



MEC-SETEC

INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS – CAMPUS AVANÇADO PIUMHI-MG.

Bacharelado em Engenharia Civil

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS DE
ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM NA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO**

Natanael Belmiro Costa

Piumhi
2019

Natanael Belmiro Costa

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS DE
ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM NA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M.e Júnior Henrique Canaval

Piumhi - MG

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

C837a Costa, Natanael Belmiro.

Análise comparativa das técnicas não destrutivas de esclerometria e ultrassom na avaliação de estruturas de concreto armado / Natanael Belmiro Costa. – 2019.
64 f.

Orientador: Júnior Henrique Canaval.

Monografia (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Avançado Piumhi, 2019.

1. Concreto. 2. Estruturas de concreto- avaliação. 3. Ultrassom - engenharia civil. 4. Esclerômetro. I. Título.

CDD 624.1

Ficha elaborada pela bibliotecária Andreia Cristina Damasceno - CRB6/1974

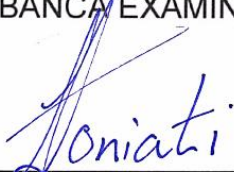
Natanael Belmiro Costa

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS DE
ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM NA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 14 de Agosto de 2019.

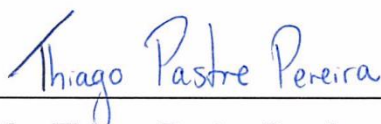
BANCA EXAMINADORA



M.e André Luís Toniati – Engenheiro Civil



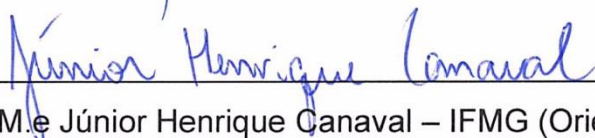
Prof. M.e Humberto Coelho de Melo – IFMG



Prof. M.e Thiago Pastre Pereira – IFMG



Prof. M.e Vinícius Barbosa de Paiva – IFMG



Prof. M.e Júnior Henrique Canaval – IFMG (Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos meus familiares e amigos que de alguma forma me apoiaram e incentivaram no decorrer da minha formação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pois sempre esteve comigo e me fortaleceu ao longo deste período, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais Jânio Costa e Nilza Rita Luiz Costa, pelo amor, encorajamento e apoio incondicional que me permitiram vencer em mais esta etapa.

À minha irmã, Tatiane Ferreira Faria Costa, pelo incentivo, apoio e aprendizado compartilhados.

À minha namorada Júlia Veloso Faria, por sempre acreditar em meu potencial, pelo carinho e apoio ao longo de todo o período de graduação.

Ao meu primo Eliezer Belmiro de Faria por me auxiliar na área da informática, por sempre me aconselhar indicando o melhor para minha vida e ao restante de toda minha família por sempre estar ao meu lado me apoiando.

Ao meu orientador, Professor M.e Júnior Henrique Canaval, pela paciência, compreensão, motivação, orientação e por todo aprendizado que adquiri ao longo da graduação, mas principalmente na realização deste trabalho.

Agradeço, por fim, aos meus amigos do IFMG especialmente ao Glayson Ronan e a Sarah Felício, pelo companheirismo e auxílio durante toda esta jornada e a todos que, de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação, o meu muito obrigado!

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria; bom entendimento têm todos os que lhe obedecem; o seu louvor permanece para sempre”.

Salmos 111:10

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo considerado por muitos o mais importante da Engenharia de Estruturas, por ser utilizado em diversas aplicações. Diante deste fato, surge a necessidade de técnicas de controle e investigação da sua condição de conservação. A inspeção preventiva das estruturas de concreto é uma estratégia necessária, visto que quanto mais rápido se identificar um problema no elemento, maior será a economia no procedimento de reparo. Um procedimento muito utilizado para avaliação da resistência do concreto é por meio do rompimento de testemunhos retirados da própria estrutura, porém esta técnica gera danos ao elemento analisado. Além deste método, existem outras técnicas para realizar estas avaliações, os ensaios não destrutivos, cujas técnicas permitem avaliar a condição das estruturas de concreto por meio de sua área superficial, evitando perda na capacidade resistente do elemento. A avaliação feita pela utilização de equipamentos, como o ultrassom e o esclerômetro, são exemplos de ensaios não destrutivos. As principais características destas técnicas de ensaios são: o processo simplificado de execução, a dispensa do processo de análise da região da estrutura a ser realizada o ensaio; a ausência de danos a estrutura, a agilidade na execução e disponibilidade instantânea dos resultados. O presente trabalho tem por objetivo utilizar as técnicas não destrutivas de esclerometria e ultrassom na avaliação do concreto. Para isto, foram realizados ensaios de esclerometria e ultrassom em três vigas do empreendimento analisado. Os resultados obtidos por meio das técnicas não destrutivas apresentaram boa concordância em relação aos ensaios destrutivos, cujos valores indicam que o concreto analisado apresenta excelente qualidade e resistência.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto. Avaliação das estruturas. Ensaios não destrutivos. Ultrassom. Esclerômetro.

ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials in the world, considered by many the most important of Structural Engineering, as it is used in several applications. Therefore, arises the need for techniques of control and investigation of its conservation condition. Preventive inspection of concrete structures is a necessary strategy since sooner a problem is identified in the element, the greater are the savings in the repair procedure. A procedure widely used to evaluate the strength of concrete is through the compressive test on concrete cores extracted from the structure itself, however, this technique generates small damages to the element analyzed. Besides this method, there are other techniques to perform these evaluations, the non-destructive tests, whose techniques allow to evaluate the condition of concrete structures by their surface area, without causing losses in the resistance of the element. The evaluation made using equipment such as ultrasonic and sclerometer are examples of non-destructive tests. The main characteristics of these test techniques are the simplified process of execution, the exemption of the analysis process of the region of the structure to be performed the test; the absence of damage to the structure, agility in execution and the instant availability of results. The present work aims to use non-destructive sclerometric and ultrasonic techniques in concrete evaluation. For this, sclerometric and ultrasonic tests were performed on three concrete beams of the analyzed enterprise. The results obtained by the non-destructive techniques showed good agreement with the destructive tests, whose values indicate that the analyzed concrete presents excellent quality and resistance.

KEYWORDS: Concrete. Evaluation of structures. Non-destructive tests. Ultrasonic. Sclerometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estado da obra em junho de 2019.	15
Figura 2 - Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento.	23
Figura 3 – Diagramas tensão-deformação.	27
Figura 4 - Mecanismo de funcionamento do esclerômetro.	33
Figura 5 - Curva de correlação do índice esclerométrico com a resistência à compressão.	35
Figura 6 - Tipos de transmissões das ondas ultrassônica na superfície do concreto.	36
Figura 7 - Planta de formas do pavimento estudado.	39
Figura 8 - Corpos de prova moldados na obra.	40
Figura 9 - Instrumento de esclerometria utilizado no estudo.	41
Figura 10 - Área de ensaio com 16 pontos de impacto.	42
Figura 11 - Realização do ensaio de esclerometria.	42
Figura 12 – Detalhamento esquemático dos trechos das vigas ensaiadas com localização da área analisada.	43
Figura 13 - Instrumento ultrassônico utilizado no estudo.	44
Figura 14 - Marcação dos pontos no elemento de concreto.	45
Figura 15- Detalhamento esquemático dos trechos das vigas ensaiadas com as áreas do ensaio de ultrassom.	46
Figura 16 – Resultados da resistência à compressão do concreto.	48
Figura 17 - Índices esclerométrico obtidos aos 21 dias.	49
Figura 18 - Índices esclerométrico obtidos aos 28 dias.	49
Figura 19 - Gráfico do índice esclerométrico médio.	51
Figura 20 – Valores individuais em destaque obtidos aos 21 dias.	52
Figura 21 – Valores individuais em destaque obtidos aos 28 dias.	52
Figura 22 - Gráfico do índice esclerométrico efetivo.	54
Figura 23 - Gráfico do índice esclerométrico global. Fonte: Arquivo próprio.	55
Figura 24 - Resistência à compressão do concreto pelo índice esclerométrico.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites máximos.....	21
Tabela 2 - Correspondência entre a relação água/cimento e a classe de agressividade ambiental.....	22
Tabela 3 - Classificação das consistências do concreto.	24
Tabela 4 - Classificação Geral das Características e Propriedades.....	25
Tabela 5 - Classificação da qualidade do concreto conforme a velocidade do pulso ultrassônico.	37
Tabela 6 - Resultados do índice esclerométrico médio aos 21 dias.....	50
Tabela 7 - Resultados do índice esclerométrico médio aos 28 dias.....	50
Tabela 8 - Resultados do índice esclerométrico efetivo aos 21 dias.....	53
Tabela 9 - Resultados do índice esclerométrico efetivo aos 28 dias.....	53
Tabela 10 - Resultados do índice esclerométrico global.	55
Tabela 11 - Resistência à compressão do concreto pelo índice esclerométrico aos 21 dias.....	56
Tabela 12 - Resistência à compressão do concreto pelo índice esclerométrico aos 28 dias.....	57
Tabela 13 - Resultados do tempo gasto pela onda ultrassônica para atravessar o concreto.....	58
Tabela 14 - Resultados do ensaio da velocidade do pulso ultrassônico médio.	59
Tabela 15 - Qualidade do concreto em relação a velocidade do pulso ultrassônico médio.	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1.	Objetivo Geral.....	16
2.2.	Objetivos Específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Materiais Constituintes	19
3.1.1	Aglomerantes	19
3.1.2	Agregados	20
3.1.3	Água de amassamento.....	21
3.2	Propriedades	23
3.2.1	Propriedades do concreto fresco.....	24
3.2.2	Propriedades do concreto endurecido.....	25
3.3	Patologia	28
3.4	Ensaio para caracterização do concreto.....	30
3.4.1	Ensaio destrutivos	31
3.4.2	Ensaio não destrutivos	32
3.4.2.1	Ensaio do índice esclerométrico	33
3.4.2.2	Ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	35
4	METODOLOGIA	38
4.1	Materiais.....	38
4.2	Métodos.....	40
4.2.1	Ensaio do índice esclerométrico.....	40
4.2.2	Ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial	47
5.2	Análise dos resultados do ensaio de esclerometria.....	48
5.2.1	Análise do índice esclerométrico médio	49
5.2.2	Análise do índice esclerométrico efetivo	51
5.2.3	Análise do índice esclerométrico global	54
5.2.4	Correlação entre o índice esclerométrico e resistência à compressão do concreto	56

5.2.5	Análise dos resultados do ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	58
5.2.6	Análise da velocidade do pulso ultrassônico médio	58
5.2.7	Correlação entre a velocidade do pulso ultrassônico médio e a qualidade do concreto	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, por se tratar de um material econômico, com boa durabilidade e alta resistência. É classificado como um compósito, constituído em sua matriz por cimento, agregados e água. Em alguns casos, aditivos são adicionados ao concreto para alterar e/ou melhorar certas características físicas e químicas em seu estado fresco ou endurecido (PALACIOS, 2012).

Ambrozewicz (2012) salienta que o concreto é o material mais importante da Engenharia Civil, pois possui várias aplicações, tais como: estrutura, revestimento, pavimentos, paredes, fundações, canalizações entre outras. Devido ao grande uso do concreto como material estrutural, surge a necessidade de avaliar a sua resistência, para garantir que o material atenda às exigências estabelecidas no projeto, podendo a mesma ser influenciada por diversos fatores, tais como transporte, lançamento, adensamento e cura (PALACIOS, 2012).

De acordo com Silva *et al.* (2013), foi constatado na segunda metade do século XX, que o concreto tinha uma vida útil limitada a menos de um século. Essa confirmação fez com que profissionais da área de cálculo estrutural passassem a considerar aspectos de durabilidades nos projetos de estruturas de concreto armado. Mesmo com todas as recomendações e normas estabelecidas, ocorrem falhas em projetos, execução ou utilização. Fusco (2012) destaca que a boa durabilidade das estruturas de concreto tem relação direta com a capacidade de resistir às agressões do meio externo e com os materiais empregados na produção do material.

Segundo Silva *et al.* (2013), para avaliar um sistema estrutural de concreto armado, geralmente, são realizados ensaios para verificação da resistência à compressão do concreto, no qual são utilizados testemunhos retirados da própria estrutura, considerando as cargas atuantes nos elementos avaliados a fim de evitar danos consideráveis. Este procedimento é categorizado como ensaio destrutivo.

Com o avanço tecnológico, novas tecnologias surgiram na área da Engenharia Civil, como por exemplo os ensaios não destrutivos. De acordo com Silva *et al.* (2013), os ensaios destrutivos são usados nas estruturas de concreto armado, podendo estes ser realizados em estruturas com idades curtas ou avançadas, os quais permitem avaliar as características das peças na idade analisada. Evangelista (2002) destaca

que estes tipos de ensaios não causam grandes danos ao elemento ensaiado após o ensaio, e não provocam perda na capacidade resistente do elemento. Ainda conforme Evangelista (2002), o uso de ensaios não destrutivos permite analisar propriedades do concreto como: massa específica, módulo de elasticidade e resistência, podendo ainda, averiguar a dureza superficial, absorção, permeabilidade, condições de umidade, localização das armaduras, existência de vazios e fissuração.

