do Portland é comparado com um que utilizou cimento aluminoso ou supersulfatado, tendo sua resistência subestimada ou superestimada, respectivamente. A variação encontrada nestes casos foi da ordem de 13% até 70%, dependendo da idade e fator a/c. Danielleto (1986) concorda sobre a influência da composição química e ainda afirma que a finura do cimento não apresenta grande significância no IE apresentado. Ainda segundo a autora, o teor de cimento apresenta uma influência máxima de 15% no índice, sendo que concretos com maior teor de cimento apresentam resistências inferiores a real e, com menor teor, mais altas que a real. A NBR 7584:2012 recomenda que seja feita uma nova curva de correlação de IE sempre que houver uma mudança no tipo de cimento utilizado no concreto.

c) Influência das condições de cura

Outro fator ressaltado por Evangelista (2002) é a variação do IE devido ao tipo de cura que o concreto é submetido, já que concretos com a superfície seca apresentam maior dureza superficial que concretos com superfície úmida. Tal fato pôde ser constatado quando comparados ensaios entre corpos de prova que foram submetidos à cura úmida até 48 horas antes do ensaio e corpos de prova submetidos até os 7 dias de idade à cura úmida e, posteriormente, expostos ao ambiente. Os corpos de prova da cura úmida tiveram um menor IE. Danielleto (1986) reforça a tese

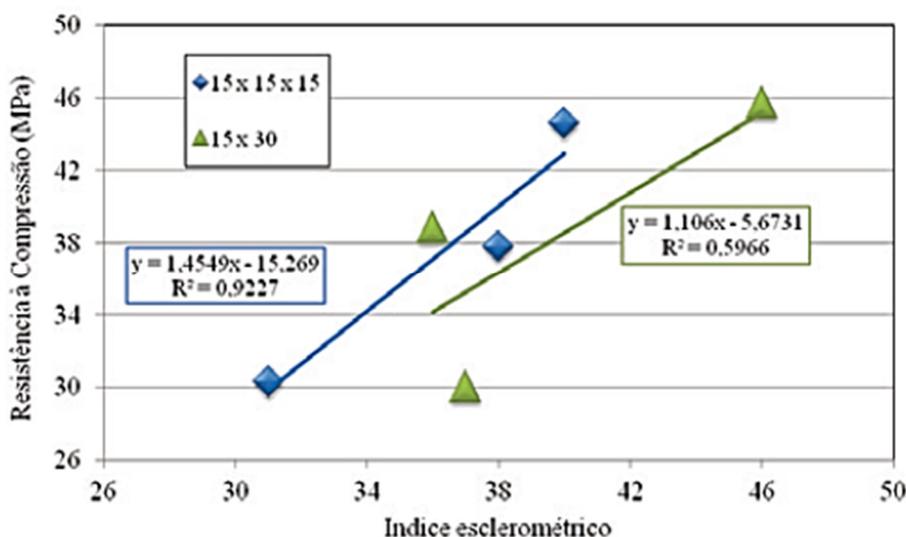
afirmando que concretos com cura úmida possuem um índice esclerométrico diferente dos curados ao ar.

d) Influência da idade do concreto

A idade do concreto ensaiado se torna relevante em idades superiores a 3 meses devido à influência da carbonatação, que pode tornar os resultados superestimados em até 50%, segundo a NBR 7584:2012. Neste caso, é recomendado remover a camada carbonatada e realizar o ensaio novamente para comparar as durezas obtidas (43 CND-FINAL RECOMMENDATION *apud* DANIELLETO, 1986).

Estudos realizados por Pereira e Medeiros (2012) mostram a correlação entre o IE e a resistência do concreto para corpos de prova cilíndricos e prismáticos. Como pode ser visto na Figura 13, a correlação entre o IE e a resistência real pode ser considerada fraca para corpos de prova cilíndricos ($R^2=0,5966$), normatizados no Brasil. Já para corpos de prova prismáticos, essa correlação é consideravelmente maior ($R^2=0,9227$), fato que também pode ser constatado verificando a figura. Essa diferença possivelmente se dá pelo fato de a superfície do corpo de prova cilíndrico não ser plana, afetando negativamente o resultado do ensaio. Contudo, os autores julgam necessário a elaboração de estudos complementares para a confirmação do fato.

Figura 13 - Correlação entre os ensaios de esclerometria e resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos



Fonte: Pereira e Medeiros (2012)

Apesar de no Brasil o ensaio não destrutivo de esclerometria ser o mais popular, Carneiro (1975) ressalta que os resultados destes devem ser avaliados com prudência, visto que o aparelho pode produzir resultados equivocados e, na maior parte das vezes, superestimando a resistência do concreto e, conseqüentemente, indo contra a segurança da estrutura analisada. Contudo, como lembra Thomaz (2011), o ensaio continua fornecendo boas indicações da homogeneidade e variação do concreto, podendo ser utilizado para averiguar a qualidade da produção. Além disso, segundo a BS 1881: Part 202 *apud* Evangelista (2002), o equipamento faz com que seja possível monitorar o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo e estimar a resistência do concreto. Portanto, é aconselhável a extração de testemunhos com um diâmetro de 5 cm ou 7,5 cm, segundo Thomaz (2011), da estrutura executada para que seja possível corrigir o risco de superestimação da resistência do concreto,

5.5.2.1.1. Pesquisas/estudos sobre esclerometria

Gálvez (2012) utilizou o equipamento para determinar a resistência e o coeficiente de restituição normal (R_N) das camadas de rocha na rodovia RS 471, visando analisar por meio de software as quedas de blocos rochosos dos cortes da rodovia. Em seus estudos, ressalta a importância de se elaborar uma correlação própria, tanto para tipos diferentes do concreto, quanto para modelos de equipamento, fazendo com que o ensaio seja uma referência, não um elemento para a decisão final.

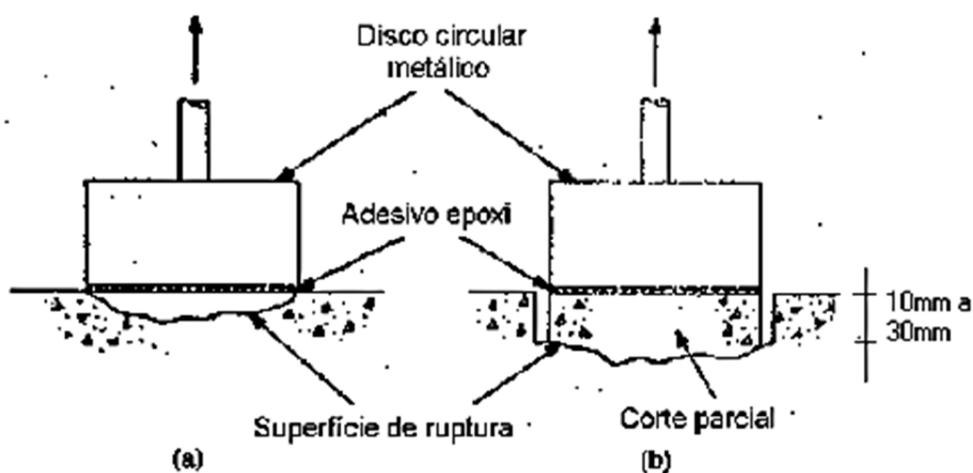
Para o caso específico do uso em rochas, o autor ressalta que o martelo tem sido bastante aplicado, mas ressalta a dificuldade de determinar parâmetros que representem o maciço rochoso como um todo, devido à grande heterogeneidade dos materiais. Tendo isso em vista, é imprescindível o julgamento técnico dos engenheiros envolvidos no projeto. O esclerômetro, contudo, facilita na determinação de zonas de amostragem, mostrando pontos similares da rocha.

Por fim, o autor recomenda a adequação das equações de propostas por Peng (2000) e utilizadas pelo mesmo para a obtenção de resultados mais precisos, com estudos utilizando câmeras de alta velocidade para o lançamento dos blocos, ensaios de laboratório com diferentes geometrias de material e leituras com o esclerômetro do tipo "N".

5.5.2.2. *Pulloff*

O método de ensaio conhecido como “*pulloff*” foi desenvolvido em 1974 por Long. O princípio do método trata de fixar uma placa circular de aço no concreto, utilizando uma resina epóxi com uma resistência à tração superior à apresentada pelo concreto ensaiado, como é demonstrado na Figura 14 (a). Também é possível executar um corte parcial na superfície do concreto, circundante à placa, de 10 mm a 30 mm (como visto na Figura 14 (b)), para induzir a ruptura e evitando influências superficiais do concreto, como a carbonatação no caso de concretos com idade superior a 3 meses. Após atendidas as condições de cura necessárias da resina, é aplicada, de maneira gradual, tração à placa metálica, valendo-se de um sistema mecânico portátil. Como a resistência à tração da resina é superior à do concreto, ocorre o arrancamento da porção de concreto fixada à placa, definindo, então, a resistência à tração do concreto ensaiado, uma vez que a tensão na ruptura é a mesma medida da resistência à tração. Uma vez definida a tração, é possível correlacionar o valor com a resistência à compressão, valendo-se das curvas de calibração apresentadas num grande número de ensaios desenvolvidos (DANIELLETO, 1986; EVANGELISTA, 2002).

Figura 14 - Representação esquemática do ensaio *pulloff*



Fonte: Bungey e Mandandoust *apud* Evangelista (2002)

Evangelista (2002) lembra que o ensaio é de execução considerada simples, não necessitando de um operador altamente qualificado. Até o momento, não foram verificados problemas em utilizar o método em superfícies verticais e nem em elementos de seção reduzida, como é o caso de lajes e vigas, e também não é necessário um planejamento prévio ao lançamento do concreto.

Segundo Pereira e Medeiros (2012), um fator que facilita a aplicação do teste é que, mesmo não sendo normatizado no Brasil, o ensaio utilizado o mesmo equipamento de ensaios tradicionais, como o de aderência em argamassas, que é normatizado. Além disso, o fato de ser necessária somente uma face exposta do elemento estrutural também facilita o processo.

Bungey e Mandandoust *apud* Evangelista (2002) especificam que, caso não haja corte superficial, a ruptura do concreto à tração deve ocorrer a cerca de 5 mm abaixo da superfície e, caso haja o corte, a zona fraturada deve se dar a uma profundidade mínima de 20 mm.

Ainda segundo a autora, as principais aplicações do método são para definir a resistência de concretos com cimento Portland e com alto teor de alumina, além de permitir a verificação da tensão de aderência superficial do concreto, no caso da necessidade de algum reparo ou reforço em que seja efetuada a fixação de chapa metálica na superfície por meio de resina epóxi, por exemplo (LONG E MURRAY *apud* EVANGELISTA, 2002; GONÇALVES *apud* EVANGELISTA, 2002).

A BS 1881: Part 201 *apud* Evangelista (2002) especifica a acurácia do método para a estimativa da resistência à compressão na ordem de $\pm 15\%$ do valor real, ainda definindo o principal fator de influência na correlação entre a força de tração medida pelo método e a resistência à compressão do concreto ensaiado como sendo o tipo de agregado. É citado também que, mesmo sendo um ensaio que determina a resistência à tração, seus resultados não podem ser comparados aos obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Além disso, por ser um método que correlaciona a resistência à tração com a resistência à compressão, Long e Murray *apud* Danielleto (1986) definem que os principais fatores que influenciam esta relação acabam afetando também os resultados dos ensaios. A idade do concreto influencia de maneira que, à medida que a idade do concreto aumenta, a relação f_t/f_c tende a diminuir. Contudo, verifica-se que uma única curva de calibração pode ser utilizada para concretos com até 28 dias de idade. Já com base no tipo e tamanho do agregado, foi verificado que o calcário

necessita de uma curva de calibração própria, diferente de outros agregados, como basalto, granito, cascalho e arenilo. Também se verificou que quando maior o agregado, menor a relação f_t/f_c , chegando à ordem de 20% para concretos com agregado de diâmetro máximo igual a 20 mm. O aumento do teor de ar incorporado no concreto faz com que a relação f_t/f_c diminua na ordem de 15%. E, quanto às condições de cura do concreto, é possível afirmar que o concreto curado ao ar possui uma menor razão f_t/f_c que o concreto curado em água.

Como pode ser verificado, as influências entre o fator f_t/f_c tendem a subestimar a resistência à compressão real do concreto, prezando pela segurança.

Além dos fatores gerados pela relação entre a força de tração e a resistência à compressão, Bungey e Mandandoust *apud* Evangelista (2002) também ressaltam a influência do equipamento utilizado para a realização do ensaio, como material, diâmetro e espessura do disco, efeitos causados ao concreto devido ao corte do mesmo, sistema de reação do equipamento e velocidade de aplicação da carga de tração. O material do disco influencia na distribuição da carga, sendo mais uniforme em discos de aço, e também gerando uma maior carga de ruptura quando comparados a discos de alumínio. A espessura influencia de modo que, quando comparados discos de 20 mm e 30 mm, os mais espessos tendem a ter uma melhor distribuição de tensões e uma menor influência do módulo de elasticidade do concreto, visto que, para concretos de mesma resistência, o com maior módulo de elasticidade tende a distribuir as tensões em sua superfície de modo menos uniforme que o de menor módulo, gerando uma carga de ruptura menor. Desta maneira, os autores recomendam discos de diâmetro 50 mm e com espessura mínima de 30 mm, além de, caso o ensaio seja executado com corte superficial, este não tenha profundidade inferior a 20 mm.

