



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



João Vitor Batista Moreira

Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico de concretos convencionais.

Ouro Preto

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico de concretos
convencionais

João Vitor Batista Moreira

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 23/02/2023

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto – UFOP

Orientadora: Eng^a.M.Sc. Juliana Fadini Natalli – UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M838r Moreira, Joao Vitor Batista.

Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico de concretos convencionais. [manuscrito] / Joao Vitor Batista Moreira. - 2023.

56 f.

Orientadores: Dra. Juliana Natalli, Prof. Dr. Ricardo Peixoto.

Coorientador:

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Concreto. 2. Concreto - Ensaios não destrutivos. 3. Concreto - resistência à compressão. 4. Engenharia - Instrumentos - Esclerometria. I. Natalli, Juliana. II. Peixoto, Ricardo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Vitor Batista Moreira

Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico de concretos convencionais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 23 de fevereiro de 2023

Membros da banca

Doutor - Ricardo André Fiorotti Peixoto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutora - Juliana Fadini Natalli - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Aline Santana Figueiredo - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Humberto Dias Andrade - Universidade Federal de Ouro Preto

Ricardo André Fiorotti Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/02/2023



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Andre Fiorotti Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2023, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0488484** e o código CRC **5BA52169**.

AGRADECIMENTOS

Em um primeiro momento gostaria de agradecer a Deus e a minha família (Elvecio Batista da Silva, Dulcilene Rodrigues Moreira da Silva, Rafael Batista Moreira e Marcos Batista Moreira da Silva) por sempre me apoiarem e serem o maior motivo de inspiração pessoal e profissional.

Gostaria de agradecer ao Grupo Reciclos, CNPq, FAPEMIG e Fundação Gorceix pelo apoio e oportunidade à pesquisa dentro da universidade e pelas experiências proporcionadas que agregaram muito na minha capacitação durante a graduação.

Por último, gostaria de agradecer a gloriosa Escola de Minas e a Universidade Federal de Ouro Preto e a todos os professores por todos os ensinamentos e oportunidades oferecidas durante toda a graduação que fizeram de mim sem dúvida uma pessoa melhor.

RESUMO

O controle de qualidade das estruturas é cada vez mais rigoroso e presente na construção civil. Como exemplo, recomenda-se avaliar a resistência à compressão de elementos de concreto armado para certos tipos de procedimentos, como alteração estrutural de uma edificação, perícia e previsão da vida útil. Além disso, as medidas de controle devem ser realizadas quando se tem dúvidas acerca da resistência de um elemento estrutural. As estruturas de concreto, mesmo apresentando um traço dimensionado podem sofrer variações quanto à resistência final, não atingindo o valor requerido pelo projeto. Tal fato é proveniente de falhas no controle de qualidade da concretagem das peças estruturais e procedimentos de cura que influenciam diretamente a durabilidade e a resistência final do concreto. A avaliação da capacidade de resistência das estruturas pode ser mensurada através de ensaios não destrutivos de esclerometria nas peças *in loco*. Essa técnica facilita e otimiza as inspeções dos elementos estruturais, evitam danos à estrutura, reduzem custos e permitem aumentar significativamente o número de amostras. Esse trabalho tem como objetivo determinar curvas de correlação do esclerômetro obtidas por meio da correlação entre os índices esclerométricos e os resultados dos testes de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto, classes C30 (30 MPa) e C35 (35 MPa). Para cada projeto de mistura, foram produzidos 16 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm (diâmetro x altura) para ensaios de resistência à compressão e um bloco de concreto armado de dimensões 50 x 50 x 50 cm (comprimento x altura x espessura) para testes de esclerometria. A partir do tratamento de dados fornecidos pelos ensaios, as curvas de correlação foram plotadas correlacionando as classes de resistência dos concretos, os índices esclerométricos e os resultados médios de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos.

Palavras-chave: concreto, ensaios não destrutivos, resistência à compressão, esclerometria.

ABSTRACT

The quality control of structures is increasingly rigorous and present in civil construction. As an example, it is recommended to evaluate the compressive strength of reinforced concrete elements for certain types of procedures, such as structural alteration of a building, expertise and prediction of useful life. In addition, control measures must be carried out when there are doubts about the resistance of a structural element. Concrete structures, even with a dimensioned trait, may suffer variations in terms of final resistance, not reaching the value required by the project. This fact comes from flaws in the quality control of the concreting of structural parts and curing procedures that directly influence the durability and final resistance of the concrete. The evaluation of the resistance capacity of the structures can be measured through non-destructive tests of sclerometry in the pieces in loco. This technique facilitates and optimizes inspections of structural elements, prevents damage to the structure, reduces costs and significantly increases the number of samples. This work aims to determine correlation curves of the sclerometer obtained through the correlation between the sclerometric indices and the results of the compression tests of cylindrical concrete specimens, classes C30 (30 MPa) and C35 (35 MPa). For each mixing design, 16 cylindrical specimens measuring 10 x 20 cm (diameter x height) were produced for compressive strength tests and a reinforced concrete block measuring 50 x 50 x 50 cm (length x height x thickness) for sclerometry tests. From the treatment of data provided by the tests, the correlation curves were plotted correlating the resistance classes of the concretes, the sclerometric indices and the average results of resistance to compression of the cylindrical specimens.

Keywords: concrete, non-destructive tests, compressive strength, sclerometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Macroestrutura do concreto visto em corpo de prova polido.	5
Figura 2.2 - Método bobina estimulada no concreto (a) e na presença de aço (b).	6
Figura 2.3 - Configuração do método da bobina elétrica de varredura no concreto.	7
Figura 2.4 - Homogeneização da superfície do ensaio.....	8
Figura 2.5 - Área de ensaio e pontos de impacto.	9
Figura 2.6 - Posições de ensaio do esclerômetro	12
Figura 2.7 - Forma aproximada da zona de falha no concreto durante o teste de penetração da sonda	14
Figura 2.8 - Forma de aplicação do disco para ensaio de pulloff.....	16
Figura 2.9 - Esquema do teste de arrancamento.....	17
Figura 2.10 - Resultados de um concreto submetido a duas temperaturas de cura distintas em relação ao desenvolvimento de sua maturidade	19
Figura 2.11 - Instalação dos sensores de temperatura junto à armadura da laje.	21
Figura 2.12 - Esquema do aparelho de ultrassom para medir a velocidade de pulso.....	25
Figura 2.13 - Configuração de um transmissor e receptor para transmissão direta.	26
Figura 2.14 - Configuração de um transmissor e receptor para transmissão semidireta.....	27
Figura 2.15 - Configuração de um transmissor e receptor para transmissão indireta.	27

Figura 2.16 - Efeito das dimensões da peça na transmissão do pulso ultrassônico.	29
Figura 3.1 - Diagrama dos passos utilizados para a metodologia.....	30
Figura 3.2 - Imagem da forma com espaçadores e armada.	31
Figura 3.3 – Produção do concreto.....	32
Figura 3.4 - Procedimento de Slump Test.....	33
Figura 3.5 - Adensamento e aparência final do bloco.....	33
Figura 4.1 - Resistência à compressão dos corpos de prova	35
Figura 4.2 - Curvas de calibração dos concretos convencionais C30 e C35	37

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos Específicos	3
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Concreto	3
2.2	Técnicas não destrutivas	5
2.2.1	Pacometria	5
2.2.2	Esclerometria	8
2.2.3	Técnica de resistência a penetração	13
2.2.4	Ensaio de arrancamento	15
2.2.5	Método da maturidade	18
2.2.6	Termografia infravermelha	22
2.2.7	Velocidade de pulso ultrassônico	24
3	Metodologia	30
3.1	Materiais	30
3.2	Métodos	32
4	Resultados	355
4.1	Resistência a compressão dos corpos de prova	355
4.2	Esclerometria	36
4.3	Curvas de calibração	37

5	Conclusão	389
	Referências.....	40

1 INTRODUÇÃO

O material de construção mais utilizado no mundo é o concreto, comumente composto da mistura de cimento Portland com areia, brita e água (Copeland, 1964). Segundo Copeland, 1964 não há material mais consumido pela humanidade em tamanha proporção, com exceção da água. As razões pela qual se dá a ampla utilização desse material é a sua capacidade de resistir a ação da água sem deterioração, moldabilidade das estruturas em diversas formas e tamanhos e o baixo custo de produção devido à grande disponibilidade de matéria prima (Mehta & Monteiro, 2014).

