

**INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

GERALDO LUÍS BECKER DUARTE

**METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE CORRELAÇÃO ENTRE
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM E A
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO**

FLORIANÓPOLIS, 2021

**INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

GERALDO LUÍS BECKER DUARTE

**METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DECORRELAÇÃO ENTRE
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM E A
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora:
Andrea Murillo Betioli

FLORIANÓPOLIS, 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Duarte, Geraldo Luís

METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DECORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO / Geraldo Luís Duarte; orientação de Andrea Murillo Betioli.
- Florianópolis, SC, 2021.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.

Inclui Referências.

1. Ensaio não destrutivo. 2. Esclerometria. 3. Ultrassom. 4. Resistência à compressão. 5. Concreto. I. Betioli, Andrea Murillo. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. **METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DECORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO.**

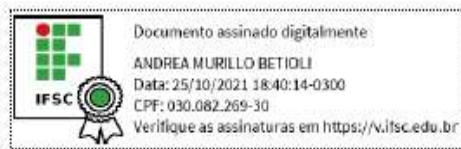
METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO

GERALDO LUÍS BECKER DUARTE

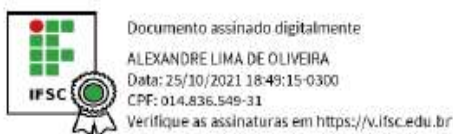
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 25 de outubro de 2021.

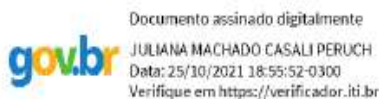
Banca examinadora:



Prof. Andrea Murillo Betioli, Drª
Orientadora



Prof. Alexandre Lima de Oliveira, Dr.



Prof. Juliana Machado Casali Peruch, Drª.

Eng. Guilherme Cardoso Hickel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, principalmente meu pai, minha mãe e meu irmão por todo o apoio e carinho dado durante esses anos de faculdade.

Agradeço a minha turma da faculdade, principalmente a aqueles que participaram de toda, ou quase toda, a jornada da graduação do meu lado: Lucas, Marina, Malu, Augusto e Júlia.

Agradeço ao pessoal do laboratório, que lá em 2018 me fez entrar nesse caminho que sigo até hoje: Alan, Rafa, Leco, Andrea, Luca, Casali, Guilherme, Tiago, Bruno, Augusto, Lucas e tantos outros que por lá passaram.

A Azul Argamassas Concretos e seus colaboradores, e em especial ao seu Marcos por ter aberto as portas da empresa para que eu pudesse estagiar e fazer o meu TCC dentro da empresa.

A Engenho Projetos e Construções Ltda, em especial a engenheira Carol, por me abrir as portas de uma de suas obras para que eu pudesse acompanhar a concretagem e realizar os ensaios necessários para a realização desse TCC.

Ao IFSC por tornar possível essa minha graduação por meio de um ensino público, gratuito e de qualidade.

Agora alguns agradecimentos especiais:

A minha orientadora por dois anos na pesquisa e no TCC, Andrea, obrigado por ter toda a paciência do mundo, pela disponibilidade e empenho nas diversas atividades que realizamos ao longo deste período.

Ao meu parceiro de pesquisa e de estágio Bruno, obrigado por todas as dicas, risadas, trocas de ideias e parceria durante esses dois anos.

Ao Guilherme por aceitar fazer parte da banca, pela oportunidade e convite para entrar na Azul, por todo os ensinamentos, companheirismo, madrugadas na concretagem da ponte, parceria e amizade durante todo esse período.

Ao Leco por aceitar participar da banca e por lá no começo da graduação, pela paixão que tem durante as aulas, já começar a me puxar para o concreto

A Casali pelo apoio dado na execução da metodologia, ajudando a realizar os ensaios e sempre muito disposta em ajudar quando algum equipamento não estava querendo funcionar direito.

Ao Rafa por todos os ensinamentos e ao apoio dado a mim em tudo.

RESUMO

A falta de confiabilidade nos resultados de resistência à compressão encontrados através da moldagem de testemunhos e ruptura realmente representa a real resistência do concreto executado na estrutura é algo muito comum. Nos casos de dúvidas sobre a real resistência do concreto, um dos métodos mais utilizados é a extração de testemunhos para posterior ruptura. Uma opção mais econômica e que não gera danos à estrutura é a execução de ensaios não destrutivos (END) nos elementos estruturais. Dentre eles, os mais utilizados são o da esclerometria que, através do princípio do rebote, avalia a dureza superficial do concreto e o ultrassom, que calcula a velocidade de propagação da onda ultrassônica no interior do concreto. Existem diversos trabalhos que buscam encontrar curvas de correlação entre os END e a resistência à compressão do concreto, realizando ambos os ensaios nos mesmos corpos de prova. Muitos autores ressaltam a importância ou já tentaram aplicar essas curvas de correlação diretamente em obras, porém, quando se compara os resultados de resistência estimados pela curva de correlação com os resultados obtidos pelos corpos de prova, os erros encontrados são significativos. Através da elaboração de curvas de correlação executando os ensaios não destrutivos tanto nos corpos de prova submetidos a diferentes tipos de cura como em prismas que simulam a real aplicação do concreto em obras, o presente trabalho tem por objetivo propor e validar uma metodologia para a elaboração de curvas de correlação determinadas em laboratório capazes de aumentar a confiabilidade dos resultados apresentados pelo controle tecnológico. As curvas de correlação que apresentaram os melhores resultados na aplicação foram as geradas através dos prismas, com coeficientes de correlação (R^2) superiores à 0,9 e com erros de estimativa de 14% para a esclerometria e de 15% para o ultrassom, erros estes dentro dos valores de variação encontrados na literatura para esses ensaios.

Palavras-chave: ensaio não destrutivo, esclerometria, ultrassom, resistência à compressão e concreto.

ABSTRACT

The lack of results in the results obtained by the technological control through the molding of testimonies, which really represent the final concrete formed in the structure, is something very common. In cases of doubt about the real strength of concrete, one of the most used methods is the extraction of cores for subsequent rupture. A more economical option that does not cause damage to a structure is to perform non-destructive testing (NDT) on contextual elements. Among them, the most used are rebound number, which, through the principle of rebound, assesses the surface hardness of the concrete and ultrasonic pulse velocity, which calculates the propagation velocity of the ultrasonic wave inside the concrete. There are several studies that seek to find correlation curves between the NDT and the compressive strength of concrete, performing both tests on the same specimens. Many authors emphasize the importance or have already tried to apply these correlation curves directly in constructions, however, when comparing the resistance results estimated by the correlation curve with the results obtained by the specimens, the errors found are found. Through the definition of non-destructive test results curves both on specimens subjected to different types of cure conditions and on prisms that simulate a real application of concrete in constructions, the present work aims to propose and validate a methodology for the elaboration of laboratory correlation curves capable of increasing the confidence of the results obtained by technological control. The best correlation curves that the application results were obtained as evidence of the prisms, with correlation coefficients (R^2) greater than 0.9 and with estimation errors of 14% for rebound number and 15% for ultrasonic pulse velocity. within the variation values found in the literature for the tests.

Keywords: non-destructive testing, rebound number, ultrasonic pulse velocity, compressive strength and concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema ensaio de esclerometria	18
Figura 2.2 - Curva de correlação IE x f_c do fabricante	19
Figura 2.3 –Curvas de correção IE e resistência à compressão em diferentes superfícies	21
Figura 2.4 – Diferença dos IE em elementos estruturais e em corpos de prova cúbicos	22
Figura 2.5 – Esquema Aparelho de ultrassom	23
Figura 2.6– Interferência do agregado na velocidade do pulso ultrassônico.....	25
Figura 3.1 – Granulometria a laser do cimento Portland CP II - F - 40.....	28
Figura 3.2 – Granulometria a laser da cinza volante	28
Figura 3.3 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.....	30
Figura 3.4 – Prismas moldados em formas de madeira	33
Figura 3.5 – Aplicação do ultrassom nos prismas e em corpos de prova cilíndricos no modo direto	34
Figura 3.6 – Esquema realização do ensaio de índice de esclerometria em corpo de prova (a) e no prisma (b).....	35
Figura 3.7 – Identificação dos pontos onde foram realizados o ensaio de esclerometria no corpo de prova e no prisma.....	35
Figura 3.8 – Pontos de execução do ensaio de esclerometria	37
Figura 4.1 – Correlação esclerometria e resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cura seca e úmida e dos prismas.....	40
Figura 4.2 – Correlação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica e a resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cura seca e úmida e dos prismas.....	41
Figura 4.3 – Metodologia proposta para estimativa de resistência à compressão em obra através de curvas de correlação com ensaios não destrutivos (esclerometria e ultrassom).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classes de abatimento do concreto	12
Tabela 2.2 - Classes de resistência à compressão axial do concreto	13
Tabela 2.3 – Resultado de resistência à compressão aos 28 dias em 7 laboratórios distintos do sul do Brasil.....	15
Tabela 2.4 – Análise de não conformidades em concretos brasileiros.....	16
Tabela 2.5 – Classificação de qualidade do concreto conforme velocidade do pulso ultrassônico	24
Tabela 3.1 – Análise química dos aglomerantes.....	29
Tabela 3.2 – Caracterização dos agregados miúdos	29
Tabela 3.3 – Caracterização dos agregados graúdos.....	31
Tabela 3.4 - Equações de correlação.....	36
Tabela 4.1 – Resultados das propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos utilizados na Etapa 1	39
Tabela 4.2 – Valores de abatimento e das resistências à compressão dos concretos avaliadas pelo laboratório e pelo controle tecnológico	42
Tabela 4.3 - Resistência à compressão, índice esclerométrico e velocidade de propagação do pulso ultrassônico e resistência estimada dos corpos de prova moldados em obra.....	43
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de índice esclerométrico (IE)e velocidade de pulso ultrassônico (V) nos pilares.....	44
Tabela 4.5 – Estimativa de resistência à compressão do concreto na obra através das curvas de correlação entre os ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto em laboratório	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo(s) de prova.
END	Ensaaios não destrutivos
f_c	Resistência à compressão do concreto.
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ck, est}$	resistência característica à compressão do concreto estimada
IE	Índice esclerométrico
R^2	Coefficiente de determinação
V	Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Justificativa	9
1.2	Objetivos	9
1.2.1	Objetivo Geral.....	9
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Limitações da pesquisa	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Concreto.....	11
2.1.1	Propriedades do concreto no estado fresco	11
2.1.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	12
2.2	Controle tecnológico de concretos usinados	14
2.3	Ensaio não destrutivo	16
2.4	ESCLEROMETRIA (DUREZA SUPERFICIAL).....	17
2.4.1	Superfície de ensaio	19
2.4.2	Tamanho e rigidez	20
2.4.3	Idade das Amostras	20
2.4.4	Umidade superficial	20
2.4.5	Tipo de agregado e de cimento	20
2.4.6	Carbonatação da Superfície	20
2.4.7	Tipo de Molde	20
2.5	ULTRASSOM (VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO)	22
2.5.1	Tipo e quantidade de agregado	24
2.5.2	Tipo de cimento	25
2.5.3	Presença de armadura	25
2.5.4	Contato do transdutor	25

2.5.5	Umidade	26
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Materiais	27
3.1.1	Caracterização dos materiais	27
3.1.2	Propriedades avaliadas no concreto.....	31
3.2	Etapa1: Laboratório.....	32
3.2.1	Moldagem dos corpos de prova	32
3.2.2	Moldagem dos prismas.....	33
3.2.3	Cura.....	33
3.2.4	Propriedades avaliadas	33
3.3	Elaboração das curvas de correlação	36
3.4	ETAPA 2: Obra.....	37
4	RESULTADOS	39
4.1	ETAPA 1: laboratório.....	39
4.2	ETAPA 2: em obra	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, no entanto, Santiago e Beck (2017) em sua pesquisa mostraram que uma significativa parcela dos concretos produzidos no Brasil não atinge a resistência característica (f_{ck}) especificada em projeto e, portanto, são considerados não conformes. Além disso, Magalhães et al. (2013) mostraram a grande variabilidade entre os resultados de resistência à compressão apresentados por diferentes empresas de controle tecnológico de concreto no Brasil, gerando dúvidas sobre a confiabilidade dos resultados apresentados e, com isso, desconfiança sobre a segurança estrutural das edificações.

Joffily (2010) cita que a maneira como é avaliada a conformidade no estado endurecido por meio de ruptura à compressão de corpos de prova, pode não representar a realidade, pois as condições de lançamento, cura e adensamento do concreto em obra são muitas vezes diferentes das condições de moldagem dos corpos de prova. Com isso, um concreto que atingiria a resistência especificada em projeto nos corpos de prova, por uma execução equivocada da concretagem dos elementos estruturais, por exemplo, pode vir a se tornar um problema estrutural.

Nestes ou em outros casos de dúvida sobre a real resistência do concreto, a extração de testemunhos na própria estrutura é o método mais empregado para avaliação da resistência à compressão (PALACIOS, 2012). Para Machado (2005), tal prática tem a desvantagem de ser onerosa e apresentar diversas restrições sobre a localização em que as extrações possam ser realizadas. Nestes casos a utilização de ensaios não destrutivos (END) surge como uma opção mais econômica, rápida e com menos restrições para execução.