Os autores também realizaram ensaios utilizando agregado graúdo leve e convencional, além de ensaios com e sem o corte superficial da superfície do concreto. Com estes ensaios, foi possível constatar que a carga necessária para romper o concreto com corte superficial tende a ser menor, devido às tensões que se concentram na região do corte e à ausência de concreto nesta região, principalmente no caso do concreto leve. Verificaram também que o concreto com agregado convencional tem sua resistência à tração reduzida quando o agregado e a interface agregado/matriz é cortada.

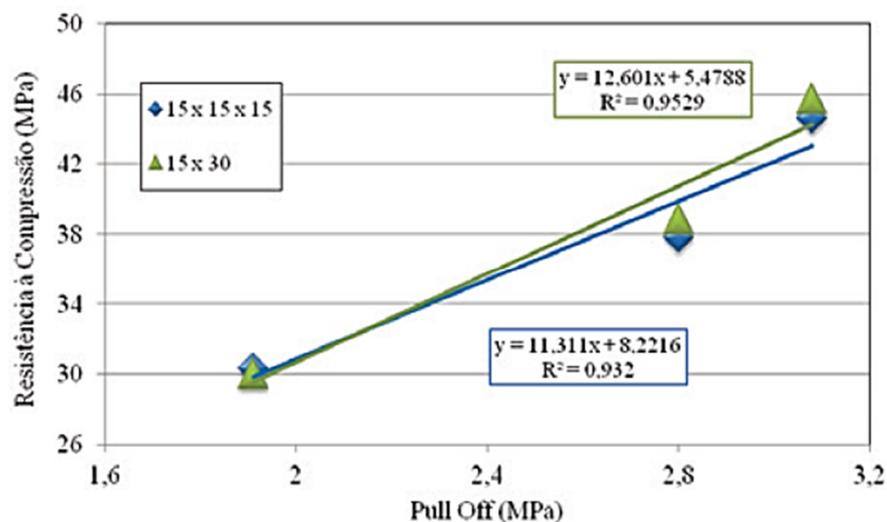
Pereira e Medeiros (2012) ressaltam que a presença de armadura logo abaixo do disco metálico colado ao concreto pode acabar distorcendo os resultados obtidos e diminuindo a precisão do método. Tendo isso em vista, é interessante utilizar um pacômetro para verificar a presença de armaduras na região ensaiada para que ela não interfira nos resultados obtidos.

Ainda segundo os autores, é necessário ressaltar que o método não é tão ágil, sendo necessário colar os discos ao concreto e aguardar um período de cura da resina para que esta tenha uma resistência à tração superior à do concreto ensaiado, variando de 1,5 h até 24 h, dependendo da resina utilizada. Um fator relativo, caso seja executado o corte superficial do concreto, é a utilização de uma furadeira com serra copo. Apesar de ser um aparelho extra, dificultando e atrasando o ensaio, deixa seus resultados mais confiáveis, eliminando a influência da carbonatação das camadas superiores do concreto. Quanto ao custo, o valor do equipamento é superior ao do esclerômetro, por exemplo.

Também citam que é necessário o reparo no local do ensaio, tendo em vista que o concreto é fraturado. A limitação dos aparelhos utilizados também deve ser considerada, pois impossibilita o ensaio para concretos de alta resistência. Contudo, para concretos convencionais, com resistência entre 25 MPa e 35 MPa, os aparelhos superam com facilidade a resistência à tração destes, de cerca de 10% da resistência à compressão.

Ensaio realizados pelos autores demonstram uma excelente correlação entre placas de concreto moldadas para o ensaio de *pulloff* e corpos de prova moldados com o mesmo concreto das placas, acima de $R^2 = 0,93$ para ambos os casos, mostrando que o método é uma excelente alternativa para a avaliação do concreto *in situ*.

Figura 15 - Correlação entre os ensaios de *pulloff* e resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos

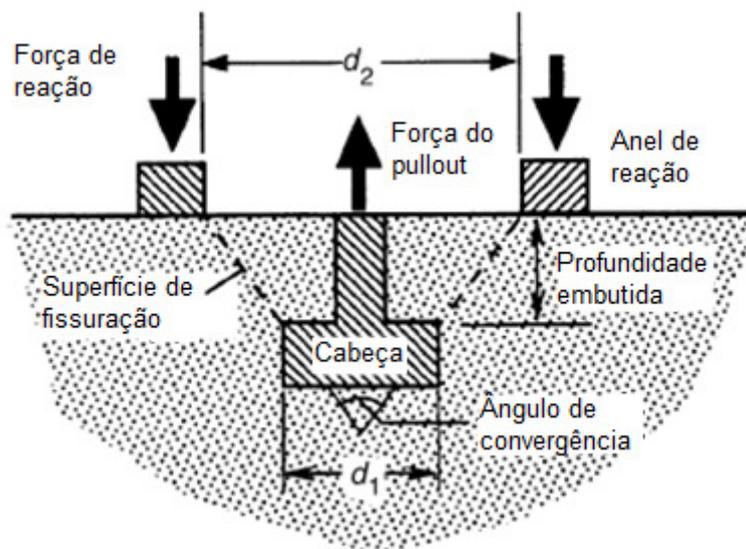


Fonte: Pereira e Medeiros (2012)

Concluem que o ensaio, mesmo apresentando um equipamento mais caro que outros ensaios de mesma finalidade, como a esclerometria, este compensa pela precisão e por ser o mesmo equipamento utilizado em ensaios de aderência de argamassa. Além disso, julgam necessária a intensificação das pesquisas na área, visando uma normatização do ensaio, como já foi feito na Europa.

5.5.2.3. *Pullout*

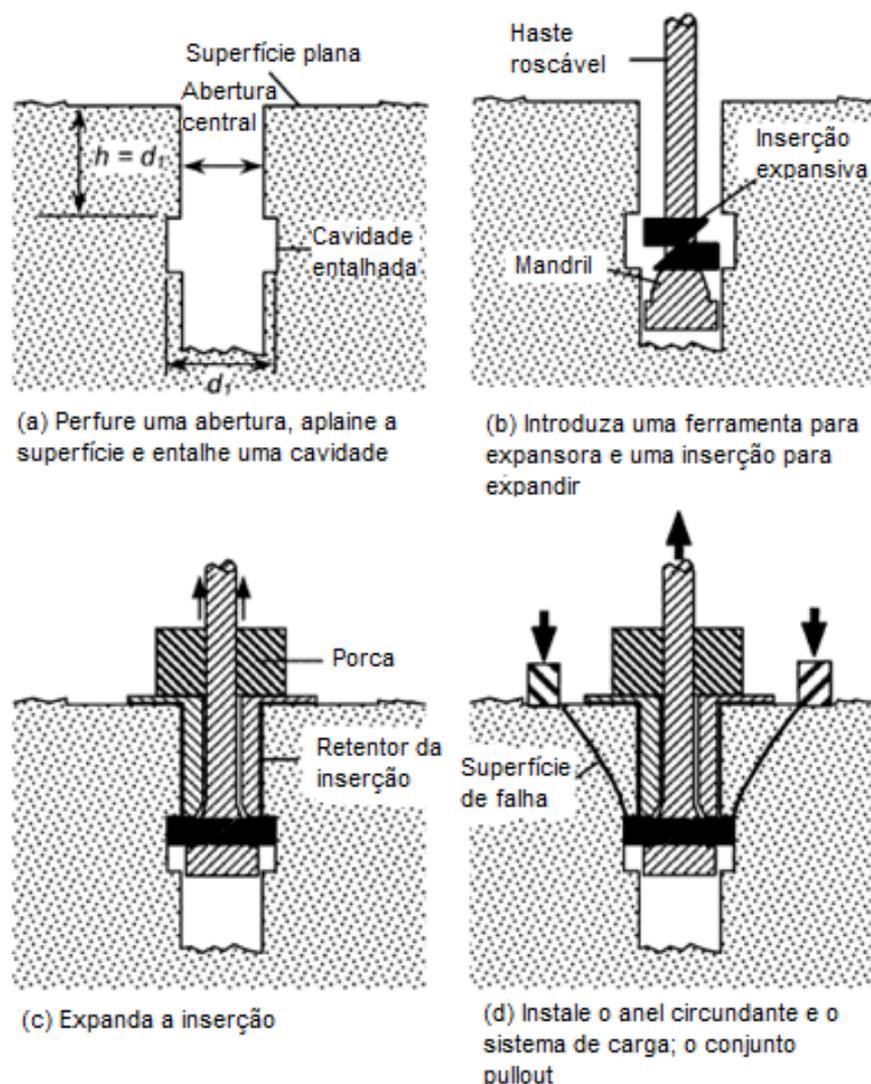
De acordo com a ACI 228.1R-03, o ensaio de *pullout* mede a força máxima necessária para arrancar um cilindro metálico com extremidade mais larga do concreto, utilizando um macaco hidráulico que aplica uma carga que reage com um anel apoiado na superfície de concreto. Quando o elemento inserido no concreto é arrancado, traz consigo um maciço de concreto com formato cônico, com a extremidade menor delimitada pela extremidade do elemento metálico inserido no concreto e extremidade maior delimitada pelo anel que reage com o concreto. É mais simples inserir o pino antes da concretagem, através da forma, ou momentos depois em superfícies de laje, por exemplo, com o concreto ainda fresco.

Figura 16 - Esquematização do ensaio *pullout*

Fonte: ACI 228.1R-03, adaptado pelo autor

Para o caso de ser necessário executar o ensaio em concreto já executado, a norma prevê o procedimento esquematizado na Figura 17. Nesses ensaios a superfície do concreto é alisada, então é perfurado o concreto, deixando um trecho onde o mecanismo de expansão possa se firmar e prosseguindo o ensaio como o normal. Há diversos métodos semelhantes e que possuem o mesmo princípio, mas nenhum normatizado. Contudo, o procedimento de instalar o equipamento após a concretagem mostrou-se complicado. Nos estudos realizados por Evangelista (2002), a autora descartou os ensaios após tentar utilizar chumbadores disponíveis no mercado brasileiro inseridos em furos nos corpos de prova, já que os mesmos deslizavam facilmente.

Figura 17 - Técnica para ensaio pullot em estruturas já executadas

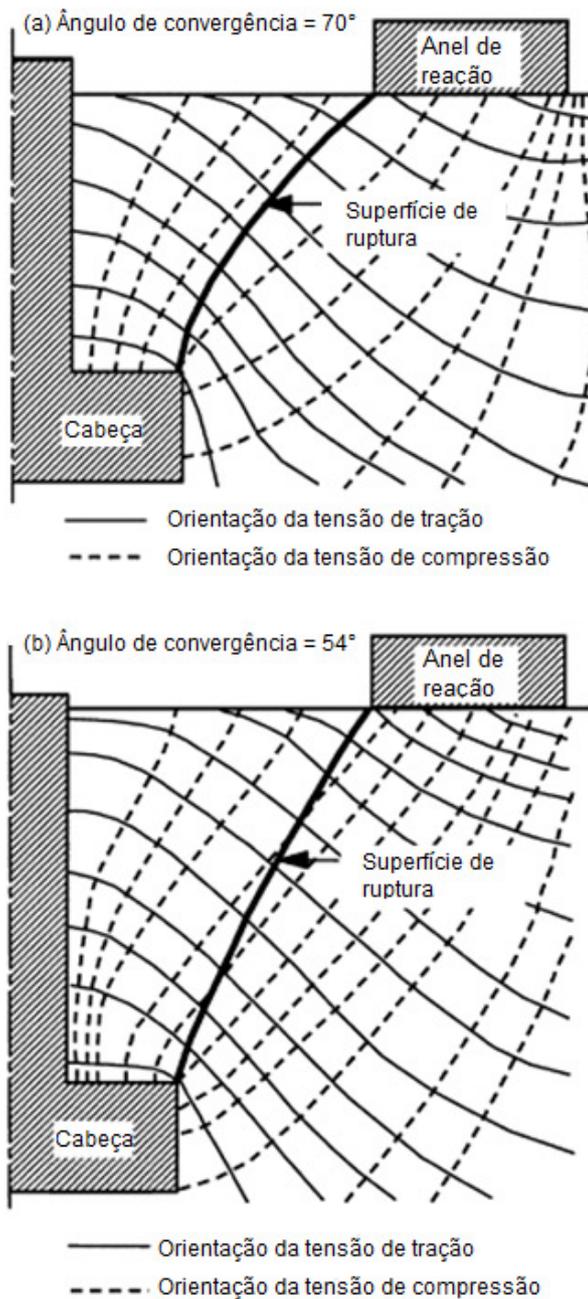


Fonte: ACI 228.1R-03, adaptado pelo autor

A norma especifica que o diâmetro da extremidade inserida no concreto deve ser igual a sua profundidade, sem especificação quando a essas dimensões. Dimensões comerciais utilizadas variam de 25 mm a 30 mm. Já o maior diâmetro deve ser de 2 a 2,4 vezes o diâmetro da extremidade metálica inserida no concreto. Logo, o ângulo de convergência fica em torno de 54° e 70°. De acordo com a norma, os autores Stone e Carino, 1984 e Ottosen, 1981, analisaram o método utilizando elementos finitos, verificando as tensões que se originam no concreto, considerando o concreto como um meio homogêneo e desconsiderando a interação do agregado graúdo. A Figura 18 demonstra as zonas de tensão que o concreto é submetido. Estudos mostram que as tensões são maiores próximas à cabeça do pino metálico,

além de mostrarem que a rachadura que ocorre quando o pino é arrancado se inicia próxima à cabeça do pino e se propaga até o anel de reação na superfície do concreto. Contudo, não há consenso quanto ao mecanismo exato da falha final do ensaio *pullout*.