Para a realização do controle de qualidade de estruturas de concreto armado relacionado à resistência mecânica e homogeneidade são utilizadas técnicas destrutivas e não destrutivas. As técnicas não destrutivas permitem, além disso, detectar possíveis problemas e patologias que possam comprometer a estrutura (Singh & Singh, 2018). Ao contrário dos métodos não destrutivos, as técnicas destrutivas podem ser inviáveis em locais de difícil acesso e são consideravelmente mais caros em relação aos não destrutivos (Alwash , et al., 2016).

A verificação da resistência das estruturas *in loco* é necessária na identificação e mapeamento de pontos críticos que, devido a falhas no processo de concretagem e cura podem ocasionar em perda de resistência estrutural e desenvolvimento de patologias. Por isso, pode haver a necessidade da verificação da resistência a compressão do concreto *in loco* logo após o processo de desforma das peças (Câmara, 2006).

A avaliação da resistência à compressão de elementos de concreto armado também é necessária na ocasião de mudanças na utilização de uma estrutura (Alwash , et al., 2016). É necessário garantir que os efeitos da mudança estão dentro da capacidade estrutural suportada pela peça (Alwash , et al., 2016). Falhas estruturais como as causadas por incêndio e degradação ambiental também podem

demandar a inspeção das estruturas quanto à resistência a compressão (Alwash , et al., 2016).

A esclerometria é um método não destrutivo que fornece um resultado rápido e preciso da resistência à compressão do concreto *in loco* (ACI 228.1R-03, 2003; Xu & Li, 2018). O esclerômetro é um equipamento que consiste em uma massa controlada por uma mola capaz de deslizar em um pistão dentro de um alojamento tubular. O valor do rebote do equipamento na superfície do concreto ensaiado é utilizado para determinar a resistência à compressão (Xu & Li, 2018).

De acordo com a normativa NBR 7584 (ABNT, 2012), após o procedimento de ensaio de esclerometria e o cálculo do índice esclerométrico médio e efetivo, a resistência mecânica do elemento estrutural verificado deve ser estimada por meio de ábacos fornecidos pelo fabricante do esclerômetro que relaciona o índice esclerométrico efetivo com a resistência do concreto.

No entanto, a utilização dessas curvas não é recomendada, uma vez que o esclerômetro pode não estar calibrado para a realização de ensaios em determinado tipo de concreto. O procedimento de execução mais correto é a obtenção de uma curva de correlação do concreto a ser inspecionado, a qual correlacione os resultados dos ensaios não destrutivos e a resistência à compressão do material (Breysse, 2012; Alwash , et al., 2016; Alwash, et al., 2017).

Dessa forma, esse estudo pretende determinar curvas de correlação do esclerômetro obtidas por meio da correlação entre os índices esclerométricos efetivos determinados em blocos de concreto, e os resultados dos testes de compressão de corpos de prova cilíndricos.

1.1 Objetivo

Este trabalho objetiva caracterizar os diversos tipos de ensaios não destrutivos existentes, os possíveis problemas que impactam nos resultados dos ensaios, além de desenvolver curva de calibração do esclerômetro obtida por meio da correlação

entre os índices esclerométricos e os resultados dos testes de compressão dos corpos de prova cilíndricos.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar diversos tipos de ensaios não destrutivos existentes por meio de uma revisão bibliográfica, apontando possíveis interferências que impactam nos resultados;
- Caracterizar o funcionamento dos equipamentos das respectivas técnicas não destrutivas também por meio de uma revisão bibliográfica;
- Desenvolver as curvas de correlação a partir do tratamento de dados fornecidos pelos ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentadas, inicialmente, algumas definições sobre o concreto convencional, material de estudo desse trabalho. Posteriormente, é feita uma revisão da literatura sobre alguns ensaios não destrutivos usualmente utilizados com foco na técnica de esclerometria.

2.1 Concreto

Em 1824, foi criado pelo construtor inglês Joseph Aspdin um aglutinante proveniente da queima do calcário e argila no qual foi chamado de Cimento Portland (Natalli, et al., 2021). O cimento é produto de uma atividade industrial integrada, obtido a partir da lavra e do beneficiamento de calcário e argila: sua industrialização ocorre mediante moagem, homogeneização e produção da farinha (mistura crua) e posterior processamento físico-químico em clínquer (cimento não pulverizado) e respectiva moagem (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2023).

Os principais constituintes do Cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), e alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃) e certa proporção de magnésia (MgO) (Bogue, et al., 1955).

Segundo (Dr. Edward G. Nawy, 2008) características básicas da hidratação do cimento Portland podem ser descritas da seguinte forma:

- Enquanto os grãos de cimento individuais permanecerem separados uns dos outros pela água, a pasta de cimento permanecerá fluida;
- Os produtos das reações de hidratação ocupam um volume maior do que o ocupado pelos grãos de cimento originais.
- À medida que os produtos de hidratação começam a crescer, ocorre o endurecimento;
- À medida que as reações de hidratação continuam, ligações adicionais são formadas entre os grãos de cimento, levando ao fortalecimento do sistema.

Quando o cimento Portland é combinado com água, a pasta fluída ganha resistência mecânica ao longo do tempo conforme os grãos de cimento vão sendo hidratados. O ganho de resistência dessa mistura é proveniente dos produtos de hidratação dos grãos de cimento. Pelo fato da hidratação do cimento se iniciar pela superfície do grão, a velocidade de hidratação está intimamente relacionada com a finura do material (Natalli, 2022).

O cimento Portland, quando misturado à água e aos agregados graúdos (brita) e miúdos (areia), dá origem ao concreto convencional, material popularizado entre os engenheiros pelo baixo custo, grande disponibilidade de matéria-prima e facilidade de produção (Mehta & Monteiro, 2014).

O concreto é um material que apresenta excelente resistência a água, superior a madeira e ao aço comum. Por esse motivo, foi amplamente utilizado pelos romanos na construção de aquedutos, cisternas, represas e, atualmente é extensamente empregado na construção de barragens, revestimentos de canais e pavimentos (Mehta & Monteiro, 2014). Outro fator influenciador da grande utilização do concreto

é a capacidade de ser moldado em diferentes formas e tamanhos na composição de um elemento estrutural no seu estado fresco. Observa-se na Figura 2.1 as fases distintas da macroestrutura do concreto, composta por agregados de tamanhos variados e o cimento hidratado os envolvendo.

A combinação formada por concreto e aço, conjunto denominado concreto armado possui um desempenho estrutural muito satisfatório, e, por isso, no Brasil é o material mais utilizados na fabricação de estruturas construtivas (Porto & Fernandes, 2015).

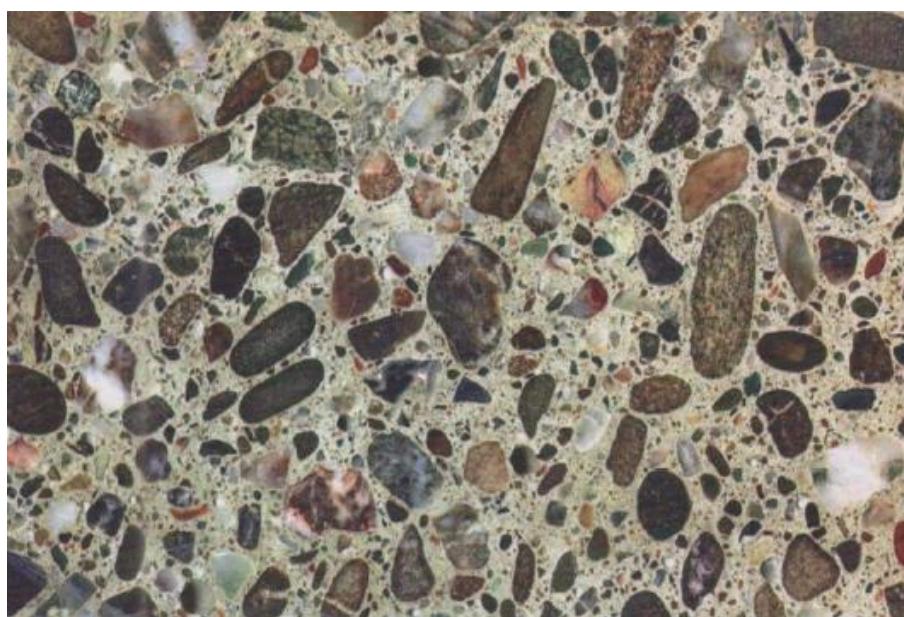


Figura 2.1 - Macroestrutura do concreto visto em corpo de prova polido.

(Mehta & Monteiro, 2014)

2.2 Técnicas não destrutivas

2.2.1 Pacometria

A pacometria é um método utilizado para identificação e localização de barras de aço no concreto armado e a verificação do cobrimento das armaduras através de ondas eletromagnéticas de um equipamento conhecido como pacômetro (Sahuinco, 2011). Diferentemente do concreto, as barras de aço interagem fortemente com ondas

eletromagnéticas de baixa frequência aplicadas na superfície do concreto, facilitando a identificação das armaduras (Mehta & Monteiro, 2014). Seu uso baseia-se no arrasto do equipamento sobre a estrutura de concreto e observação dos resultados no visor do equipamento (Ramos, 2019).