Câmara (2006) salienta que os ensaios não destrutivos apresentam vantagens expressivas em relação à velocidade de execução em comparação aos ensaios que demandam a retirada de amostras para um decorrente exame. Além de permitir uma quantidade maior de ensaios, proporcionando uma verificação mais abrangente da estrutura a ser analisada. O autor ainda destaca a rapidez para obtenção dos resultados dos ensaios.

As técnicas de ensaios não destrutivos são métodos para acompanhar e inspecionar a condição das estruturas de concreto. Possui pontos positivos por não provocar danos à estrutura e nem perda de resistência com sua execução. Lorenzi *et al.* (2016) salienta que danos mal corrigidos acarretam redução da vida de serviço da estrutura. A aplicação de ensaios não destrutivos é de grande eficiência, além de possibilitar uma alternativa de baixo custo, sendo capaz de prever a qualidade do concreto, correlacionando os resultados obtidos para estimar os valores da resistência à compressão do material, sem danificar expressivamente ou provocar perda na resistência da estrutura em análise. Pode, ainda, detectar defeitos e anomalias no elemento como trincas, rachaduras e vazios em estruturas de concreto armado, localizar barras e especificar o seu diâmetro, apurar a possibilidade e a ocorrência de corrosão de armaduras (SILVA *et al.*, 2013).

Neste trabalho foram feitas avaliações de elementos estruturais de concreto armado em uma obra localizada na cidade de Piumhi – MG, por meio de ensaios não destrutivos. O empreendimento, objeto de estudo, é uma obra de ampliação de uma casa de dois pavimentos com um total de área a ser construída de 165,68 m². A Figura 1 mostra o estágio da edificação na data da realização dos ensaios.

Figura 1 - Estado da obra em junho de 2019.



Fonte: Arquivo próprio.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é correlacionar as técnicas não destrutivas de Esclerometria e Ultrassom com o ensaio destrutivo, realizado por compressão axial, na avaliação do concreto.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da idade do concreto na dureza superficial medida por esclerometria aos 21 e 28 dias;
- Classificar a qualidade do concreto de acordo com a velocidade do pulso ultrassônico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Carvalho (2008), expõe que, até o século XIX, eram utilizados como sistemas construtivos, a madeira e a alvenaria, o que era justificável pela abundância da primeira, na época. A desvantagem de construir-se com madeira desdobrava-se sobre a pouca durabilidade e a combustão.

A alvenaria de pedras, sem dúvida, é um dos mais antigos sistemas construtivos utilizados pelo homem e, sobre o período acima citado, mesmo com as desvantagens existentes, a alvenaria de pedras ou de tijolos foi o sistema estrutural empregado nas obras mais importantes. Para compreender tal método, menciona-se ainda o conceito apresentado pelo autor, no que diz respeito à alvenaria:

A alvenaria pode ser definida como um sistema construtivo que consiste na moldagem de unidades (pedras, tijolos ou blocos) unidas por um ligante (a argamassa) (CARVALHO, 2008)

Em toda história da construção civil, o objetivo principal sempre foi buscar a melhor forma de trabalhar, para produzir o melhor resultado com o número mínimo de falhas ou desvantagens. Assim, desde as primeiras experiências com a alvenaria de pedras, foram testadas diversas misturas para criar a argamassa que unisse melhor e de forma coesa, as pedras; barro, argila, e posteriormente cal, foram algumas tentativas.

Na medida em que eram feitas as construções, utilizando-se os materiais disponíveis, as pessoas foram percebendo falhas e vantagens em cada um deles e, assim, evoluindo até os dias atuais, colocando e buscando nas matérias primas a reunião de todos os benefícios encontrados nos métodos construtivos.

Quando na ausência ou escassez de pedras naturais e de madeira, provavelmente, na região da Mesopotâmia, passou-se a utilizar o tijolo como produto de substituição. Apesar da origem ser conflituosa, existem relatos da descoberta de tijolos modelados manualmente em barro, e queimados, datados de 14.000 a.C. e 5.000 a.C. (PFEIFER *et al.*, 2001 *apud* CARVALHO, 2008)

A construção civil, através de sua evolução, mostra que o material utilizado é reflexo direto da constante busca pela perfeição e minimização de prejuízos. Nesse sentido, o concreto é o ápice, no que diz respeito à segurança e a estabilidade de resultados no ramo da construção civil. A mistura entre cimento, água e agregados, admitindo-se ainda a possibilidade de aditivos ou adições, produz uma liga, que,

graças à viabilidade de ser moldada para assumir diferentes formatos e aplicações, que durarão infinitamente mais do que qualquer outro material já utilizado, representa o estopim da construção civil, no que diz respeito à matéria prima utilizada (COUTO, 2013). Entender a importância desta afirmativa, implica na consideração de que o concreto é o principal componente utilizado para as construções, graças à sua heterogeneidade advinda da mistura entre elementos que, por si só se completam, seguindo guardadas as devidas proporções à sua função pretendida (COUTO, 2013).

O Concreto de cimento Portland é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo, agregado graúdo e água, podendo ainda conter componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozzolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água) (NBR 12655, ABNT, 2015). Como aditivos químicos, podem ser citados os retardadores, os aceleradores de pega, os plastificantes e superplastificantes, entre diversos outros (ARAÚJO, 2014).

A mistura dos materiais constituintes do concreto influenciará na porosidade da pasta resultante e, por conseguinte, na resistência à compressão. Outro fator influente nas especificidades do concreto é a espécie de agregados utilizados. Os concretos produzidos pela utilização de agregados britados possuem maior resistência quando comparados àqueles produzidos com agregados de seixos arredondados e lisos (ARAÚJO, 2014). Ressalta-se que o objetivo da utilização de agregados de maiores dimensões na produção do concreto é para redução do custo sem comprometer a qualidade do material (CARVALHO, 2007).

Logo após a mistura, o concreto fresco deve possuir plasticidade suficiente para as operações de manuseio, transporte e lançamento em fôrmas. As propriedades definidas, para este momento, são consistência, textura, trabalhabilidade, integridade da massa, poder de retenção de água e massa específica (AMBROZEWICZ, 2012).

As estruturas de construções usuais, na maior parte dos casos, exigem de seus elementos resistência à tração e compressão, fazendo com que a utilização somente do concreto seja inadequado, pois apresenta elevada resistência à compressão e baixa resistência à tração, cerca de 10% da sua resistência à compressão (CARVALHO, 2007). O uso do concreto torna-se adequado em estruturas quando é feita a associação de um material que tenha boa resistência à tração e que seja mais deformável, aumentando assim a resistência à tração do novo material composto. O

aço é o material mais utilizado nesta associação, fazendo com que o material composto empregado na estrutura seja definido por concreto armado.

3.1 Materiais Constituintes

Os materiais constituintes do concreto são água e aglomerante (cimento), formando este composto a pasta. Acrescentando a esta pasta, agregado miúdo, obtém-se a argamassa. Adicionando agregado graúdo resultará no concreto simples (AMBROZEWICZ, 2012). Bastos (2006) também classifica como materiais constituintes do concreto, os aditivos químicos e materiais como cinza volante, pozolanas, sílica ativa, entre muitos outros, com o objetivo de melhorar ou modificar as propriedades básicas do resultado final. Posteriormente, pode ser adicionado ao concreto simples, barras de aço, formando assim o concreto armado. De acordo com Mehta e Monteiro (1994) em relação às propriedades primárias, é preciso considerar que, o concreto armado é resultante da união do concreto simples com barras de aço, criando uma aderência perfeita entre estes materiais, de maneira que ambos passam a resistir solidariamente aos esforços aos quais forem submetidos.

Sobre esta união, pode-se dizer que:

A utilização de barras de aço juntamente com o concreto, só é possível devido as seguintes razões: trabalho conjunto do concreto e do aço, assegurado pela aderência entre os dois materiais; o coeficiente de dilatação térmica do aço e do concreto são praticamente iguais; o concreto protege de oxidação o aço da armadura garantido a durabilidade da estrutura (BASTOS, 2006).

Para indicar a proporção de cada componente a ser inserido na mistura para formação do concreto, e para que este apresente as características desejadas no projeto e na obra é definido o traço do concreto. O traço usa sempre como referência o aglomerante, podendo ser expresso tanto em volume quanto em massa (AMBROZEWICZ, 2012).

3.1.1 Aglomerantes

Os aglomerantes, por ser um material atuante, ligante, são responsáveis por garantir a junção entre os grãos do agregado. Atualmente o aglomerante mais utilizado para produção do concreto é o cimento Portland. De acordo com a NBR 12655 (2015), o cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem

de clínquer, ao qual pode ser adicionado uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos à mistura, nos teores indicados nas normas específicas.

3.1.2 Agregados

Os agregados são materiais granulares sem forma ou volume definido, de atividade química inerte (AMBROZEWICZ, 2012). Bauer (2015) complementa dizendo que é um material não coeso, com grande variedade granulométrica.

De acordo com Bauer (2015), as características dos agregados são de grande variabilidade, necessitando de um primoroso estudo e controle de sua qualidade tanto antes como durante a execução da obra. Ainda conforme o autor, os agregados utilizados no concreto devem seguir algumas recomendações:

- Não devem reagir com o cimento e nem ser instáveis perante os agentes que irão entrar em contato com o concreto;
- Não deve ser utilizado agregados originários de rochas macias, friáveis ou de baixa resistência à compressão, ou que contenham pirita, gesso e componentes ferrosos;
- Devem ser isentos de argila e matéria orgânica, ou de materiais que prejudiquem sua aderência à argamassa ou interfiram na pega e no endurecimento;
- Areia de praia, só deve ser utilizada se o teor de NaCl for inferior a 0,08%.

Segundo Ambrozewicz (2012), os agregados ocupam cerca de 75% do volume total do concreto, com isso sua qualidade é de grande importância. Bauer (2015) afirma que os agregados atuam com cerca de 80% do peso do concreto e custeiam em torno de 20% do valor do concreto estrutural sem aditivos para um concreto de resistência característica à compressão da ordem de 15 MPa. O uso dos agregados aumenta o volume da mistura, reduzindo o custo do concreto (PINHEIRO, 2007).

Quanto à classificação dos agregados Ambrozewicz (2012) e Bauer (2015) concordam que, os agregados podem ser classificados segundo: a origem em agregados naturais e industrializados; as dimensões das partículas em agregados

miúdo e graúdo; a massa específica em agregados leves, médios ou normais e pesados.

Para Ambrozewicz (2012) a granulometria de um agregado pode influenciar diretamente a qualidade do concreto, tanto no seu estado plástico, como no estado endurecido. A classificação granulométrica é obtida através do ensaio de peneiramento, onde são verificadas as porcentagens, em massa, retidas, nos conjuntos de peneiras padronizadas.

3.1.3 Água de amassamento

A água é um dos componentes mais importantes para preparação do concreto e argamassas. É usada em quase todos os serviços da construção civil, podendo ser empregada como componente na produção do concreto e, também como ferramenta para realização de limpeza, resfriamento e cura. É um material nobre de construção, sua qualidade é de extrema importância, pois pode influenciar diretamente na qualidade e segurança da obra (AMBROZEWICZ, 2012). Segundo Ambrozewicz (2012), a água utilizada como componente para o amassamento deve garantir a homogeneidade da mistura, não podendo conter impurezas e ainda estar dentro das recomendações prescritas pelas normas técnicas. Ribeiro Júnior (2015) aduz que as impurezas presentes na água podem prejudicar a pega do cimento ou a resistência do concreto. Na produção do concreto deve ser utilizada água potável com o valor do pH entre 6 e 8. Já para Ambrozewicz (2012), as águas potáveis são consideradas satisfatórias quando detém pH entre 5,80 e 8,0, devendo ainda respeitar os limites apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites máximos.

Substâncias	Limites
Matéria orgânica (expressa em oxigênio consumido)	3 mg/L
Resíduo sólido	5.000 mg/L
Sulfatos (expressos em íons SO_4^{2-})	300 mg/L
Cloretos (expressos em íons Cl ⁻)	500 mg/L
Açúcar	5 mg/L

Fonte: Adaptado de AMBROZEWICZ, 2012.

De acordo com Ribeiro Júnior (2015) o papel da água é envolver os grãos e promover a hidratação do cimento, devendo ser empregada na quantidade ideal para realizar sua função como componente do concreto. A relação entre o peso da água e o peso do cimento é chamado de fator água/cimento (a/c), sendo este fator utilizado como uma referência no controle da quantidade de água utilizada, evitando assim o seu excesso no concreto.

Segundo Petrucci (1998), o que traz maiores danos ao concreto não é a qualidade da água, mas sim o uso em excesso, que pode oferecer maior risco e trazer maiores prejuízos. Ribeiro Júnior (2015) cita que a utilização da água em excesso no preparo do concreto resultará numa pasta mais elástica, conseqüentemente acarretará a perda de aderência entre a pasta e o agregado, com isso o concreto perderá resistência. A NBR 6118 (2014) através de ensaios comprobatórios estabelece uma relação água/cimento para traços do concreto, fazendo uma correlação entre a qualidade do concreto e a classe de agressividade do ambiente. A Tabela 2, a seguir, expressa os requisitos mínimos a serem adotados, garantindo uma maior durabilidade e resistência à compressão do concreto.