Figura 18 - Zonas de tensão durante o ensaio *pullout*



Fonte: ACI 228.1R-03, adaptado pelo autor

A norma complementa afirmando que, como não há consenso em se tratando da força que é medida pelo ensaio, é necessário desenvolver uma relação entre o ensaio de *pullout* e a força de compressão do concreto. O concreto analisado é o trecho cônico entre a cabeça do enxerto metálico e o anel de reação, portanto uma pequena e heterogênea parcela de concreto, que costuma apresentar variação de 7% a 10% por lote, que é de duas a três vezes o apresentado pelo ensaio de compressão de corpo de prova.

Apesar das controvérsias, a força do ensaio *pullout* apresenta grande relação com a resistência à compressão do concreto. Portanto, caso não se trate da própria resistência à compressão, é constante relacionada a ela (ACI 228.1R-03, DANIELLETO, 1986).

Outro ponto interessante levantado por Stone e Giza *apud* Danielleto (1986) demonstra que há uma variação significativa na força do ensaio com o ângulo formado na extremidade do cone, com a força do ensaio decrescendo com o aumento do ângulo. Também foi ensaiado com diferentes tamanhos e tipos de agregado graúdo, com um mesmo ângulo e profundidade e constatou-se que nenhum afeta o ensaio. Além disso, os autores também constataram que a força aumenta com a profundidade.

5.5.2.4. Penetração de pinos

O teste de penetração de pinos, também conhecido como Sistema de Teste da Sonda de Windsor, foi desenvolvido na primeira metade dos anos 60 e é um ensaio parcialmente destrutivo. Basicamente seu funcionamento consiste no disparo de um pino de aço na superfície do concreto, valendo-se de uma quantidade controlada de pólvora e uma pistola específica. Após efetuado o disparo, o comprimento do pino exposto é medido e o restante, no interior do concreto, é correlacionado com a resistência à compressão do concreto, observando curvas de calibração do sistema “Windsor Probe”, disponível internacionalmente. No Brasil utiliza-se uma adaptação deste método, utilizando a pistola de marca Walsywa. (DANIELLETO, 1986; EVANGELISTA 2002; ACI 228.1R-03).

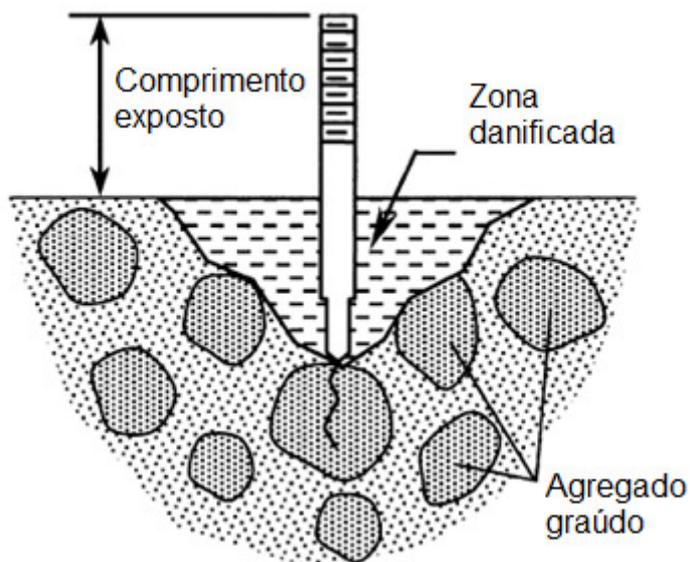
A ACI 228.1R-03 lembra que este ensaio é semelhante ao ensaio esclerométrico, mas com uma energia aplicada muito maior, que penetra no concreto, enquanto o ensaio esclerométrico causa danos ínfimos. Contudo, a norma ainda

lembra que este ensaio apresenta resultados com análise teórica ainda mais complicada que o esclerométrico.

Ainda de acordo com a norma, é especificado que o teste consiste na energia cinética inicial, fornecida pela pólvora, na posição inicial do pino na pistola e da perda de energia através do atrito com o concreto. Um requisito primário deste ensaio é que a energia cinética inicial dos pinos deve ser constante, com variação de velocidade inferior à 3%, de acordo com 10 testes balísticos realizados.

A norma lembra que não há uma grande gama de estudos na área em se tratando de fatores que afetam a forma da zona fratura devido ao ensaio, sendo que o aceito é que a penetração gera uma zona, geralmente em formato de cone, em que a energia é absorvida, como pode ser visto na Figura 19. A zona fraturada costuma ocorrer na matriz de argamassa e na interação entre a argamassa e a superfície do agregado. Durante o ensaio, o pino percorre argamassa e agregado gráudo, portanto ambos influenciam na resistência do concreto examinado, diferente do ensaio de compressão, onde a resistência da matriz de argamassa acaba definindo a resistência à compressão.

Figura 19 - Zona danificada no ensaio de penetração de pino

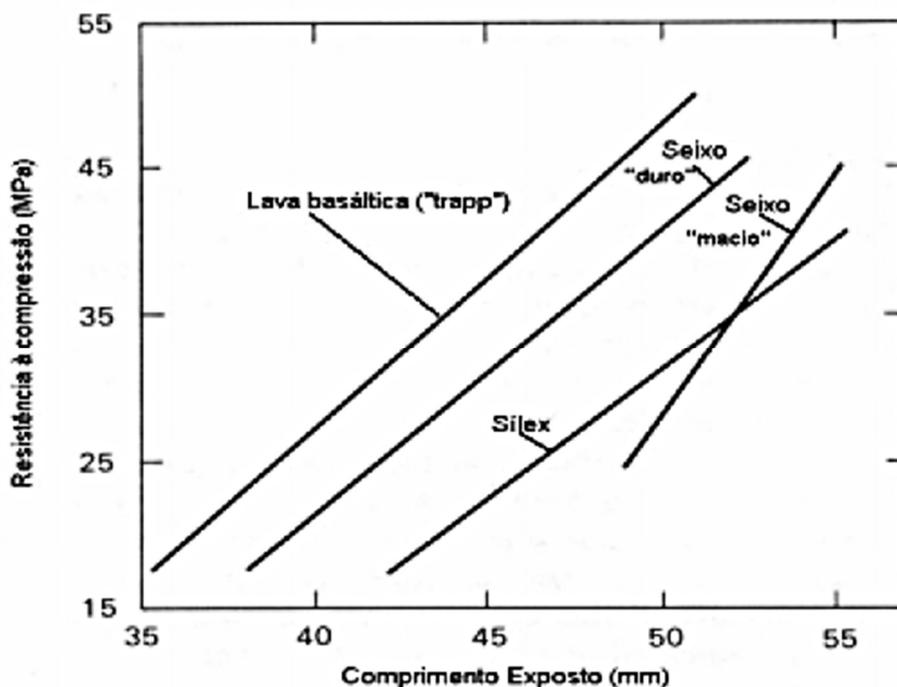


Fonte: ACI 228.1R-03, adaptado pelo autor

Ainda de acordo com a norma, o tipo de agregado apresenta uma influência significativa no ensaio de penetração, uma vez que tem uma influência significativa na

relação entre a penetração do pino e a resistência do concreto. Por exemplo, para concretos de uma mesma resistência, o concreto que utiliza agregado leve terá uma penetração de pino maior que a com agregado comum. Contudo, estudos realizados por Evangelista (2002) entre concretos executados com brita de gnaiss e brita de traquito demonstraram que o segundo tipo apresentava uma profundidade de perfuração de cerca de 17% a 31% maior que a outra em diferentes idades e teores a/c, considerado pouco significativo pela autora. Outro fator ressaltado por Bungey *apud* Evangelista (2002) lembra que os fabricantes utilizam somente a resistência dos agregados graúdos em suas calibrações, desconsiderando a aderência entre o agregado e a matriz de argamassa. Contudo, para uma melhor precisão dos resultados é necessário realizar uma correlação entre o tipo de agregado e a resistência, como apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Influência do tipo de agregado na relação entre comprimento exposto e resistência à compressão



Fonte: Bungey *apud* Evangelista (2002)

Estudos realizados por Evangelista (2002) quanto à influência da dimensão máxima do agregado mostraram que a dimensão do agregado é relevante. Em seus ensaios, para um mesmo tipo de agregado, os de menor diâmetro (9,5 mm) apresentaram uma menor resistência à penetração quando comparados aos de maior

diâmetro (19 mm), variando entre 4% e 38% em diferentes idades e teores a/c. A autora cita ensaios realizados por Yun *et al* (1988), com agregados de diâmetro máximo 25 mm e 40 mm, que tiveram uma conclusão semelhante. Contudo, também cita estudos realizados por Bungey (1989) com agregados acima de 50 mm que não julgam a dimensão como significativa para o ensaio.

Ainda segundo estudos realizados pela autora, a BS 1881: Part 201, que relata que o tipo de cimento não altera o resultado. Contudo, verificou-se uma influência significativa utilizando-se diferentes tipos de cimento. Para concretos produzidos com CP III, a profundidade perfurada foi até 62% maior que para concretos com CP V.

Um fator que deve ser considerado é a influência do aço da armadura no ensaio, sendo necessário averiguar a presença de barras no local do ensaio para que as mesmas não absorvam o impacto do pino (ACI 228.1R-03).

Já parâmetros das condições superficiais do concreto, como irregularidades, não afetam os resultados do ensaio, embora práticas como o desempenho tornem a superfície mais resistente para a penetração do pino, superestimando a resistência do concreto e tornando os resultados mais dispersos. Outro fator tido como irrelevante é a orientação do disparo, que deve ser realizado de maneira perpendicular ao concreto (ACI 228.1R-03).

A BS 1881: Part 201 *apud* Evangelista (2002) especifica que a dimensão máxima do agregado gráudo investigado deve ser de 50 mm. A superfície avariada varia sua profundidade entre 25 mm e 75 mm, sendo essa representativa da totalidade do concreto. A área superficial afetada pelo ensaio tem um diâmetro aproximado de 75 mm. Ainda ressalta mais fatores que não influenciam nos resultados do ensaio, como teor de umidade e cura. A norma ainda lembra que o ensaio pode ser realizado através das formas de madeira, sendo prático para a realização de um controle do concreto mesmo antes da remoção das formas.

Quanto à precisão do método, estudos apresentados por Evangelista (2002) diferem ligeiramente sobre a acurácia do método. Malhotra (1984) encontrou uma acurácia em torno de 15 a 20% em condições ideais, com corpos de prova moldados, curados e ensaiados em condições idênticas às das curvas de calibração. O coeficiente de variação dos resultados é da ordem de 6% a 10%. Bungey (1989) cita que, em 95% dos ensaios realizados, foi possível estimar a resistência com acurácia de cerca de 20% para um conjunto de 3 penetrações. Yun *et al* (1988) obtiveram uma média nos coeficientes de variação de 11,7% para argamassas, 16,1% para concretos

com agregados de até 25 mm de diâmetro e 15,4% para concretos com agregados até 40 mm de diâmetro. Já Turkstra *et al* (1988) apresentaram em seus ensaios um coeficiente de variação de cerca de 12,4% a 15,8%.

A ACI 228.1R-03 não recomenda a utilização do método para concretos acima de 28 MPa. Al-Manaseer e Aquino *apud* Evangelista (2002) recomendam a troca do tipo de pino já para uma resistência acima de 25 MPa, devido ao fato de concretos com resistência à compressão acima disso já façam com que o pino comum tenda a quebrar na parte superior. Os autores ainda limitam o ensaio a concretos de até 130 MPa, sendo que acima desta, o pino não consegue penetrar no elemento.