Para que os métodos de ensaio não destrutivos realizados na obra sejam utilizados para avaliar indiretamente a resistência do concreto, devem-se obter curvas de correlação entre a resistência e os ensaios não destrutivos com os mesmos materiais utilizados na obra (CÂMARA, 2006).

Segundo Mohamad et. al. (2015), entre os ensaios não destrutivos mais utilizados estão o esclerômetro de reflexão (determina a dureza superficial) e o ensaio de ultrassom (determina a velocidade de propagação do pulso ultrassônico no material).

1.1 Justificativa

Diversos autores já buscaram correlações entre diversos ensaios não destrutivos (END) e a resistência à compressão do concreto com o objetivo de compreender o comportamento dos ensaios a medida em que se altera composição ou as propriedades do concreto, dentre eles no Brasil se destacam: Evangelista (2002), Machado (2005) e Câmara (2006). Estes autores utilizaram a metodologia de elaboração de curvas de correlação baseada em ensaios em corpos de prova moldados em laboratório.

Apenas Câmara (2006) tentou validar as curvas de correlação obtidas em laboratório em obras. Porém, o autor encontrou para a esclerometria diferenças entre a resistência estimada e a resistência obtida pelo corpo de prova aos 28 dias de 32%, invalidando o uso da curva de correlação para a estimativa da resistência. O autor cita que um dos motivos para tal erro é o tipo de material utilizado como forma, sendo de madeira nos pilares e de metal nos corpos de prova, e recomendou o uso de formas de madeira para os corpos de prova, visando assim, encontrar curvas de correlação que realmente possam ser aplicadas em obras. Segundo o autor, as formas de madeira absorveram parte da água da camada superficial do concreto e deixaram a mesma com uma maior dureza superficial, aumentando o índice esclerométrico e a resistência estimada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para elaboração de curvas de correlação entre ensaios não destrutivos (esclerometria e ultrassom) e a resistência à compressão do concreto, de forma que as mesmas possam ser aplicadas em obras para avaliar a confiabilidade dos resultados apresentados pelo controle tecnológico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar os resultados de compressão do concreto analisados no laboratório da concreteira com os analisados no controle tecnológico;
- Avaliar a influência do tipo de forma e cura nos resultados dos ensaios não destrutivos;

- Avaliar a correlação entre o índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto moldado em diferentes tipos de forma e tipos de cura;
- Avaliar a correlação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica com a resistência à compressão do concreto moldado em diferentes tipos de forma e tipos de cura;
- Validar a metodologia adotada para aferir a confiabilidade dos resultados apresentados no controle tecnológico em uma obra;
- Elaborar curvas de correlação entre os ensaios não destrutivos com a resistência à compressão para concretos produzidos por uma concreteira na região da Grande Florianópolis - Santa Catarina.

1.3 Limitações da pesquisa

As limitações desta pesquisa foram as seguintes:

- Foram avaliados concretos apenas da classe de abatimento S100 com classes de resistência: C25, C30 e C40;
- Todos os concretos foram produzidos com os mesmos materiais;
- Não foram realizadas extrações de testemunhos ;
- Não foi utilizado vibrador para a moldagem dos prismas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão tratados os temas sobre tecnologia do concreto, propriedades no estado fresco e endurecido enfatizando os ensaios não destrutivos e sua correlação com a resistência à compressão.

2.1 Concreto

Concreto é um compósito formado pela aglutinação de partículas ou fragmentos de agregado em um meio aglomerante. O concreto é composto por: Agregado graúdo (partículas maiores de 4,75mm), agregado miúdo (partículas menores de 4,75 e maiores de 0,075mm), cimento, água e em alguns casos aditivos/adições, usados frequentemente nos concretos atuais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A proporção de cada um dos materiais utilizados na mistura é chamada de traço, para determinar esse traço é recomendável a execução de um estudo de dosagem. Para Mehta e Monteiro (2008) o objetivo dessa dosagem é obter um produto que atenda aos pré-requisitos determinados e outros fatores. Esses pré-requisitos são comumente chamados de propriedades que se dividem no estado fresco e no estado endurecido.

2.1.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Para Neville (2016), a principal característica do concreto, a resistência à compressão, é diretamente afetada pelo seu adensamento. Dessa forma, as propriedades no estado fresco são de suma importância para que todos os processos previstos (transporte, lançamento, adensamento e acabamento) possam ser realizados com sucesso e sem que haja a segregação do concreto.

Dentre as propriedades do estado fresco do concreto, as principais em questão de controle de qualidade são a trabalhabilidade, consistência, massa específica e teor de ar incorporado.

a) Trabalhabilidade e consistência

Trabalhabilidade pode ser definida como a facilidade com que o concreto pode ser misturado e movimentado ainda no estado fresco e a consistência como uma característica ligada à capacidade de fluir, sendo a consistência o contrário da fluidez (ASTM C125-03, 2003).

Existem diversos ensaios que avaliam a trabalhabilidade e consistência do concreto. No Brasil o ensaio mais utilizado para esta avaliação é o abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), normatizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

A NBR 8953 (ABNT, 2015) determina a classificação da consistência do concreto em 5 classes, apresentadas na Tabela 2.1 juntamente com as aplicações típicas previstas.

Tabela 2.1 – Classes de abatimento do concreto

CLASSE	ABATIMENTO (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais com lançamento convencional
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeável
S220	$A \geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015)

A NBR 8953 (ABNT, 2015) ainda prevê que outras faixas de abatimento podem ser estipuladas em comum acordo entre as partes.

b) Massa específica e teor de ar incorporado

A NBR9833 (ABNT, 2008) conceitua massa específica como a massa de uma unidade de volume do concreto fresco adensado pelo método gravimétrico e o teor de ar como o volume de ar aprisionado ou incorporado no concreto no estado fresco expresso em porcentagem.

2.1.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

No estado endurecido a principal propriedade mecânica do concreto é a resistência à compressão, mas também são medidas resistência à tração, módulo de

elasticidade, e como propriedades físicas a massa específica aparente, absorção de água e índice de vazios.

a) Resistência à compressão axial

A resistência do material é a capacidade de carga que o material consegue suportar até sua ruptura ou deformação excessiva. Nesse sentido, os ensaios mais importantes em resistência dos materiais são os de compressão e tração (HIBBELER, 2004). No projeto de estruturas de concreto NBR 6118 (ABNT, 2014), na maioria dos casos só é levado em consideração para fins de dimensionamento a resistência à compressão do concreto, visto que por ser muito baixa e por questões de segurança sua resistência à tração é desprezada.

A resistência à compressão do concreto (f_c) é classificada pela NBR 8953 (ABNT, 2015) em diversas classes, determinadas de acordo com a resistência característica do concreto (f_{ck}) em megapascal (MPa). As classes de resistência de concretos estruturais são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classes de resistência à compressão axial do concreto

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015)

O ensaio para determinação da resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos envolve basicamente três normas: a NBR 12655 (ABNT, 2015), que determina como devem ser formados os lotes e as amostras, a NBR 5738 (ABNT, 2015), que estabelece como devem ser realizadas as moldagens dos corpos de prova e a NBR 5739 (ABNT, 2018), que estabelece como deve ser realizado o ensaio de compressão axial.

b) Massa específica

A NBR 9778 (ABNT, 2009) define a massa específica seca do concreto no estado endurecido como a razão entre a massa do material seco e o seu volume, incluindo os poros permeáveis e os impermeáveis. A classificação da massa específica do concreto se dá pela NBR 8953 (ABNT, 2015), onde o concreto é dividido em 3 grupos:

- Concreto normal (C): massa específica seca entre 2000 kg/m³ e 2 800 kg/m³;
- Concreto leve (CL): massa específica seca inferior a 2000 kg/m³;
- Concreto pesado ou denso (CD): massa específica seca superior a 2 800 kg/m³.

2.2 Controle tecnológico de concretos usinados

A NBR 12655 (ABNT, 2015) trata sobre os ensaios no estado fresco e no estado endurecido de controle de recebimento e aceitação de concreto usinado na obra. No estado fresco, para concreto convencional, a norma prevê que deve ser realizado apenas o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump test*) e para o estado endurecido apenas o ensaio de resistência à compressão axial.

O concreto é dito conforme quando o valor estimado de resistência característica ($f_{ck, est}$) for igual ou superior à resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto estrutural.

Souza (2006) avaliou alguns fatores que podem afetar a não conformidade de resistência do concreto, e os que obtiveram diferenças relevantes foram: tipo de cura; tipo de molde; condição de topo e moldador de corpos de prova.

Magalhães et al. (2013) avaliaram sete laboratórios de controle tecnológico do sul do Brasil nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Um total de 126 corpos de prova foi dividido em três grupos, entre eles testemunhos moldados para ruptura aos 28 dias de idade. As resistências à compressão deste grupo obtidas pelos sete laboratórios são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resultado de resistência à compressão aos 28 dias em 7 laboratórios distintos do sul do Brasil

Laboratório	I	II	III	IV	V	VI	VII
CP 1	36,7	46,5	42,7	46,8	49,4	42,5	44,4
CP 2	35,3	51,3	45,1	47,8	47,4	41,3	46,4
CP 3	38,5	49,9	46,9	49,3	50,5	48,0	45,0
CP 4	34,3	50,3	43,5	47,3	50,2	48,8	42,2
CP 5	34,5	52,6	47,6	48,2	47,6	31,0 ¹	43,0
CP 6	39,8	48,2	42,8	46,3	47,6	43,4	45,7
Média	36,5	49,8	44,8	47,6	48,8	44,8	44,5
Desvio Padrão	1,8	1,6	1,8	0,8	1,3	2,9	1,3
$f_{ck, estimado}^2$	33,5	47,1	41,8	46,3	46,7	40,0	42,4
$f_{ck, estimado}^3$	29,9	43,2	38,2	41,0	42,2	38,2	37,9
Topo ⁴	Fresado	Neoprene	Enxofre	Fresado	Fresado	Fresado	Neoprene

¹Resultado descartado da amostra analisada

²Resistência estimada segundo o critério 6.2.3.1.b da NBR 12655 (2006) e S_d de ensaio

³Resistência estimada segundo o critério 6.2.3.1.b da NBR 12655 (2006) e $S_d = 4,0$ Mpa (condição A)

⁴Tipo de acabamento do corpo de prova para rompimento

Fonte: Magalhães et al. (2013)

Analisando os dados é possível verificar a influenciados fatores externos ao concreto, ou seja, o processo que ele passa entre a moldagem e a entrega do resultado ao cliente (transporte dos corpos de prova; armazenamento; preparação do topo; execução do ensaio) afeta também a conformidade ou não conformidade do concreto. No Laboratório I foi atingida uma resistência média de 36,5 MPa e no Laboratório II de 49,8 MPa, ambos aos 28 dias de idade. Vale ressaltar que nesse estudo ainda não foram avaliadas as variações de moldagem e tipos de forma, fatores estes que, como tratado por Souza (2006), também afetam nos resultados.

Santiago e Beck (2017) analisaram as não conformidades dos concretos produzidos por concreteiras no Brasil. Os valores encontrados na região sul e sudeste apresentam uma menor variabilidade quando comparada às outras regiões, porém mesmo assim o número de não conformidade tende a ser superior a 5% em todas as regiões do país. Os autores ainda compararam os dados de 2017 com os dados encontrados por Santiago e Beck (2011) cinco anos antes. Na comparação houve uma expressiva redução das não conformidades como apresentado na Tabela 2.4, o que mostra uma evolução nos últimos anos no setor de usinas de concreto no país.

Tabela 2.4 – Análise de não conformidades em concretos brasileiros

Classe	Ano	$f_{ck\ est}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	σ (MPa)	Cv(%)	% não conformidade
C20	2016	19,2	26,2	4,3	0,164	8,3
	2011	23,0	23,7	1,8	0,071	1,0
C30	2016	29,2	37,3	4,9	0,131	5,7
	2011	27,9	28,0	3,6	0,105	9,0
C40	2016	38,5	44,7	3,8	0,084	6,9
	2011	35,9	33,6	3,6	0,090	30,0
C50	2016	48,0	56,1	4,9	0,088	4,5
	2011	42,4	41,1	2,9	0,062	84,0

Fonte: Santiago e Beck (2017)

Tendo em vista os diversos fatores citados anteriormente que podem afetar a resistência estimada do concreto, existe a necessidade muitas vezes da realização de uma contraprova, por exemplo, quando no laboratório da concreteira a resistência característica é alcançada, mas no laboratório do controle tecnológico contratado não. Neste e em outros casos, uma das maneiras de se estimar a resistência real do concreto já na estrutura é através de ensaios não destrutivos.

2.3 Ensaios não destrutivos

Ensaios não destrutivos são ensaios que possibilitam a avaliação de concretos em estruturas existentes sem causar dano à estrutura, desta forma viabilizando uma possível repetição dos ensaios ao longo do tempo (EVANGELISTA, 2002).

É importante ressaltar que os ensaios não destrutivos podem avaliar a resistência à compressão ou outras propriedades do concreto, mas não podem medir tais propriedades. Sendo necessário estabelecer uma relação experimental, no caso da resistência, entre a propriedade medida por determinado método não destrutivo e a resistência à compressão do concreto (NEVILLE, 2016).

Segundo Carino (1994) citado por Araújo (2018), os ensaios não destrutivos podem ser divididos em 2 grupos:

- Para avaliação da resistência do concreto: esclerometria, ultrassom, ensaio de penetração de pino, ensaio de arrancamento, ensaio de

fratura interna, ensaio de torque Stoll, ensaio de aderência, método de maturidade e métodos combinados.