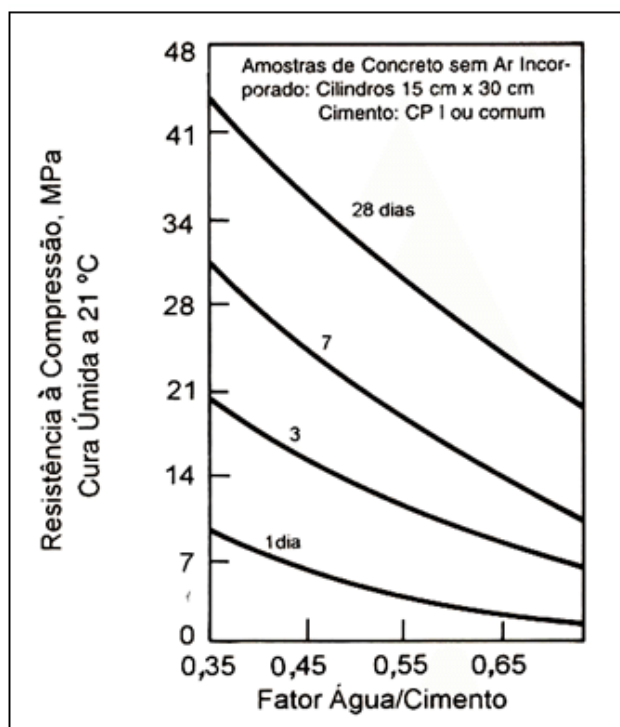
Tabela 2 - Correspondência entre a relação água/cimento e a classe de agressividade ambiental.

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento, em massa, para concreto armado	$\leq 0,65$	$\leq 0,66$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

As propriedades mecânicas e a resistência do concreto são diretamente influenciadas pela relação água/cimento, como mostrado na Figura 2. Quanto maior o consumo de cimento e menor o de água na mistura, mais resistente será o concreto (AMBROZEWICZ, 2012).

Figura 2 - Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento.



Fonte: ABROZEWICZ, 2012.

3.2 Propriedades

As características do concreto estão intrinsecamente relacionadas com as propriedades dos materiais que o compõem e da proporção adequada entre eles, assim como do modo de execução e controle pós-fabricação.

Ambrozewicz (2012) destaca atributos cruciais para o concreto, tais como: trabalhabilidade, resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade. Estas propriedades estão diretamente relacionadas com:

- Boa qualidade dos materiais;
- Proporção adequada entre os componentes;
- Transporte, lançamento e adensamento corretos;
- Dimensionamento estrutural;
- Execução de fôrmas e armaduras;
- Concretagem e cura bem executados.

O presente estudo preocupou neste tópico em específico, em discorrer, baseando-se na literatura encontrada, sobre as propriedades do concreto, fazendo

uso de duas divisões básicas e essenciais existentes no que diz respeito ao material e sua composição estrutural, quais sejam, o concreto fresco e o concreto endurecido.

3.2.1 Propriedades do concreto fresco

De acordo com Almeida (2002), o concreto fresco possui duas principais propriedades estruturais a serem analisadas: a consistência/trabalhabilidade e a exsudação. A primeira, diz respeito àquelas propriedades intrínsecas à mistura fresca, que correspondem à mobilidade da massa criada e a coesão entre os elementos que formam, levando-se em consideração a uniformidade e compacidade do concreto (ALMEIDA, 2002).

O ensaio de determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone, também conhecido como *Slump test*, é utilizado para determinar a consistência do concreto, em que se avalia o abatimento do concreto fresco após ser enformado, compactado e desenformado. A Tabela 3 apresenta a classificação das consistências do concreto de acordo com o abatimento obtido no ensaio (AMBROZEWICZ, 2012).

Tabela 3 - Classificação das consistências do concreto.

Consistência	Abatimento (cm)
Seca	0 a 2
Firme	2 a 5
Média	5 a 12
Mole	12 a 18
Fluida	18 a 25

Fonte: AMBROZEWICZ, 2012.

A exsudação por sua vez, é a pré-disposição existente na água de amassamento, para sobressair-se à superfície do concreto recém-lançado e, como consequência desta, a umidade excessiva existente na parte superior do concreto, que cria ou abre precedentes, para um concreto poroso e de menor resistência (ALMEIDA, 2002).

Vale mencionar que a exsudação pode ser controlada, com a proporcionalidade de elementos, cuidando, principalmente para que não haja a utilização de água em excesso, ou, na impossibilidade deste controle, pode-se contornar o ocorrido, com a

adição de grãos relativamente finos que compensem a deficiência dos agregados, balanceando a proporcionalidade dos elementos (AMBROZEWICZ, 2012).

É de grande importância que se tenha o controle das propriedades do concreto fresco, pois pode influenciar na qualidade final do concreto, como cita Bauer (2015):

Tendo em vista a qualidade do concreto endurecido, as propriedades desejáveis para o concreto fresco são as que asseguram a obtenção de mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, e que, depois do endurecimento, se apresenta homogênea, com o mínimo de vazios (BAUER, 2015).

3.2.2 Propriedades do concreto endurecido

Em relação ao concreto endurecido é preciso atentar-se a algumas propriedades e características que o qualificam de modo a verificar as possibilidades e limitações que condicionam a escolha do material. A Tabela 4 apresenta algumas destas propriedades e aspectos do concreto com que estão relacionadas.

Tabela 4 - Classificação Geral das Características e Propriedades.

Características e propriedades	Aspectos e relações
Densidade	- Concretos leves: isolamento térmico - Concretos pesados: blindagem, radioatividade
Atrito	Pavimentos e tubulações
Absorção	Aparência, durabilidade, oxidação
Permeabilidade-líquidos	Impermeabilidade, durabilidade a corrosão,
Permeabilidade-gases	Durabilidade a oxidação
Calor específico	Aquecimento na cura
Dilatação térmica	Fissuramento térmico
Condutibilidade térmica	Cálculos estáticos, aquecimento na cura
Condutibilidade som	Ensaio não destrutivo
Transmissão e absorção de sons	Insonorização
Resistência ao fogo	Sobrevivência a sinistros
Deformações (espontânea, elástica, plástica, lenta)	Fissuramento, cálculos estruturais, aparência
Ruptura	Ensaio
Resistência à ação de agentes naturais e químicos	Durabilidade
Reação álcali-agregados	Durabilidade
Corrosão das armaduras	Durabilidade
Aderência	Segurança e fissuramento
Fissuramento	Permeabilidade e durabilidade

Fonte: Bauer (2014).

Quanto ao peso específico, é preciso compreender que ele irá depender de diversos fatores e principalmente da natureza dos agregados e do modo utilizado na compactação.

No entanto, Almeida (2002) menciona que a variação do peso específico será pequena e, de acordo com a literatura, considerando-se para o concreto simples o valor de 2,3 tf/m³ e para o concreto armado de 2,5 tf/m³.

A NBR 6118:2014 adota os seguintes valores, para efeito de cálculo: peso específico do concreto simples 2400 kg/m³ e para o concreto armado de 2500 kg/m³.

Outra propriedade de importante análise do concreto endurecido é a deformação, que pode ser causada por variação das condições ambientes: retração e deformações provocadas por variações de umidade e temperatura ambiente; ou pode ser oriunda da ação de cargas externas: deformação imediata e deformação lenta (AMBROZEWICZ, 2012).

Quanto às deformações de natureza das variações das condições ambientes, Almeida (2002) aduz que:

A retração é a diminuição de volume do concreto desde o fim da cura até atingir um estado de equilíbrio compatível com as condições ambientes. A retração se processa mais rapidamente até uns 3 a 4 meses e depois mais lentamente. Pode-se admitir que, para as dimensões usuais, um quarto da retração se dá aos 7 dias, um terço aos 14 dias e metade em 1 mês, três quartos em 6 meses. Por sua vez, a variação da temperatura ambiente não se transmite instantaneamente ao concreto, mas tem uma ação retardada sobre a variação da temperatura deste, sendo de amplitude tanto menor quanto mais afastado da superfície exposta ao ar estiver o ponto considerado. (ALMEIDA, 2002).

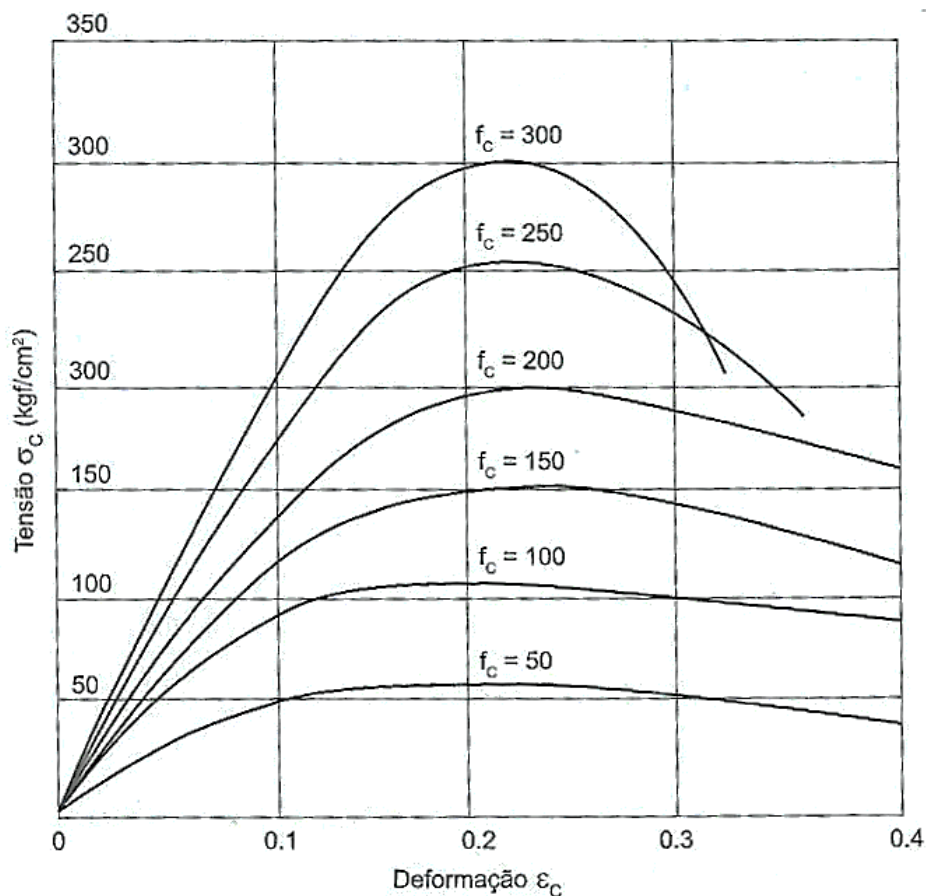
As deformações que são provocadas pela ação de cargas externas são definidas por Almeida (2002) como deformação imediata e lenta, sendo a primeira aquela observada por ocasião da aplicação da carga e a segunda, equivalente ao acréscimo de deformação que ocorre no concreto, no caso em que a solicitação é mantida, e com a manutenção da carga ao longo do tempo.

A resistência à compressão simples é a característica considerada como a mais importante do concreto, haja visto que este trabalha predominantemente à compressão, determinada em corpos de prova cilíndricos padronizados em norma para possibilitar que resultados de diferentes concretos possam ser comparados. Tendo-se o valor da resistência à compressão de um concreto é possível estimar empiricamente outras características através da correlação de valores, tais como: coeficiente de Poisson, resistência à tração, módulo de elasticidade, entre outros. Já

a resistência à tração depende de vários fatores, principalmente da aderência dos agregados com a argamassa (AMBROZEWICZ, 2012).

De acordo com Almeida (2002), o diagrama tensão-deformação representa a deformação do concreto obtida em ensaio à compressão axial de um corpo de prova cilíndrico. A Figura 3 apresenta as curvas do diagrama tensão-deformação para concretos com diferentes resistências (f_c), consistindo em um trecho inicial relativamente reto, o qual corresponde a um comportamento elástico do concreto para tensões baixas, sendo a deformação linearmente proporcional à tensão, passando por um ponto de máxima tensão, que corresponde à resistência do concreto à compressão na sua idade, apresentando no final um ramo decrescente.

Figura 3 – Diagramas tensão-deformação.



Fonte: Ambrozewicz (2012.).

3.3 Patologia

Visando melhor análise e compreensão aprofundada das manifestações patológicas no concreto, têm emergido dentre todas as já saturadas áreas estudadas, uma nova área de pesquisas e estudos, que tem sido denominada como patologia do concreto. Nesse sentido, Souza e Ripper (1998) explicam a terminologia:

Designa-se genericamente por Patologia das estruturas esse novo campo da engenharia das construções que se ocupa das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas (SOUZA; RIPPER 1998).

A durabilidade está diretamente ligada a inúmeros fatores, compreendendo que são incontáveis as causas que levam uma estrutura a sofrer danos e, por isso, é tão importante compreender o estudo destas patologias.

A questão da durabilidade pode ter origens diversas que se dividem entre fatores externos, internos, ou da mistura destes dois. Assim, Neville (1997) explica que a deterioração é a manifestação da durabilidade inadequada, podendo ser originada por fatores externos ou por causas intrínsecas (no interior do próprio concreto).