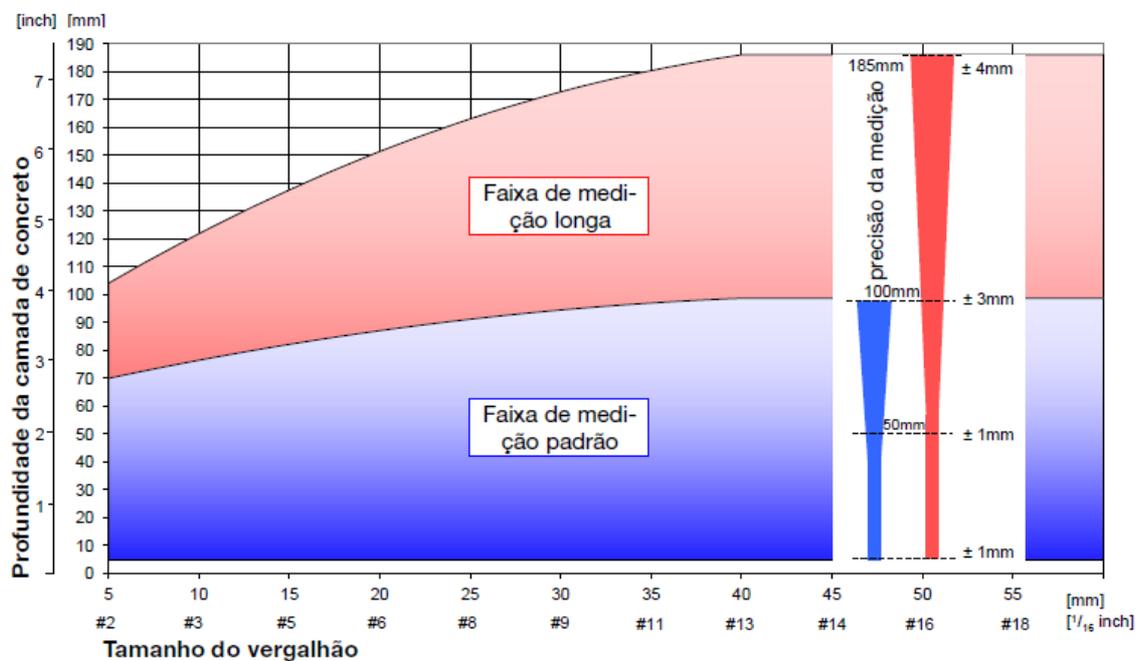
5.5.2.5. Pacometria

Para uma análise precisa das estruturas de concreto armado, foram desenvolvidos aparelhos denominados pacômetros, capazes de detectar a armadura no interior do concreto, partindo do princípio que o aço afeta o campo eletromagnético. Com tais aparelhos, é possível determinar o diâmetro das armaduras e a sua localização, além do cobrimento.

Essas ferramentas são aliadas na análise de estruturas que desenvolveram alguma patologia, pois proporcionam informações de cobrimento e armadura executada sem a necessidade de destruição do concreto. Além disso, podem ser utilizadas de maneira combinada com outro método não destrutivo, visando eliminar a influência do aço nos resultados obtidos.

Na Figura 21, é possível visualizar a precisão do aparelho, que fornece leituras precisas a até 64 mm de profundidade, desde que não haja a interferência de outra barra.

Figura 21 - Faixa máxima de medição possível do aparelho da Profoscope (sem a interferência de outras barras)



Fonte: Manual técnico Profoscope

Malhotra *apud* Evangelista (2002) lembra que estes aparelhos apresentam problemas para concretos com armação elevada, como uma segunda camada de aço, visto que ocorre uma interferência no campo eletromagnético por parte das duas armaduras, dificultando a leitura de diâmetro e cobertura.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Introdução

Com o intuito de realizar um estudo comparativo utilizando um método de ensaio não destrutivo, optou-se por escolher três edificações em fase de execução da estrutura de concreto. Para estas edificações, moldar corpos de prova para serem ensaiados em laboratório à compressão simples e, em uma mesma idade, pelo método esclerométrico em laboratório e *in loco*. Com um intuito de realizar uma coleta de dados de uma maior gama de casos, foi escolhida uma edificação em fase de concretagem de vigas e lajes e duas edificações na fase de concretagem de pilares.

O objetivo principal dos ensaios consiste em analisar a resistência dos corpos de prova e do concreto *in loco*, comparando os resultados e buscando verificar a precisão do ensaio. Para isso, na idade de 28 dias, foi realizado um ensaio de compressão em laboratório, ensaio esclerométrico nos corpos de prova em laboratório e ensaio esclerométrico *in loco*, sendo possível comparar as resistências e visando verificar a precisão do ensaio em diferentes situações. Além disso, com o intuito de identificar outra propriedade fundamental do concreto, foi realizado um ensaio utilizando extensômetro em laboratório para verificar a deformação dos corpos de prova sujeitos a determinada tensão, tornando possível determinar o módulo de elasticidade do concreto e, posteriormente, possibilitando uma comparação entre os resultados experimentais e resultados obtidos valendo-se de equações previstas em diferentes normas para a determinação do módulo de elasticidade a partir da resistência.

Para a amostragem da primeira edificação foram moldados um total de seis corpos de prova de uma concretagem concomitante de vigas e lajes. Já para as duas seguintes, foram moldados três corpos de prova em cada durante a concretagem de pilares. Com o intuito de viabilizar os ensaios, obtendo a aceitação por parte das construtoras para a utilização do concreto, foi necessário utilizar somente três corpos de prova para cada concretagem de pilares, número inferior ao mínimo solicitado pela NBR 12655:2015 para controle tecnológico do concreto.

A seguir, podem ser verificadas algumas determinações empregadas em cada método utilizado durante o estudo, contando com a descrição dos procedimentos, equipamentos e características do ensaio.

6.2. Moldagem e cura dos corpos de prova

6.2.1. Procedimentos

Primeiramente, foi executado o ensaio de abatimento de tronco de cone para a determinação da resistência do concreto utilizado. Dados os valores obtidos e segundo a NBR 5738:2015, todos os adensamentos foram realizados por método manual.

Em seguida, antes de adicionar o concreto aos moldes, executou-se a lubrificação dos mesmos utilizando óleo mineral, além de dispor identificações no fundo de cada unidade. O concreto foi adicionado com concha em U, distribuindo-o de maneira simétrica, e com regularização utilizando a haste de aço. Dadas as dimensões básicas do molde e o tipo de adensamento empregado, o concreto foi disposto em 2 camadas de 12 golpes cada.

Figura 22 - Moldagem dos corpos de prova de concreto



Fonte: Autor

Ainda seguindo as orientações da norma, após a moldagem os corpos de prova foram imediatamente locados em local horizontal e coberto no canteiro de obras pelas primeiras 24 h, livre de vibrações que pudessem interferir em sua forma ou propriedades durante o início de pega e cura inicial. Dadas as primeiras 24 h, o concreto foi transportado para o Laboratório de Estruturas, desmoldados e imersos em água até que a idade de rompimento fosse atingida.

Figura 23 – Corpos de prova moldados da primeira edificação



Fonte: Autor

No primeiro ensaio executado, uma vez atingida a idade de 28 dias, os corpos de prova foram retirados da cura úmida e submetidos à retificação, de modo a tornar as superfícies dos mesmos planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova e estando assim prontos para o ensaio de compressão axial. Nos ensaios posteriores, o tempo de cura úmida foi reduzido devido a fatores que serão detalhados no item 6.3.1..

6.2.2. Equipamentos

O molde utilizado para confeccionar os corpos de prova foi fornecido pelo Laboratório de Estruturas da Universidade de Santa Cruz do Sul, possuindo diâmetro igual a 100 mm e altura igual a 200 mm. Os moldes eram constituídos por lateral e base de aço, possuindo uma abertura na extremidade superior.

A haste utilizada para o adensamento do concreto era constituída de aço, com superfície plana e com diâmetro de 16 mm, fornecida por empresa especializada na execução do controle tecnológico de concreto.

Para verificação da relação h/d, foi utilizado o paquímetro fornecido pelo Laboratório de Estruturas da Universidade de Santa Cruz do Sul, com resolução de 0,01 mm. Os resultados das medidas encontradas podem ser verificados no Anexo.

6.2.3. Características

O concreto foi fornecido pela concreteira A para as edificações 1 e 2 e pela concreteira B para a edificação 3.

6.3. Ensaio esclerométrico

6.3.1. Procedimentos para as medições realizada em laboratório

Para o ensaio nos corpos de prova, os mesmos foram posicionados no centro da máquina de ensaios e submetidos a uma força normal de 300000 N, visando estabilizar o corpo de prova e evitando vibrações durante o ensaio. O ensaio procurou evitar distâncias inferiores à 50 mm das extremidades e com espaçamento mínimo de 30 mm entre os 16 golpes executados. Após a execução do ensaio a carga foi removida e o próximo ensaio teve início.

O primeiro ensaio foi realizado imediatamente após uma cura úmida de 28 dias. Contudo, dada uma interferência muito elevada entre os resultados obtidos no ensaio de compressão e no ensaio esclerométrico, os corpos de prova provenientes da segunda e terceira edificação foram removidos da cura úmida 48 h e 96 h antes dos 28 dias, respectivamente.

Figura 24 - Ensaio esclerométrico em corpo de prova



Fonte: Autor

6.3.2. Procedimentos para as medições realizadas *in loco*

Já para os ensaios *in loco*, visando garantir que o concreto ensaiado com o esclerômetro era o mesmo dos corpos de prova, seguiu-se o que foi detalhado no mapa de concretagem fornecido pelas construtoras. O esclerômetro utilizado, bem como o operador, foram os mesmos do ensaio em laboratório, visando reduzir interferências. Para a primeira concretagem, foram executados três ensaios em vigas e três ensaios em laje. Para a segunda e terceira concretagem, foram ensaiados três pilares em cada. Com o intuito de obter-se os dados mais precisos na execução do ensaio, seguiram-se as orientações da NBR 7584:2012 e de Carneiro (1975), optando-se por pontos que tiveram contato direto com as formas, além de serem secas ao ar e planas. Antes da execução do ensaio, a superfície foi preparada por meio de polimento com disco abrasivo, fornecido pelo fabricante, com movimentos circulares, removendo posteriormente a poeira a seco. No caso de pilares, para evitar

os fenômenos de exsudação, segregação e regiões de alta concentração de armadura, optou-se por concentrar a maioria dos ensaios na metade de sua altura. Contudo, visando verificar a influência destes fenômenos no ensaio, um dos pilares em cada uma das edificações foi ensaiado em três alturas distintas. Além disso, no caso das vigas, as regiões inferiores no meio do vão foram evitadas, bem como superiores próximas aos apoios. Contudo, assim como nos pilares, um dos ensaios foi realizado no fundo da viga, visando verificar a influência destes fenômenos. Já no caso das lajes, buscou-se executar os ensaios em elementos com no mínimo 100 mm de espessura, garantindo sua rigidez e eliminando fenômenos de ressonância, vibração ou dissipação de energia já descritos anteriormente.

Figura 25 - Ensaio esclerométrico em estrutura de concreto



Fonte: Autor

Figura 26 - Ensaio realizado em três alturas distintas do pilar



Fonte: Autor

Para o cálculo do índice, foi feita a média dos valores fornecidos pelo equipamento em cada local ensaiado, descontando, posteriormente, os valores com distância superior à 10% da média, visto que poderiam ter golpeado uma bolha de ar ou mesmo o agregado. Removidos os valores, é calculada uma nova média, onde os valores devem ficar distantes da média em até 10%. Também é necessário considerar que devem haver no mínimo 5 valores. Com a média calculada e em função do ângulo de aplicação do equipamento, é determinada a resistência.

6.3.3. Equipamentos

Para a realização da resistência superficial do concreto, foi utilizado o esclerômetro fornecido pelo Laboratório de Estruturas da Universidade de Santa Cruz do Sul, da marca James Instruments, especializada em equipamentos para ensaios não destrutivos, e de modelo D-500, adequado para casos normais de elementos estruturais.

Figura 27- Esclerômetro utilizado



Fonte: Autor

6.3.4. Características

Nos locais de ensaio, foi desenhada uma malha visando orientar os golpes do esclerômetro. Foram executados 16 golpes por local ensaiado, sendo que todos os pontos possuíam entre si uma distância mínima de 30 mm, além de nenhum impacto ocorrer duas vezes no mesmo local. Todos os ensaios também buscaram um afastamento mínimo de 50 mm das arestas dos elementos. Durante a realização do

ensaio, os valores fornecidos pelo equipamento foram anotados e foram utilizados posteriormente para a determinação da resistência superficial.

6.4. Ensaio para a determinação do módulo de elasticidade

6.4.1. Procedimentos

Para a determinação do módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados, foram fixadas firmemente por meio de sistema próprio as garras do extensômetro eletrônico, de maneira equidistante entre si no perímetro do corpo de prova. A distância entre as extremidades de cada garra era igual à medida de diâmetro do corpo de prova, de 100 mm. Para a obtenção da deformação, a leitura de cada sensor é utilizada para a obtenção de uma média, fornecida diretamente pelo equipamento. Além disso, o extensômetro era compatibilizado com a máquina de ensaios, fornecendo a leitura diretamente para o software integrado TESC, da EMIC.

Figura 28 - Extensômetro fixado ao corpo de prova



Fonte: Autor

O carregamento utilizado foi aplicado pela máquina de forma contínua até o final do ensaio. Uma vez atingido o carregamento, o ensaio é paralisado e o extensômetro é removido, evitando, assim, possíveis danos ao aparelho causados por rompimento do corpo de prova.