Os dois principais métodos utilizados nos pacômetros comerciais são os que utilizam bobina estimulada – relutância magnética - e os de bobina elétrica de varredura (ACI 228.2R-98, 2004). O método da bobina estimulada se dá através da geração de um fluxo magnético que se desloca no concreto com a intensidade sendo medida por uma bobina sensora (Mehta & Monteiro, 2014). Quando o detector se aproxima de uma armadura, a bobina indica um grande aumento no fluxo magnético, pois o aço é um excelente condutor (Figura 2.2). A intensidade da corrente da bobina também é influenciada pela profundidade da armadura, portanto também é possível estimar o cobrimento da armadura (Mehta & Monteiro, 2014).

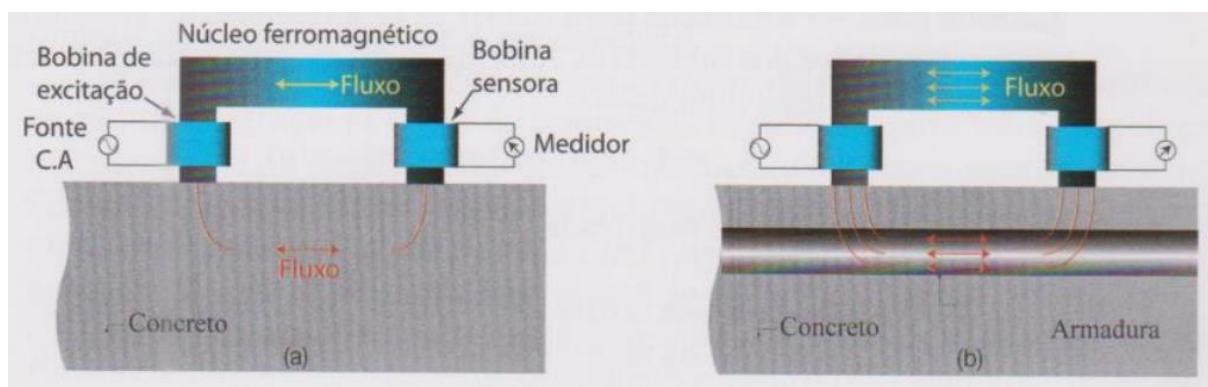


Figura 2.2 - Método bobina estimulada no concreto (a) e na presença de aço (b).

(Mehta & Monteiro, 2014)

Já o método da bobina elétrica por varredura encontra a localização da barra na superfície do concreto com uma bobina elétrica fixada a uma fonte CA e um indicador de corrente. Quando o detector realiza a varredura em área sem presença de

armadura, o indicador de corrente permanece na mesma posição (Mehta & Monteiro, 2014). Já na presença de armadura, o detector começa a indicar queda na corrente até que a mesma se estabilize em um valor mínimo, instante este que o detector está sob a armadura (Mehta & Monteiro, 2014).

O campo magnético gerado pela bobina induz correntes parasitas nas barras de aço (Figura 2.3) que por sua vez produzem campos magnéticos secundários de direção oposta cuja presença é detectada pelo indicador de corrente (Mehta & Monteiro, 2014).

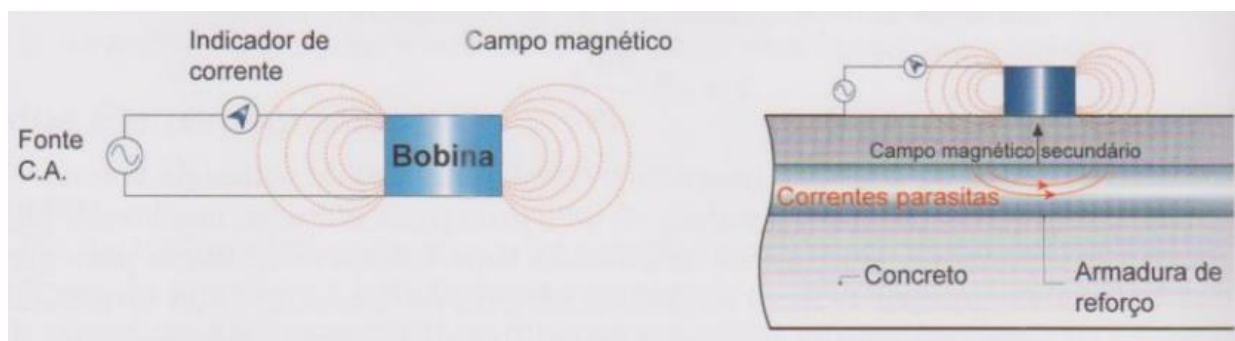


Figura 2.3 - Configuração do método da bobina elétrica de varredura no concreto.

(Mehta & Monteiro, 2014)

De acordo com (Ramos, 2019) os fatores que influenciam no resultado da técnica são:

- rugosidade da estrutura ensaiada;
- taxa de armadura da estrutura;
- presença de impurezas na região de aplicação do ensaio.

O ensaio de pacometria também é importante na combinação com outros ensaios. No ensaio de esclerometria, por exemplo, deve se evitar locais que contenham barra de aço afim de obter resultados mais precisos da resistência do concreto (Pedroza, 2018).

2.2.2 Esclerometria

O método esclerométrico é um método não destrutivo que mede a dureza superficial do concreto NBR 7584 (ABNT, 2012), fornecendo informações para a avaliação da qualidade do concreto endurecido. De acordo com (Mehta & Monteiro, 2014) o método do esclerômetro de Schmidt, como é também conhecido, é de uso simples, rápido e barato na avaliação da uniformidade do concreto moldado *in loco*.

Para a realização do ensaio, primeiramente deve-se utilizar uma pedra de esmeril para alisar a superfície e homogeneizar conforme mostrado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Homogeneização da superfície de ensaio.

(Instruções de operação SilverSchmidt & Hammerlink, 2016)

Antes de executar o teste, deve-se realizar alguns testes de impacto na superfície para depois realizar as medições a serem avaliadas (Instruções de operação SilverSchmidt & Hammerlink, 2016).

No ensaio é obtido o índice esclerométrico, valor cujo qual é obtido através do impacto de um esclerômetro de reflexão sobre uma área de ensaio (região da superfície do concreto em estudo), fornecido pelo aparelho que corresponde ao valor de recuo do martelo NBR 7584 (ABNT, 2012).

Em cada área de ensaio, devem ser efetuados 16 impactos não sendo permitido mais que um impacto sobre um mesmo ponto (ABNT, 2012). Os ensaios devem ser uniformemente distribuídos na área de ensaio, por isso é recomendado que se desenhe um reticulado conforme mostrado na Figura 2.5 para aplicação do esclerômetro. A distância mínima entre os centros de dois pontos de impacto deve ser de 30 mm (ABNT, 2012).

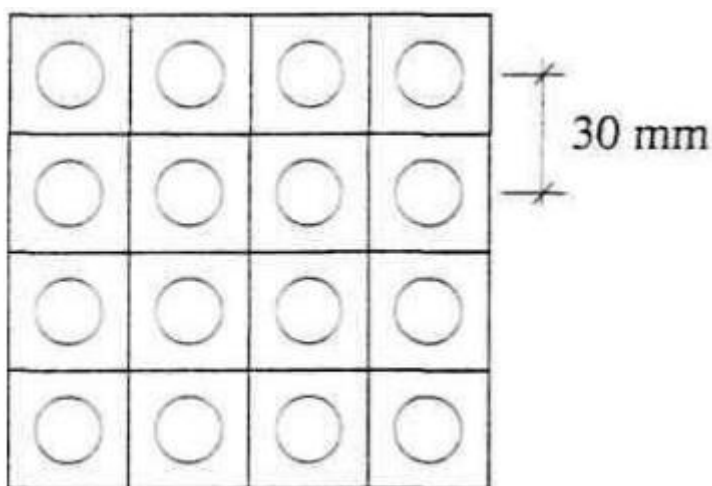


Figura 2.5 - Área de ensaio e pontos de impacto.

(ABNT, 2012).

Após obtenção dos 16 índices esclerométricos fornecidos pelo aparelho, calcula-se a média entre eles (R_m) e a partir desse valor encontra-se o índice esclerométrico.

$$I = k \times R_m$$

Sendo k a constante do aparelho.

Obtido o índice esclerométrico, entra-se com esse valor no ábaco fornecido pelo aparelho, o qual relaciona esse parâmetro com a resistência à compressão do concreto. Dessa forma, obtém-se a resistência da peça estrutural analisada.