As principais causas de deterioração, geralmente, no que diz respeito à literatura e a análise desta, se dividem em grupos, que se subdividem em tópicos, que os agrupam em tipos de causa, a fim de facilitar a compreensão. Assim, primariamente separam-se em três espécies de causas, quais sejam, as causas físicas, as químicas e as mecânicas. Sendo que,

a primeira diz respeito principalmente aos efeitos de altas temperaturas ou de diferenças de coeficiente de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratado, a segunda, refere-se à deterioração que inclui as reações álcali-silica e álcali-carbonato. O ataque químico externo ocorre principalmente pela ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono e muitos líquidos e gases naturais ou industriais e por fim, as causas da deterioração mecânica que dizem respeito ao impacto, abrasão, erosão ou cavitação (NEVILLE, 1997).

Vale ainda mencionar, sobre os danos estruturais que, estes, em sua grande maioria, senão em sua totalidade, representam danos estruturais evolutivos, ou seja, o comprometimento da estabilidade é gradativo e varia de prazo a prazo, dependendo das especificidades da estrutura.

Pensando nesta questão, Bauer (2015) aduz que a deterioração de uma estrutura precisa ser compreendida sob a análise de quatro grupos distintos entre si: o grupo composto por aquelas estruturas que possuem erros no projeto estrutural; o composto pelo emprego de materiais inadequados; o composto pelos erros na

execução e aquele composto pelas estruturas que lidam com a agressividade do meio ambiente.

No que tange esta subdivisão apresentada pelo autor, fica fácil identificar no caso prático, qual dano relaciona-se com o grupo em questão. A título de exemplo, pode-se mencionar, sobre o primeiro grupo, decorrente das estruturas que possuem erros no projeto estrutural, a falta de detalhes ou ao mal detalhamento destes.

Outro exemplo, referente a outro grupo ensinado pelo autor supramencionado, que diz respeito ao emprego de materiais inadequados, podem ser exemplos, a falta de critérios, ou de atenção, no momento de escolher e selecionar as marcas e produtos que irão ser utilizados.

Souza e Ripper (1998), Couto (2013) e Bauer (2015) mencionam que, as fissuras e a desagregação são sintomas visíveis, facilmente constatados e por si só, alarmantes da deterioração de uma obra. Souza e Ripper (1998) ainda denominam as fissuras como a manifestação patológica das estruturas de concreto. Isso, porque são, segundo eles, o dano de ocorrência mais comum, partindo das deformações muito acentuadas, além de ser aquele que mais chama atenção, por ser visivelmente detectado. Para leigos, é o atestado ótico de que “algo não está certo”. Mas, para os estudiosos, bem como para os profissionais, e, interessados na completude saudável da obra, é preciso atentar-se à subdivisão das fissuras e os perigos que estas representam.

Assim, Bauer (2015) ensina que são dois tipos de fissuras: as “vivas”, e as “mortas”, podendo também serem chamadas, respectivamente, de ativas e passivas. Esta nomenclatura se deve à movimentação das fissuras, onde, as vivas movimentam-se, enquanto as mortas possuem estabilidade. Além do aspecto “feio”, é preciso atentar-se sob o cerne da corrosão e possibilidade de penetração de agentes agressivos, que correspondem ao principal perigo da existência das fissuras.

Por fim, o segundo sintoma mencionado por Souza e Ripper (1998), Couto (2013) e Bauer (2015) é a desagregação do concreto que se caracteriza pela perda da coesão e pela falta de capacidade de suportar os esforços que atuaram sobre o mesmo.

3.4 Ensaio para caracterização do concreto

O concreto vem sendo utilizado em grande escala dentro da construção civil, com isso é de grande importância a utilização dos ensaios, para caracterização e controle das suas propriedades. Para Bauer (2015), considerando que o concreto é um material constituído por diversos elementos com formas, dimensões e propriedades variadas (pedra, areia, cimento e água), o controle de sua execução e dos materiais empregados adquire fundamental importância.

Segundo Palacios (2012), as avaliações estruturais podem ser necessárias ao longo da vida útil da estrutura, quando não apresenta conformidade na resistência do concreto, quando há mudanças no uso, ao introduzir carregamento em idade precoce, para determinar a remoção de escoramentos, na avaliação das condições do concreto, entre outras.

O monitoramento constante é um procedimento necessário em estruturas de concreto a fim de detectar preventivamente um problema potencial da estrutura, no que diz respeito à resistência e qualidade do concreto utilizado. A verificação preventiva possibilita a utilização de métodos mais econômicos para reparar uma possível patologia na estrutura (LORENZI *et al.*, 2016).

Os ensaios para caracterização do concreto são divididos em dois grupos tendo como base os danos estruturais causados, sendo ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos. Os ensaios destrutivos, referindo-se ao nome, são aqueles que causam danos para a estrutura e deve ser reparado após o teste. Já os ensaios não destrutivos, também se referindo ao nome, são ensaios que não afetam a amostra ou causam pequenos danos que são insignificantes, ou seja, não é necessário reparar o elemento após o ensaio (PALACIOS, 2012).

Segundo Pereira e Medeiros (2012) geralmente, para estimar a resistência da estrutura no local, tem sido utilizado ensaios destrutivos, no qual é feita a extração e ruptura de testemunhos da estrutura. Os ensaios não destrutivos permitem uma avaliação mais econômica do concreto na estrutura por não ser necessário a extração de testemunhos, além de não gerar danos significativos ao elemento. Porém, os ensaios não destrutivos apresentam a limitação de não serem aceitos por norma como um ensaio substitutivo aos destrutivos, mas apenas como ensaios complementares ou adicionais aos ensaios destrutivos. Outra limitação desses métodos é a exigência

de treinamento e capacitação do responsável em realizar o ensaio e interpretar os resultados obtidos.

3.4.1 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos, por compreensão lógica diante do tópico supramencionado, serão aqueles que, após sua realização, deixarão algum sinal, marca ou resquício de sua realização na peça ou no corpo de prova submetido a ele, não significando a sua inutilização (SILVA, 2013).

Esta modalidade de ensaios é importante e deve ser estudada, pois representa a possibilidade de verificação dos materiais, comprovando a adequação das propriedades estruturais destes para o uso.

É o principal controle de qualidade dos produtos e materiais, garantindo-se a primazia da confiabilidade e segurança para com o cliente, empresa e profissional envolvidos no que tange a construção em questão (PALACIOS, 2012).

Podemos citar como exemplos principais desse tipo de ensaio e as normas da ABNT que os regem:

- Ensaio de compressão do concreto: NBR 5739:2018 Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos;
- Ensaio de compressão diametral: NBR 7222:2011 Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

O ensaio de compressão do concreto é utilizado para verificar se o material atende as especificações estabelecidas em projeto. O ensaio consiste no rompimento de corpos de provas, podendo eles serem moldados utilizando o mesmo concreto da estrutura ou pela extração direta da própria estrutura, seguindo as exigências estabelecidas pela NBR 7680-1 (ABNT, 2015). Para o rompimento dos corpos de prova é utilizado uma prensa hidráulica que mede a carga de ruptura de cada elemento ensaiado, sendo possível determinar a resistência à compressão do concreto pela divisão do valor da carga de ruptura pela área da superfície do corpo de prova (AMBROZEWICZ, 2012).

3.4.2 Ensaios não destrutivos

Com a divisão supramencionada, a título de contextualização, é importante mencionar que, o ensaio não destrutivo é um método evolutivo que, passou e ainda passa por inúmeras tentativas e avanços, em busca de melhores resultados.

Os ensaios não destrutivos se mostram muito eficientes, visto que podem ser realizados em diversos pontos da estrutura e com o número de ensaios necessário para ter a precisão e confiabilidade assegurada (LORENZI *et al.*, 2016).

Lorenzi *et al.* (2016) cita que o uso de métodos não destrutivos é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente. A viabilidade mencionada pelo autor, diz respeito ao baixo custo e à segurança, uma vez que sua execução não expõe o operador à perigo.

Dada sua natureza predominantemente não invasiva, os ensaios não destrutivos se constituem em uma das principais ferramentas de controle da qualidade de materiais e produtos, e já são amplamente utilizados em diversas atividades, tais como na indústria aeroespacial, no ramo automobilístico, no ramo elétrico e na construção naval (LORENZI *et al.*, 2016).

Para estruturas antigas ou existentes, o ensaio pode ser empregado para avaliar a integridade da estrutura e sua capacidade para resistir aos esforços solicitantes. No caso de novas estruturas, estes ensaios auxiliam no monitoramento do ganho de resistência, ou, podem ser empregados para sanar possíveis incertezas em relação à qualidade do concreto empregado (EVANGELISTA, 2002).

De acordo com Evangelista (2002), dentre as propriedades do concreto que podem ser avaliadas por meio de ensaios não destrutivos, tem-se: massa específica, módulo de elasticidade e resistência. Ainda podem ser investigadas a dureza superficial, absorção, permeabilidade, condições de umidade, a localização das armaduras, existência de vazios e fissuração.

Vale citar que a literatura demonstra que essas técnicas geralmente são aplicadas em obra, na estrutura real, graças à praticidade, como forma de prevenir e erradicar possíveis complicações no que tange a durabilidade da estrutura, e, também como forma de avaliação do material em fase construtiva e de vida útil.

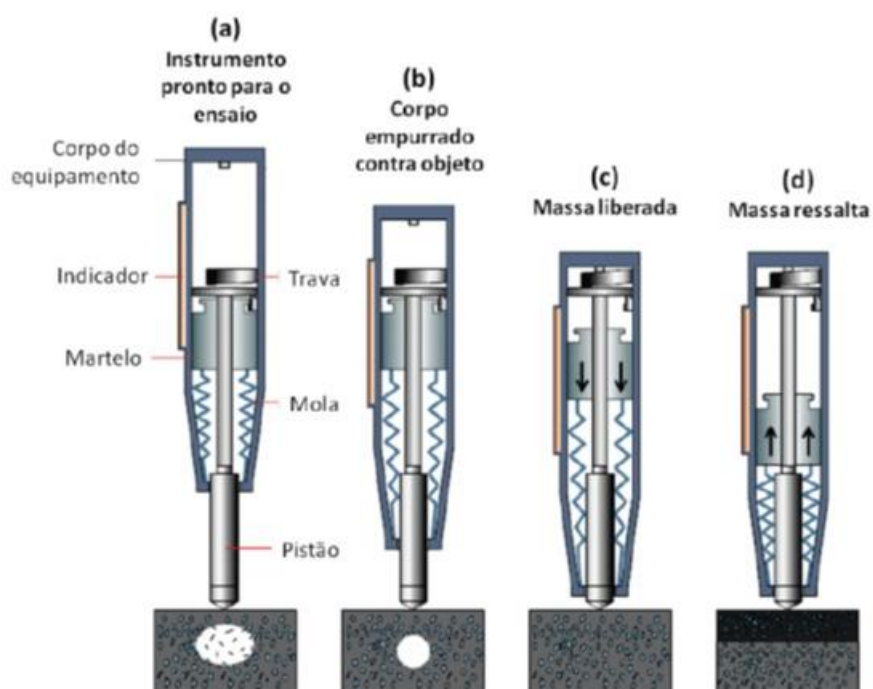
Existem inúmeras técnicas para realização de ensaios não destrutivos. Neste trabalho serão abordados somente os ensaios de esclerometria e ultrassom.

3.4.2.1 Ensaio do índice esclerométrico

O ensaio é regido pela norma da ABNT NBR 7584:2012 onde é definido como “método de ensaio não destrutivo que mede a dureza superficial do concreto, fornecendo elementos para avaliação da qualidade do concreto endurecido”.

O equipamento utilizado é um massa-martelo que é impulsionado por uma mola que se choca, através de uma haste, com a ponta, em forma de calota esférica, ortogonalmente com a área de estudo. O valor obtido de impacto do esclerômetro de reflexão sobre uma área de superfície de concreto é chamado de índice esclerométrico e, que corresponde ao recuo do martelo (ABNT, 2012). Na Figura 4 é demonstrado o mecanismo de funcionamento do esclerômetro.

Figura 4 - Mecanismo de funcionamento do esclerômetro.



Fonte: Pereira e Medeiros, 2012.