- Para avaliação de estruturas: inspeção visual, auscultação, ecoimpacto, termografia infravermelha, radar de sub superfície, métodos nucleares, métodos magnéticos e elétricos, emissão acústica, fibras ópticas e penetrabilidade.

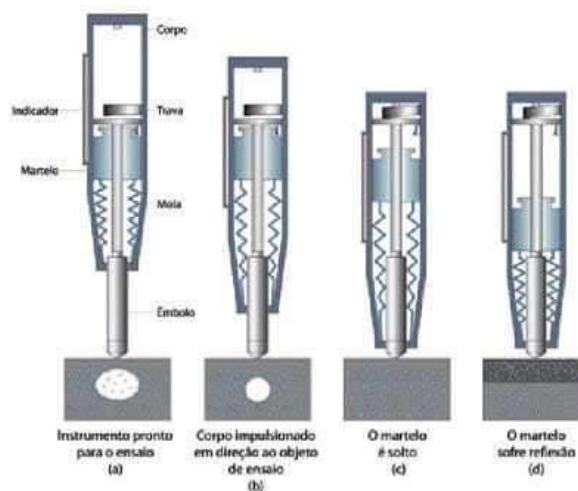
Os ensaios mais utilizados para obtenção indireta das propriedades são a esclerometria e o ultrassom (ALMEIDA JÚNIOR, 2019), sendo estes ensaios utilizados neste trabalho, e detalhados a seguir.

2.4 ESCLEROMETRIA (DUREZA SUPERFICIAL)

Este ensaio, que mede a dureza superficial, é um dos métodos não destrutivos mais antigos. Foi concebido em 1948 por Ernst Schmidt e por isso o equipamento até hoje também é chamado de Esclerômetro Schimidt (NEVILLE, 2016).

O método é muito difundido por ser rápido e barato de ser realizado. A Figura 2.1 esquematiza sua execução em 4 etapas, sendo elas: (a) Colocar o êmbolo em contato com a superfície de concreto com a mola encolhida; (b) Pressionar o instrumento contra a superfície de concreto, estendendo a mola; (c) No momento em que a mola é totalmente estendida ela é destravada e o martelo se desloca em direção ao embolo; (d) O martelo impacta no embolo e a mola sofre um recuo que é registrado pelo indicador. O valor obtido no indicador é o índice esclerométrico ou índice de reflexão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 2.1 – Esquema ensaio de esclerometria

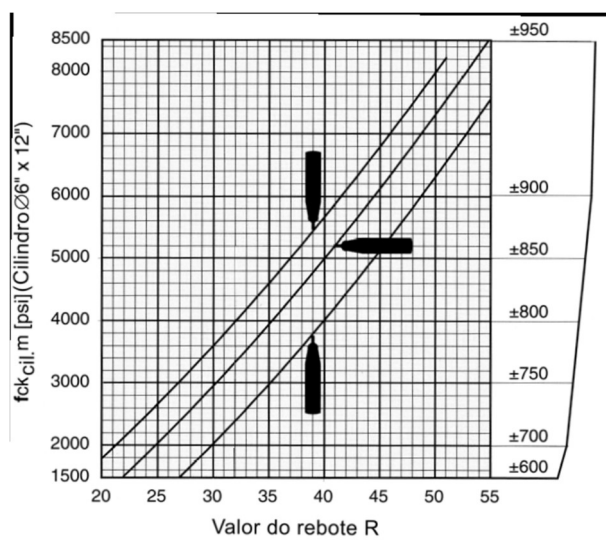


Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

É de amplo conhecimento e previsto NBR 7584 (ABNT, 2012) que para a relação direta do ensaio com a resistência à compressão é necessário ter uma relação confiável. Esta relação deve ser elaborada com os mesmos materiais utilizados no concreto e levando em consideração outros fatores que podem interferir nos resultados do ensaio.

O equipamento traz uma curva de correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão do concreto, como citado anteriormente, é recomendado a criação de curvas de correlação através de concretos produzidos com os mesmos materiais, com isso, o uso direto da curva de correlação do equipamento não é recomendada. A Figura 2.2 é a curva de correlação estipulada pelo fabricante do esclerômetro que foi utilizado nessa pesquisa.

Figura 2.2 - Curva de correlação IE x f_c do fabricante



Fonte: Proceq (2017)

É importante ressaltar que o ensaio deve sempre ser realizado ortogonalmente à superfície de concreto e preferencialmente na direção horizontal. Caso essa última não seja possível, é necessário corrigir este índice através de coeficientes que levam em consideração a força da gravidade e são específicos para cada tipo de esclerômetro. Essa necessidade explica as três curvas de correlação apresentadas anteriormente, cada uma para uma posição de execução do ensaio.

Mehta e Monteiro (2008), Malhotra e Carino (2003) e a NBR 7584 (ABNT, 2012) descrevem algumas limitações deste ensaio, que serão apresentadas a seguir

2.4.1 Superfície de ensaio

Mehta e Monteiro (1994) não recomendam a execução do ensaio em locais com o concreto exposto e ressalta que se deve verificar a situação da superfície. Se o impacto do êmbolo atingir um vazio ou um agregado graúdo o ensaio sofrerá variação.

Malhotra e Carino (2003) afirmam que em superfícies ásperas o resultado do ensaio é reduzido, e que lixar a superfície pode ser uma solução para o problema. Segundo a NBR 7584 (ABNT, 2012) o estado da superfície é o que mais acarreta variações no ensaio.

2.4.2 Tamanho e rigidez

Qualquer movimentação na peça, mais provável em peças menores, durante a realização do ensaio causa uma diminuição no índice esclerométrico. A solução utilizada para corpos de prova menores é aplicar uma pré-carga de aproximadamente 15% da carga de ruptura durante o ensaio (MALHOTRA; CARINO, 2003).

2.4.3 Idade das Amostras

Mehta e Monteiro (1994) ressaltam que a relação entre a resistência e o índice esclerométrico não é constante em várias idades. Segundo Malhotra e Carino (2003) para a mesma resistência, concretos com menos idade tendem a ter índices esclerométricos maiores.

2.4.4 Umidade superficial

De acordo com Malhotra e Carino (2003) e com a NBR 7584 (ABNT, 2012), há uma redução no índice esclerométrico de amostras com a superfície saturada.

2.4.5 Tipo de agregado e de cimento

O tipo de agregado e de cimento pode influenciar significativamente o índice esclerométrico (MALHOTRA; CARINO, 2003). Segundo a NBR 7584 (ABNT, 2012) e comprovado por Evangelista (2002) nos casos da comparação com agregados leves essa diferença é ainda mais expressiva.

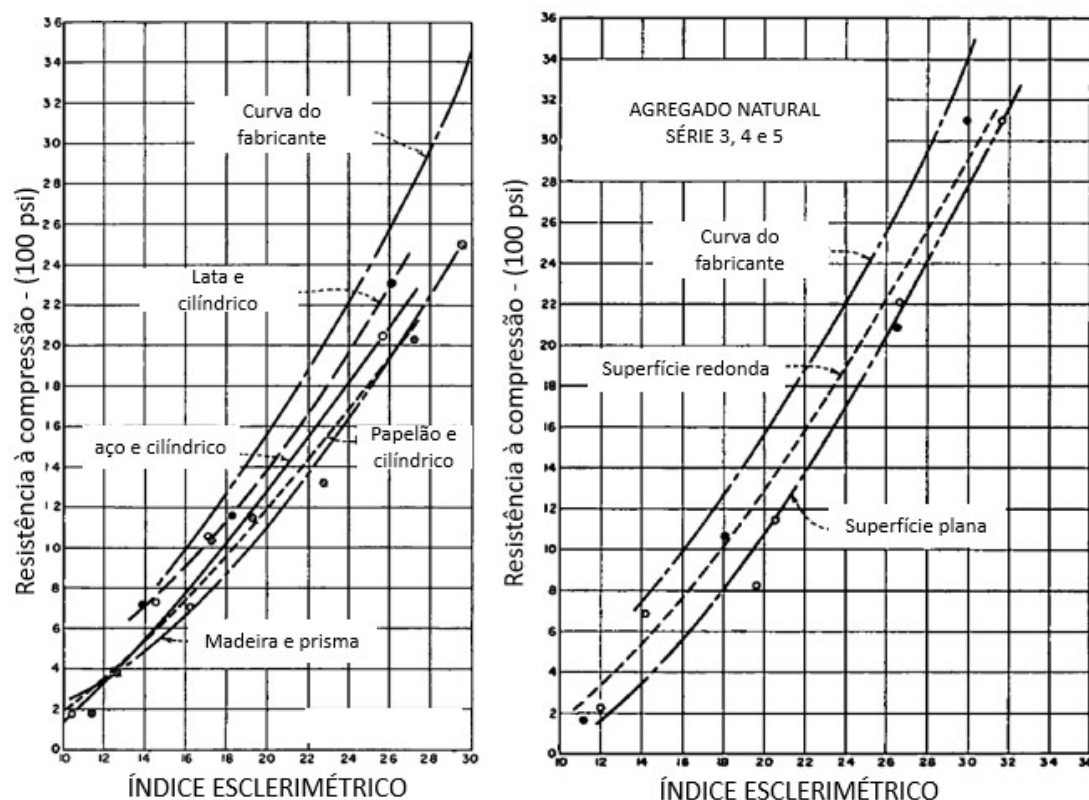
2.4.6 Carbonatação da Superfície

Malhotra e Carino (2003) e Mehta e Monteiro (1994) ressaltam a importância de levar em consideração a carbonatação da superfície. Visto que, não é levado em consideração em idades avançadas e, por consequência, a resistência será superestimada.

2.4.7 Tipo de Molde

De acordo com Malhotra e Carino (2003), o tipo de molde utilizado pode interferir, por exemplo, na absorção de água, o que altera a dureza superficial do concreto. Além disso, a forma da superfície também interfere no resultado do ensaio. O tipo de molde já foi avaliado por Mitchell e Hoagland (1961) como apresentado na Figura 2.3.

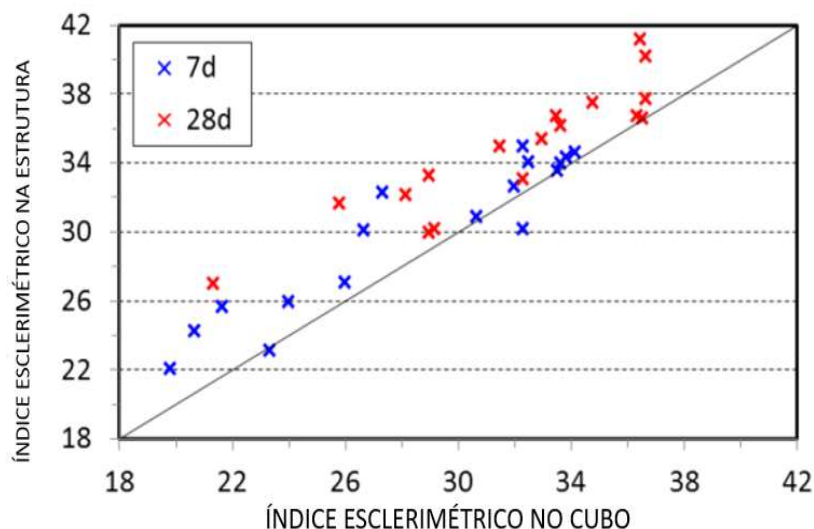
Figura 2.3 –Curvas de correção IE e resistência à compressão em diferentes superfícies



Fonte: Traduzido de Mitchell e Hoagland (1961)

Benyahia et al. (2017) avaliaram a diferença no resultado da esclerometria no elemento estrutural e no corpo de prova, e constataram um IE no cubo 6% e 9% maior do que a do elemento estrutural aos 7 e aos 28 dias de idade do concreto, respectivamente. É válido ressaltar que nesse caso, tanto o elemento estrutural quanto o corpo de prova têm suas superfícies planas, caso fosse circular essa variação poderia ser ainda maior.

Figura 2.4 – Diferença dos IE em elementos estruturais e em corpos de prova cúbicos



Fonte: Traduzido de Benyahia et al. (2017)

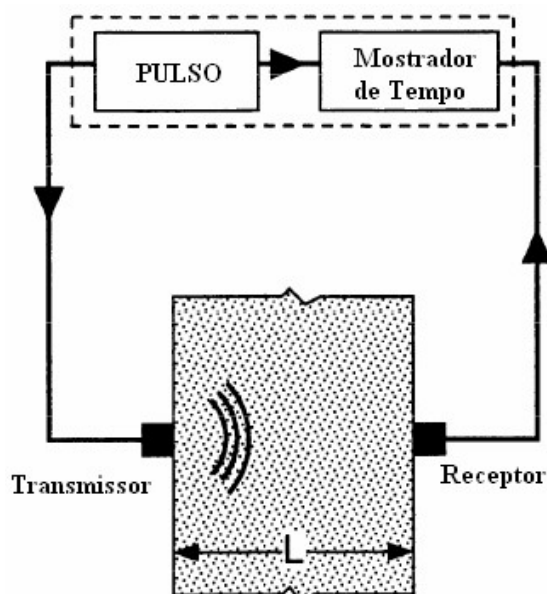
Como se pode observar, diversos fatores alteram a dureza superficial do concreto. Por isso, na prática, as curvas genéricas como as apresentadas na Figura 2.2 não podem ser utilizadas em estruturas reais para estimar a resistência à compressão. É válido ressaltar que nesse caso, tanto o elemento estrutural quanto o corpo de prova têm suas superfícies planas, caso fosse circular essa variação seria diferente como provado por Mitchell e Hoagland (1961).