Segundo (Mehta & Monteiro, 2014) os resultados dos ensaios dependem dos seguintes parâmetros:

- Dosagem do concreto: O tipo e a forma do agregado utilizado na composição do concreto influenciam diretamente no resultado obtido do ensaio. Quando o objetivo é a obtenção de uma correlação entre a resistência e o índice esclerométrico, é necessário que haja a identificação do agregado e que se obtenha uma curva de calibração precisa. O tipo cimento Portland por sua vez, não tem uma influência que seja tão significativa no resultado do ensaio;
- Idade e tipo da curva: A relação entre o índice esclerométrico e a resistência não são constantes ao longo de grandes períodos de tempo e há a necessidade também de uma calibração especial para concretos submetidos a processos de cura com temperatura elevada;
- Uniformidade da superfície: Para a obtenção de resultados mais consistentes é necessário que a superfície do ensaio esteja regularizada, compacta, livre de textura aberta e com agregado exposto;
- Condição de umidade: A superfície de ensaio deve estar seca uma vez que a umidade pode diminuir em até 20% o resultado da resistência do concreto;
- Carbonatação superficial: Um dos produtos da carbonatação superficial é o carbonato de cálcio, composto rígido que pode aumentar o índice de reflexão. Nos casos em que há a presença desse produto (recorrente em estruturas antigas), recomenda-se a retirada da camada de carbonatação em uma pequena área para que esta possa ser comparada com o restante das áreas ensaiadas na estrutura;
- Rigidez do elemento: Durante o ensaio, no caso de ocorrer vibração na peça ensaiada, o índice esclerométrico é reduzido influenciando em desvios no resultado do ensaio, portanto, a peça ou corpo de prova a ser

ensaiada deve ter altura suficiente a fim de evitar vibração no momento do ensaio;

- Localização do êmbolo: A heterogeneidade da peça ensaiada pode afetar nos resultados uma vez que se o êmbolo for apoiado sob um agregado rígido, a medida resultará em um valor elevado do índice de reflexão, e, da mesma forma se o êmbolo for posicionado sob um vazio ou um agregado mole a medida resultará em um valor baixo. A fim de solucionar tal problema, a ASTM C 805 estabelece que sejam feitas dez medidas em uma única região de ensaio descartando as leituras cuja qual desviam mais que sete unidades da média e descarta-se a medição total se mais de duas leituras se desviarem mais que sete unidades da média.

Embora na prática seja difícil, para o estabelecimento de uma boa correlação entre o índice esclerométrico e a resistência do concreto, devem ser considerados todos os parâmetros supracitados. Segundo (Malhotra, 1984) estima-se que a precisão da resistência do concreto de uma estrutura ensaiada *in loco* com um esclerômetro bem calibrado é de $\pm 25\%$, enquanto os ensaios feitos em laboratório são de ± 15 a 20% .

A Figura 2.6 mostrada abaixo exhibe o martelo esclerômetro nas três posições de ensaio.

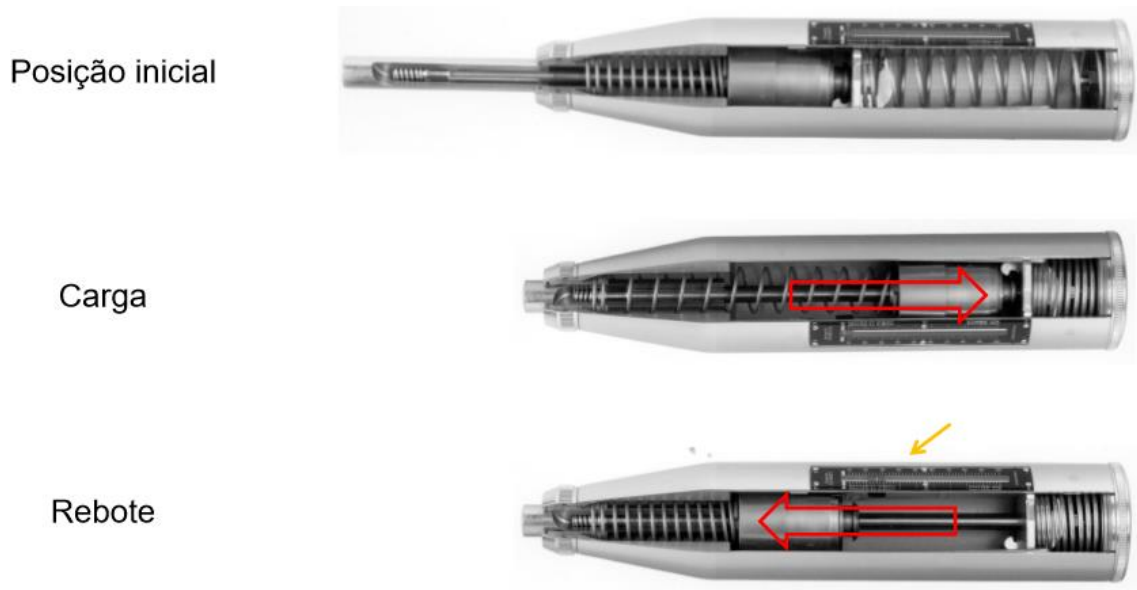


Figura 2.6 - Posições de ensaio do esclerômetro.

(Duarte, 2016)

Para maior confiabilidade no resultado da avaliação da resistência a compressão de uma determinada estrutura, é recomendado a utilização de correlação de ensaios (Meneghetti, 1999). De acordo com a norma NM78 (1996), para a determinação da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão é necessário os seguintes passos:

- Preparar concretos com relação água/cimento variando de 0,40 a 0,70, com intervalos de 0,05, para obter diferentes pontos da curva de correlação;
- Para cada valor da relação água/cimento recomenda-se moldar no mínimo dois corpos de prova. Determinar inicialmente o índice esclerométrico médio e a resistência à compressão para cada corpo de prova;
- Recomenda-se a utilização de corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura;

- O corpo de prova deve estar superficialmente seco (deixar 48 horas em ambiente de laboratório antes do ensaio);
- Os impactos devem ser aplicados na direção normal ao plano tangente do corpo de prova. Devem ser escolhidas três geratrizes separadas em aproximadamente 120 graus e serem efetuadas três determinações a diferentes alturas em cada uma delas.

2.2.3 Técnica de resistência a penetração

Por volta de 1964, foi desenvolvido nos Estados Unidos um aparelho denominado *Windsor probe* cuja finalidade era medir a resistência à compressão do concreto a partir da profundidade de penetração de pinos ou de parafusos disparados por uma pistola contra a superfície do concreto (Carino, 1997).

O método é muito eficaz na medição da taxa relativa de desenvolvimento da resistência do concreto nas primeiras idades, e, como o ensaio pode ser feito com disparos através da madeira é muito eficiente na determinação do tempo de retirada de formas (ACI 364.1R, 1993; Mehta & Monteiro, 2014).

O equipamento utilizado para determinar a resistência do concreto a penetração consiste de um dispositivo ativado à base de pólvora (Mehta & Monteiro, 2014). A norma que define os procedimentos do ensaio é a ASTM C 803. A fim de evitar rachaduras na realização do ensaio, é necessário que as estruturas a serem ensaiadas tenham pelo menos 150mm de espessura, distância mínima de 100mm da borda da peça e distância entre os pinos de 175mm.

Após o disparo, é necessário que o pino penetre no concreto com uma energia cinética consistente. Segundo a norma (ASTM C 803, 1990), a velocidade de saída do pino não pode ter um coeficiente de variação superior a 3% com base em 10 testes aprovados por métodos balísticos. A energia cinética empregada é absorvida pelo atrito entre o pino e o concreto e outra parte é absorvida pelo esmagamento e fraturamento do concreto (ACI 228.1R-03, 2003). Apesar de não haver estudos aprofundados em relação a geometria da zona de fratura do concreto por

consequência do impacto do pino, acredita-se que esta seja em formato cônico, conforme é mostrado na Figura 2.7 (ACI 228.1R-03, 2003).