Para a execução do ensaio deve-se tomar alguns cuidados quanto à superfície em estudo, que são explicitados pela norma da ABNT NBR 7584:2012:

- As superfícies devem estar secas ao ar;
- Superfícies preferencialmente planas;
- Dar preferência a superfícies confinadas por fôrmas absorventes e lisas;

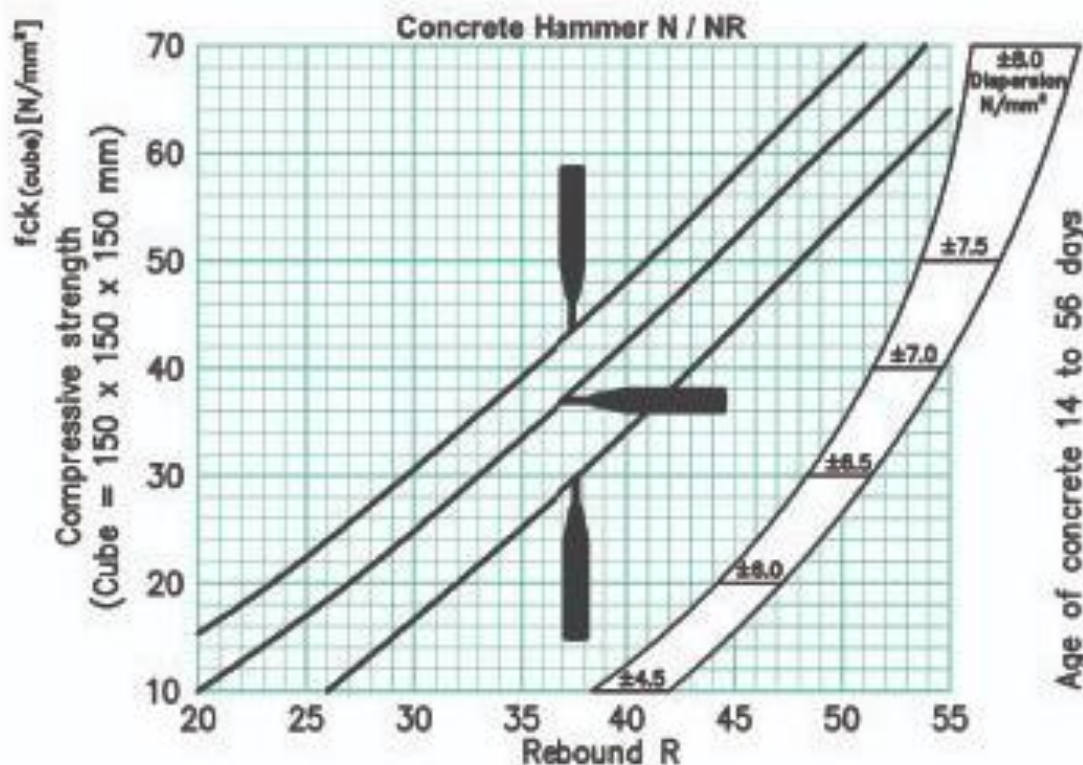
- Em superfícies de concretos equivalentes na construção de superfícies horizontais, devido aos fenômenos de segregação e exsudação, o ensaio só pode ser realizado se for retirada as camadas alteradas;
- Evitar superfícies úmidas ou carbonatadas; se usadas devem ser preparadas e aplicados coeficientes de correção.

A área a ser ensaiada, compreendida entre 8.000 mm² e 40.0000 mm², deve ser polida com prisma ou disco de *carborundum* e limpa, situadas preferencialmente nas faces verticais afastadas de pontos de heterogeneidade como segregação e elevada taxa de armadura, distantes no mínimo 50 mm dos cantos e arestas e estar geometricamente uniformemente distribuídas pela região da estrutura (ABNT, 2012).

O índice esclerométrico médio final corresponde ao resultado da média aritmética dos 16 impactos em uma única área de ensaio, sendo desprezados valores com discrepância maior que 10% do valor médio. Se necessário deve-se corrigir o valor médio do índice para um correspondente à posição horizontal, de acordo com os coeficientes fornecidos pelo fabricante (ABNT, 2012).

O valor de resistência à compressão do concreto da estrutura analisada pode ser correlacionado com o índice esclerométrico obtido no ensaio, usando de uma curva de correlação que cada equipamento possui, demonstrado na Figura 5. Para a correlação dos valores foram traçadas, para cada análise, uma linha vertical posicionada no eixo horizontal de acordo com o valor do índice esclerométrico, obtendo uma intersecção entre esta linha e a curva conforme a posição do aparelho utilizada no ensaio. Neste ponto de intersecção foi traçada uma linha horizontal que ao unir ao eixo vertical do diagrama permitiu que fosse feita a leitura do valor da resistência à compressão estimada para o concreto. O valor da resistência foi lido no eixo vertical, cujo nomeação na figura é *compressive strength*, ou seja, esforço de compressão expressado em Mega Pascal (MPa).

Figura 5 - Curva de correlação do índice esclerométrico com a resistência à compressão.



Fonte: NL SCIENTIFIC, 2019.

Ressalta-se que a NBR 7584 (ABNT, 2012) recomenda que o ensaio de esclerometria seja usado apenas como um método complementar para ensaios de resistência à compressão.

3.4.2.2 Ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

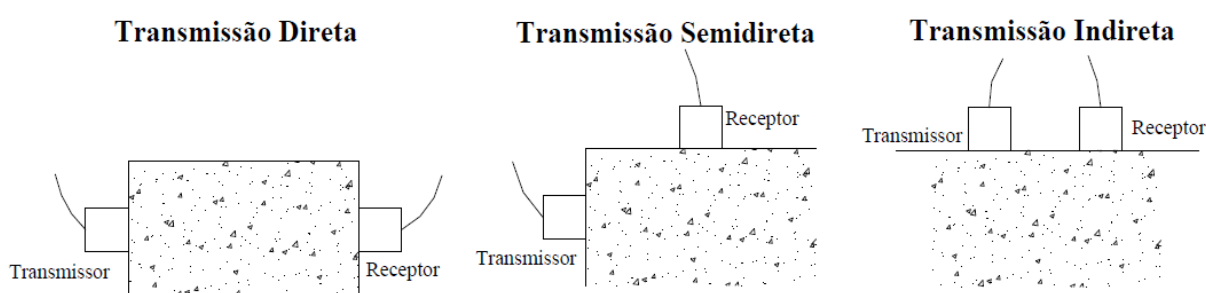
Outro tipo de ensaio não destrutivo de concreto se baseia em vibrações próximas das do som como o método de determinação da velocidade de propagação do som no concreto, no qual se utiliza ultrassons que emitem ondas de pequenos comprimentos e frequências correspondentes, superiores a 20 Hz. As características da propagação de ondas ultrassônicas podem ser usadas para caracterizar a composição, a estrutura, as propriedades, a densidade e a geometria do material (BAUER, 2014). O ensaio é normatizado pela NBR 8802:2019 - Concreto endurecido-Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

A superfície de estudo do corpo de prova ou elemento estrutural deve ser regularizada de modo a estarem, planas, lisas e limpas, utilizando processo mecânico

ou com camada máxima de 1 mm de pasta de cimento ou resina epoxídica NBR 8802 (ABNT, 2019).

Deve-se garantir que o equipamento esteja calibrado e que seja aplicado uma camada de acoplante nas faces dos transdutores ou na superfície do concreto, bem como que o posicionamento dos transdutores seja de acordo com o arranjo de transmissão (direta, semidireta, indireta), conforme ilustrado na Figura 6 NBR 8802 (ABNT, 2019).

Figura 6 - Tipos de transmissões das ondas ultrassônica na superfície do concreto.



Fonte: CÂMARA, 2006.

De acordo com a NBR 8802:2019, a velocidade de propagação das ondas é calculada conforme Equação 1, sendo utilizada para análise da qualidade e homogeneidade do concreto conforme classificação da Tabela 5, proposta por Neville (1981).

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo V a velocidade de propagação, L a distância entre os transdutores de envio e recebimento, e t o tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção.

Tabela 5 - Classificação da qualidade do concreto conforme a velocidade do pulso ultrassônico.

Velocidade de propagação linear (km/s)	Qualidade do concreto armado
$v > 4,5$	Excelente
$3,6 < v < 4,5$	Boa
$3,0 < v < 3,6$	Aceitável
$2,1 < v < 3,0$	Pobre
$v < 2,1$	Muito pobre

Fonte: NEVILLE, 1981.

4 METODOLOGIA

O procedimento prático consistiu em analisar vigas do empreendimento estudado. Foram selecionadas três vigas da edificação para a realização do experimento, nas quais foram sujeitas ao ensaio de esclerometria e ultrassom. Estes elementos de ensaio foram limitados em 3 vigas pelo fato de que, na data do ensaio, apenas estas se encontravam com as faces laterais expostas, ou seja, nas demais vigas a remoção das formas ainda não tinham sido realizadas.

O ensaio de esclerometria foi feito com 21 e 28 dias, contados a partir da data de concretagem dos elementos, o ensaio de ultrassom e de resistência a compressão foram realizados aos 28 dias após a concretagem. Os ensaios de esclerometria e ultrassom foram realizados simultaneamente na estrutura de concreto armado, nas idades de 21 e 28 dias. O ensaio de resistência à compressão foi executado nos corpos de prova retirados na data da concretagem, sendo realizado aos 28 dias, para controle tecnológico no laboratório da fornecedora do concreto, que posteriormente forneceu os resultados do ensaio para o cliente.

Após a realização de todos os ensaios, foi possível analisar os dados obtidos fazendo as devidas correlações dos resultados obtidos nos ensaios.

4.1 Materiais

O concreto requerido na obra foi de resistência característica à compressão de 25,0 MPa. O lançamento foi feito pelo método convencional, distribuído nas vigas e lajes do pavimento a ser estudado. Na Figura 7 é representada a planta de formas do pavimento em que foi lançado o concreto, sendo destacadas, por hachuras, as vigas que foram ensaiadas pelos métodos de esclerometria e ultrassom.

Na data da concretagem foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de concreto de $\varnothing 10 \times 20$ cm pela empresa fornecedora do concreto usinado. Segundo o laudo fornecido foram atendidos todos os procedimentos para execução do ensaio estabelecido pela NBR 5739 (ABNT, 2007). Na Figura 8 são demonstrados os corpos de prova moldados no local.

Figura 8 - Corpos de prova moldados na obra.



Fonte: Arquivo próprio.

4.2 Métodos

4.2.1 Ensaio do índice esclerométrico

Na realização deste ensaio, utilizou o esclerômetro de impacto tipo Schimidt modelo N, da empresa brasileira ENGETOTUS, com energia de impacto de 2,25 Nxm que é o tipo de esclerômetro característico para elementos estruturais. A Figura 9 mostra o aparelho usado para realização do ensaio do índice esclerométrico.

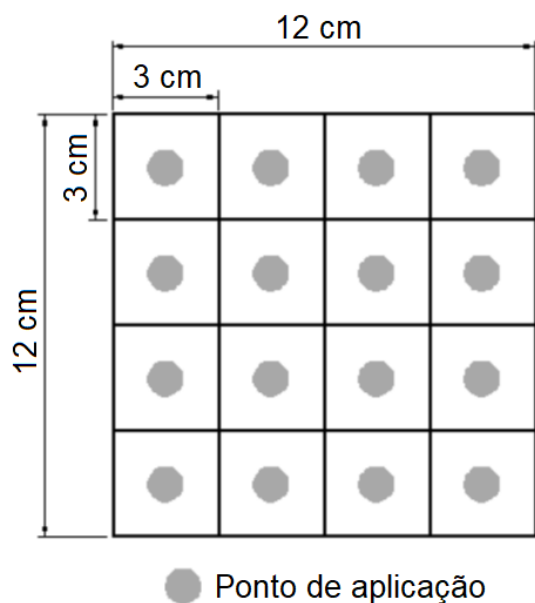
Figura 9 - Instrumento de esclerometria utilizado no estudo.



Fonte: Arquivo próprio.

Para realização deste ensaio, foram seguidos todos os procedimentos e orientações estabelecidos pela NBR 7584 (ABNT, 2012). Primeiramente foi feita a preparação da superfície do concreto a ser ensaiada, realizando o lixamento manual e em seguida o polimento energético com prisma de carborundum, que acompanha o equipamento, usando de movimentos circulares. Todo pó e poeira superficial foram removidos a seco. Como sugerido pela norma, foi feito um reticulado delimitando as áreas a serem ensaiadas, para aplicação do esclerômetro nos pontos definidos conforme demonstrado na Figura 10. Foram realizados 16 pontos de impacto em cada área a ser ensaiada, respeitando a distância mínima de 30 mm entre os eixos dos pontos de impacto. Foi realizado apenas um impacto em cada ponto de aplicação. A calibração do equipamento seguiu os procedimentos descrito no manual do fabricante.

Figura 10 - Área de ensaio com 16 pontos de impacto.



a) Esquema do reticulado



b) Ensaio esclerométrico sendo realizado na demarcação

Fonte: Arquivo próprio.

A Figura 11 apresenta o momento da execução do ensaio de esclerometria. As aplicações foram feitas sempre na posição horizontal e ortogonalmente à área de ensaio. Após o impacto foi feita a leitura do índice de esclerometria no equipamento e anotado os dados.