Visto que no Brasil as curvas de correlação geralmente são realizadas através de ensaio em corpos de prova moldados em formas metálicas cilíndricas (metal e curva), e sua real aplicação em elementos estruturais normalmente moldados em formas de madeira (plana), fica claro o porquê de curvas elaboradas nestas condições distintas pode não ser efetiva para a estimativa da resistência à compressão em obra.

2.5 ULTRASSOM (VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO)

O método consiste em, através de um equipamento com emissor e receptor, medir o tempo necessário para o pulso ultrassônico percorrer um elemento com um comprimento específico (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A Figura 2.5 mostra um esquema do ensaio.

Figura 2.5 – Esquema Aparelho de ultrassom



Fonte: Traduzido de ACI 228.1R (2003) por Câmara (2006)

Seu desenvolvimento começou no Canadá e na Inglaterra praticamente ao mesmo tempo, porém somente a partir da década de 60 o equipamento passou a ter a opção de ser utilizado com baterias e começou a ser mais utilizado em obras, não apenas em laboratórios (MACHADO, 2005).

A norma NBR 8802 (ABNT, 2019) descreve as diretrizes para a aplicação do método de ensaio. O cálculo da velocidade de propagação é dado pela $V = \frac{L}{t}$ (2.1).

$$V = \frac{L}{t} \quad (2.1)$$

Onde,

V é a velocidade de propagação (m/s)

L é a distância os transdutores (m)

t é o tempo decorrido entre a emissão do pulso e a recepção do mesmo (s)

A partir da velocidade de propagação da onda ultrassônica, conforme a Tabela 2.5, pode-se classificar a qualidade e homogeneidade do concreto.

Tabela 2.5 – Classificação de qualidade do concreto conforme velocidade do pulso ultrassônico

Velocidade de propagação linear (m/s)	Qualidade do concreto armado
>4500	Excelente
3600 – 4500	Boa
3000 – 3600	Aceitável
2100 – 3000	Pobre
<2100	Muito Pobre

Fonte: (CÁNOVAS, 1988)

Além de classificar a homogeneidade do concreto e estipular a resistência, Malhotra e Carino (2003) apontam outros usos para este ensaio:

- Estudos sobre a Hidratação de Cimento
- Estudos de Durabilidade de Concreto
- Medição da profundidade de fissura da superfície
- Determinação do Módulo Dinâmico de Elasticidade

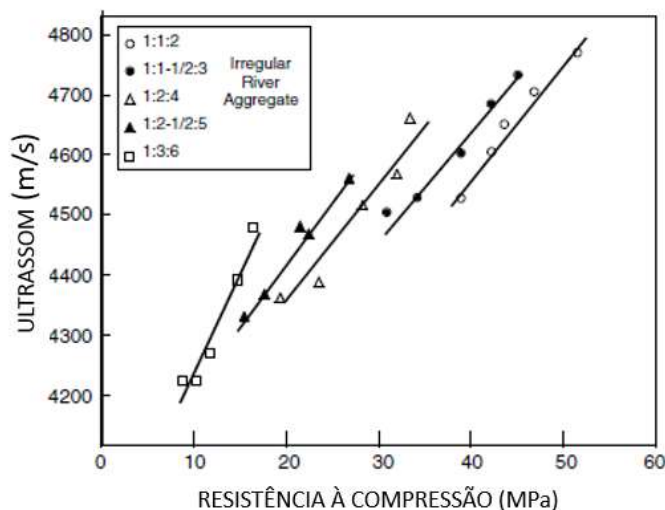
Assim como a esclerometria, o método também apresenta limitações que serão apresentadas a seguir.

2.5.1 Tipo e quantidade de agregado

De acordo com Malhotra e Carino (2003), em geral, a velocidade do pulso ultrassônico na pasta de cimento é menor do que no agregado. Com isso, no caso de concretos com a mesma resistência, os que tenham maior volume de agregado tendem a ter velocidades maiores. A

Figura 2.6 representa essa alteração causada pela quantidade de agregado.

Figura 2.6 – Interferência do agregado na velocidade do pulso ultrassônico



Fonte: traduzido de Malhotra e Carino (2003)

2.5.2 Tipo de cimento

Evangelista (2002) avaliou a interferência causada pelo tipo de cimento no ensaio, a autora encontrou um aumento de cerca de 5% para o cimento CPV-ARI–cimento Portland de alta resistência inicial quando comparado com o CPIII – cimento Portland de alto forno. Essa interferência não muito expressiva também é relatada por Malhotra e Carino (2003).

2.5.3 Presença de armadura

As ondas propagam mais rápido em meios sólidos, com isso a velocidade tende a ser maior nas barras de aço do que no concreto em si. Pelo fato de o pulso ter uma velocidade maior nas barras de aço do que no concreto, na avaliação de concreto armado, a presença de aço pode causar erros na leitura. Bungey (2006) relata que barras transversais ao percurso não causam muita interferência, todavia, barras acima de 6mm paralelas ao percurso geram impactos significativos.

2.5.4 Contato do transdutor

Malhotra e Carino (2003) ressaltam a importância de tomar cuidado com o contato dos transdutores com o concreto. Na maioria dos casos é utilizada a vaselina sólida nesta região.

2.5.5 Umidade

Segundo Naik et al. (2004) e mostrado por Câmara (2006) há um aumento na velocidade do pulso à medida que se aumenta a umidade do concreto.

Como se pode observar, assim como na esclerometria, a propagação do pulso ultrassônico com a resistência também depende de vários fatores, que devem ser levados em consideração na hora de se utilizar tal ensaio para estimar a resistência à compressão do concreto.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para elaboração e validação das curvas de correlação dos ensaios não destrutivos (ultrassom e esclerometria) com a resistência à compressão será apresentada a seguir.

O método utilizado teve como base as pesquisas desenvolvidas por Machado (2005), Câmara (2006) e Benyahia et al. (2017). Este trabalho foi realizado em duas etapas: ensaios em laboratório e ensaios em obra.

Etapa 1 – Laboratório

Esta etapa teve por objetivo a concepção das curvas de correlação entre os ensaios não destrutivos e a resistência à compressão. Para isso, foram produzidos concretos com classe de abatimento S100 e classes de resistência C25, C30 e C40.

Para realização dessa etapa foram moldados para cada classe de resistência quatro corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) em formas metálicas e um prismático (27x30x40cm, aproximadamente) em uma forma de madeira de Pinus. Dos quatro corpos de prova, dois foram submetidos ao processo de cura previsto pela NBR 5738 (ABNT, 2015) e os outros dois foram desmoldados apenas após 28 dias, juntamente com a desforma dos prismas.

Etapa 2 – Obra

Essa etapa teve por objetivo a validação das curvas de correlação geradas na etapa anterior. Para isso, a curva foi testada em uma obra com classe de abatimento S100 e de resistência C35, através da realização dos ensaios não destrutivos nos elementos estruturais na obra e nos corpos de prova moldados com o mesmo concreto utilizado na obra.

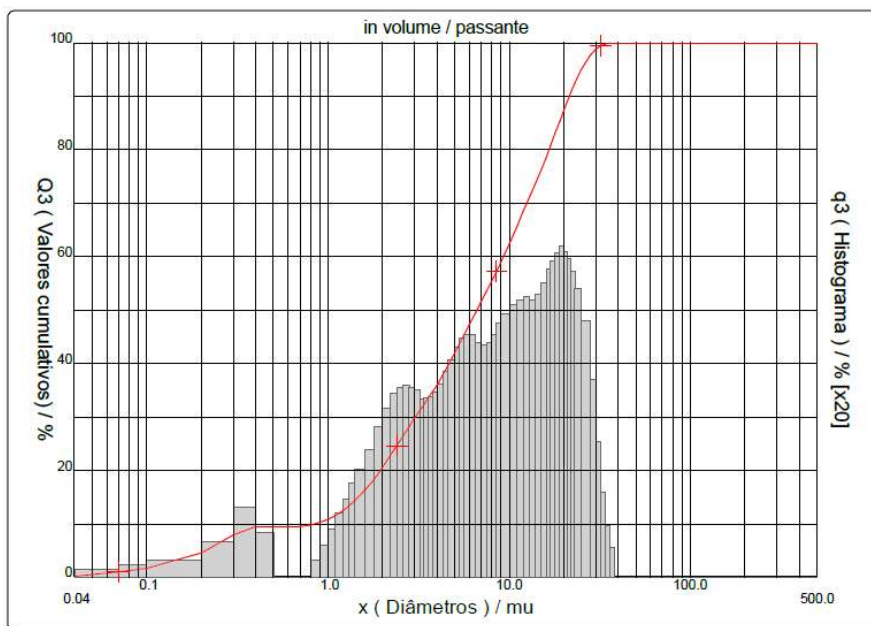
3.1 Materiais

Para realização deste trabalho os concretos foram produzidos com: dois tipos de agregado graúdo com diâmetros máximos de 12,5 e de 25 mm; agregado miúdo natural de britagem granítica; agregado miúdo natural de cava; cimento Portland CPIIF-40, cinza volante, aditivo polifuncional, aditivo superplastificante e água.

3.1.1 Caracterização dos materiais

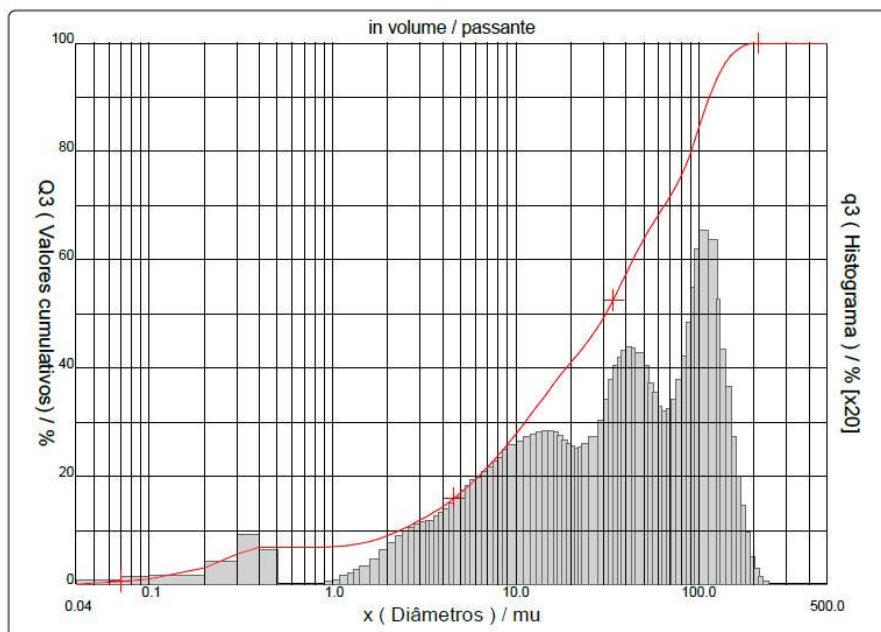
A caracterização do cimento Portland CP II-F-40 e da cinza volante foi realizada por um laboratório externo. A curva granulométrica do cimento encontra-se na Figura 3.1, a curva granulométrica da cinza volante na Figura 3.2. A Tabela 3.1 apresenta a análise química por espectrometria dos dois aglomerantes.