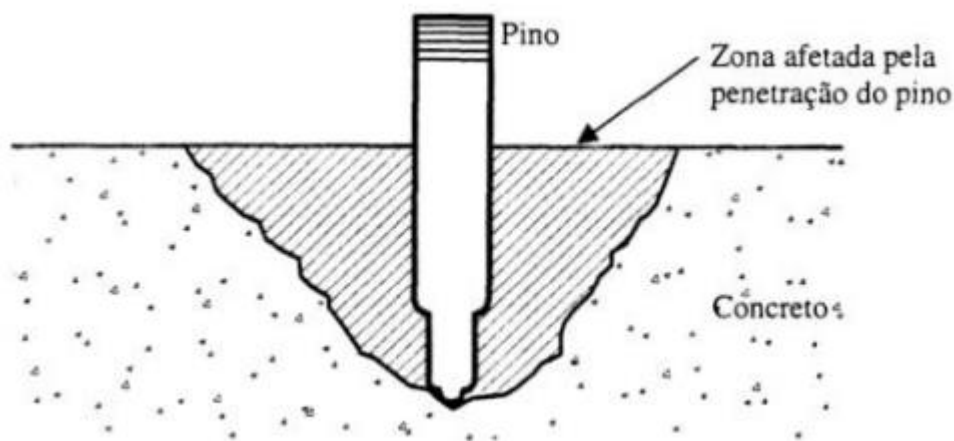


Figura 2.7 - Forma aproximada da zona de falha no concreto durante o teste de penetração da sonda.

(Meneghetti, 2016)

De acordo com diversos estudos realizados as principais condições que influenciam no resultado da técnica são:

Tipo e quantidade do agregado: a profundidade de penetração do pino está diretamente ligada ao tipo e a quantidade de agregado utilizado no concreto (Mehta & Monteiro, 2014). Segundo (Malhotra, 1984) em agregados macios a penetração do pino é maior, enquanto que em agregados mais duros a penetração é menor;

- Direção de penetração e presença de armadura: A direção do disparo deve ser feita perpendicularmente à superfície sendo necessário também que o disparo seja efetuado longe de armaduras principalmente se o cobrimento do aço for pequeno (ACI 228.1R-03, 2003);

- Carbonatação: influência de forma significativa na penetração do pino pois as características físicas e químicas do concreto na superfície sofrem alterações devido a carbonatação (Malhotra, 1984);
- Acabamento e fôrma: superfícies em que tiveram acabamento com colher de pedreiro são mais duras e, portanto, resultam em valores menores e mais dispersos de penetração do pino (ACI 228.1R-03, 2003). Segundo (ASTM C 803, 1990) o resultado do ensaio pode ser afetado pela natureza da superfície formada devido ao tipo de fôrma usada (aço ou madeira);

2.2.4 Ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento, também conhecido como *pullout test* ou *pulloff* é muito utilizado na verificação da resistência acabada das estruturas para entrega de obra bem como a verificação da resistência suficiente para a desforma de peças estruturais. As principais vantagens dos ensaios é a mensuração da resistência do concreto de forma direta, simples e rápida. Em contrapartida, os ensaios de *pullout test* e *pulloff* precisam de ser planejados com antecedência para que todas as ações necessárias na preparação dos ensaio previstas pela ASTM C900 e NBR 14081-4 respectivamente sejam executadas.

O ensaio de pulloff pode ser realizado através da fixação de um disco diretamente na superfície do concreto com a utilização de resina Epoxi como adesivo (Figura 2.8), cuja resistência mecânica deve ser superior à do concreto a ser ensaiado (Tavora, et al., 2017).

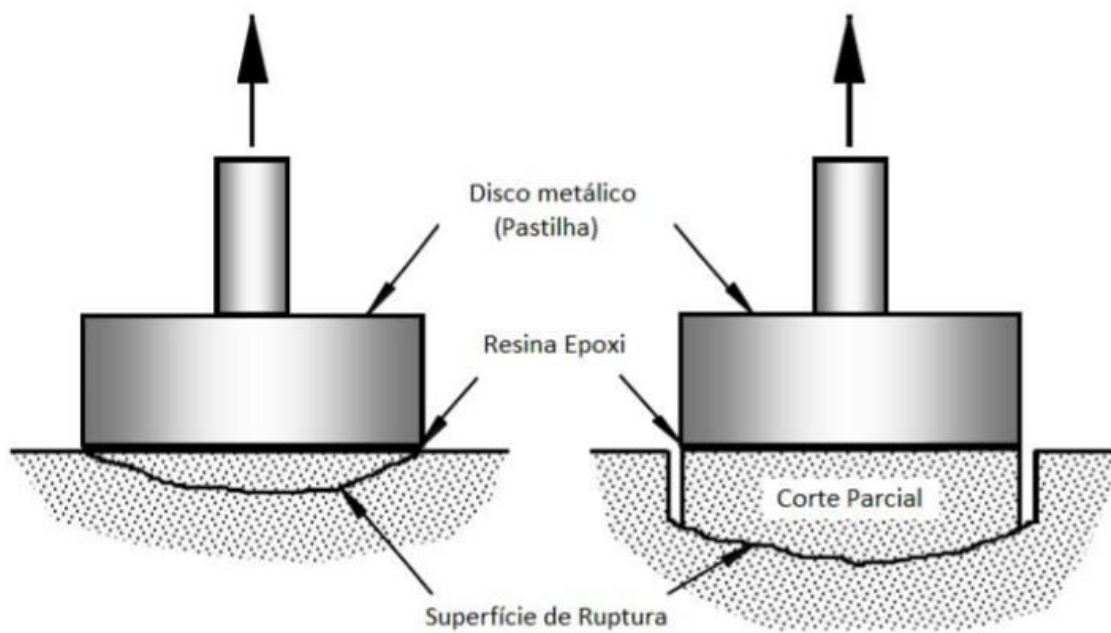


Figura 2.8 - Forma de aplicação do disco para ensaio de *pulloff*.

(Tavora, et al., 2017).

Para o ensaio *pulloff* a superfície do concreto deve ser preparada com lixamento e/ou desengorduramento, para garantir uma boa colagem dos discos (Tavora, et al., 2017). Dependendo das condições da superfície, como exemplo presença de umidade, o adesivo de fixação pode ainda necessitar de um processo de cura de até 24 horas.

Para o ensaio de *pullout*, ainda no estado fresco do concreto, um elemento metálico de aço com formato especial é inserido no concreto, a extremidade do elemento possui uma extremidade aumentada (cabeça alargada) que é responsável pela ancoragem desse elemento no concreto como é mostrado na Figura 2.9.

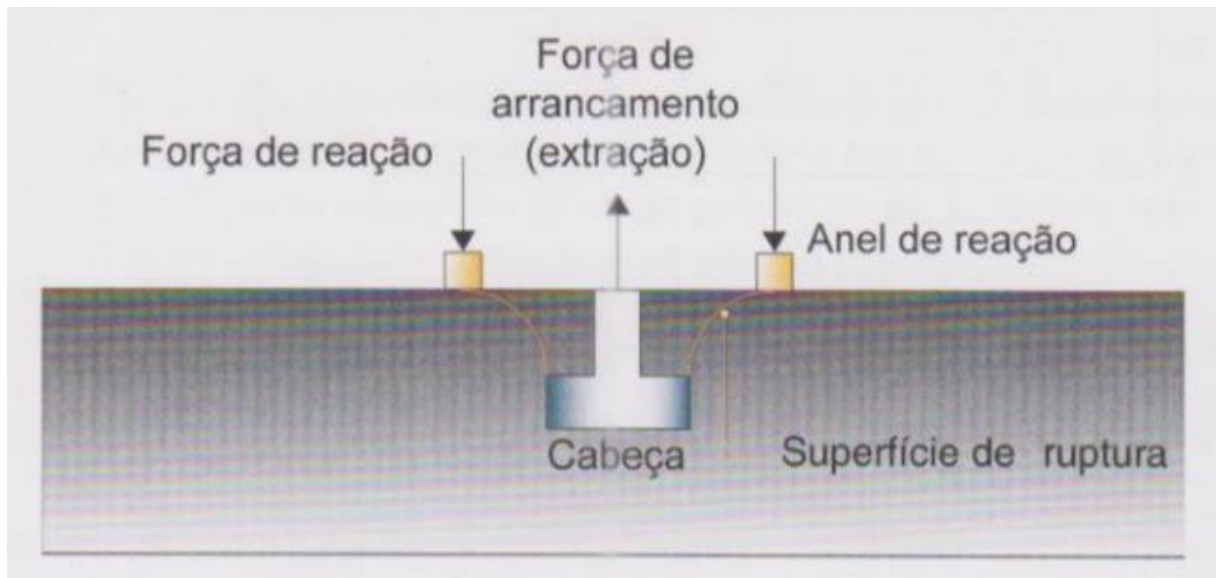


Figura 2.9 - Esquema do teste de arrancamento.

(Mehta & Monteiro, 2014).

A profundidade em que a cabeça é ancorada deve ser igual, porém não é estabelecido uma ordem de grandeza desse embutimento. O diâmetro interno do anel de reação deve estar no intervalo de 2 a 2,4 vezes o cabeçote de inserção de modo que a variação de ângulo do tronco cônico esteja entre 70 e 54 graus.