Com os dados obtidos, foi realizado o cálculo do módulo conforme a metodologia A da NBR 8522:2008, especificado no item 5.4.4.. Além disso, também foi calculado o módulo de elasticidade experimental para as tensões de $0,4 f_c$ e $0,45 f_c$, conforme determinam as normas EUROCODE 2 e ACI 318-14, respectivamente.

6.4.2. Equipamentos

Para a determinação do módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados, a NBR 8522:2008 foi seguida dentro do possível dados os objetivos almejados. Para o ensaio, foi utilizado um extensômetro eletrônico da marca EMIC e modelo EE08, fornecido pelo Laboratório de Estruturas da Universidade de Santa Cruz do Sul, constituído por dois sensores independentes. O equipamento é específico para a medição de pequenas deformações em corpos de prova, com máxima deformação de 2,5 mm. A precisão do equipamento é de 0,0001 mm.

Figura 29 - Extensômetro utilizado



Fonte: Autor

6.4.3. Características

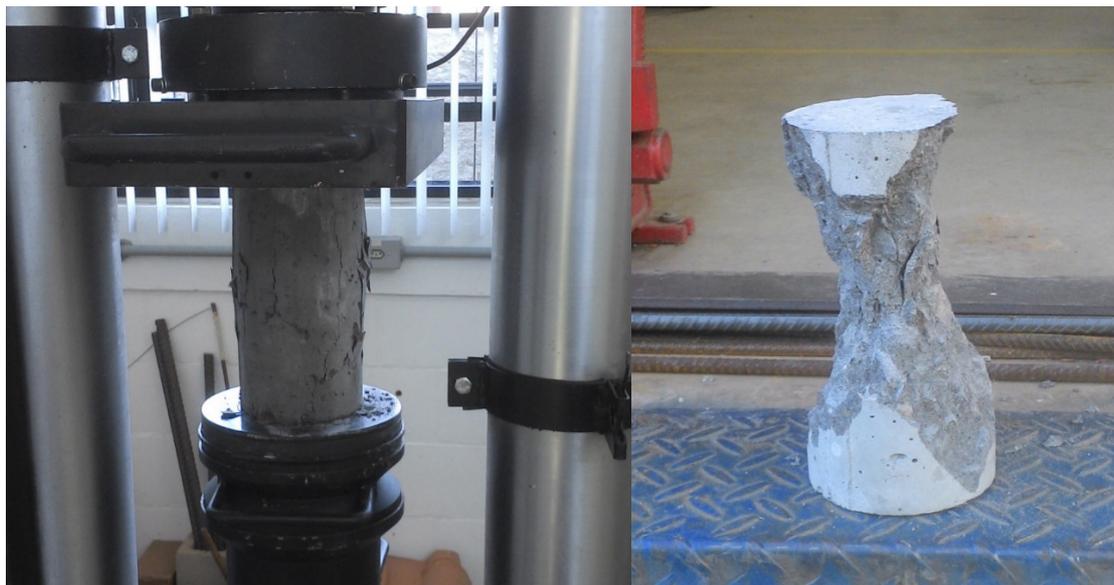
Tendo em vista a pequena quantidade de corpos de prova para ensaio, não foi possível determinar a resistência exata do concreto antes do ensaio rompendo duas amostras. Portanto, a tensão aplicada nos corpos de prova foi estimada com base na resistência solicitada pelo projetista, visando ultrapassar os 45 % de f_c , valor mais elevado para a determinação do módulo de elasticidade experimental dentre os calculados, dada a solicitação da ACI 318-14. O carregamento utilizado em todos os corpos de prova foi de 140000 N. Contudo, alguns corpos de prova alcançaram uma resistência superior à esperada, sendo, nesse caso, utilizada uma linha de tendência para determinar o módulo.

6.5. Ensaio de compressão em laboratório

6.5.1. Procedimentos

Após a remoção do extensômetro, utilizado para a realização do módulo de elasticidade, é dada continuidade ao ensaio até que ocorra uma queda brusca de força, então o carregamento é cessado e o ensaio finalizado. O procedimento foi realizado procurando seguir ao descrito na NBR 5739:2007 e detalhado no item 5.4.2.. Os valores de carregamento são fornecidos pela máquina de ensaios e, dividindo-se o valor pela área dos corpos de prova, é possível determinar a tensão na ruptura.

Figura 30 - Rompimento de corpo de prova



Fonte: Autor

6.5.2. Equipamentos

Para a execução do ensaio de compressão do corpo de prova cilíndrico, foi utilizada a prensa PC200CS, de classe 1, localizada no Laboratório de Estruturas da UNISC. A prensa possui articulação tipo rótula esférica no prato superior, possui capacidade máxima de carga de 200 tf e funciona fornecendo dados para software TESC, possibilitando a emissão de relatório de ensaio precisos.

6.6. Cálculo do módulo de elasticidade em função da resistência através de procedimentos normativos

Além do módulo experimental, o estudo também abordará o cálculo do módulo em função dos valores de resistência obtidos por ensaio esclerométrico, ensaio de compressão e por classe do concreto. As normas utilizadas para o cálculo serão NBR 6118:2007, NBR 6118:2014, ACI 318-14 e EUROCODE 2, valendo-se das fórmulas especificadas no item 5.3.3.

É necessário ressaltar que, dada a falta de amostras em algumas concretagens estudadas, o valor de f_{ck} não será calculado. Nestes casos, será utilizado o valor de f_{cm} para a determinação do módulo em todos os casos.

7. RESULTADOS

7.1. Caracterização geral das amostras de concreto

Para que seja possível realizar uma análise mais precisa dos resultados, primeiramente é necessário apresentar alguns parâmetros específicos de cada lote de amostras, envolvendo características fundamentais do concreto e dos corpos de prova, bem como seu local de aplicação. Os dados colhidos das três concretagens são apresentados no Anexo.

7.2. Resultados obtidos nos ensaios de compressão e esclerometria em corpo de prova

Conforme apresentado anteriormente, a determinação da resistência dos corpos de prova de concreto deu-se pela realização de ensaio de compressão e por esclerometria em corpos de prova. Os resultados destes ensaios podem ser verificados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de resistência encontrados para os corpos de prova

Concretagem	CP	Força máxima (N)	f_c (MPa)	Média de R	Ângulo ensaio (°)	Resistência superficial (N/mm ²)
1	1	268934,4	34,24	27,36	0	16,42*
	2	271392,7	34,55	24,13	0	12,77*
	3	271743,8	34,60	28,08	0	17,75*
	4	270760,5	34,47	26,56	0	15,94*
	5	276519,9	35,21	27,40	0	16,44*
	6	280312,7	35,69	27,75	0	17,54*
	f_{cm}		34,79			
2	1	362489,0	46,15*	37,07	0	30,46*
	2	277362,8	35,31	33,67	0	25,25*
	3	273710,5	34,85	33,18	0	24,63*
	f_{cm}		35,08			
3	1	335307,6	42,69	31,00	0	21,60*
	2	328635,2	41,84	32,8	0	24,35*
	3	196520,9	25,02*	33,67	0	25,25*
	f_{cm}		42,27			

* Resultados desconsiderados.

Desvio padrão de f_c concretagem 1: 0,54

Desvio padrão de f_c concretagem 2: 0,33

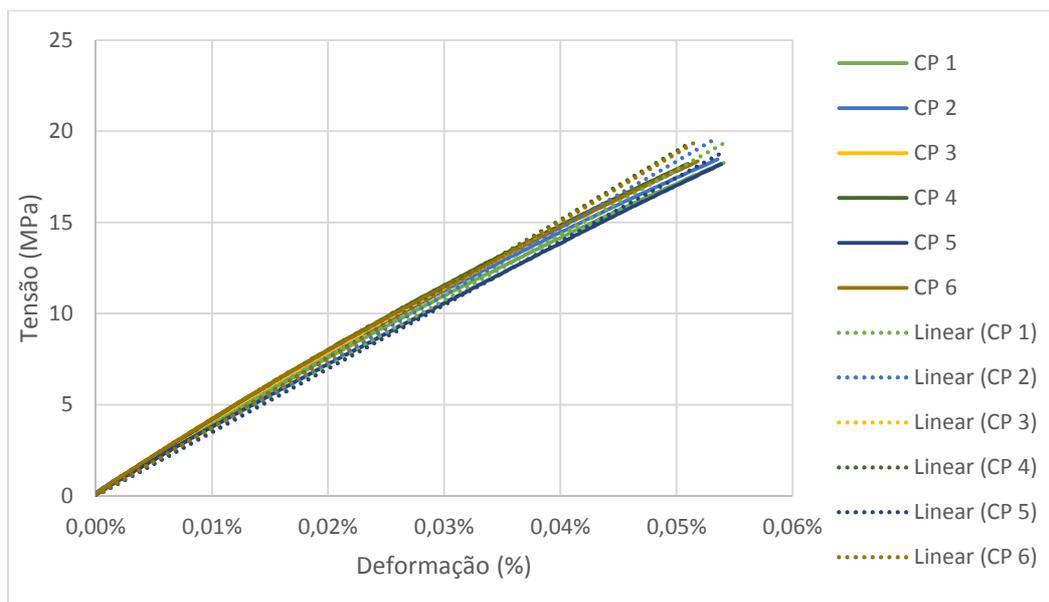
Desvio padrão de f_c concretagem 3: 0,60

Fonte: Autor

7.3. Resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade

Com o intuito de determinar-se o módulo de elasticidade do concreto, foi utilizado o método descrito anteriormente, anexando-se extensômetros às laterais do corpo de prova e aplicando-se carga progressiva durante a medição. Os diagramas de tensão-deformação para cada edificação podem ser verificados nas Figuras 31, 32 e 33, juntamente com as linhas de tendência geradas com os resultados.