Figura 3.1 – Granulometria a laser do cimento Portland CP II - F - 40



Fonte: autor

Figura 3.2 – Granulometria a laser da cinza volante



Fonte: autor

Tabela 3.1 – Análise química dos aglomerantes

Determinação da Análise Química por Espectrometria de FRX- PR-CR-098 (%)									
Material	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂
Cimento	4,126	62,346	1,865	1,044	3,891	<0,05	<0,05	0,17	18,391
Cinza	21,865	5,429	5,087	2,882	1,194	0,062	0,458	0,089	60,134
Material	TiO ₂	BaO	Co ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	PbO	SrO	ZnO	ZrO ₂ /Hf	Perda ao Fogo
Cimento	0,132	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,21	<0,05	<0,05	5,797
Cinza	0,976	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,054	<0,05	<0,05	1,684

Fonte: autor

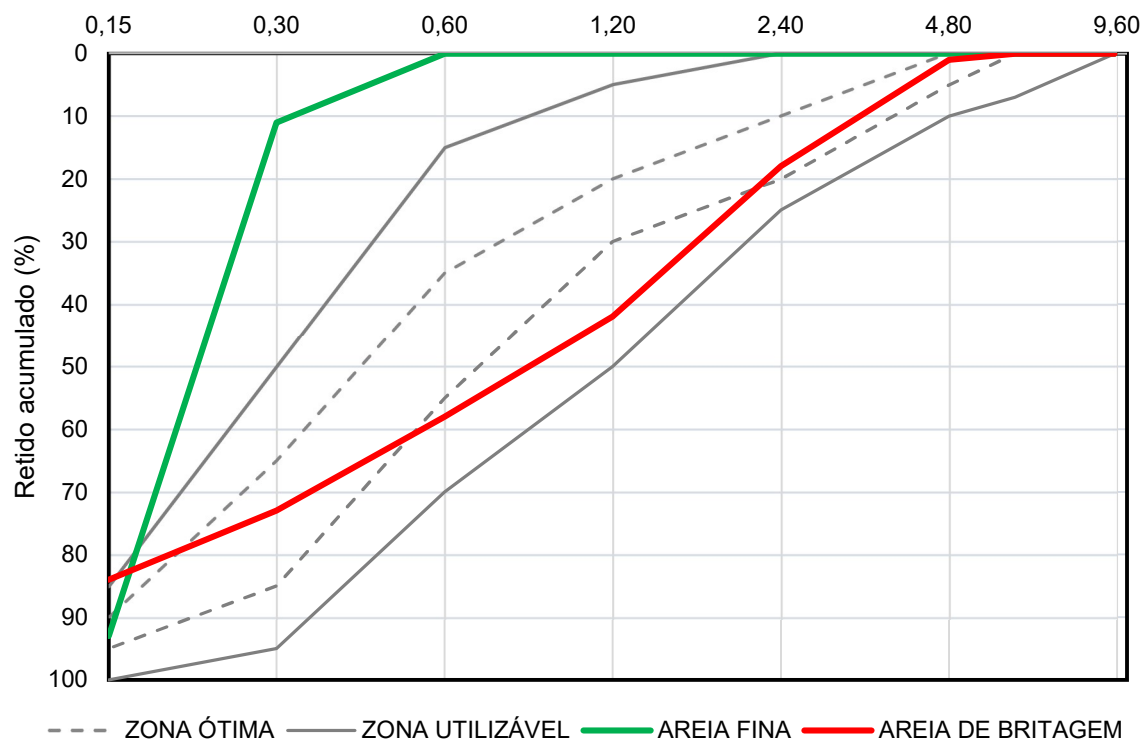
Os agregados miúdos são provenientes da Região da Grande Florianópolis. Os mesmos foram caracterizados pelos ensaios apresentados na Tabela 3.2 e a curva granulometria encontra-se na Figura 3.3.

Tabela 3.2 – Caracterização dos agregados miúdos

Composição granulométrica NBR 7211 (ABNT, 2009)						
Peneira	Areia de Britagem			Areia Fina		
	peso (g)	% retida	% acumulada	peso (g)	% retida	% acumulada
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,8	6,1	1	1	0	0	0
2,4	99,5	17	18	0	0	0
1,2	145,8	24	42	0,2	0	0
0,6	98,1	16	58	0,3	0	0
0,3	88,8	15	73	68,7	11	11
0,15	66,1	11	84	489,1	81	93
FUNDO	98,3	16	100	45	7	100
Material Pulverulento NBR NM 46 (ABNT, 2003)	7,83%			0,75%		
D_{máx} (mm) NBR 7211 (ABNT, 2009)	4,8mm			entre 0,6mm e 0,3mm		
D_{mín} (mm) NBR 7211 (ABNT, 2009)	<0,15mm			<0,15mm		
Módulo de finura NBR 7211 (ABNT, 2009)	2,76			1,04		
Massa específica (g/cm³) NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,65			2,66		

Fonte: autor.

Figura 3.3 – Composição granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: autor.

Os agregados graúdos são provenientes da Região da Grande Florianópolis. Os mesmos foram caracterizados pelos ensaios apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Caracterização dos agregados graúdos

Composição granulométrica NBR 7211 (ABNT, 2009)				
Peneira	BRITA 0		BRITA 1	
	% retida	% acumulada	% retida	% acumulada
19	0	0	1,4	1
12,5	0	0	64,8	66
9,5	21	21	29,0	95
6,3	44,7	66	4,2	99
4,8	18,7	84	0,0	99
2,4	0	84	0,0	99
1,2	0	84	0,0	99
0,6	0	84	0,0	99
0,3	0	84	0,0	99
0,15	0	84	0,0	99
FUNDO	15,6	100	0,6	100
Material Pulverulento NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,50%		0,80%	
D _{máx} (mm) NBR 7211 (ABNT, 2009)	12,5		19	
Módulo de finura NBR 7211 (ABNT, 2009)	5,27		6,93	
Massa unitária (kg/m³) NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1540		1380	
Massa específica (g/cm³) NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,66		2,68	

Fonte: autor.

Foram utilizados dois aditivos químicos, sendo um deles um polifuncional com teor de sólidos na faixa de 0,6-1,1% e massa específica na faixa de 1,17-1,23g/cm³ e um aditivo superplastificante sem o teor de sólidos informado pelo fabricante, porém com a massa específica variando entre 1,10-1,15g/cm³,

3.1.2 Propriedades avaliadas no concreto

3.1.2.1 Trabalhabilidade

Nas duas etapas (laboratório e obra) foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone para caracterização no estado fresco dos concretos. O ensaio foi realizado em todos os concretos avaliados para garantir que os mesmos se encaixassem na faixa de abatimento S100. O ensaio foi executado seguindo as diretrizes da NBR 8953 (ABNT, 2015).

3.1.2.2 Massa específica

Nos concretos produzidos na Etapa 1 (Laboratório) foi realizado o ensaio de massa específica. O ensaio foi executado seguindo as recomendações da NBR 9833 (ABNT, 2008) e foi adensado através do método manual.

3.1.2.3 Resistência à compressão axial

Determinação de resistência à compressão realizados nos corpos de prova foram realizados conforme NBR 5739 (ABNT, 2018) em prensa eletrohidráulica com Indicador Digital da marca Solotest com célula de carga com capacidade de 3000 kg.

3.1.2.4 Dureza superficial

A determinação da dureza superficial foi realizada com um esclerômetro de reflexão da marca Proceq modelo N/NR com energia de percussão de 2,207N.m. O processo para obtenção do índice esclerométrico se deu seguindo as instruções determinadas pela NBR 7584 (ABNT, 2012). Este ensaio foi realizado nos corpos de prova, nos prismas e em pilares na obra.

3.1.2.5 Determinação da velocidade de pulso ultrassônico

O ensaio foi realizado seguindo as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019) de forma direta com o equipamento PUNDIT LAB com transdutores de 54 kHz. Foi utilizada a vaselina sólida para melhorar o contato entre os transdutores. Este ensaio foi realizado nos corpos de prova, nos prismas e em pilares na obra.

3.2 Etapa1: Laboratório

Após a mistura na betoneira de aproximadamente 50 litros de cada concreto (C25, C30 e C40), foram moldados quatro corpos de prova e um prisma para realização dos ensaios com 28 dias de idade.

3.2.1 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em moldes cilíndricos metálicos com dimensão de 10 x 20cm, de forma manual seguindo as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.2.2 Moldagem dos prismas

Cada prisma foi moldado em quatro camadas de mesma espessura, adensadas com a mesma haste da moldagem dos corpos de prova. Após a última camada o acabamento da face superior foi realizado com colher de pedreiro. A Figura 3.4 mostra os prismas na forma e um desmoldado.

Figura 3.4 – Prismas moldados em formas de madeira



Fonte: autor.

3.2.3 Cura

Para cada mistura, dois corpos de prova e o prisma se mantiveram nos moldes até a data dos ensaios (28 dias). Os outros dois corpos de prova foram submetidos ao procedimento padrão de cura previsto pela NBR 5738 (ABNT, 2015), permanecendo as primeiras 24 horas no molde, após esse período foram desmoldados e armazenados em um tanque de água com cal até 48 horas antes da realização dos ensaios. Essa retirada 48 horas antes da ruptura, também foi utilizada por Machado (2005) visto que a NBR NM 78 (ABNT, 1996) recomenda essa prática para a elaboração de curvas de correlação entre resistência e índice esclerométrico.

3.2.4 Propriedades avaliadas

O primeiro ensaio a ser realizado foi o de velocidade de pulso ultrassônico, depois o índice esclerométrico e por último a ruptura por compressão axial dos corpos de prova.

3.2.4.1 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

Nos corpos de prova o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico foi realizado por no mínimo duas leituras de forma direta em cada corpo de prova. Já nos prismas foram realizadas ao menos 3 leituras de forma direta nas duas direções laterais dos mesmos, simulando a medida nas duas direções dos pilares.

O tempo de transmissão adotado para cada corpo de prova e prisma foi a média entre as leituras. Após a verificação das medidas exatas dos prismas e dos corpos de prova foi calculado a velocidade do pulso ultrassônico para cada um deles. A Figura 3.5 mostra a realização do ensaio no prisma e em corpo de prova.

Figura 3.5 – Aplicação do ultrassom nos prismas e em corpos de prova cilíndricos no modo direto

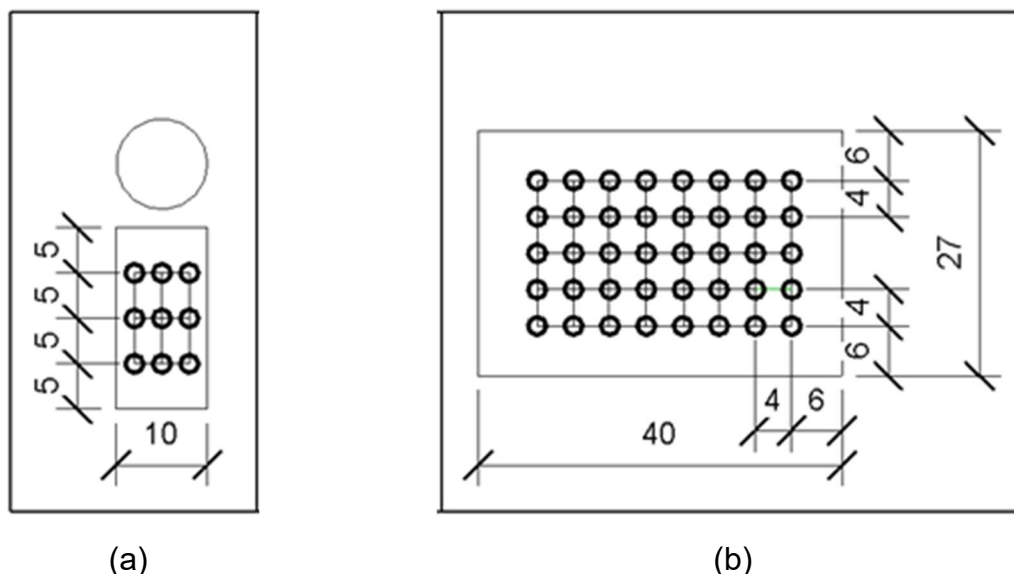


Fonte: autor.

3.2.4.2 Dureza superficial

A dureza superficial foi avaliada pelo índice esclerométrico (IE) através de três medidas em três geratrizes do corpo de prova representadas na Figura 3.6 (a), resultando um total de nove medidas individuais por corpo de prova, já nos prismas, foram realizadas um total de 40 medidas em uma das faces, representadas na Figura 3.6(b).

Figura 3.6 – Esquema realização do ensaio de índice de esclerometria em corpo de prova (a) e no prisma (b)



Fonte: autor.

Nos corpos de prova os ensaios foram executados após uma pré-carga de aproximadamente 15% da carga de ruptura, prática prevista e recomendada pela NBR NM 78 (ABNT, 1996) e por Malhotra e Carino (2003). Já nos prismas, o ensaio foi realizado com a face inversa à que estava sendo ensaiada contra a parede, evitando assim o deslocamento dos mesmos. A Figura 3.7 mostra a posição em que os ensaios foram realizados.

Figura 3.7 – Identificação dos pontos onde foram realizados o ensaio de esclerometria no corpo de prova e no prisma



Fonte: Autor.

Seguindo os critérios da NBR 7584 (ABNT, 2012), para cada elemento avaliado foi realizada a média entre as medidas, após isso, os valores individuais afastados em mais de 10% da média foram desconsiderados, e uma nova média aritmética foi realizada e o processo foi refeito.

3.2.4.3 Resistência à compressão axial

Os corpos de prova foram avaliados quanto à resistência à compressão conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.3 Elaboração das curvas de correlação

Com os resultados dos ensaios em laboratório foram propostas curvas de correlação descritas a seguir, sendo IE o índice esclerométrico, V o valor da velocidade de propagação do pulso ultrassônico e f_c resistência à compressão aos 28 dias.

1. IE Corpo de prova (Cura úmida) versus f_c (Cura úmida)
2. IE Corpo de prova (Cura seca) versus f_c (Cura úmida)
3. IE Prisma (Cura seca) versus f_c (Cura úmida)
4. V Corpo de prova (Cura úmida) versus f_c (Cura úmida)
5. V Corpo de prova (Cura seca) versus f_c (Cura úmida)
6. V Prisma versus f_c (Cura úmida)

O método de escolha da equação para cada curva teve como base o coeficiente estatístico R^2 . Para a determinação da curva de correlação foram avaliadas quatro diferentes equações apresentadas a seguir e foi escolhida aquela com o maior coeficiente de correlação entre as apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Equações de correlação

I	$f_c = a * (x) + b$
II	$f_c = a * (x)^b$
III	$f_c = a * e^{b(x)}$
IV	$f_c = a * \ln[b * (x)]$

a e b – constantes

x – valor do ensaio não destrutivo avaliado

f_c – resistência à compressão (MPa)

Fonte: Autor.

3.4 ETAPA 2: Obra

Nesta etapa foram avaliados cinco caminhões betoneira em uma obra em que a concretagem foi realizada utilizando um concreto com classe de abatimento S100 e de resistência C35.