Após a inserção desse elemento, o aço é puxado para fora do concreto e com o auxílio de um dinamômetro, verifica-se a força necessária para o arrancamento. Para que o formato da peça extraída seja mais regular é utilizado um anel de contenção, que na medida em que o elemento é extraído, um cone de concreto é removido.

O ensaio de arrancamento provoca na estrutura um estado tridimensional de tensões que através de uma análise numérica antes da fissuração aponta que as tensões principais são maiores nas proximidades do aço embutido, porém não é claro o mecanismo responsável pela fissuração final do concreto (Mehta & Monteiro, 2014).

Os critérios na avaliação da ruptura incluem resistência a compressão pelo esmagamento, tenacidade a fratura e interligação do agregado na fissura

circunferencial (Mehta & Monteiro, 2014). Como a medição do ensaio de arrancamento não é bem definida quanto aos esforços citados acima, recomenda-se o desenvolvimento de uma relação entre o ensaio e a resistência compressão do concreto que é validada apenas para determinada geometria e dosagem.

No caso da utilização do ensaio de arrancamento na conferência da resistência suficiente para a desforma segura, não é necessário que o conjunto extrator seja instalado pois assim que a força de desforma segura especificada é atingida, o ensaio pode ser finalizado.

Os principais fatores que influenciam nos resultados dos ensaios citados são:

- Propriedades do concreto: idade, tipo e dimensão máxima dos agregados, condições de cura, dosagem e tipo de cimento;
- Materiais do ensaio: material do disco, diâmetro e espessura do disco, sistema de reação do equipamento e velocidade de aplicação da carga.

2.2.5 Método da maturidade

O método da maturidade é uma técnica que contabiliza os efeitos combinados de tempo e temperatura no ganho de resistência do concreto (Carino, 2001). O método da maturidade pode ser utilizado para verificar o tempo de desforma do concreto nas primeiras idades, liberação do tráfego em pavimentos de obras rodoviárias entre outras aplicações. Atualmente, o controle de qualidade no processo de concretagem consiste basicamente em moldagem de corpos de prova com o mesmo concreto usado na estrutura conforme especificado na NBR 12655 (ABNT, 2015), e o rompimento do corpo de prova em laboratório a fim de verificar se a resistência especificada no projeto pra determinada peça estrutural será atingida. Porém, é comum que os corpos de prova moldados no momento da concretagem sejam curados em laboratório com condições pré-definidas de temperatura, o que não ocorre no elemento estrutural que foi concretado. Além disso, o volume e a área específica também influenciam na retenção de calor do elemento que conseqüentemente impactará no resultado final da resistência tendo em vista que em geral tanto o volume

quanto a área específica dos corpos de prova cilíndricos são bem diferentes dos elementos concretados (Falcão Bauer, 2022). Como o grau de hidratação do cimento depende do tempo e temperatura, a resistência do concreto pode ser avaliada pelo conceito da maturidade (Mehta & Monteiro, 2014). Utilizando-se amostras de mesmas misturas de concreto com a mesma maturidade, estas resultarão na mesma resistência (Mehta & Monteiro, 2014). Na Figura 2.10 abaixo, podemos observar o diferente comportamento da curva de ganho de resistência de acordo com o nível da temperatura.

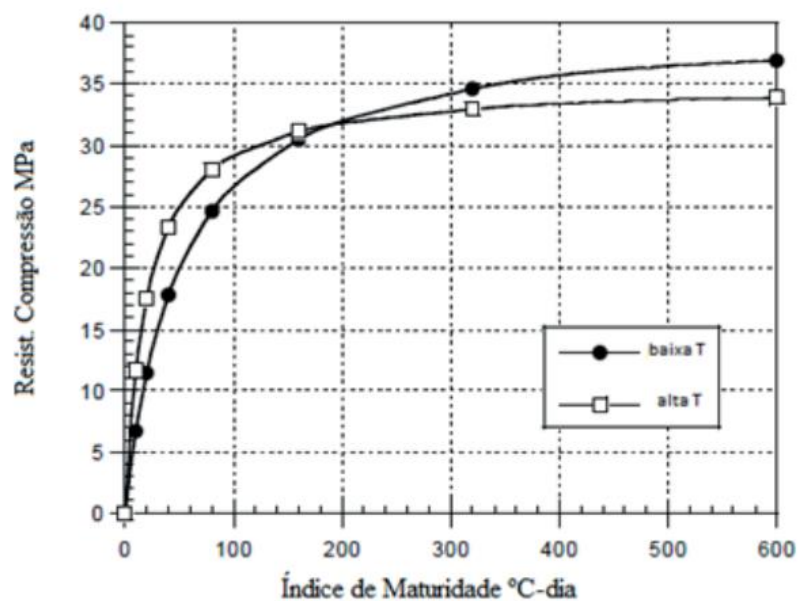


Figura 2.10 – Resultados de um concreto submetido a duas temperaturas de cura distintas em relação ao desenvolvimento de sua maturidade.

(Carino, 2001).

Segundo (Dr. Edward G. Nawy, 2008), a função $M(t)$ da maturidade (fator tempo-temperatura), conhecida como função Nurse-Saul, pode ser definida como o produto entre tempo e temperatura:

$$M(t) = \sum (T\alpha - T_0)\Delta t$$

ou

$$M(t) = \int_0^t (T\alpha - T_0) dt$$

sendo:

$M(t)$ = índice de maturidade;

Δt = intervalo de tempo;

$T\alpha$ = temperatura média do concreto durante intervalo de tempo Δt ;

T_0 = temperatura de referência (geralmente considerada como $- 10^\circ\text{C}$).

A função da equação exibida acima considera que o ganho de resistência do concreto tem um comportamento linear, o que não é válido se as temperaturas de cura variam em uma ampla faixa. Em 1977 foi proposta uma função mais assertiva (Freiesleben Hansen, 1977), que provém do cálculo do índice de maturidade a partir do histórico de temperatura. Atualmente este modelo é amplamente utilizado e recomendado pela norma (ASTM C1074-11, 2011), conhecido como modelo de Arrhenius, que relaciona idade equivalente em uma determinada temperatura:

$$Te = \sum e^{-Q} \left(\frac{1}{Ta} - \frac{1}{Ts} \right) \Delta t$$

sendo:

Te = idade equivalente a uma temperatura especificada;

Q = energia de ativação dividida pela constante do gás, K ;

T_a = temperatura média do concreto durante intervalo de tempo Δt , K;

T_s = temperatura especificada, K;

Δt = intervalo de tempo

Esta função por sua vez é exponencial e representa resultados mais fidedignos em relação ao método linear de Nurse-Saul.

Os equipamentos utilizados no registro dos dados através do método da maturidade são compostos por cabo, sensor instalado na barra de aço e receptor externo conforme mostrado na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Instalação dos sensores de temperatura junto à armadura da laje.

(Ramoel Serafini, 2020)

Os principais fatores que influenciam no resultado da técnica são:

- Curva de calibração: a criação de uma curva de calibração para cada tipo de traço é indispensável. A curva de calibração de determinado traço é criada a partir do monitoramento do histórico de temperatura do traço com o tempo. Dessa forma podemos verificar o ganho de resistência do concreto com o tempo e correlacionar ao seu grau de maturidade (Falcão Bauer, 2022).
- Idade do concreto: A assertividade do método é maior nas primeiras idades de hidratação do cimento, em torno de 7 dias (variação de 0,5 a 1%), pois nesse período há maior variação de temperatura (Falcão Bauer, 2022).
- Temperatura: Temperaturas iniciais muito elevadas resultam em previsão incorreta da resistência do concreto a longo prazo.
- Linearidade: A equação do modelo Nurse-Saul assume um ganho de resistência linear em função da temperatura, o que ocorre na maioria dos casos, porém o aspecto linear do ganho de resistência pode não representar tão fielmente o valor real da resistência em determinado ponto como o que é obtido através do modelo de Arrhenius (Mehta & Monteiro, 2014).

2.2.6 Termografia infravermelha

A técnica não destrutiva denominada termografia infravermelha é utilizada na detecção de defeitos internos no concreto com base na análise da temperatura na superfície ensaiada, incluindo produtos de corrosão, destacamentos e vazios (Hiasa, et al., 2017). Uma área de defeito tem condutividade térmica diferente e se revela como uma área resfriada ou com manchas quentes (Bauer, et al., 2014). É uma técnica considerada rápida, não invasiva, sem contato com resultados em tempo real podendo ser aplicada em grandes distâncias e áreas (Rocha & Póvoas, 2017).