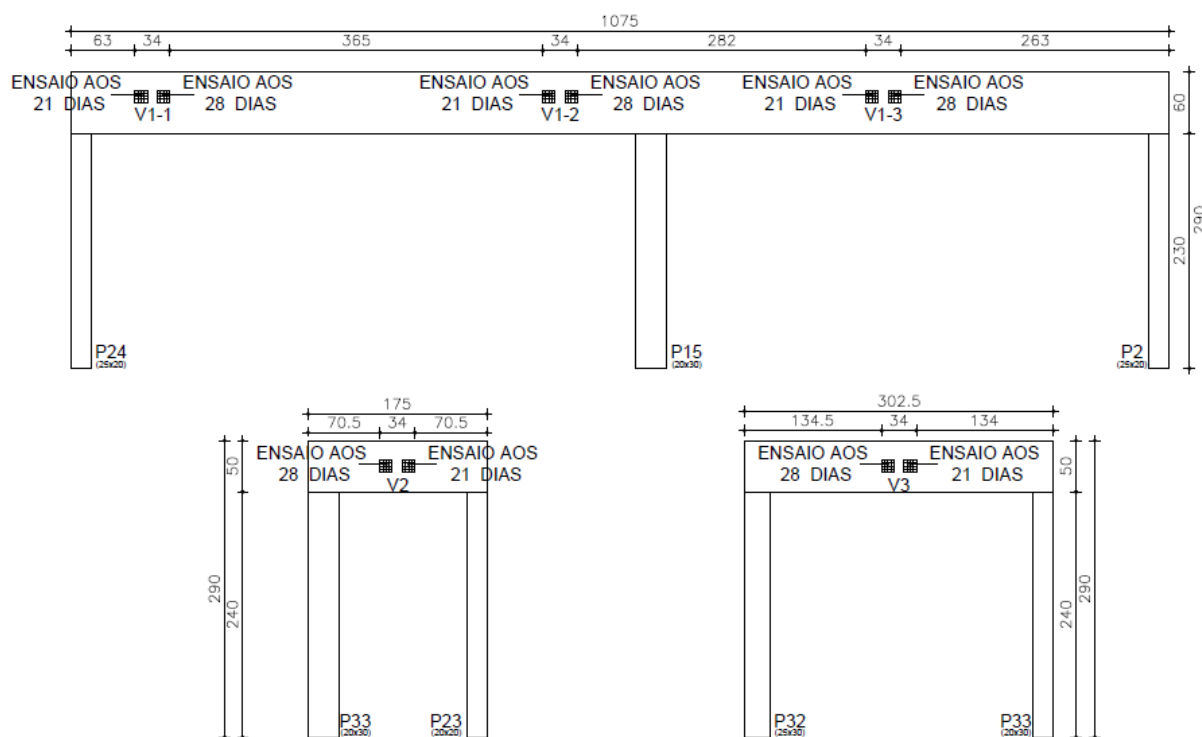
Figura 11 - Realização do ensaio de esclerometria.



Fonte: Arquivo próprio.

O ensaio de esclerometria foi realizado em 5 áreas distribuídas em 3 vigas da estrutura, sendo todas ensaiadas no meio da altura dos elementos. Na viga 1, foram realizados 3 ensaios devido este elemento possuir maior comprimento sem formas e apresentar o maior consumo de concreto das vigas analisadas. Nas vigas 2 e 3 foram realizados 1 ensaio em cada elemento. Na Figura 12 é possível verificar o esquema de localização das áreas ensaiadas em cada viga analisada, salienta-se que na figura são representados somente os trechos que foram submetidos ao ensaio.

Figura 12 – Detalhamento esquemático dos trechos das vigas ensaiadas com localização da área analisada.



Fonte: Arquivo próprio.

Quanto aos momentos fletores atuantes nos elementos analisados, as áreas de ensaio localizadas em V1-1, V1-3 e V-3 apresentaram momentos fletores positivos, e nas áreas de ensaio localizadas em V1-2 e V2 apresentaram momentos fletores negativos.

4.2.2 Ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Na execução do ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi utilizado o equipamento de bolso para ensaio de ultrassom, modelo C369N da empresa italiana MATEST Unipersonale S.p.A., com transdutores de 55 Hz. Todos os procedimentos e orientações estabelecidos pela NBR 8802 (ABNT, 2019) para a realização do ensaio foram seguidos. O equipamento ultrassônico utilizado para a realização dos ensaios é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Instrumento ultrassônico utilizado no estudo.



Fonte: Arquivo próprio.

Inicialmente, foi feita a regularização da superfície dos elementos ensaiados por meio do lixamento manual e posteriormente, realizada a limpeza a seco. Em seguida, foram demarcados os pontos a serem ensaiados com distância de eixo a eixo entre os pontos de 10 cm como mostrado na Figura 14. Previamente à realização dos ensaios, foi realizada a calibração do equipamento de ultrassom utilizando a barra acrílica de referência que acompanha o instrumento, como indicado pelo fabricante.

Figura 14 - Marcação dos pontos no elemento de concreto.



Fonte: Arquivo próprio.

Foi feita a medição da espessura em cada elemento de concreto ensaiado, obtendo a distância que a onda ultrassônica percorreu. Em seguida, colocou-se o emissor e o receptor da onda, no mesmo alinhamento, um de cada lado do elemento estrutural, caracterizando a transmissão direta, para que pudesse ser efetuada a medida do tempo gasto pela onda ultrassônica para atravessar o concreto.

Na realização dos processos de medição e calibração foi necessário a aplicação de um acoplante (vaselina) na interface de contato entre a superfície ensaiada e os transdutores.

O ensaio de ultrassom foi realizado em 3 áreas, sendo 1 área de ensaio em cada viga analisada. Todas as áreas ensaiadas foram demarcadas no meio do vão ao longo dos elementos. A Figura 15 mostra o esquema de localização das áreas ensaiadas para cada viga.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização de todos os ensaios, foram feitas as análises dos dados coletados em campo. A partir dos resultados do ensaio de esclerometria, foi analisado o índice esclerométrico médio ($IE_{\text{médio}}$), que é a média de todos os valores em cada área ensaiada, o índice esclerométrico efetivo (IE_{efetivo}), que é a média de todos os valores em cada área ensaiada eliminando os dados mais distantes de 10% do $IE_{\text{médio}}$ e o índice esclerométrico global (IE_{global}), que é a média dos IE_{efetivo} de todas as vigas analisada. Os resultados do ensaio de esclerometria foram correlacionados para obtenção dos valores estimados para as resistências à compressão do concreto e posteriormente, estes valores foram comparados ao resultado obtido pelo rompimento do corpo de prova feito pela empresa fornecedora do material.

Com os resultados do ensaio de ultrassom, foram analisadas as velocidades do pulso ultrassônico médio ($V_{\text{médio}}$), que representa a média dos cinco pontos na área de ensaio de cada viga. A velocidade média obtida para cada viga foi utilizada para verificar a qualidade do concreto.

5.1 Análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova moldados na obra foram fornecidos pela empresa concreteira “CMP Piumhi”. Foram obtidos na idade de 28 dias. A Figura 16 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão em corpos de provas cilíndricos, conforme NBR 5739.

Figura 16 – Resultados da resistência à compressão do concreto.

grupo cmp		ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO EM CP					
DESC. CLIENTE:	<input type="text"/>	ENDEREÇO:	<input type="text"/>				
PROCEDÊNCIA DA AMOSTRA:	CMP Concreto Usinado – Usina Piumhi				ENSAIO Nº:	002/2019	
REFERÊNCIA:	Resultados de ensaios em corpos de prova cilíndrico Ø10 x 20 cm, em concordância com a NBR 5739.						

Local de Aplicação	Data da Moldagem	Data do ensaio	Idade	Nº do CP	Fck (Mpa)	Carga (Kgf/cm²)	Resistência (Mpa)
PISCINA	07/03/19	04/04/19	28 d	13578	25,0	32810,0	41,8
LAGE E VIGA	07/05/19	04/06/19	28 d	13995	25,0	21560,0	27,5

Passos, 04 de Junho de 2019.

Eng. Cimj- Gerente central de concreto

Dados de Calibração do Equipamento:
Máquina de Ensaio: Prensa Hidráulica Digital - Modelo: 2401230 - Série: 5190 - N° Certificado: 1120509 - Data da Calibração: 17/04/2019 Validade: Abril/2020 - Centro de Inovação e Tecnologia SENAI - FIEMG - Campus CETEC

Fonte: Grupo CMP.

É possível observar que, a resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi de 27,5 MPa, cerca de 110% da resistência característica de projeto de 25 MPa. Portanto, conforme estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) o lote de concreto analisado foi aceito quanto ao atendimento da resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto estrutural.

5.2 Análise dos resultados do ensaio de esclerometria

Os índices esclerométricos obtidos nos ensaios de esclerometria aos 21 e 28 dias após a data da concretagem estão representados, respectivamente, nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Índices esclerométrico obtidos aos 21 dias.

VIGA 1 - 1				VIGA 1 - 2				VIGA 1 - 3			
30	30	29	30	36	33	41	35	32	31	34	32
33	33	29	30	38	34	34	37	34	31	32	32
32	32	30	32	30	38	25	27	34	32	32	33
30	28	30	31	28	24	32	36	36	37	36	32

VIGA 2				VIGA 3			
32	29	31	32	27	32	27	30
29	31	30	39	28	32	30	34
35	28	36	33	28	32	30	31
32	33	30	30	38	30	30	30

Fonte: Arquivo próprio.

Figura 18 - Índices esclerométrico obtidos aos 28 dias.

VIGA 1 - 1				VIGA 1 - 2				VIGA 1 - 3			
40	32	32	32	28	31	37	33	36	34	35	30
31	32	34	31	35	33	39	31	30	34	36	32
33	32	32	34	31	32	36	34	32	32	35	32
34	31	40	35	30	36	34	36	33	31	32	31

VIGA 2				VIGA 3			
30	36	41	31	31	32	34	31
40	40	40	42	32	32	31	31
37	42	42	42	33	31	30	31
35	35	35	39	29	30	30	30

Fonte: Arquivo próprio.

5.2.1 Análise do índice esclerométrico médio

Conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012) foram obtidos os índices esclerométrico de cada área ensaiada. Com resultados em mãos foram analisados estaticamente considerando a área de ensaio de cada elemento. Os valores de $IE_{\text{médio}}$ foram calculados por média aritmética utilizando-se os dados apresentados nas Figuras 17 e 18. Para se obter a média de dispersão da amostra, calculou-se o desvio padrão amostral e o coeficiente de variação em cada área de ensaio. O coeficiente de variação fornece a variação dos dados obtidos na amostra em relação à média e quanto menor for o valor deste coeficiente mais homogêneos são os dados da amostra

analisada, este coeficiente é considerado baixo quando for menor ou igual a 25%, tendo assim um conjunto de dados bem homogêneos

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados obtidos de todos os índices esclerométrico médios, a fim de analisar a variabilidade dessa amostra. Os resultados são apresentados graficamente na Figura 19.

Tabela 6 - Resultados do índice esclerométrico médio aos 21 dias.

Viga	Idade (dias)	Nº de pontos	IE _{médio}	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
V1 - 1	21	16	30,56	1,46	4,77
V1 - 2	21	16	33,00	4,97	15,05
V1 - 3	21	16	33,13	1,86	5,61
V2	21	16	31,88	2,87	9,01
V3	21	16	30,56	2,76	9,02

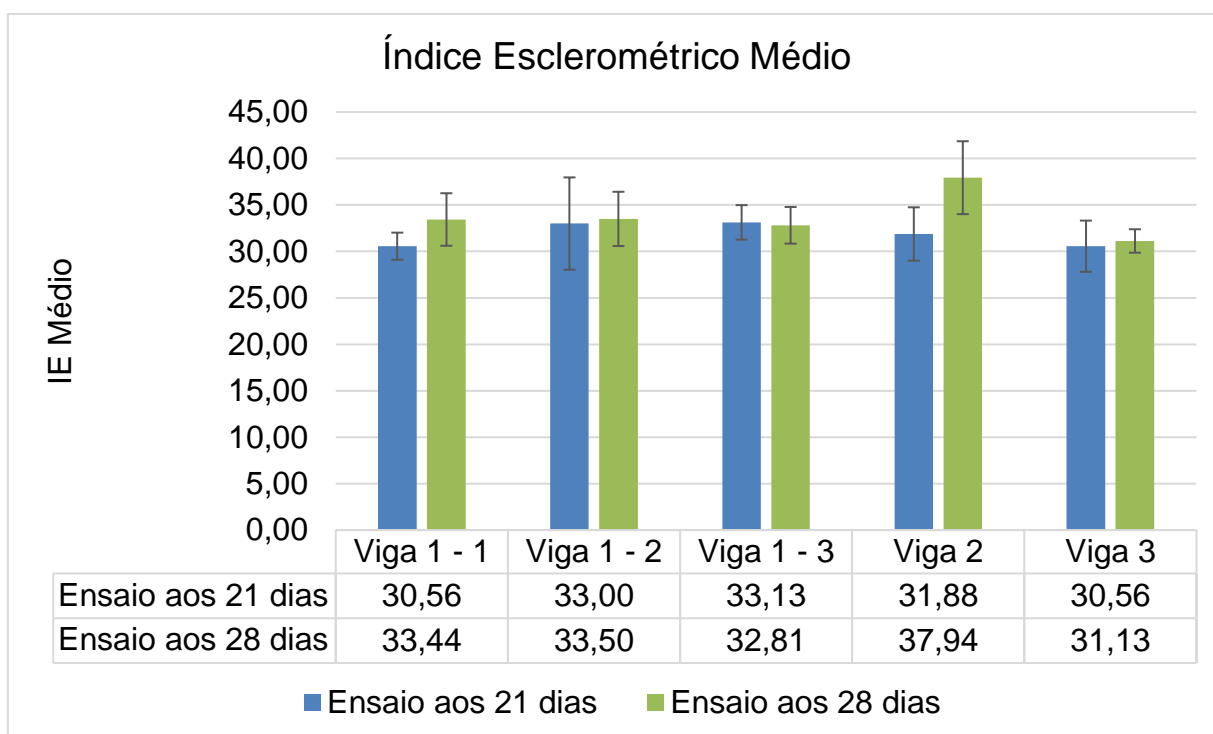
Fonte: Arquivo próprio.

Tabela 7 - Resultados do índice esclerométrico médio aos 28 dias.

Viga	Idade (dias)	Nº de pontos	IE _{médio}	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
V1 - 1	28	16	33,44	2,83	8,46
V1 - 2	28	16	33,50	2,92	8,72
V1 - 3	28	16	32,81	1,97	6,02
V2	28	16	37,94	3,92	10,34
V3	28	16	31,13	1,26	4,04

Fonte: Arquivo próprio.