Figura 31 - Diagrama tensão-deformação para a edificação 1



$$\text{CP1: } y = 35779x$$

$$\text{CP2: } y = 36717x$$

$$\text{CP 3: } y = 37565x$$

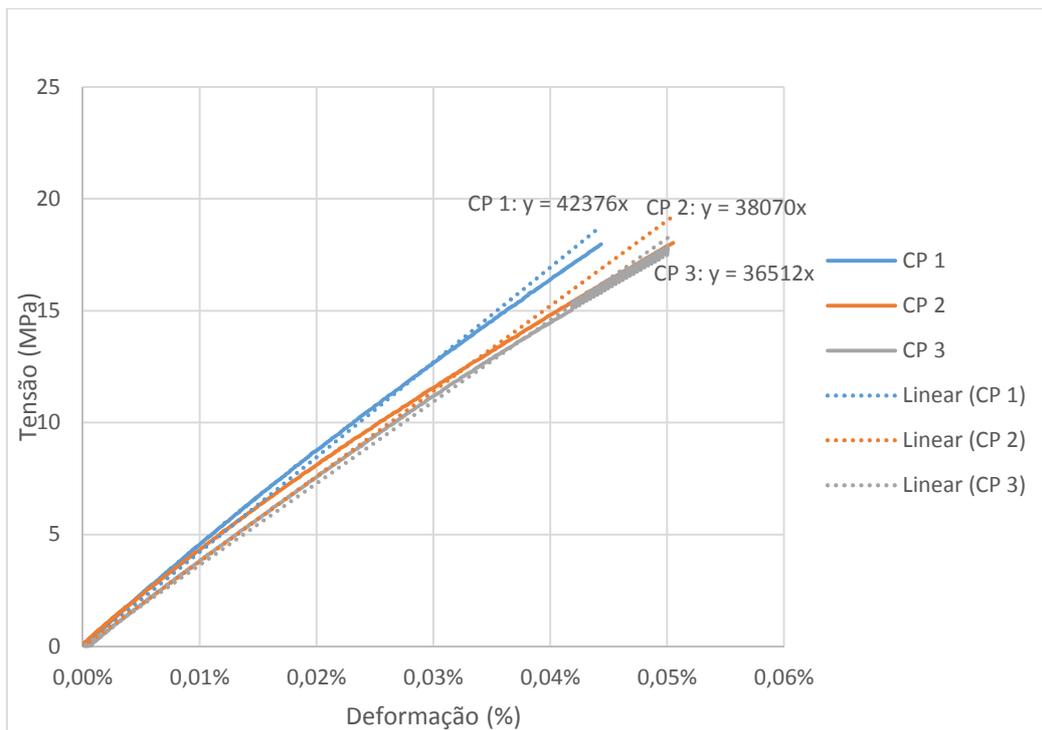
$$\text{CP 4: } y = 37880x$$

$$\text{CP 5: } y = 34935x$$

$$\text{CP 6: } y = 37594x$$

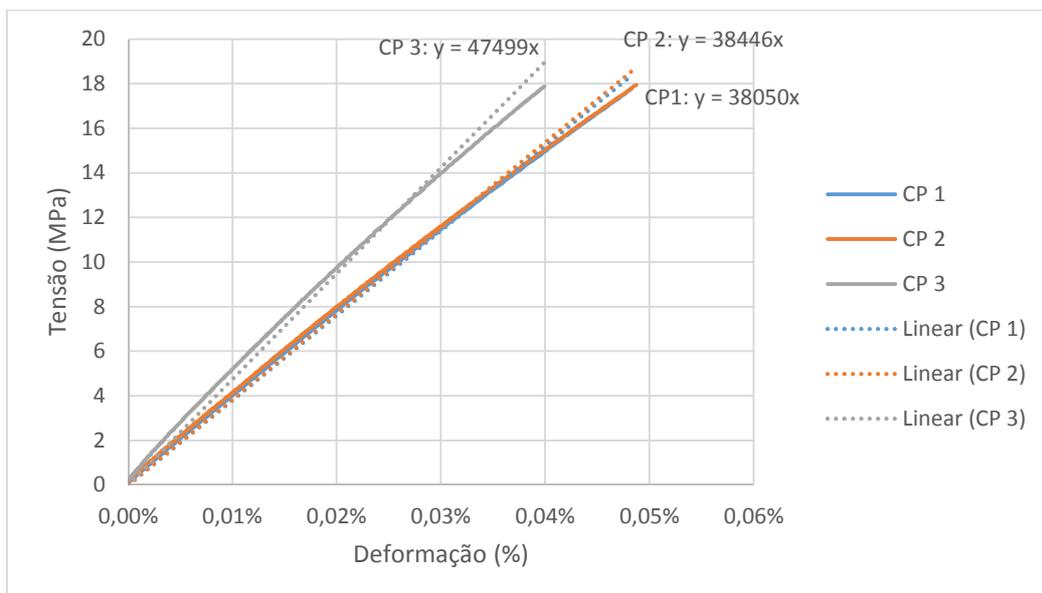
Fonte: Autor

Figura 32 - Diagrama tensão-deformação para a edificação 2



Fonte: Autor

Figura 33 - Diagrama tensão-deformação para a edificação 3



Fonte: Autor

Com os resultados obtidos foi possível determinar o módulo de elasticidade experimental em função de diferentes tensões, de acordo com o especificado em cada norma abordada. A Tabela 11 apresenta primeiramente os resultados médios de módulo de elasticidade dos corpos de prova para uma tensão inicial de 0,5 MPa e final de $0,3 f_c$, segundo a NBR 8522:2008. Em seguida, a tabela apresenta os valores com tensão inicial nula até uma tensão final de $0,4 f_c$, como sugere o EUROCODE 2. Por fim, a tabela ainda apresenta valores experimentais médios entre uma tensão nula até uma tensão de $0,45 f_c$, como sugere a ACI 318-14. Os valores de módulo de elasticidade individuais encontrados, bem como os valores de deformação, utilizados para verificar resultados com dispersão acima da tolerância apresentada ($\Delta\varepsilon$) pela norma, também podem ser verificados no Anexo.

Tabela 11 – Valores de módulo de elasticidade experimental

Tensão final	Edificação	Eci (MPa)
0,30 f_c	1	37606,86
	2	38113,98
	3	37576,22
0,40 f_c	1	36361,32
	2	39550,88
	3	37026,99
0,45 f_c	1	36040,19
	2	36548,68
	3	38248,00

Fonte: Autor

7.4. Resultados obtidos por ensaio esclerométrico *in loco*

Como descrito anteriormente, para a determinação da resistência superficial por meio de ensaio esclerométrico *in loco* foi realizada uma verificação para averiguar os locais em que o concreto utilizado para a moldagem dos corpos de prova ensaiados em laboratório fora utilizado. Os resultados da média do índice esclerométrico “R”, bem como a resistência superficial do concreto determinada pela curva de calibração

do equipamento em função do ângulo de realização do ensaio e geometria da superfície podem ser verificados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de resistência superficial obtidos por ensaio esclerométrico *in loco*

Edificação	Local ensaiado	Ponto	Ângulo ensaio (°)	Média de R	Resistência superficial (N/mm ²)
1	Laje	1	90	40,53	35,39
		2	90	41,20	35,98
		3	90	39,69	33,74
		f_{cm}			35,04
	Viga	1	0	35,64	33,07
		2	90	42,43	37,88
		3	0	35,20	32,48
		f_{cm}			34,48
2	Pilar	1	0	38,23	37,12
		2	0	37,57	36,48
		3	0	38,07	36,97
		4	0	38,75	38,95
		5	0	37,80	36,71
		f_{cm}			37,25
3	Pilar	1	0	34,25	30,22
		2	0	34,21	30,19
		3	0	33,13	28,91
		4	0	34,63	31,96
		5	0	34,94	32,24
		f_{cm}			30,70

Desvio padrão edificação 1: 1,16 (laje); 2,96 (viga)

Desvio padrão edificação 2: 0,98

Desvio padrão edificação 3: 1,38

Fonte: Autor

De maneira complementar, para analisar o fenômeno da segregação do concreto e sua influência no ensaio esclerométrico, foi realizado o ensaio em três alturas distintas em dois pilares, um de cada concretagem. Os resultados encontrados podem ser verificados na Tabela 13.

Tabela 13 - Ensaio esclerométrico em alturas distintas de pilar

Edificação	Ponto	Local ensaiado	Ângulo ensaio (°)	Média de R	Resistência superficial (N/mm²)
2	1	Base	0	38,23	37,12
	2	Meio	0	37,57	36,48
	3	Topo	0	38,07	36,97
3	1	Base	0	34,25	30,22
	2	Meio	0	34,21	30,19
	3	Topo	0	33,13	28,91

Fonte: Autor

8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

8.1. Análise da caracterização geral das amostras de concreto

Com base nos dados apresentados, é possível verificar que fatores como idade do concreto ensaiado, tipo do agregado graúdo, características do corpo de prova ou da máquina de ensaios não afetaram os resultados. Contudo, a classe de concreto varia entre as concretagens, sendo C30 para a primeira e terceira concretagem e C35 para a segunda. Outro fator que se altera é o tipo de cimento utilizado, sendo este CP IV para as duas primeiras concretagens e CP II para a terceira. Por fim, outro fator que diferenciará somente os ensaios *in loco* é o local de aplicação do concreto, sendo que na primeira edificação empregou-se em lajes e vigas e nas duas últimas em pilares.

8.2. Análise dos resultados obtidos nos ensaios de compressão e esclerometria em corpo de prova

Analisando-se os resultados, foi possível verificar alguns dados discrepantes que acabaram sendo desconsiderados, como corpos de prova com resistência individual muito diferente a dos restantes, devido a falhas durante a moldagem, visto que os corpos de prova foram moldados com o mesmo concreto.

Além disso, os resultados de resistência superficial, utilizando-se o esclerômetro, ficaram aquém do medido em seguida durante o ensaio de compressão. Na realização do primeiro ensaio, ao constatar-se que o resultado estava sendo afetado de maneira significativa pela absorção do impacto causada pela saturação do corpo de prova, foi estabelecido que os corpos de prova dos ensaios posteriores seriam removidos da cura úmida com antecedência. Assim, para o segundo lote de corpos de prova, a cura úmida foi interrompida 48 h antes do ensaio esclerométrico. Contudo, durante a realização do ensaio, verificou-se que a resistência ainda se encontrava abaixo da medida no ensaio de compressão. Além disso, foi possível verificar que os corpos de prova rompidos ainda possuíam seu interior saturado. Como apresentado anteriormente, o esclerômetro analisa uma superfície de até 50 mm de profundidade, portanto a umidade do interior do corpo de prova ainda poderia interferir na determinação da resistência. Por fim, para o último lote de corpos de prova, a remoção da cura úmida se deu 96 h antes do ensaio, contudo, ainda não foi possível determinar com precisão a resistência dos corpos de prova através deste ensaio.

8.3. Análise dos resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade

Os valores encontrados no ensaio experimental encontram-se próximos aos valores esperados de módulo de elasticidade, determinado através do cálculo apresentado pela NBR 6118:2014. Uma análise mais aprofundada será realizada no item 8.6..

8.4. Análise dos resultados obtidos por ensaio esclerométrico *in loco*

Os resultados obtidos encontram-se próximos aos esperados com base na classe do concreto utilizado.

Para os valores verificados no ensaio complementar, variando-se a altura, não é possível verificar nenhuma relação significativa entre a altura da realização do ensaio e o índice esclerométrico, sendo verificada somente uma pequena variação entre a base e o restante do pilar. Contudo, dada a pequena quantidade de pilares analisada, um estudo mais aprofundado é recomendado para melhor determinar a influência deste parâmetro no índice esclerométrico.

8.5. Comparação e análise dos resultados de resistência

Com base nos resultados obtidos e apresentados anteriormente, foi possível realizar uma comparação entre a resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados com a resistência obtida no ensaio esclerométrico *in loco*. Os resultados da esclerometria em corpos de prova foram desconsiderados devido aos fatores anteriormente apresentados.

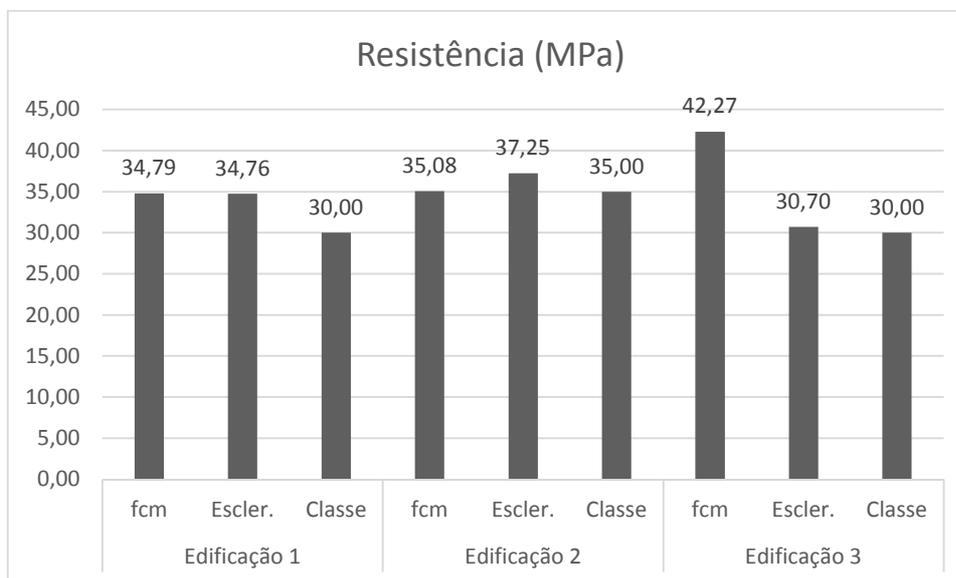
Tabela 14 – Comparação dos resultados de resistência

Edificação	Ensaio de compressão em corpo-de-prova		Ensaio esclerométrico <i>in loco</i>	
	CP	f_c (MPa)	Local	Resist. superficial (MPa)
1	1	34,24	Laje 1	35,39
	2	34,55	Laje 2	35,98
	3	34,60	Laje 3	33,74
	4	34,47	Viga 1	33,07
	5	35,20	Viga 2	37,88
	6	35,69	Viga 3	32,48
	Média	34,79	Média	34,76
	CV	2%	CV	6%
2	1	35,31	Pilar 1 (base)	37,12
	2	34,85	Pilar 1 (meio)	36,48
	3	46,15*	Pilar 1 (topo)	36,97
			Pilar 2	38,95
			Pilar 3	36,71
	Média	35,08	Média	37,25
	CV	1%	CV	3%
	3	1	42,69	Pilar 1 (base)
2		41,84	Pilar 1 (meio)	30,19
3		25,02*	Pilar 1 (topo)	28,91
			Pilar 2	31,96
			Pilar 3	32,24
Média		42,27	Média	30,70
CV		1%	CV	5%

Fonte: Autor

Com base nos resultados, também foi possível elaborar um gráfico para verificar a correlação entre os valores de resistência por ensaio de compressão, esclerometria e classe de concreto.

Figura 34 - Comparação dos valores de resistência obtidos



Fonte: Autor

Para os resultados de resistência, é possível observar uma boa correlação entre os resultados obtidos na esclerometria com os resultados obtidos no rompimento de corpos de prova para as duas primeiras edificações. Contudo, também é possível verificar que a terceira concretagem possui uma resistência no ensaio de compressão muito acima do determinado pelo esclerômetro e até mesmo da esperado dada a classe do concreto. Neste caso, é necessário lembrar que o concreto utilizado foi produzido utilizando CP II, diferente das duas primeiras concretagens que utilizaram CP IV. Este fato pode ter afetado a leitura do equipamento, subestimando a resistência do concreto. Outro fato que pode ter gerado este resultado é o teor de cimento do concreto, visto que um alto teor tende a fazer com que o aparelho subestime a resistência real do concreto.

8.6. Comparação e análise dos resultados de módulo de elasticidade

Uma vez obtidos os resultados de módulo de elasticidade experimental do concreto ensaiado, foi possível realizar uma verificação dos resultados utilizando fórmulas normatizadas para determinar o módulo de elasticidade. Como ressaltado anteriormente, foram utilizadas as equações previstas nas normas NBR 6118:2007, NBR 6118:2014, ACI 318-14 e EUROCODE 2. Nas tabelas 16, 17 e 18 foram realizadas as comparações, utilizando os parâmetros de resistência à compressão característica, resistência à compressão média, resistência superficial por ensaio esclerométrico *in loco* e resistência por classe de concreto, utilizada em projeto. Cabe ressaltar que a resistência característica foi utilizada somente para a primeira concretagem, visto que os outros lotes não fornecem dados suficientes para uma análise precisa da resistência característica do concreto.