Durante a concretagem foram moldados dois corpos de prova por caminhão. Após a moldagem permaneceram aproximadamente 24 horas na obra em local plano e coberto e após isso foram levados ainda nos moldes para o laboratório da concreteira. No laboratório, os corpos de prova seguiram os mesmos processos de armazenamento e ensaios que passaram os corpos de prova moldados na Etapa 1, os quais foram submetidos à cura em água e cal.

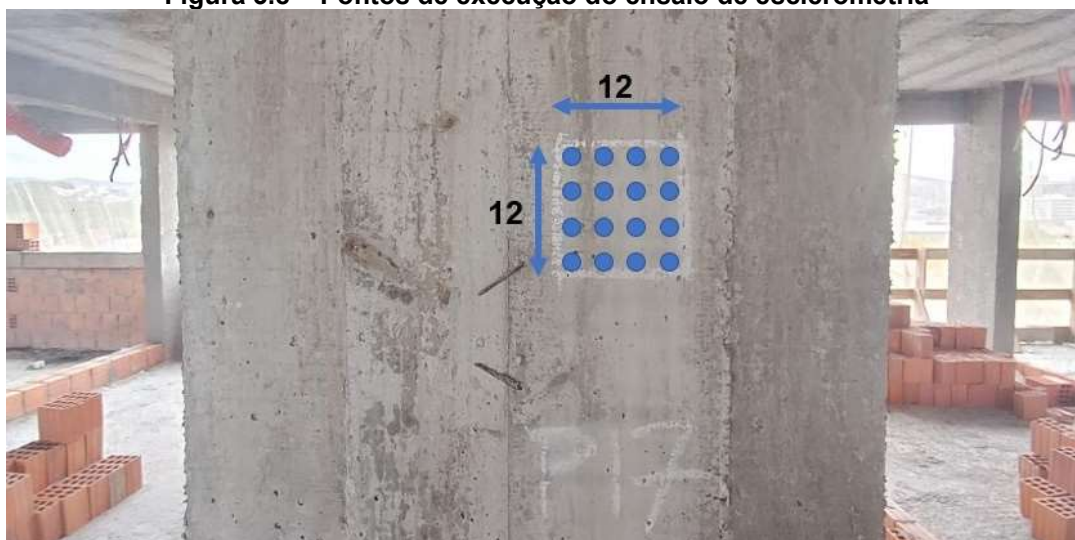
Após 28 dias da concretagem e em posse do mapa de concretagem, os ensaios não destrutivos (esclerometria e ultrassom) foram realizados para cada carga avaliada, em um pilar e nos dois corpos de prova moldados na obra. Após os ensaios não destrutivos, os corpos de prova foram rompidos à compressão axial.

Os resultados de resistência apresentados pela empresa que fez o controle tecnológico também foram solicitados nesta etapa.

3.4.1.1 Dureza superficial

Seguindo as diretrizes da NBR 7584 (ABNT, 2012), para o ensaio de esclerometria (IE) foram realizadas 16 medidas a uma distância de aproximadamente 40 mm uma da outra formando uma “grelha” como a mostrada na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Pontos de execução do ensaio de esclerometria



Fonte: Autor.

3.4.1.2 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

Para o ensaio de ultrassom foram realizadas ao menos três medidas de forma direta em cada pilar avaliado (um para cada carga), sempre alterando o local do ensaio. Não foi utilizado nenhum dispositivo para identificar a presença de barras de aço no local do ensaio, todavia, valores de velocidade muito altos ou muito baixos eram desconsiderados e a leitura era refeita em outro local.

4 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por etapa: Etapa 1 realizada em laboratório e Etapa 2 em obra. Na Anexo 1, encontra-se os resultados individuais de todos os ensaios realizados.

4.1 ETAPA 1: laboratório

Na Tabela 4.1 encontram-se os resultados das propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos utilizados na Etapa 1 (laboratório).

Tabela 4.1 – Resultados das propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos utilizados na Etapa 1

CLASSE DE RESISTÊNCIA	CURA	CORPOS DE PROVA					PRISMA				
		IE	CV (%)	V (m/s)	CV (%)	fc (MPa)	IE	CV (%)	V (m/s)	CV (%)	fc,adt (MPa)**
C25	SECA	19,7	4,15	4662	0,64	24,75	25,6	5,48	4328	0,33	26,3
		18,8	7,06	4665	0,95	24,99					
C30		20,9	5,83	4796	5,02	32,50	28,0	5,16	4414	0,34	33,2
		20,0	5,00	4758	1,19	31,74					
C40		25,5	5,41	4818	2,27	40,93	31,9	4,36	4598	1,20	43,8
		24,5	5,77	4832	0,29	41,03					
C25	ÚMIDA	20,0	0,00	4921	0,52	26,28	NÃO REALIZADO				
		20,3	2,54	4949	1,17	26,24					
C30		21,8	1,87	4825	1,33	32,66					
		21,3	5,68	4851	0,64	33,24					
C40		25,7	2,01	5126	2,96	43,83					
		24,5	7,82	5003	0,58	42,00					

CLASSE DE RESISTÊNCIA	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)	AR INCORPORADO (%)	SLUMP (mm)
C25	2,28	4,01	160
C30	2,28	4,53	155
C40	2,29	4,75	155

*CV – coeficiente de variação

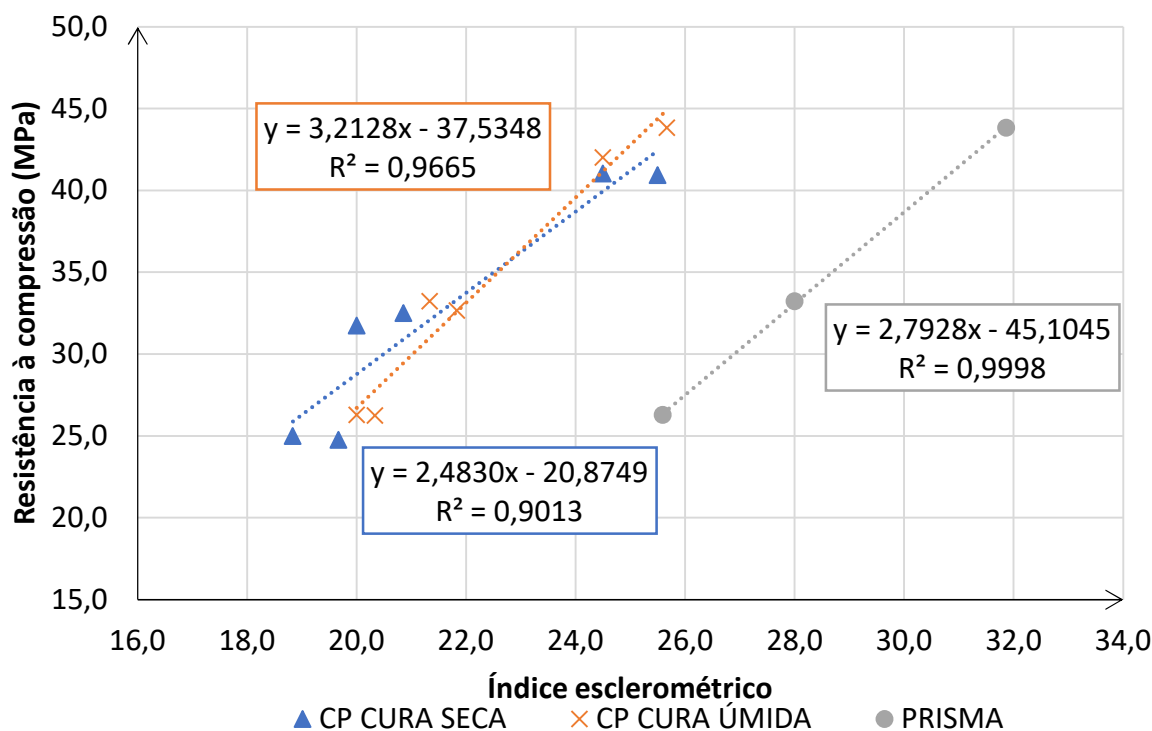
**fc, adt – resistência adotada através dos corpos de prova

Fonte: Autor.

A partir dos resultados da Tabela 4.1, com exceção dos valores de velocidade de propagação da onda ultrassônica nos copos de prova submetidos à influência da umidade, é possível verificar um aumento dessas propriedades à medida em que se aumenta a resistência, conforme esperado.

A Figura 4.1 apresenta as curvas de correlação entre os índices esclerométricos e a resistência à compressão dos corpos de prova e dos prismas. Visto que os prismas não foram rompidos, as resistências adotadas para eles foram maiores atingidas pelos corpos de prova em cada classe de resistência.

Figura 4.1 – Correlação esclerometria e resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cura seca e úmida e dos prismas



*Resistência do prisma adotada

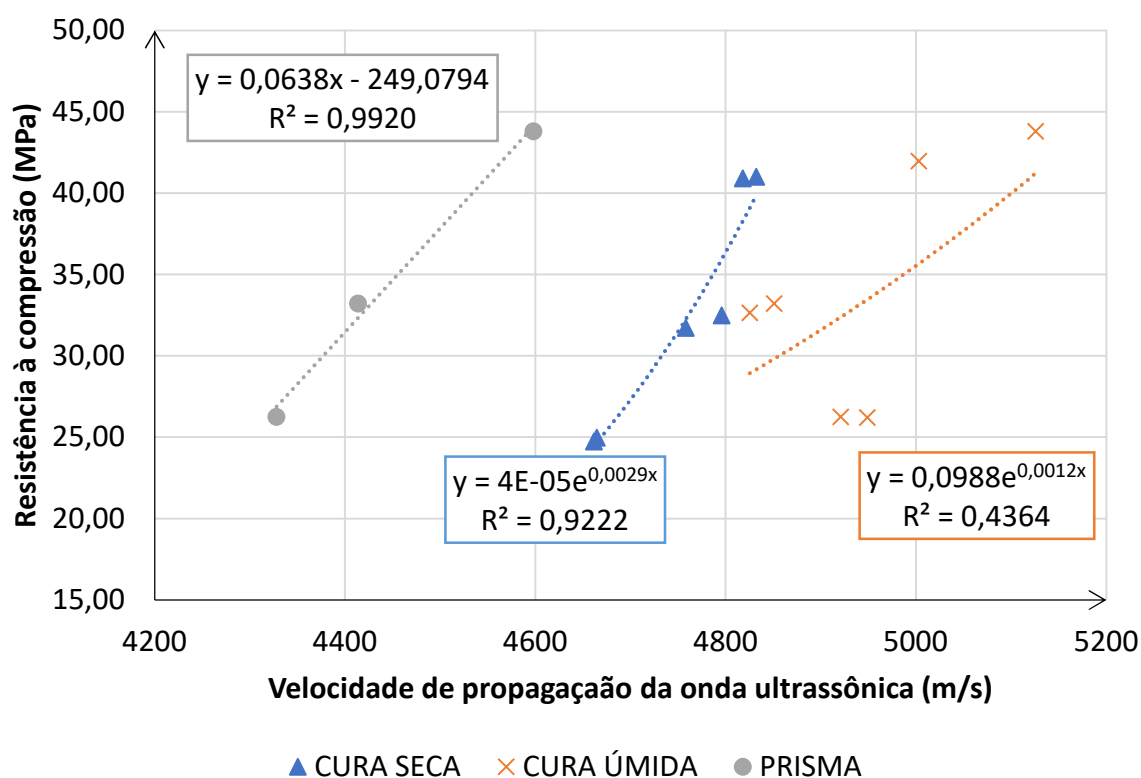
Fonte: Autor.

Observam-se valores próximos dos índices esclerométricos dos corpos de prova submetidos a diferentes tipos de cura, mesmo comportamento observado por Câmara (2006) e por Evangelista (2002).

A diferença é mais expressiva quando se comparam índices esclerométricos dos prismas e dos corpos de prova, sendo nos prismas no mínimo 22% maiores. Os valores distintos para os prismas já era esperado, visto que, como mostrado por Mitchell e Hoagland (1961) e apresentado na Figura 2.3, os corpos de prova moldados em formas de madeira tendem a ter índices esclerométricos maiores do que os moldados em formas de aço e os índices esclerométricos de superfícies planas são maiores do que os de superfícies curvas.

A Figura 4.2 apresenta as correlações entre as velocidades de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão dos corpos de prova e dos prismas.

Figura 4.2 – Correlação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica e a resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cura seca e úmida e dos prismas



*Resistência do prisma adotada

Fonte: Autor.

Diferente do índice esclerométrico, o tipo de cura interferiu de maneira expressiva na velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova. As curvas de correlação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão obtiveram excelentes coeficientes de correlação nos prismas e nos corpos de prova submetidos à cura seca, porém, nos submetidos à cura úmida tal correlação não foi eficiente.

A diferença entre a velocidade de propagação da onda ultrassônicas nos corpos de prova sujeitos a diferentes tipos de cura podem ser justificados pelo fato de que a velocidade nos corpos de prova saturados é maior do que nos secos, e mesmo tendo sido retirados do tanque com 48 horas de antecedência, os mesmos provavelmente não estavam totalmente secos. Este aumento na velocidade do pulso

à medida que se aumenta a umidade do concreto também foi observado por Naik et al. (2004) e Câmara (2006)

O fato da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos prismas ser menor que as nos corpos de prova já era esperado, visto que, segundo Kaplan (1959) citado por Malhotra e Carino (2003), a velocidade é menor em pilares do que nos corpos de prova, e de certa forma, os prismas podem simular pilares. Tal fato não foi justificado pelo autor, mas também foi comprovado por Câmara (2006) e pode estar associado a direção do ensaio em corpos de prova cilíndricos ser a mesma do adensamento, diferente do que acontece nos pilares.