Figura 19 - Gráfico do índice esclerométrico médio.



Fonte: Arquivo próprio.

Os coeficientes de variação para a idade de 21 dias variaram de 4,77% a 15,05% resultando em um intervalo de 10,28%. Já para a idade de 28 dias essa variação foi de 4,04% a 10,34% resultando em um intervalo de 6,3%, sendo que as médias dos coeficientes de variação foram, respectivamente, 8,69% e 7,52%. Nota-se que o maior intervalo de variação foi para a idade de 21 dias, podendo este valor ter sido influenciado pelo fato do concreto ser mais recente e possuir uma superfície mais úmida, possibilitando assim uma maior variabilidade nos resultados. Já para os valores médios dos coeficientes de variação obtidos, é possível verificar que eles se enquadram nas situações ideais de Engenharia, haja vista que inúmeros fatores podem influenciar nos experimentos in loco. Os desvios padrão indicados aos 28 dias, apresentaram valores inferiores que aos estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2015).

5.2.2 Análise do índice esclerométrico efetivo

Conforme estabelece a NBR 7584 (ABNT, 2012) para os índices esclerométrico efetivos foram feitos a segunda média aritmética dos resultados das áreas de ensaio,

porém eliminando os valores individuais que variam em + ou - 10% do primeiro valor médio. A Figura 20 e 21, mostra em destaque os dados individuais eliminados para realização da segunda média.

Figura 20 – Valores individuais em destaque obtidos aos 21 dias.

VIGA 1 - 1			
30	30	29	30
33	33	29	30
32	32	30	32
30	28	30	31

VIGA 1 - 2			
36	33	41	35
38	34	34	37
30	38	25	27
28	24	32	36

VIGA 1 - 3			
32	31	34	32
34	31	32	32
34	32	32	33
36	37	36	32

VIGA 2			
32	29	31	32
29	31	30	39
35	28	36	33
32	33	30	30

VIGA 3			
27	32	27	30
28	32	30	34
28	32	30	31
38	30	30	30

Fonte: Arquivo próprio.

Figura 21 – Valores individuais em destaque obtidos aos 28 dias.

VIGA 1 - 1			
40	32	32	32
31	32	34	31
33	32	32	34
34	31	40	35

VIGA 1 - 2			
28	31	37	33
35	33	39	31
31	32	36	34
30	36	34	36

VIGA 1 - 3			
36	34	35	30
30	34	36	32
32	32	35	32
33	31	32	31

VIGA 2			
30	36	41	31
40	40	40	42
37	42	42	42
35	35	35	39

VIGA 3			
31	32	34	31
32	32	31	31
33	31	30	31
29	30	30	30

Fonte: Arquivo próprio.

Para se obter a média de dispersão da amostra, calculou-se o desvio padrão amostral e o coeficiente de variação em cada área de ensaio. Os resultados do índice esclerométrico efetivo são apresentados nas Tabelas 8 e 9, sendo representados graficamente na Figura 22 para melhor comparação.

Tabela 8 - Resultados do índice esclerométrico efetivo aos 21 dias.

Viga	Idade (dias)	Nº de pontos	IE _{efetivo}	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
V1 - 1	21	16	30,56	1,46	4,77
V1 - 2	21	8	33,75	2,05	6,08
V1 - 3	21	15	32,87	1,60	4,86
V2	21	14	31,36	2,66	8,47
V3	21	12	30,25	1,36	4,49

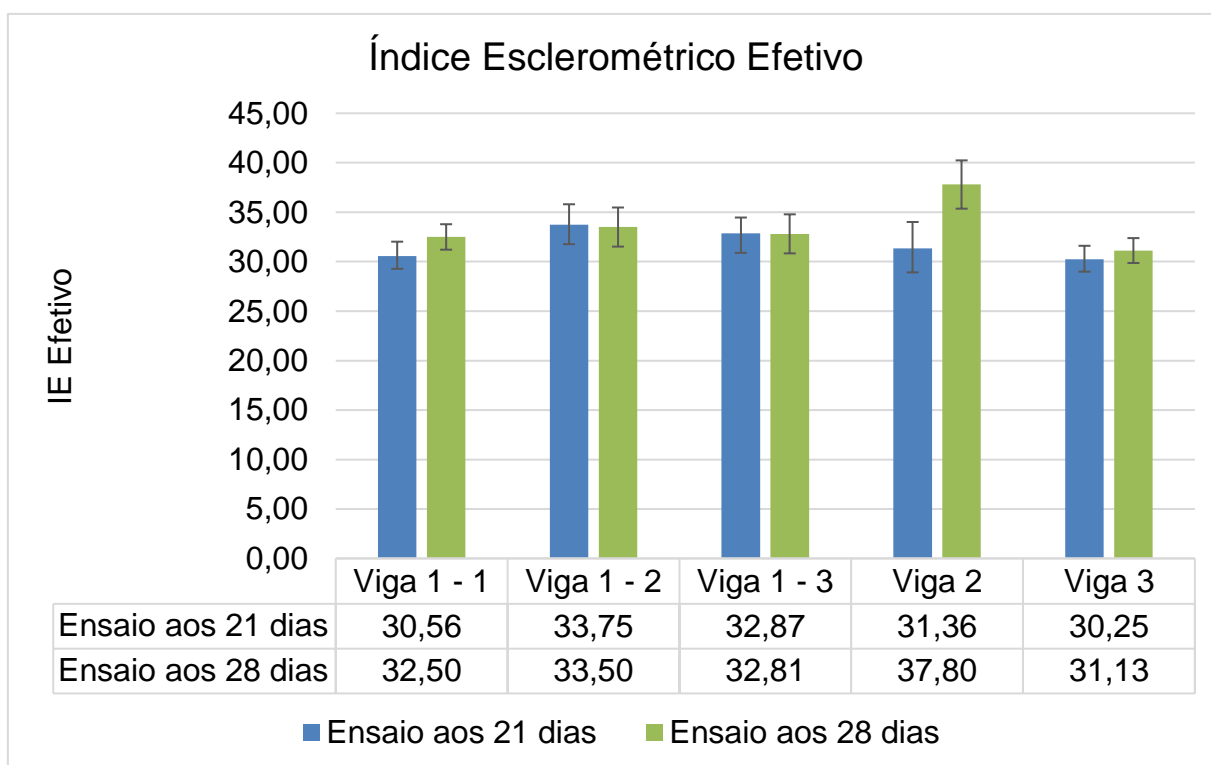
Fonte: Arquivo próprio.

Tabela 9 - Resultados do índice esclerométrico efetivo aos 28 dias.

Viga	Idade (dias)	Nº de pontos	IE _{efetivo}	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
V1 - 1	28	14	32,50	1,29	3,96
V1 - 2	28	12	33,50	1,98	5,90
V1 - 3	28	16	32,81	1,97	6,02
V2	28	10	37,80	2,44	6,46
V3	28	16	31,13	1,26	4,04

Fonte: Arquivo próprio.

Figura 22 - Gráfico do índice esclerométrico efetivo.



Fonte: Arquivo próprio.

Os coeficientes de variação para a idade de 21 dias variaram de 4,77% a 8,47% resultando em um intervalo de 3,70%, já para a idade de 28 dias essa variação foi de 3,96% a 6,46% resultando em um intervalo de 2,50%. Nota-se que o maior intervalo de variação foi novamente para a idade de 21 dias e a explicação é a mesma ao item anterior: idade do concreto e superfície ensaiada úmida. As médias dos coeficientes de variação foram, respectivamente, 5,73% e 5,27%, que é considerada baixa, pois neste caso foram eliminados os valores individuais que estavam afastados de mais de 10% da média, com isso houve uma diminuição no coeficiente de variação resultando em um conjunto de dados mais homogêneos devido os valores individuais tenderem à média efetiva.

5.2.3 Análise do índice esclerométrico global

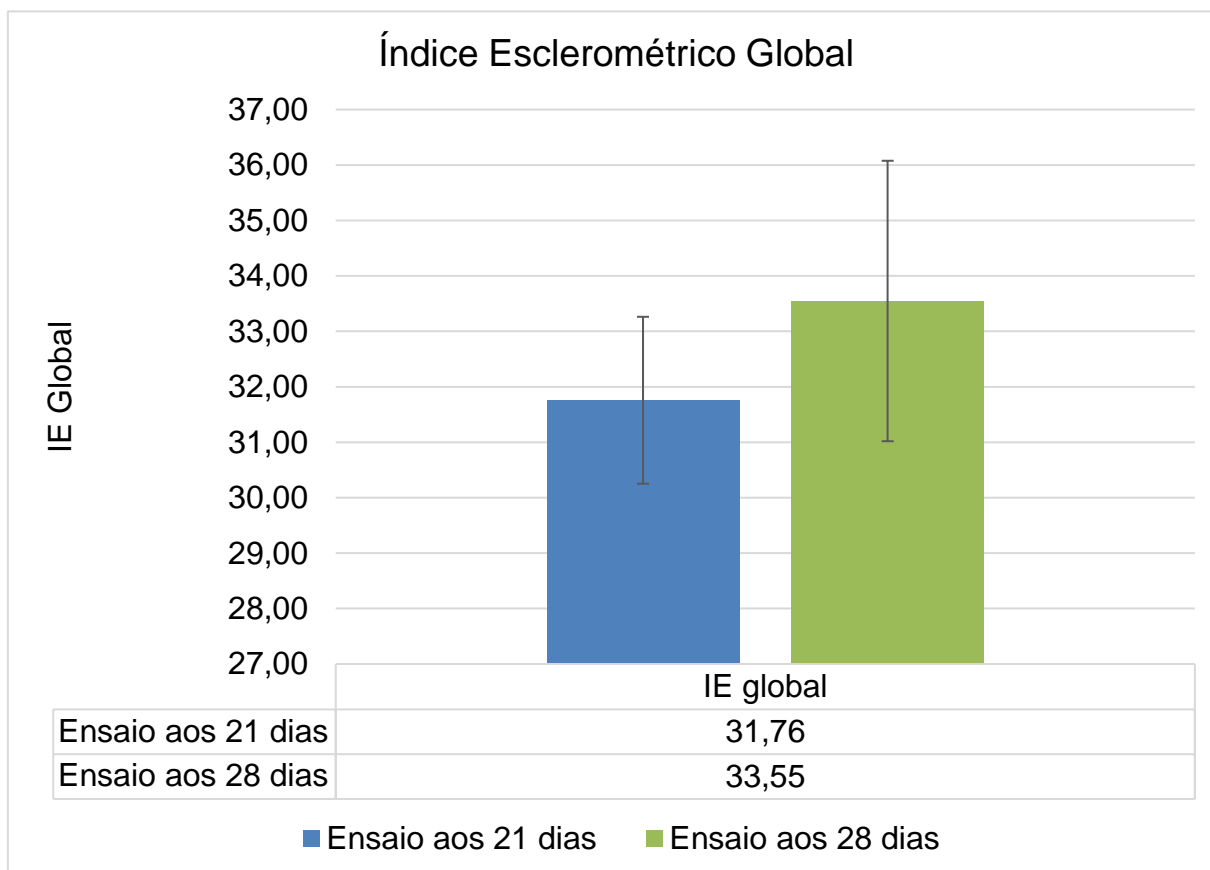
O IE_{global} é a medida dos índices esclerométricos efetivos de cada viga ensaiada, ele representa o lote do concreto avaliado. Na Tabela 10 são apresentados os resultados desses índices para as idades de 21 e 28 dias, estes valores também estão representados na Figura 23.

Tabela 10 - Resultados do índice esclerométrico global.

	IE _{global}	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Aos 21 dias	31,76	1,51	4,74
Aos 28 dias	33,55	2,53	7,54

Fonte: Arquivo próprio.

Figura 23 - Gráfico do índice esclerométrico global.



Fonte: Arquivo próprio.

O coeficiente de variação para a idade de 21 dias foi de 4,74% e para idade de 28 dias foi de 7,54%. Nota-se que diferentemente dos índices esclerométrico médio e efetivo o maior coeficiente de variação foi para idade de 28 dias, podendo este valor ter sido influenciado devido ao fato da viga 2 ter resultado em leituras do índice esclerométrico elevado em comparação as demais vigas ensaiadas, possibilitando assim, uma maior variabilidade nos resultados. Isso pode ter ocorrido pelo fato de na região ensaiada o cobrimento da armadura ter sido menor que os demais pontos ensaiados, o que causa um aumento na resistência superficial. Um ensaio de

pacometria seria útil para a identificação das armaduras na região, porém não dispúnhamos do equipamento.

O IE_{global} apresentou um crescimento considerável nos ensaios realizados aos 21 dias para os 28 dias, que já era de se esperar, isso devido o concreto ganhar resistência mecânica conforme a evolução do tempo, como consequência a sua dureza superficial também evolui, tendo maiores valores de índice esclerométrico para idades superiores.

5.2.4 Correlação entre o índice esclerométrico e resistência à compressão do concreto

A resistência à compressão do concreto foi obtida por meio da correlação dos índices esclerométrico adquiridos na seção 5.2.2, com a curva de correlação do equipamento utilizado para realização do ensaio de esclerometria mostrada na Figura 5.