Tabela 15 - Resistências utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade

EDIFICAÇÃO	1	2	3
f_{ck} ensaio de compressão (MPa)	33,54	-	-
f_{cm} ensaio de compressão (MPa)	34,79	35,08	42,27
Média ensaio esclerométrico <i>in loco</i> (MPa)	34,76	37,25	30,70
Resistência por classe de concreto (MPa)	30,00	35,00	30,00

Fonte: Autor

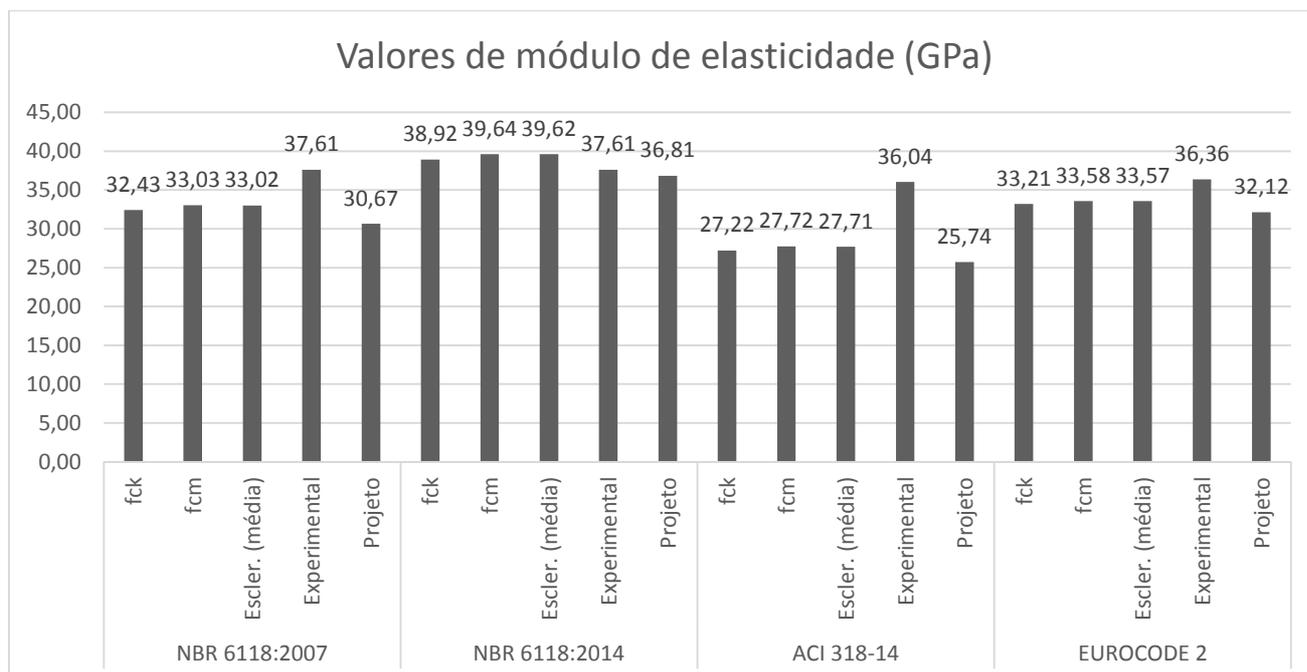
Além dos valores individuais, também foi possível verificar a relação entre os módulos de elasticidade obtidos por meio de cálculos normatizados em função da resistência ou de maneira experimental e do módulo de elasticidade utilizado na fase de projeto. Também foi possível realizar uma relação entre o módulo de elasticidade calculado com o experimental, verificando a precisão dos resultados fornecidos pelas normas. Por fim, com base nos dados apresentados, foi elaborado um gráfico ilustrativo para cada lote, valendo-se dos resultados encontrados, apresentado nas figuras 35, 36 e 37.

Tabela 16 – Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 1

Norma	Resistência para cálculo de E	Módulo de elasticidade (MPa)	Relação E obtido/E projeto	Relação E calculado/E experimental
NBR 6118:2007	f_{ck}	32431,69	+06%	-14%
	f_{cm}	33030,51	+08%	-12%
	Escler. (média)	33016,26	+08%	-12%
	Experimental	37606,86	+23%	-
	Projeto	30672,46	-	-18%
NBR 6118:2014	f_{ck}	38918,03	+06%	+03%
	f_{cm}	39636,61	+08%	+05%
	Escler. (média)	39619,52	+08%	+05%
	Experimental	37606,86	+02%	-
	Projeto	36806,96	-	-02%
ACI 318-14	f_{ck}	27219,45	+06%	-24%
	f_{cm}	27722,03	+08%	-23%
	Escler. (média)	27710,08	+08%	-23%
	Experimental	36040,19	+40%	-
	Projeto	25742,96	-	-29%
EUROCODE 2	f_{ck}	33210,92	+03%	-09%
	f_{cm}	33577,50	+05%	-08%
	Escler. (média)	33568,81	+05%	-08%
	Experimental	36361,32	+13%	-
	Projeto	32117,99	-	-12%

Fonte: Autor

Figura 35 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 1



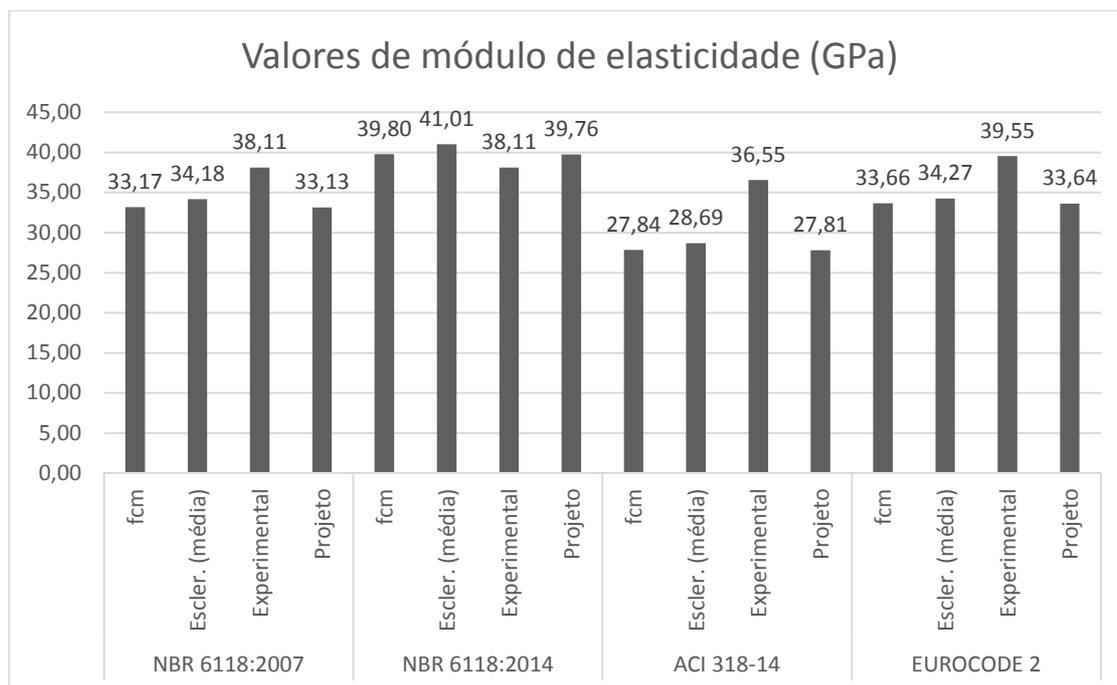
Fonte: Autor

Tabela 17 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 2

Norma	Resistência para cálculo de E	Módulo de elasticidade (MPa)	Relação E obtido/E projeto	Relação E calculado/E experimental
NBR 6118:2007	f_{cm}	33167,89	00%	-13%
	Escler. (média)	34178,36	+03%	-10%
	Experimental	38113,98	+15%	-
	Projeto	33130,05	-	-13%
NBR 6118:2014	f_{cm}	39801,47	00%	+04%
	Escler. (média)	41014,03	+03%	+08%
	Experimental	38113,98	-04%	-
	Projeto	39756,06	-	+04%
ACI 318-14	f_{cm}	27837,33	00%	-24%
	Escler. (média)	28685,41	+03%	-22%
	Experimental	36548,68	+31%	-
	Projeto	27805,57	-	-24%
EUROCODE 2	f_{cm}	33661,22	00%	+15%
	Escler. (média)	34272,82	+02%	+13%
	Experimental	39550,88	+18%	-
	Projeto	33638,17	-	+15%

Fonte: Autor

Figura 36 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 2



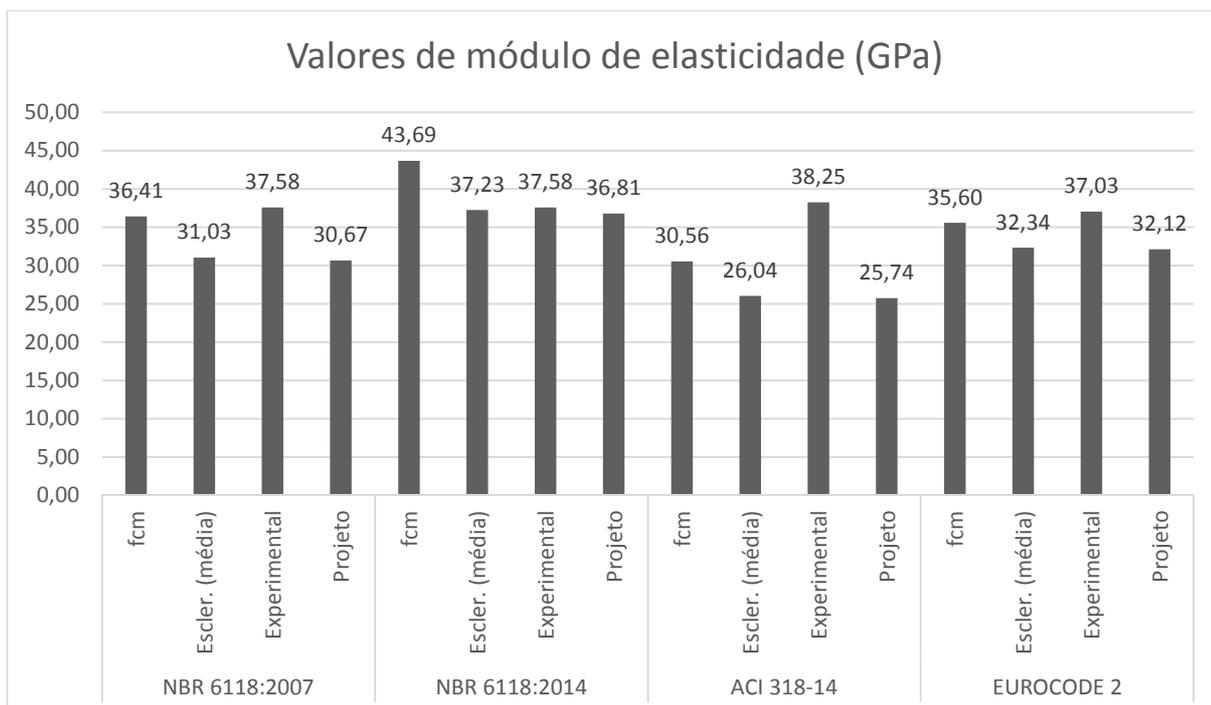
Fonte: Autor

Tabela 18 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 3

Norma	Resistência para cálculo de E	Módulo de elasticidade (MPa)	Relação E obtido/E projeto	Relação E calculado/E experimental
NBR 6118:2007	f _{cm}	36408,61	+19%	-03%
	Escler. (média)	31028,25	+01%	-19%
	Experimental	37576,22	+23%	-
	Projeto	30672,46	-	-18%
NBR 6118:2014	f _{cm}	43690,34	+19%	+16%
	Escler. (média)	37233,89	+01%	-01%
	Experimental	37576,22	+02%	-
	Projeto	36806,96	-	-02%
ACI 318-14	f _{cm}	30557,23	+19%	-20%
	Escler. (média)	26041,56	+01%	-32%
	Experimental	38248,00	+49%	-
	Projeto	25742,96	-	-33%
EUROCODE 2	f _{cm}	35597,68	+11%	-04%
	Escler. (média)	32341,00	+01%	-13%
	Experimental	37026,99	+15%	-
	Projeto	32117,99	-	-13%

Fonte: Autor

Figura 37 - Comparação dos valores de módulo de elasticidade obtidos na edificação 3



Fonte: Autor

Com base nos valores de módulo de elasticidade apresentados, é possível realizar algumas análises interessantes. Primeiramente, analisando-se a relação entre o módulo de elasticidade obtido e o utilizado em projeto, é possível verificar que todos os valores de módulo de elasticidade, calculados através das resistências obtidas nos ensaios ou através do módulo encontrado por ensaio experimental específico, estão acima do valor utilizado pelo projetista para o cálculo da estrutura, com exceção do valor experimental na segunda concretagem e valendo-se do método fornecido pela NBR 6118:2014, onde o valor da propriedade atingiu 96% do esperado na etapa de projeto. A tendência dos valores de encontrarem-se acima do previsto na parte de projeto é importante, já que demonstra que o valor obtido na estrutura estará acima do esperado, garantindo que não ocorrerão flechas acima do planejado e não gerando perigo quanto à segurança. Contudo, na segunda concretagem, a flecha total estará ligeiramente acima da calculada na fase de projeto, mas sem comprometer a estrutura. Já para o restante das normas, foram apresentados resultados muito mais conservadores quando realizado a cálculo em função da resistência, principalmente

para a ACI 318-14, onde o módulo de elasticidade experimental atingiu um valor de até 49% maior que previsto em projeto.