A técnica da termografia infravermelha é dividida em duas categorias: ativa e passiva, dependendo da fonte de calor utilizada para o aquecimento do elemento estrutural (Rocha & Póvoas, 2017). A termografia passiva utiliza-se da energia solar e

temperatura ambiente como fonte de aquecimento, enquanto a termografia ativa requer a utilização de fontes externas de estimulação de calor (Oh, et al., 2013).

Todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto (0 K) emitem radiação na faixa infravermelha do espectro eletromagnético. A radiação infravermelha está na faixa de 0,75 a 1000 μm (micrometro), localizado entre a faixa visível e micro-ondas (Clark, et al., 2003). Utilizando a técnica da termografia infravermelha, a radiação emitida por determinado objeto é detectada de um modo sem contato através de um detector infravermelho da câmara utilizando a equação de Stefan-Boltzmann obtendo a temperatura do objeto (Clark, et al., 2003).

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \frac{q}{A}$$

onde

$E =$ radiação emitida pelo objeto ($\frac{W}{m^2}$);

$q =$ grau de emissão de energia (W);

$A =$ área da superfície emissora (m^2);

$T =$ temperatura absoluta (K);

$\sigma =$ constante de Stefan – Boltzmann;

$\varepsilon =$ emissividade da superfície emissora.

O estabelecimento de critérios associativos as anomalias e patologias a serem analisadas pelo método em questão é de extrema importância. A variação constatada de temperatura Delta-T de 2°C entre regiões próximas e submetidas ao mesmo fluxo

térmico é um forte indício de possíveis anomalias, enquanto um Delta-T de 4°C caracteriza comportamento anormal (Maldague, 2001).

No entanto, a termografia infravermelha apresenta algumas limitações, onde as condições ambientais influenciam diretamente nas medições (Massoud Nasrollahi & and Glenn Washer, 2015).

As principais condições que influenciam no resultado da técnica são:

- Vento: Quando o vento é forte, ele pode gerar cortes de temperatura gerados na superfície (Davis, 2003);
- Radiação solar: A exposição ao sol é considerada como a principal força para gerar gradientes térmicos, pois afeta os valores de temperatura medidos, gerando energia térmica na superfície do concreto (Rocha & Póvoas, 2017);
- Humidade: A cor e o teor de umidade são alguns fatores que também podem influenciar a emissividade dos materiais (Nascimento, 2022);
- Emissividade da superfície: É recomendado a inspeção de pontes durante a noite para eliminar os efeitos da radiação solar, e ter uma melhor visão entre o defeito e as regiões intactas, evitando falsas detecções (Uemoto, 2000).

2.2.7 Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

O teste de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) consiste na determinação da velocidade da propagação de um pulso de energia de vibração em uma estrutura de concreto (Jones, 1949).

A operação do equipamento de teste moderno é exibida na Figura 2.12.

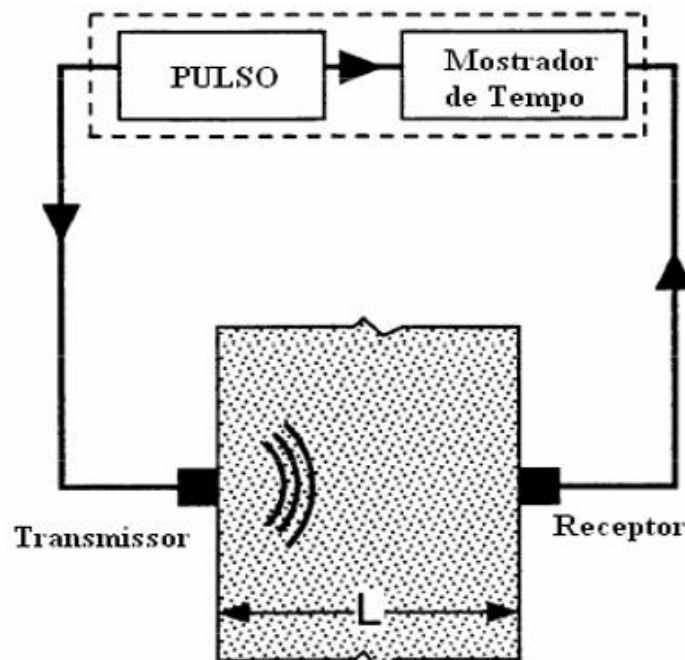


Figura 2.12 - Esquema do aparelho de ultrassom para medir a velocidade de pulso.

(ACI 228.1R-03, 2003).

Um pulsador envia um sinal de curta duração e alta tensão para um transdutor, fazendo com que o transdutor vibre em sua frequência de ressonância (ACI 228.1R-03, 2003). Um temporizador é ligado no início de um pulso elétrico e as vibrações de um transdutor é transferida para o meio material (concreto) através do fluido de acoplamento chegando até um transdutor receptor instalado. No momento em que o pulso chega ao receptor, o temporizador eletrônico é desligado e o valor do tempo é registrado. A distância do percurso entre os transdutores dividido pelo tempo de viagem do pulso é a velocidade média de propagação da onda (Mehta & Monteiro, 2014).

$$V = \frac{L}{t}$$

onde

V é a velocidade de propagação da onda ultrassônica em $\frac{m}{s}$;

L é a medida da distância entre os eixos ou faces dos transdutores em m ;

t é o tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção em s .

Na metodologia de ensaio são utilizadas ondas no intervalo de 20kHz a 150kHz (Mehta & Monteiro, 2014). Existem os ensaios diretos, Figura 2.13, em que os transdutores são colocados em faces opostas, os semidiretos exibidos na Figura 2.14 e os ensaios indiretos Figura 2.15, com os transmissores colocados na mesma face.

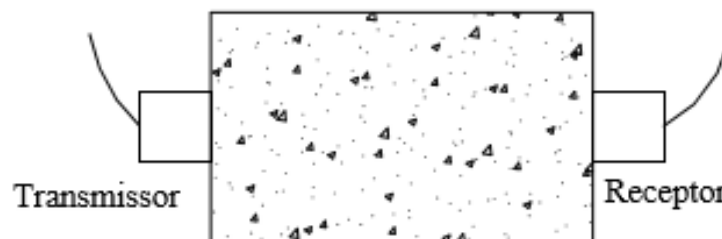


Figura 2.13 - Configuração de um transmissor e receptor para transmissão direta.

(ACI 228.1R-03, 2003).

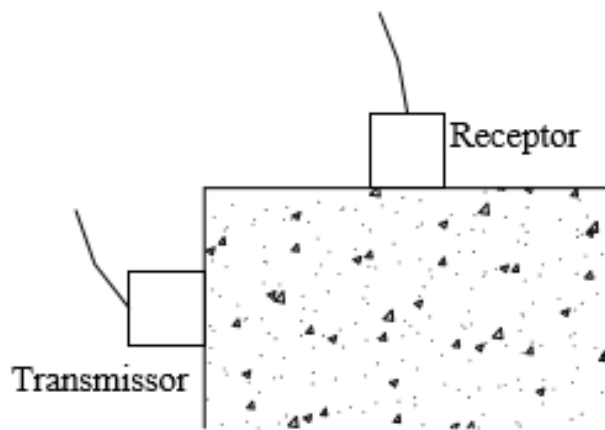


Figura 2.14 - Configuração de um transmissor e receptor para transmissão semidireta.

(ACI 228.1R-03, 2003).

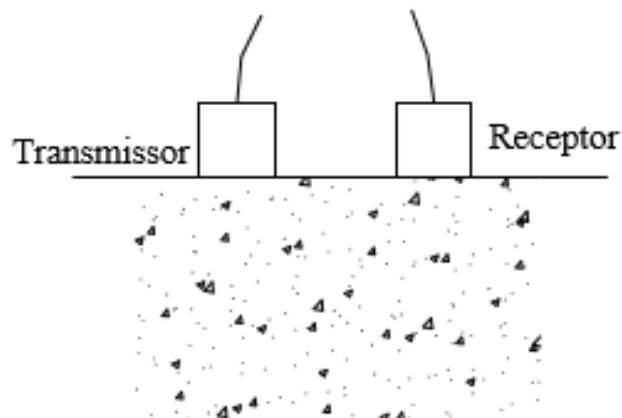


Figura 2.15 - Configuração de um transmissor e receptor para transmissão indireta.

(ACI 228.1R-03, 2003).

A transmissão direta é a mais recomendada, já que esse é o arranjo de transdutores que tem a menor perda de energia entre a transmissão e a recepção do sinal, porém, nem sempre é possível o acesso a superfícies opostas do material em

teste, por exemplo no caso de avaliação de pavimento rígido sendo necessária a utilização do método indireto ou semi-direto (Evangelista, 2002).