4.2 ETAPA 2: em obra

Na Tabela 4.2 encontram-se os resultados de resistência à compressão encontrados pelo presente trabalho para as cinco cargas de concreto avaliadas, além do resultado apresentado pelo controle tecnológico contratado pela construtora. As cargas que não atingiram a resistência estão destacadas em vermelho.

Tabela 4.2 – Valores de abatimento e das resistências à compressão dos concretos avaliadas pelo laboratório e pelo controle tecnológico

CARGA	Slump (mm)	Rc lab (MPa)	Rc controle tecnológico (MPa)
C1	160	38,19	33,80
C2	135	38,43	37,10
C3	140	38,37	34,30
C4	130	40,23	34,70
C5	130	38,43	32,30
MÉDIA	139	38,73	34,44

Fonte: Autor.

De acordo com o controle tecnológico, quatro das cinco cargas avaliadas são consideradas não conformes pelo fato de não terem atingido a resistência de projeto de 35 MPa. Todavia, pelos corpos de prova moldados neste trabalho, as cinco cargas ultrapassaram a resistência de projeto e são considerados conformes.

Essa diferença pode ser justificada pelos fatores citados por Souza (2006) e Magalhães et al. (2013) apresentados anteriormente como: Tipo de forma, tipo de cura, moldador, preparação do topo entre outros fatores, o que demonstra a importância do cuidado na hora da realização do controle tecnológico, visto que, um

concreto conforme que seja diagnosticado como não conforme pode acarretar em custos desnecessários, por exemplo, para o reforço da estrutura.

Na Tabela 4.3 encontram-se os resultados de resistência à compressão e dos ensaios não destrutivos realizados diretamente nos corpos de prova moldados na obra (A e B para cada caminhão), assim como da resistência à compressão estimada para cada um dos corpos de prova utilizando as curvas de correlação elaboradas na Etapa 1 e o erro encontrado em cada uma das estimativas. Apesar das curvas obtidas através da cura úmida apresentar menor coeficiente de correlação, as mesmas foram utilizadas pelo fato dos corpos de prova moldados na obra terem passado pelo mesmo processo.

Tabela 4.3 - Resistência à compressão, índice esclerométrico e velocidade de propagação do pulso ultrassônico e resistência estimada dos corpos de prova moldados em obra

IDENTIFICAÇÃO	Rc (MPa)	V (m/s)	CV (%)	IE	CV (%)	fc, est (MPa)	erro (%)	fc, est (MPa)	erro (%)
C1.A	36,63	4797	0,17	23,2	3,61	31,24	14,7	37,00	1,0
C1.B	38,19	4844	0,18	24,5	6,19	33,05	13,5	41,18	7,8
C2.A	38,43	4815	0,35	24,7	6,05	31,92	16,9	41,87	8,9
C2.B	38,23	4786	0,17	25,0	4,90	30,84	19,3	42,79	11,9
C3.A	38,37	4820	0,53	25,0	5,06	32,11	16,3	42,79	11,5
C3.B	37,85	4716	0,17	26,0	5,77	28,34	25,1	46,00	21,5
C4.A	38,66	4825	0,71	23,8	7,52	32,31	16,4	38,93	0,7
C4.B	40,23	4838	0,35	24,9	3,98	32,81	18,4	42,38	5,3
C5.A	37,67	4790	0,35	27,0	5,24	30,98	17,7	49,21	30,6
C5.B	38,43	4791	0,69	24,4	6,18	31,02	19,3	40,78	6,1
Média	38,27	4802	0,37	25	5	31	18	42	11

Fonte: Autor.

Observa-se um menor erro nas resistências estimadas a partir do ensaio de esclerometria do que às estimadas pelo ensaio de ultrassom. Isso ocorre devido ao baixo coeficiente de correlação entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico e a resistência à compressão encontrado pela equação da curva apresentada anteriormente na Figura 4.2 .

A estimativa de resistência a partir do índice esclerométrico obteve erros menores e na faixa de 10%, o que demonstra a viabilidade do uso da curva de correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão do corpo de prova para estimar a resistência à compressão do concreto da estrutura. Tal curva se mostra útil também para estimar a resistência do corpo de prova sem rompê-lo,

podendo guardar o mesmo para ruptura em idades superiores, como também para verificar se o resultado apresentado na ruptura do corpo de prova é confiável ou não.

Na Tabela 4.4 encontram-se os resultados dos ensaios realizados nos pilares para cada uma das 5 cargas avaliadas.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de índice esclerométrico (IE) e velocidade de pulso ultrassônico (V) nos pilares

/PILAR	IE	CV (%)	V (m/s)	CV (%)
P1	33,4	3,83	4429	0,16
P2	32,1	6,67	4334	0,32
P3	31,5	4,34	4414	0,33
P4	30,5	6,22	4409	0,36
P5	31,8	3,94	4434	0,00
MÉDIA	31,9	5,00	4404	0,23

Fonte: Autor.

Analisando os resultados dos ensaios não destrutivos nos pilares é possível perceber, pelo baixo coeficiente de variação (CV), a homogeneidade entre as cargas entregues na obra, a padronização do processo de lançamento e adensamento do concreto nos pilares e da execução dos ensaios.

Aplicando estes resultados nas equações de correlação determinadas neste trabalho e apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2 elaborou-se a

Tabela 4.5. Nela encontram-se as resistências estimadas para as 5 cargas avaliadas pelos dois ensaios não destrutivos (IE e V) realizados nos pilares. Além do valor estimado (f_c , est), foi avaliado o erro entre a estimativa de resistência através da curva de correlação e o valor de resistência através da ruptura do corpo de prova.

Tabela 4.5 – Estimativa de resistência à compressão do concreto na obra através das curvas de correlação entre os ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto em laboratório

ENSAIO	PILAR	CURVA CP CURA UMIDA		CURVA CP CURA SECA		CURVA PRISMA	
		f_c , est (MPa)	erro (%)	f_c , est (MPa)	erro (%)	f_c , est (MPa)	erro (%)
ESCLEROMETRO (IE)	P1	69,64	82	61,95	62	48,06	26
	P2	65,73	71	58,94	53	44,66	16
	P3	63,67	66	57,34	49	42,87	12
	P4	60,46	50	54,86	36	40,08	0

	P5	64,59	68	58,05	51	43,67	14
	MÉDIA	64,82	68	58,23	50	43,87	14
ULTRASSOM (V)	P1	20,09	47	15,14	60	33,49	12
	P2	-	-	-	-	-	-
	P3	19,73	49	14,49	62	32,52	15
	P4	19,61	51	14,29	64	32,22	20
	P5	20,21	47	15,37	60	33,82	12
	MÉDIA	19,91	49	14,82	62	33,01	15

Fonte: Autor.

Observam-se erros consideráveis na estimativa de resistência à compressão através do uso das equações de correlação elaboradas a partir dos corpos de prova em laboratório (CURVA CP CURA ÚMIDA e CURVA CP CURA SECA), tal fato inviabiliza o uso das duas curvas para estimativa de resistência. Câmara (2006) ao tentar aplicar suas curvas de correlação obtidas em laboratório diretamente nas obras aos 28 dias também encontrou erros, na ordem de 32% para a esclerometria e para o ultrassom 2% em uma obra e 13% em outra.

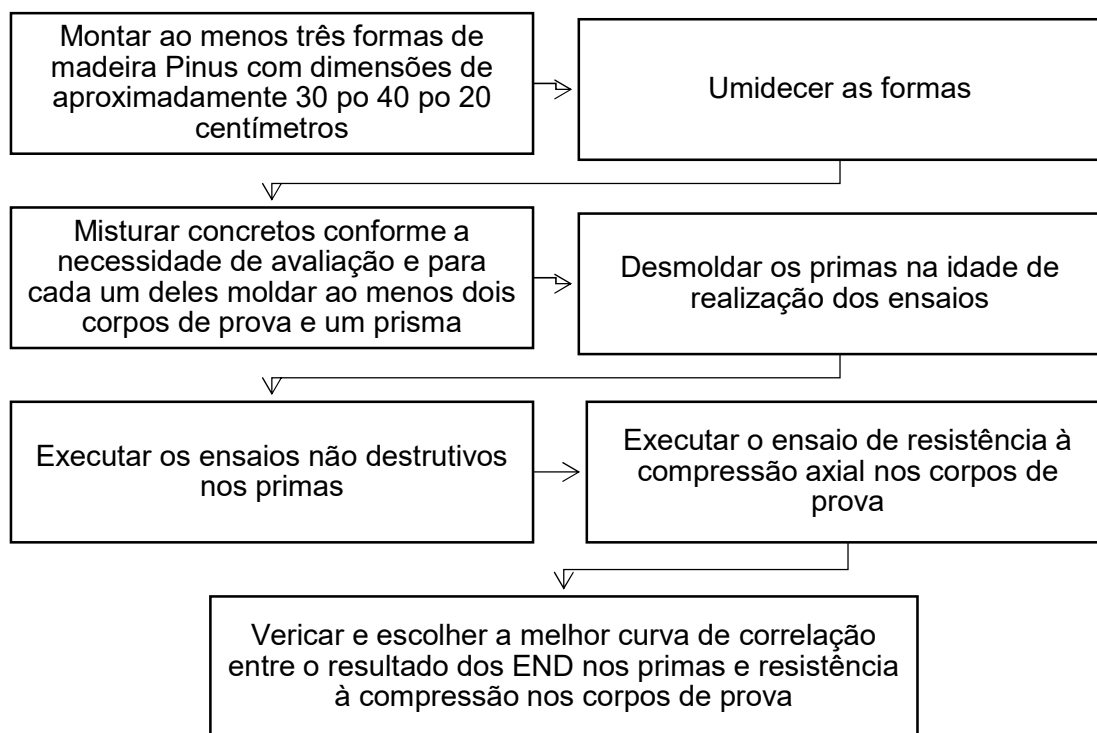
Porém, os valores de erro utilizando as curvas geradas a partir dos prismas (CURVA PRISMA) são menores. Com relação ao ensaio de esclerometria, a curva de correlação que obteve o menor erro na estimativa da resistência foi a elaborada através dos prismas, seguido pela cura seca e por última a cura úmida. É importante ressaltar que a forma de adensamento foi diferente, no pilar realizada com vibrador e no prisma de forma mecânica com a haste do ensaio de abatimento do concreto (*slump test*). Embora de certa forma ainda expressivo em alguns casos, o valor do erro está dentro do encontrado pela literatura, visto que, segundo Malhotra (1984), a precisão do ensaio é de 15 à 20%.

Para o ensaio de ultrassom a curva de correlação que obteve o menor erro na estimativa da resistência também foi a elaborada através dos prismas, seguida pelo corpo de prova com cura úmida e por último o com cura seca.

As curvas de correlação a partir dos prismas foram as que melhor estimaram as resistências à compressão do concreto em obra, pelo fato de melhor simularem o ambiente de obra. Com isso, o método utilizando os prismas com formas de madeira se mostra mais confiável, viabilizando seu uso para estimativa de resistência à compressão.

Desta forma, a metodologia proposta neste trabalho para estimar a resistência do concreto em obra se divide em alguns passos, como mostra o fluxograma da Figura 4.3.

Figura 4.3 – Metodologia proposta para estimativa de resistência à compressão em obra através de curvas de correlação com ensaios não destrutivos (esclerometria e ultrassom)



Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa encontrou-se uma divergência entre os resultados de resistência à compressão apresentados pelo controle tecnológico e os resultados obtidos pelo laboratório, esse problema poderia ser facilmente resolvido com ensaio de extração, porém de alto custo, ou através de ensaios não destrutivos (END), através da estimativa de resistência com uso de curvas de correlação entre END e compressão axial.

Conforme observado por outros autores, a estimativa da resistência à compressão do pilar através do uso das curvas de correlação entre a esclerometria e o ultrassom com a resistência à compressão, obtidos através de ensaios em corpos de prova cilíndricos metálicos, apresentou erros consideráveis. O que justificou o uso de formas de madeira prismáticas.

Com relação ao tipo de cura, para a esclerometria não se mostrou relevante, todavia o tipo de molde (cilíndrico metálico e prisma de madeira) acarretou diferenças de no mínimo 22% entre o índice esclerométrico no corpo de prova e no prisma. Já para a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, os dois fatores se mostraram importantes, o fato da velocidade ser menor nos prismas do que nos corpos de prova e a presença de umidade no corpo de prova que passou por cura úmida reduzir o coeficiente de correlação entre a velocidade de propagação e da resistência à compressão.

Com exceção da curva gerada através do ensaio de ultrassom nos corpos de prova que passaram pela cura úmida, todas as curvas se mostraram aplicáveis, com altos graus de correlação (R^2). Portanto, as curvas geradas a partir dos prismas, tanto para o ensaio de ultrassom como para o ensaio de esclerometria, podem ser utilizadas nas obras realizadas pela concreteira visando o aumento da segurança no exercício do controle tecnológico do concreto realizado diretamente.