Outro ponto interessante pode ser verificado quando comparados valores de módulo de elasticidade experimental com módulo de elasticidade calculado, onde é possível verificar que os valores calculados em função da resistência mais próximos ao experimental foram obtidos seguindo o cálculo apresentado pela NBR 6118:2014, onde é levado em conta o tipo de agregado utilizado no concreto, demonstrando a importância desse fator no cálculo. Novamente, a ACI 318-14 apresentou os resultados mais conservadores. Já o EUROCODE 2 forneceu resultados intermediários, semelhantes aos da NBR 6118:2007.

9. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

9.1. Conclusões

Com base nos testes e estudos realizados, foi possível obter conclusões acerca dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos, conforme segue:

A utilização do esclerômetro para a determinação da resistência à compressão do concreto mostrou-se um método simples, rápido e com resultados satisfatórios, em especial para as edificações que utilizaram CP IV para a confecção do concreto. Contudo, não é possível valer-se do método para uma análise definitiva da propriedade, visto que podem ocorrer desvios significativos, como ocorreu na terceira concretagem. Devido a este fato, não é possível descartar a verificação do concreto por meio de ensaios de compressão de corpos de prova. Conforme sugere a literatura, o ensaio esclerométrico deve ser utilizado para controle adicional e verificação da homogeneidade do concreto, podendo também verificar, por exemplo, a resistência superficial em locais específicos dado o surgimento de alguma patologia na estrutura.

Para a obtenção do módulo de elasticidade, o ensaio previsto em norma, valendo-se do extensômetro, mostrou-se simples e preciso, com valores próximos do esperado dada a resistência do concreto. Contudo, tendo em vista que se trata de um equipamento de custo relativamente elevado para grande parte dos laboratórios que realizam este tipo de ensaio para obras usuais, a metodologia proposta pela NBR 6118:2014 mostrou resultados aproximados aos encontrados pelo ensaio, inclusive utilizando valores obtidos por meio do esclerômetro *in loco*. Já a metodologia proposta pela ACI 318-14 mostrou-se a mais conservadora.

O fato de a NBR 6118:2014 apresentar valores aproximados é importante para possíveis controles tecnológicos de estruturas onde não tenha sido realizado o ensaio previsto na NBR 8522:2008 para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. Além disso, como lembra Vasconcelos (2009), sabe-se que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência, contudo, não é possível determinar essa relação com precisão e a dispersão dos valores tendem a ser de até 25%, não sendo possível avaliar de maneira precisa deformações. Para uma correlação mais

adequada, seria necessário um estudo prévio de um concreto nas mesmas condições, proporções e com os mesmos materiais do que será utilizado, visando apurar essa correlação.

Já para o ensaio esclerométrico em corpo de prova cilíndrico, a relação entre a resistência real do concreto e o valor obtido pelo equipamento mostrou-se muito baixa. Em estudo à literatura técnica, foi possível verificar que ensaios realizados por Pereira e Medeiros (2012) com o equipamento em corpos de prova cilíndrico possuem uma relação pequena com a resistência, dada a falta de planeza da face. Além disso, o fato da saturação do concreto absorver parte da energia do impacto contribui para uma leitura ainda mais errônea, como lembram Danielleto (1986) e Evangelista (2002). Também é preciso lembrar que a carbonatação influencia muito na dureza superficial do concreto medida pelo esclerômetro e esta não ocorre durante a cura úmida.

Outro ponto importante que pôde ser verificado é o fato de que a posição em que o ensaio esclerométrico, no caso de pilares, não afeta o ensaio de maneira significativa, ao contrário do que Cánovas (1988) afirma ocorrer em extrações de testemunho devido ao fenômeno da segregação.

Por fim, o trabalho proporcionou um grande aprofundamento nos conhecimentos adquiridos durante a graduação, mostrando a importância deste tipo de trabalho na formação acadêmica dos estudantes.

9.2. Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se, para ensaios futuros, a utilização de estufa para remover totalmente a água do concreto, visando verificar o quanto este fator influencia nos resultados fornecidos, além de ensaios em corpos de prova com maior diâmetro ou ainda em corpos de prova prismáticos, atenuando ou eliminando a influência da irregularidade da face. Além disso, seria interessante realizar um estudo mais aprofundado para averiguar a real influência dos tipos de cimento ensaiados (CP II e CP IV) no ensaio esclerométrico. Finalmente, também é possível sugerir uma maior gama de ensaios em diferentes posições de pilares, verificando com maior volume de resultados a influência do fenômeno da segregação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.1R-03: *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*. [S. l.]: ACI Committee, 2003.

_____. ACI 318-14: *Building Code Requirements for Structural Concrete*. [S. l.]: ACI Committee, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto - procedimentos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

_____. *NBR 5739/2007: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. *NBR 7584/2012: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. *NBR 7680/2015: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunho de estruturas de concreto*: ABNT, 2015.

_____. *NBR 8522/2008: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BOTTEGA, Fábio. *Análise do ensaio esclerométrico, um ensaio não destrutivo, nas estruturas de concreto*. 2010. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2010.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. *Patologia e Terapia do Concreto Armado*. São Paulo: Pini, 1988. Coordenação Técnica: L. A. Falcão Bauer.

DANIELLETO, Carla Cristina. *Avaliação da Resistência do Concreto em Estruturas Prontas*. 1986. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNAER. *Manual de Construção de Obras de Arte Especiais*. Rio de Janeiro, 1975.

EMIC. *Extensômetro eletrônico de configuração dupla para medição de pequenas deformações em corpos de prova rígidos, EE08*. Disponível em: <<http://www.emic.com.br/Produtos+Mostra/2/13/62/Extensometro+eletronico+de+con>

figuracao+dupla+para+medicao+de+pequenas+deformacoes+em+corpos+de+prova+rígidos_+EE08_>. Acesso em: 14 nov. 2015.

EMIC. *Prensa servo-hidráulica e microprocessada para ensaio de concreto modelo PC200CS, capacidade máxima 200 ton (2MN)*. Disponível em <http://www.emic.com.br/Produtos+Mostra/4/8/24/Prensa+servo_hidraulica+e+micro+processada+para+ensaio+de+concreto+modelo+PC200CS_+capacidade+maxima+200+ton+_2MN_>. Acesso em: 14 nov. 2015.

EMIC. *Software TESC (TESC script)*. Disponível em <http://emic.com.br/Interno/software_tesc>. Acesso em: 14 nov. 2015.

European Committee for Standardization. *EUROCODE 2: Design of concrete structures: part 1-1: general rules and rules for buildings*. EM 1992-1-1. Brussels, Belgium, 2004.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. *Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos*. 2002. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FUSCO, Péricles Brasiliense. *Técnicas de armar as estruturas de concreto*. São Paulo: Pini, 1995.

GÁLVEZ, Jorge Hernán Flórez. *Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da rodovia RS471 / BR 153, lote 2*. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

HELENE, Paulo; PACHECO, Jéssika; BILESKY, Pedro; MORAIS, Tereza Rachel; GRANDO, Fernanda. *Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto*. Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto. São Paulo: IBRACON, out. 2014.

JAMES INSTRUMENTS INC. *About us*. Disponível em: <<http://www.ndtjames.com/AboutUs.asp>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

PEREIRA, Eduardo; MEDEIROS, M. H. F.. *Ensaio de "Pulloff" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normatizados no Brasil*. Revista Ibracon de Estruturas de Materiais, São Paulo, v. 5, n. 6, p.769-780, dez. 2012.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. *Notas de aula*. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2004.

PROCEQ AS. *Manual técnico profoscope*. Proceq, Suíça, v. 6, 2013.

SILVA, Turibio José da; FERREIRA, Gercindo; DIAS, João Fernando. *Influência de Variáveis nos Resultados de Ensaios Não Destrutivos em Estruturas de Concreto Armado*. Ciência & Engenharia, Uberlândia, v. 22, n. 1, p.103-113, jan. 2013.

THOMAZ, Eduardo. *Notas de aula*. Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro, 2011.

VASCONCELOS, Augusto C.; GIAMMUSSO, Salvador E.. *O misterioso módulo de elasticidade*. 2009. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89-artigos/199-o-misterioso-modulo-de-elasticidade>>.

Acesso em: 9 nov. 2015.

ANEXO**Dimensões dos corpos de prova**

Edificação	Corpo de prova	Altura (mm)	Diâmetro (mm)
1	1	200	100
	2	200	100
	3	200	100
	4	200	100
	5	200	100
	6	200	100
2	1	194,2	100
	2	195,59	100
	3	194,4	100
3	1	196,58	100
	2	197,11	100
	3	197,5	100

Fonte: Autor

Características gerais das amostras de concreto

EDIFICAÇÃO 1	Data de moldagem/concretagem	03/09/2015
	Tipo de cimento	CP IV
	Abatimento (mm)	120
	Classe do concreto ensaiado	C30
	Aditivos	Sim
	Tipo de agregado	Basalto
	Local de aplicação	Lajes e vigas
	Formato dos corpos de prova	Cilíndrico
	Idade do concreto nos ensaios (dias)	28
	Data de ensaio	01/10/2015
	Tipo de capeamento	Retificação
	Classe máquina de ensaios	Classe 1
EDIFICAÇÃO 2	Data de moldagem/concretagem	25/09/2015
	Tipo de cimento	CP IV
	Abatimento (mm)	120
	Classe do concreto ensaiado	C35
	Aditivos	Sim
	Tipo de agregado	Basalto
	Local de aplicação	Pilares
	Formato dos corpos de prova	Cilíndrico
	Idade do concreto nos ensaios (dias)	28
	Data de ensaio	23/10/2015
	Tipo de capeamento	Retificação
	Classe máquina de ensaios	Classe 1
EDIFICAÇÃO 3	Data de moldagem/concretagem	30/09/2015
	Tipo de cimento	CP II
	Abatimento (mm)	120
	Classe do concreto ensaiado	C30
	Aditivos	Sim
	Tipo de agregado	Basalto
	Local de aplicação	Pilares
	Formato dos corpos de prova	Cilíndrico
	Idade do concreto nos ensaios (dias)	28
	Data de ensaio	28/10/2015
	Tipo de capeamento	Retificação
	Classe máquina de ensaios	Classe 1

Fonte: Autor

Módulo de elasticidade experimental para $0,3 f_c$

Edificação	CP	$\Delta\varepsilon$	Eci (MPa)
1	1	0,000267702	36505,30
	2	0,000266363	37041,37
	3	0,000259742	38037,17
	4	0,000255121	38578,97
	5*	0,000290238	34669,11
	6	0,000269521	37871,47
	Média	0,000263690	37606,86
2	1*	0,000320960	41581,64
	2	0,000263112	38365,69
	3	0,000262926	37862,27
	Média	0,000263019	38113,98
3	1	0,000328752	37437,92
	2	0,000319584	37714,52
	3*	0,000143762	48737,13
	Média	0,000324168	37576,22

* Resultados desconsiderados

Fonte: Autor

Módulo de elasticidade experimental para $0,4 f_c$

Edificação	CP	$\Delta\varepsilon$	Eci (MPa)
1	1	0,000385	35590,07
	2	0,000372	35764,23
	3	0,000362	36812,77
	4	0,000358	37089,00
	5*	0,000397	34212,65
	6	0,000377	36550,54
	Média	0,000371	36361,32
2	1	0,000338	41733,84
	2	0,000373	37367,93
	3* **	-	36512,00
	Média	0,000356	39550,88
3	1	0,000462	36960,83
	2	0,000451	37093,16
	3*	0,000208	48064,30
	Média	0,000457	37026,99

* Resultados desconsiderados

** Resultados baseados em linha de tendência

Fonte: Autor

Módulo de elasticidade experimental para $0,45 f_c$

Edificação	CP	$\Delta\varepsilon$	Eci (MPa)
1	1	0,000442	34873,51
	2	0,000436	35652,69
	3	0,000425	36607,74
	4	0,000421	36804,44
	5*	0,000461	34324,79
	6	0,000443	36262,59
	Média	0,000434	36040,19
2	1*	0,000387	41111,24
	2	0,000429	36585,37
	3**	-	36512,00
	Média	-	36548,68
3	1**	-	38050,00
	2**	-	38446,00
	3* **	-	47499,00
	Média	-	38248,00

* Resultados desconsiderados

** Resultados baseados em linha de tendência

Fonte: Autor