As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados da resistência à compressão do concreto utilizando a curva de correlação do equipamento pelo índice esclerométrico efetivo e na Figura 24 estão representados estes dados para melhor comparação entre as resistências à compressão do concreto em diferentes idades.

Tabela 11 - Resistência à compressão do concreto pelo índice esclerométrico aos 21 dias.

Viga	Idade (dias)	$IE_{efetivo}$	Resistência à compressão (MPa)
V1 - 1	21	30,56	25,50
V1 - 2	21	33,75	30,80
V1 - 3	21	32,87	29,50
V2	21	31,36	27,00
V3	21	30,25	25,00

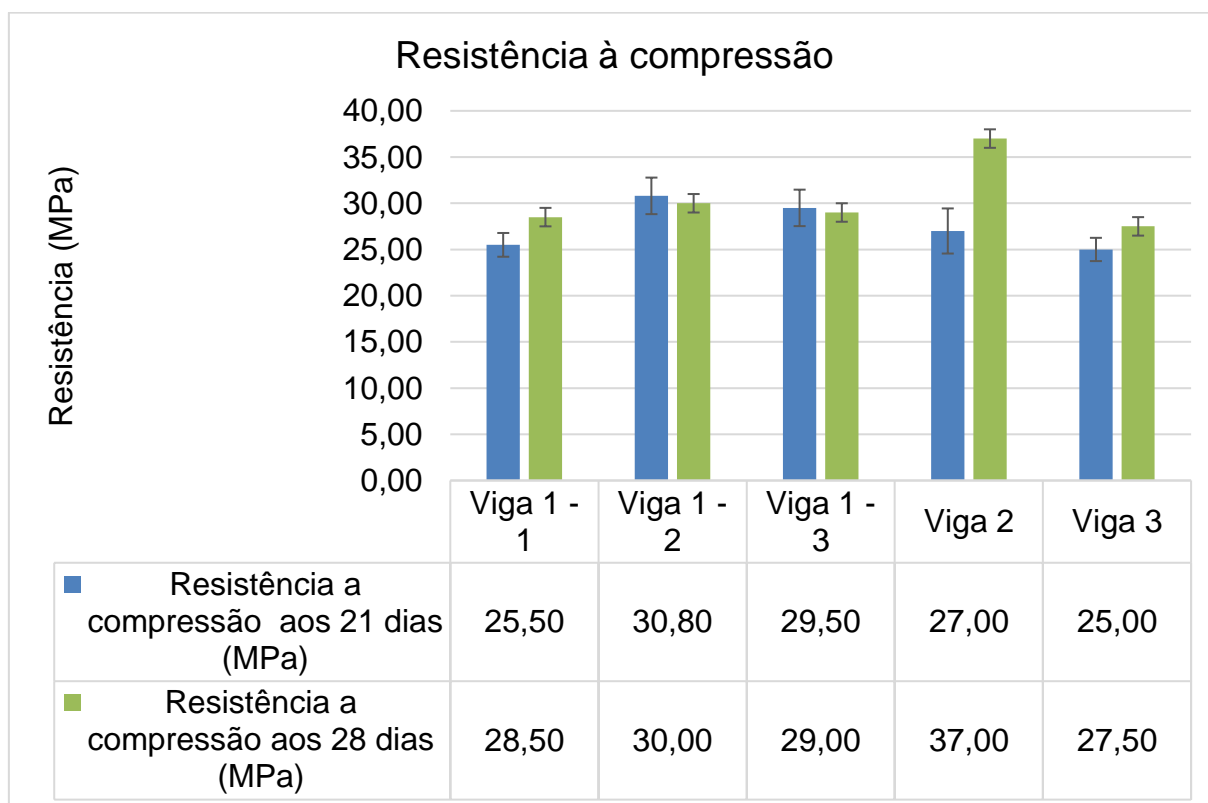
Fonte: Arquivo próprio.

Tabela 12 - Resistência à compressão do concreto pelo índice esclerométrico aos 28 dias.

Viga	Idade	IE efetivo	Resistência à compressão (MPa)
V1 - 1	28	32,50	28,50
V1 - 2	28	33,50	30,00
V1 - 3	28	32,81	29,00
V2	28	37,80	37,00
V3	28	31,13	27,50

Fonte: Arquivo próprio.

Figura 24 - Resistência à compressão do concreto pelo índice esclerométrico.



Fonte: Arquivo próprio.

A resistência à compressão adquirida na realização do ensaio do índice esclerométrico foi pouco maior em comparação ao ensaio de resistência à compressão axial em corpos de provas. A maior diferença foi na viga 2, apresentando 148% da resistência à compressão apresentada no ensaio destrutivo. As demais vigas ensaiadas apresentaram uma pequena variação na resistência cerca de 120%.

A resistência à compressão do concreto obtida através da correlação pelo índice esclerométrico apresentou um aumento nos resultados dos 21 dias para os 28

dias, o que já era previsto, devido ao concreto ganhar resistência mecânica conforme a evolução do tempo, tendo maiores valores na resistência a compressão para idades superiores.

5.2.5 Análise dos resultados do ensaio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de ultrassom, realizado 28 dias após a data da concretagem, consistiu em analisar o tempo que a onda ultrassônica gasta para atravessar o interior de um elemento de concreto, sendo este procedimento realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019). Na Tabela 13 são apresentados os resultados do ensaio de ultrassom em cada área das vigas ensaiadas.

Tabela 13 - Resultados do tempo gasto pela onda ultrassônica para atravessar o concreto.

Viga	Tempo 1 (μ s)	Tempo 2 (μ s)	Tempo 3 (μ s)	Tempo 4 (μ s)	Tempo 5 (μ s)	Tempo Médio (μ s)
V1	43,00	43,50	44,20	44,60	44,90	44,04
V2	44,00	44,70	44,80	44,90	44,70	44,62
V3	44,50	42,70	43,30	43,70	42,90	43,42

Fonte: Arquivo próprio.

5.2.6 Análise da velocidade do pulso ultrassônico médio

Com base nos dados descritos na Tabela 13 e a Equação 1, calculou-se a velocidade em cada ponto ensaiado na estrutura. Em seguida, foi calculada a média aritmética das cinco leituras realizadas em cada viga. Para se obter a média de dispersão da amostra calculou-se o desvio padrão amostral e o coeficiente de variação em cada área de ensaio.

A velocidade do pulso ultrassônico médio ($V_{\text{médio}}$) é a média das medidas dos cinco pontos na área em cada viga ensaiada. Na Tabela 14 são apresentados os resultados do $V_{\text{médio}}$.

Tabela 14 - Resultados do ensaio da velocidade do pulso ultrassônico médio.

Viga	Nº de pontos	Tempo Médio (μ s)	Espessura do elemento (m)	$V_{\text{médio}}$ (m/s)	$V_{\text{médio}}$ (km/s)	Desvio Padrão (km/s)	Coefficiente de Variação (%)
V1	5	44,04	0,205	4654,86	4,65	0,783	0,168
V2	5	44,62	0,205	4594,35	4,59	0,356	0,078
V3	5	43,42	0,205	4721,33	4,72	0,716	0,152

Fonte: Arquivo próprio.

Os coeficientes de variação apresentados foram consideravelmente baixo, sendo o maior coeficiente da viga V1 com 0,168%. Nota-se que as áreas de ensaio analisadas obtiveram uma certa homogeneidade ao longo de toda a estrutura de concreto, isso devido à baixa variação da velocidade nos pontos ensaiados.

5.2.7 Correlação entre a velocidade do pulso ultrassônico médio e a qualidade do concreto

Utilizando a Tabela 5, proposta por Neville (1981), foi feita a análise do concreto quanto a sua qualidade e homogeneidade por meio da relação da velocidade do pulso ultrassônico médio. A Tabela 15 apresenta os resultados quanto à classificação da qualidade do concreto.

Tabela 15 - Qualidade do concreto em relação a velocidade do pulso ultrassônico médio.

Viga	$V_{\text{média}}$ (km/s)	Qualidade do concreto armado
V1	4,65	Excelente
V2	4,59	Excelente
V3	4,72	Excelente

Fonte: Arquivo próprio.

Analisando os resultados da velocidade do pulso ultrassônico, percebe-se que o concreto analisado é de excelente qualidade, devido a $V_{\text{média}}$ de todos os elementos ensaiados serem maiores que 4,5 Km/s.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que a avaliação preventiva das estruturas é de grande importância, pois garante o funcionamento adequado por meio da detecção de defeitos antes que resultem em danos graves assegurando, assim, que a estrutura esteja em conformidade com as normas estruturais.

Os métodos de avaliação de estruturas por ensaios não destrutivos se mostram eficientes, visto que podem ser realizados em diversos pontos da estrutura e com o número de ensaios necessários para obter precisão e confiabilidade, sem provocar perda na capacidade de resistência do elemento, pois não é necessária a extração de testemunhos.

Verificou-se que as correlações entre índice esclerométrico e resistência à compressão resultou em uma avaliação eficiente, visto que teve uma pequena diferença em comparação ao ensaio destrutivo de compressão aos corpos de provas.

Conclui-se também que os elementos foram bem executados, com a concretagem feita de modo a ter menor porosidade no material, sendo justificado pelas altas velocidades obtidas no ensaio de ultrassom, uma vez que concretos com alta compacidade facilita o fluxo da onda ultrassônica. Sendo assim, pode-se dizer que os elementos tiveram uma concretagem de excelente qualidade na execução.

Os ensaios de esclerometria e ultrassom se mostraram ensaios complementares um ao outro, visto que o ensaio de esclerometria é um método que avalia a dureza superficial do elemento estrutural, ou seja, avalia apenas uma pequena camada próxima à superfície, o qual não garante que o interior da peça está com boa homogeneidade e resistência. Já o ensaio de ultrassom avalia o interior do elemento, verificando a qualidade da concretagem e classificando-a de acordo com os valores da velocidade do pulso ultrassônico que percorre o interior da peça.

A realização deste trabalho permite uma maior difusão dos assuntos relacionados aos ensaios não destrutivos, podendo ser utilizado como referência em outras pesquisas e até mesmo para realização dos ensaios de esclerometria e ultrassom.

A obtenção de curvas de correlação através do esclerômetro utilizando de corpos de prova moldados com concreto específico de cada região é uma das

recomendações para estudos futuros, assim como a análise de fatores que interferem nos resultados dos ensaios não destrutivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Concreto (Notas de aula da disciplina)**. 2002. P. 03-24 Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf> Acesso em 10 abr 2019.
- AMBROZEWICZ P. H. L. **Materiais de Construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: Pini, 2012.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. - Rio Grande: Dunas, 2014. v.1, 4.ed.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584**: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7680-1**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru/SP Agosto/2006.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Novos Materiais para Construção Civil**. Revisão técnica DIAS, J.F. v.1. 5. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão de concreto s utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos**. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- CARVALHO, J. D. N. **Sobre as origens e desenvolvimento do concreto**. Universidade Estadual de Maringá. Revista Tecnológica, v. 17, p. 19-28, 2008.
- CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo A NBR 6118:2003**. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007.

COUTO, José Antônio Santos; CARMINATTI, Rafael Lima; NUNES, Rogério Reginato Alves; MOURA, Ruan Carlos A. **O concreto como material de construção** [Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas] Sergipe. v. 1. n.17. p. 49-58. 2013.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. **Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil**. IBRACON Structures and Materials Journal vol. 5 • nº 6, dez. 2012 p. 757-780 • ISSN 1983-4195

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios não Destrutivos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 2 Ed. São Paulo: Pini, 2012.

LORENZI, Alexandre; REGINATO, Lucas Alexandre; LORENZI, Luciani Somensi; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da. **Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto**. Revista de Engenharia Civil IMED, 3(1): 3-13, jan./jun. 2016 - ISSN 2358-6508

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994, p. 01-02.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997, p. 220. Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas | Sergipe | v. 1 | n.17 | p. 49-58 | out. 2013

NEVILLE, A.M. **Properties of concrete**. 3ª ed. London: Pitman, 1981.

NL Scientific. **Martelo de teste de concreto**. Disponível em: <https://www.nl-test.com/ViewCatalog.asp?ID=614&MainId=16> Acesso em 11 jul 2019.

PALACIOS, M.P.G (2012). **Emprego de Ensaios Não Destrutivos e de Extração de Testemunhos na Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-007A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 165p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/23746834/eladio-g-r-petrucci-concreto-de-cimento-portland-13-ed-1998-> Acesso em 07 mai 2019.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Universidade de São Paulo, São Carlos. Revista Tecnológica, 2007.

RIBEIRO, JÚNIOR, E. **Propriedades dos materiais constituintes do concreto** ISSN 2179-5568 – Revista Especialize On-line IPOG - Goiânia - Edição nº 10 Vol. 01/ 2015 dezembro/2015.

SILVA, T. J.; FERREIRA, G.; DIAS, J. F. **Influência de variáveis nos resultados de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado.** Revista Ciência e Engenharia, v. 22, 2013.

SOUZA, J. D.; TORRE, E. M.; KOSLOSKI, F.; SILVESTRO, L.; LEME, L. B. P.; MEDEIROS, M. H. F. **Obtenção da resistência à compressão do concreto de viadutos localizados na região de Curitiba por métodos de ensaios não destrutíveis: esclerometria e ultrassom.** 44^a RAPv e 18^a ENACOR. Foz do Iguaçu, agosto de 2015.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998. 255 p.