Tal correlação determinada em laboratório só pôde ser aplicada na obra pelo uso dos prismas moldados em formas de madeira planas sem passar por um processo de cura em tanque com água e cal. Os tipos de forma e de cura se mostraram significativos para a real viabilidade da utilização das curvas de correlação criadas em laboratório nas obras para a estimativa da resistência do concreto.

Portanto, a metodologia proposta de obtenção de curvas de correlação entre ensaios não destrutivos (esclerometria e ultrassom) e a resistência à

compressão do concreto através da moldagem de prismas em formas de madeira se mostrou eficaz, uma vez que foi encontrado um alto coeficiente de correlação (R^2 maior do que 0,9) e baixo erro na estimativa da resistência, na faixa de 15%, para ambos os ensaios.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Realização das moldagens dos prismas diretamente nas obras e com o uso de vibrador, para comparar diretamente os ensaios não destrutivos nos prismas com os nos pilares moldados com o mesmo concreto;
- Simular diversos tipos de cura nos prismas e diferentes datas de desmoldagem;
- Elaborar outras curvas de correlação e testá-las em mais obras com classes de resistência distintas;
- Elaborar curvas de correlação para diferentes idades;
- Realizar a extração de testemunhos dos próprios prismas, após a realização dos ensaios não destrutivos.

6 REFERÊNCIAS

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

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7211: Agregado para concreto. Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

_____. NBR 8953: Concreto para fins estruturais. Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 61889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. NBR 12655: Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006

_____. NBR NM 46: agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 mm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 78: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado Graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

Almeida Júnior, Racine Peixoto de. Análise da correlação dos ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto / Racine Peixoto de Almeida Júnior. – 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C125 – 03 – Standard Terminology Relating to concrete and concrete aggregates. In: anual book of ASTM, 2003.

Almeida Júnior, Racine Peixoto de. Análise da correlação dos ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto / Racine Peixoto de Almeida Júnior. – 2019.

ARAÚJO, Carla Cavalcante. Estudo de correlações entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos, Dissertação (mestrado), UFPB, 2018. 148 p.

BENYAHIA, K. A.; GHRICI, M.; KENAI, S.; BREYSSE, D.; SBARTAI, Z. M. Analysis of the relationship between nondestructive and destructive testing of low concrete strength in new structures. Asian Journal of Civil Engineering, v. 18, n. 2, p. 191–205, 2017.

BUNGEY, John H.; GRANTHAM, Michael G. Testing of concrete in structures. Crc Press, 2006.

CÂMARA, Everlei. Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na Grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

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

CANOVA, G. R. et al. Effect of rate sensitivity on slip system activity and lattice rotation. Acta Metallurgica, v. 36, n. 8, p. 1961-1970, 1988.

HIBBELER, R. C. Resistência de Materiais - 5a Ed., 2004.

JOFFILY, I. A. L. (2010). Avaliação do ensaio de penetração de pino para mensuração indireta da resistência à compressão do concreto. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-003A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p.

MACHADO, M.D. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MALHOTRA, V. M AND CARINO, N.J., CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. 2004.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 2008. MONTEIRO,

MITCHELL, L. J.; HOAGLAND, G. G. Investigation of the Impact-Type Concrete Test Hammer. Highway Research Board Bulletin, n. 305, 1961.

MOHAMAD, G., CARMO, P. I. O., OLIVEIRA, M. J. D., Temp, A. L. (2015), “Métodos combinados para avaliação da resistência de concretos”, Revista Matéria, V.20, No. 1, pp. 83-99.

NASCIMENTO, Beatriz Andrade. RESISTENCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EM OBRAS DA CIDADE DE MARINGÁ. JournalofExactSciences, v. 19, p. 20–25, 2018.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 5ª Edição – Bookman Editora, 2015.

PALACIOS, Maria del Pilar Guzman. Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PROCEQ (Suíça). MARTELO PARA TESTE DE CONCRETO (ESCLERÔMETRO). 2017. Disponível em: <<https://www.proceq.com/pt/compare/schmidt-esclerometros/>>. Acesso em: 01 abril 2018.

SANTIAGO, W. C.; BECK, A. T. A study of brazilian concrete strength (non-) compliance and its effects on reliability of short columns. Revistalbracon de Estruturas e Materiais, v. 4, n. 4, p. 663–690, 2011.

SANTIAGO, W. C.; BECK, A. T. A new study of Brazilian concrete strength conformance. Revistalbracon de Estruturas e Materiais, v. 10, n. 4, p. 906–914, 2017.

SOUSA, G. G. Influência dos Procedimentos de Ensaio à Compressão de Corpos-de Prova Cilíndricos no Controle de Qualidade do Concreto. Dissertação de Mestrado. UFSC. Florianópolis, 2006.

ANEXO 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS

ENSAIOS NOS PILARES

PILARES	VEL. PROP. PULSO ULTRASSÔNICO				
	COMP (cm)	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)	CV (%)
C1	19,2	43,4	43,3	4429	0,16
C2	19,2	44,2	44,4	4334	0,32
C3	19,2	43,4	43,6	4414	0,33
C4	26,3	59,5	59,8	4409	0,36
C5	19,2	43,3	43,3	4434	0,00

PILARES	IE INDIVIDUAL																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	MED	MIN	MAX
C1	32	35	32	32	36	34	32	34	42	34	32	33	34	33	30	34	33,7	30,3	37,1
C2	36	35	34	30	32	32	31	30	32	35	38	33	30	30	38	30	32,9	29,6	36,2
C3	33	32	33	30	30	33	32	30	30	31	32	30	32	34	32	30	31,5	28,4	34,7
C4	30	33	28	28	33	30	29	32	28	32	32	29	30	29	33	32	30,5	27,5	33,6
C5	32	34	30	32	32	34	32	41	31	30	38	32	30	32	32	32	32,8	29,5	36,0

PILARES	IE VÁLIDOS																IE FINAL	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	MED	CV (%)
C1	32	35	32	32	36	34	32	34		34	32	33	34	33		34	33,4	3,83
C2	36	35	34	30	32	32	31	30	32	35		33	30	30		30	32,1	6,67
C3	33	32	33	30	30	33	32	30	30	31	32	30	32	34	32	30	31,5	4,34
C4	30	33	28	28	33	30	29	32	28	32	32	29	30	29	33	32	30,5	6,22
C5	32	34	30	32	32	34	32		31	30		32	30	32	32	32	31,8	3,94

CORPOS DE PROVA

	ULTRASSOM						
	COMP (cm)	t1 (μs)	t2 (μs)	t3 (μs)	t4 (μs)	V (m/s)	CV (%)
C1.A	19,5	40,7	40,6	-	-	4797	0,17
C1.B	19,4	40,1	40,0	-	-	4844	0,18
C2.A	19,5	40,4	40,6	-	-	4815	0,35
C2.B	19,6	40,9	41,0	-	-	4786	0,17
C3.A	19,4	40,1	40,4	-	-	4820	0,53
C3.B	19,5	41,3	41,4	-	-	4716	0,17
C4.A	19,3	40,2	39,8	-	-	4825	0,71
C4.B	19,4	40,2	40,0	-	-	4838	0,35
C5.A	19,4	40,6	40,4	-	-	4790	0,35
C5.B	19,5	40,5	40,9	-	-	4791	0,69
25.S1	19,3	41,1	41,5	41,6	-	4662	0,64
25.S2	19,3	41,7	41,2	41,7	40,9	4665	0,95
25.U1	18,8	38,4	38,0	38,2	-	4921	0,52
25.U2	19,4	39,3	38,7	39,6	-	4949	1,17
30.S1	19,3	39,1	41,9	38,0	42,0	4796	5,02
30.S2	19,2	40,7	40,1	39,8	40,8	4758	1,19
30.U1	19,0	39,7	38,6	39,5	39,7	4825	1,33
30.U2	19,0	39,4	38,9	39,2	-	4851	0,64
40.S1	19,0	39,9	40,0	38,4	-	4818	2,27
40.S2	19,2	39,8	39,6	39,8	-	4832	0,29
40.U1	19,0	37,7	35,8	37,7	-	5126	2,96
40.U2	19,2	38,6	38,1	38,3	38,5	5003	0,58

CORPOS DE PROVA	IE INDIVIDUAL												IE VÁLIDOS									IE FINAL		RESIST.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MED	MIN	MAX	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MED	CV (%)	Rc (MPa)
C1.A	22	20	25	25	23	23	24	16	24	22	20,2	24,7	22				23	23	24		24	23,2	3,61	36,63
C1.B	28	26	18	25	24	26	24	22	21	24	21,4	26,2		26		25	24	26	24	22		24,5	6,19	38,19
C2.A	20	24	26	26	25	26	24	22	20	24	21,3	26,0		24	26	26	25	26	24	22		24,7	6,05	38,43
C2.B	24	24	24	26	26	26	27	24	24	25	22,5	27,5	24	24	24	26	26	26	27	24	24	25,0	4,90	38,23
C3.A	29	26	26	22	22	23	25	24	26	25	22,3	27,3		26	26			23	25	24	26	25,0	5,06	38,37
C3.B	26	27	28	26	24	26	25	24	28	26	23,4	28,6	26	27	28	26	24	26	25	24	28	26,0	5,77	37,85
C4.A	16	28	25	22	22	27	24	28	26	24	21,8	26,6			25	22	22		24		26	23,8	7,52	38,66
C4.B	24	24	24	26	25	26	24	30	26	25	22,9	28,0	24	24	24	26	25	26	24		26	24,9	3,98	40,23
C5.A	28	28	24	34	28	25	28	27	25	27	24,7	30,2	28	28			28	25	28	27	25	27,0	5,24	37,67
C5.B	21	24	23	26	24	26	24	22	26	24	21,6	26,4		24	23	26	24	26	24	22	26	24,4	6,18	38,43
25.S1	20	20	20	18	20	20	17	17	22	19	17,4	21,3	20	20	20	18	20	20				19,7	4,15	24,75
25.S2	22	18	18	21	18	16	20	24	18	19	17,5	21,4		18	18	21	18		20		18	18,8	7,06	24,99
25.U1	26	24	18	20	20	20	23	16	18	21	18,5	22,6				20	20	20				20,0	0,00	26,28
25.U2	20	21	20	20	18	22	20	21	18	20	18,0	22,0	20	21	20	20			20	21		20,3	2,54	26,24
30.S1	19	22	20	21	20	27	23	20	20	21	19,2	23,5		22	20	21	20		23	20	20	20,9	5,83	32,50
30.S2	20	18	17	20	20	21	20	21	22	20	17,9	21,9	20	18		20	20	21	20	21		20,0	5,00	31,74
30.U1	22	22	22	18	28	22	21	22	18	22	19,5	23,8	22	22	22			22	21	22		21,8	1,87	32,66
30.U2	20	22	30	18	21	18	23	22	20	22	19,4	23,7	20	22			21		23	22	20	21,3	5,68	33,24
40.S1	26	24	22	29	24	25	27	27	22	25	22,6	27,6	26	24			24	25	27	27		25,5	5,41	40,93
40.S2	24	26	20	26	24	22	24	24	26	24	21,6	26,4	24	26		26	24	22	24	24	26	24,5	5,77	41,03
40.U1	25	26	26	21	26	18	25	21	26	24	21,4	26,2	25	26	26		26		25		26	25,7	2,01	43,83
40.U2	28	26	16	22	28	18	24	28	26	24	21,6	26,4		26		22			24		26	24,5	7,82	42,00

PRISMAS

PRISMA	ULTRASSOM												
	COMP (cm)	t1 (μs)	t2 (μs)	t3 (μs)	V (m/s)	CV (%)	COMP (cm)	t1 (μs)	t2 (μs)	t3 (μs)	V (m/s)	CV (%)	MED (m/s)
C25	29,50	68,70	67,90	68,40	4317	0,59	36,0	82,9	83	83	4339	0,07	4328
C30	29,50	66,50	66,90	66,60	4425	0,31	34,5	78,7	78,2	78,2	4402	0,37	4414
C45	30,00	64,60	66,90	63,90	4606	2,41	35,5	78,6	76,1	77,3	4591	1,62	4598

PRISMA	IE INDIVIDUAL																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
C25	27	27	24	25	24	30	28	26	24	23	26	24	17	23	24	24	28	30	30
C30	28	28	30	26	22	26	28				26	18	28	28	29	39	44	26	29
C45	36	26	26	32	32	32	-	32	32	32	23	28	33	-	28	32	30	36	30
PRISMA	IE INDIVIDUAL																		
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	MED	MIN	MAX
C25	26	28	26	26	30	29	24	23	32	22	26	25	23	22	25	26	26	23,1	28,2
C30	24	26	28	30	32	30	30	30	26	28	24	28	28	34	28	24	28	25,5	31,1
C45	34	-	34	30	34	34	30	30	-	32	32	32	32	30	35	-	31	28,2	34,4

PRISMA	IE VÁLIDO																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
C25	27	27	24	25	24		28	26	24		26	24			24	24	28		
C30	28	28	30	26		26	28				26		28	28	29			26	29
C45				32	32	32		32	32	32			33			32	30		30
PRISMA	IE VÁLIDO																		
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	MED	CV(%)	
C25	26	28	26	26			24				26	25			25	26	25,6	5,48	
C30		26	28	30		30	30	30	26	28		28	28		28		28,0	5,16	
C45	34		34	30	34	34	30	30		32	32	32	32	30			31,9	4,36	