Segundo a NBR8802 (ABNT, 2019) os principais fatores que influenciam no resultado dos ensaios são:

- Distância entre as superfícies de contato dos transdutores: para que haja a verificação da homogeneidade do concreto, em grandes estruturas, os transdutores devem estar dispostos em malha de 1m², e em pequenos elementos ou concreto com grande variação é necessário um espaçamento menor (Mehta & Monteiro, 2014);
- Presença de armadura: a velocidade no aço é em cerca 40% maior que a velocidade de propagação do pulso no concreto (ACI 228.1R-03, 2003);
- Densidade do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem: matriz mais heterogênea e com presença de vazios resulta em velocidades menores de propagação de onda (ACI 228.1R-03, 2003);
- Tipo, densidade e outras características dos agregados: as rochas utilizadas como agregado possuem velocidades de propagação de ondas mais altas que as da pasta de cimento, portanto, com o aumento da proporção de agregado, também aumenta a velocidade de propagação no compósito (Mehta & Monteiro, 2014). A rugosidade superficial do agregado interfere na aderência da pasta de cimento, agregados mais rugosos representam uma ZTI (Zona de Transição Interfacial) mais forte que por sua vez resulta em uma velocidade de pulso maior (Güçlüer, 2020);
- Tipo de cimento e grau de hidratação: quanto maior o grau de maturidade da hidratação do cimento utilizado, maior a velocidade do pulso pois à medida que ocorre a hidratação a porosidade do compósito diminui (ACI 228.1R-03, 2003);
- Direção de ensaio da peça: o método mais recomendado para melhor representatividade é método direto, porém quando se não tem acesso as duas faces da peça a ser ensaiada utiliza-se o indireto conforme citado na NBR8802 (ABNT, 2019);

- Tipo de adensamento do concreto: a velocidade de pulso medida da estrutura pode ser afetada pela presença de vazios ao longo do caminho do transmissor para o receptor (ACI 228.1R-03, 2003);
- Idade do concreto: À medida que avança o processo de hidratação do cimento a porosidade diminui e as ondas se propagam mais rapidamente no meio sólido (Mehta & Monteiro, 2014);
- Umidade do concreto: em estado saturado, a velocidade da onda aumenta (Mehta & Monteiro, 2014);
- Temperatura do concreto: quanto maior a temperatura maior será o grau de hidratação dos grãos de cimento, resultando em maiores resistências do concreto nas menores idades e maiores velocidades de onda (ACI 228.1R-03, 2003);
- Forma e tamanho da peça a ser ensaiada: conforme mostrado na tabela C.1 da norma NBR8802, Figura 2.16, é necessário que haja o ajuste da frequência do pulso ultrassônico de acordo com as dimensões da peça a ser ensaiada NBR8802 (ABNT, 2019).

Frequência dos transdutores kHz	Velocidade do pulso ultrassônico km/s		
	$v_c = 3,50$	$v_c = 4,00$	$v_c = 4,50$
	Mínima dimensão lateral recomendada mm		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Figura 2.16 - Efeito das dimensões da peça na transmissão do pulso ultrassônico.

(ABNT, 2019).

3 METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 ilustra esquematicamente a metodologia proposta.

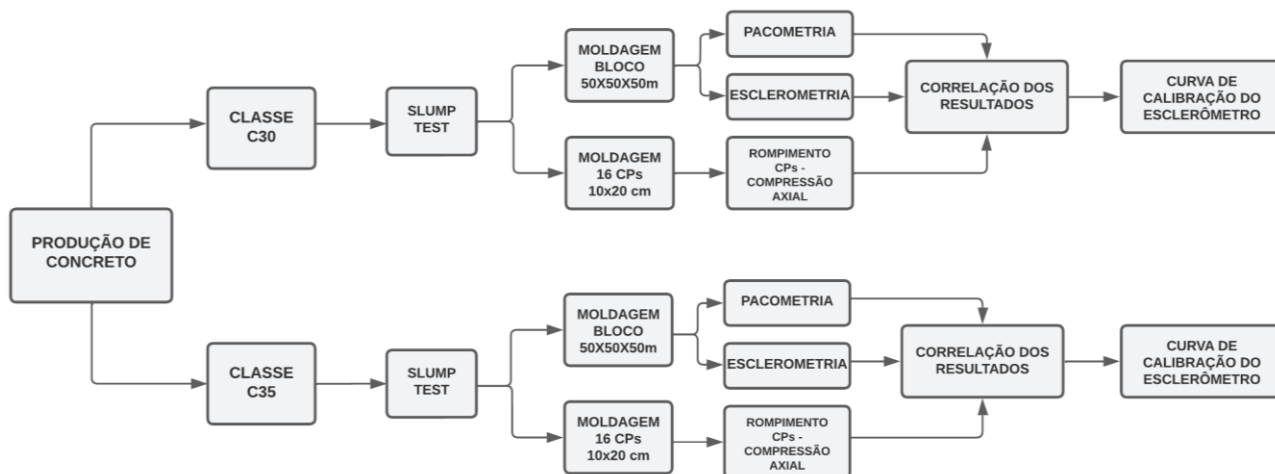


Figura 3.1 - Diagrama dos passos utilizados para a metodologia.

3.1 Materiais

Neste trabalho foram produzidos 2 tipos de concreto convencional (classe C30 e classe C35). Na composição do concreto C30 utilizou-se cimento Portland de alto-forno CP III-40RS, e para a produção do concreto C35 utilizou-se cimento CP V-ARI de alta resistência inicial. O agregado graúdo utilizado nas duas classes de concreto foi brita gnáissica com dimensão característica de 25 mm (brita 1). Para o agregado miúdo utilizou-se areia (média) natural de rio. As características físicas dos agregados foram identificadas e segue na tabela abaixo.

Propriedade	Areia	Brita 1
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,64
Massa unitária (g/cm ³)	1,37	1,47
Módulo de finura	2,36	7,0
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	25,0

Tabela 1 - Características físicas dos agregados.

Na confecção das formas foram utilizadas chapas de compensado, estas foram pregadas a fim de formarem um molde de geometria cúbica de 50 x 50 x 50 cm (comprimento x altura x espessura). A armação da forma foi feita com barras de diâmetro de 12,5 mm colocadas na posição longitudinal, e foram posicionadas também transversalmente nas faces inferior e superior do bloco. Estribos com diâmetro de 4,5 mm e espaçadores de 30 mm também foram confeccionados para o projeto. A montagem final utilizando todos esses materiais pode ser vista na Figura 3.2.

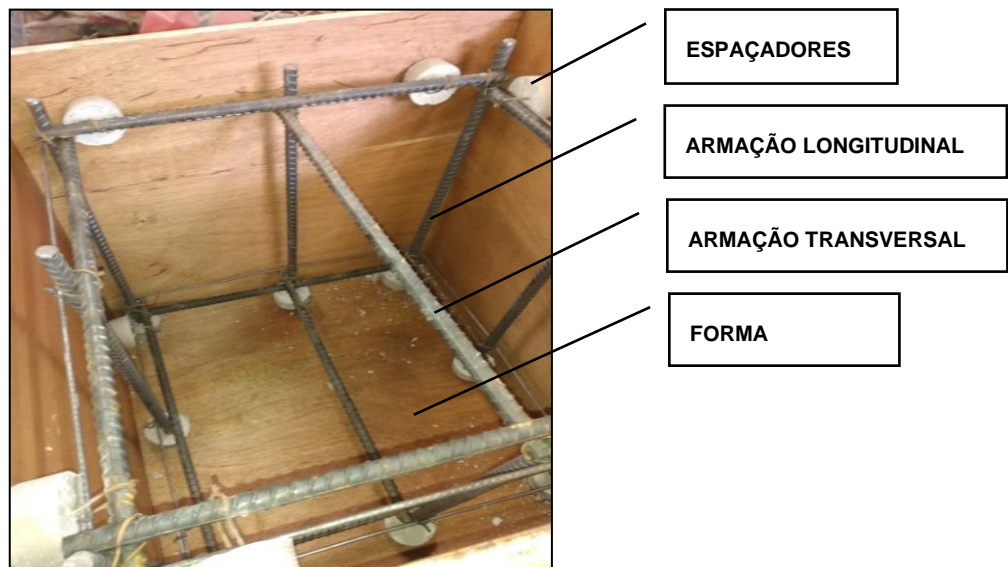


Figura 3.2 - Imagem da forma com espaçadores e armada.

3.2 Métodos

Os traços desenvolvidos foram feitos com base no cálculo de um software computacional de dosagem (Soares, 2009), onde este recebeu parâmetros de entrada de acordo com a classe e tipo do cimento, características dos agregados, fator água-cimento e medida de *slump test*. Todo esse processo foi de acordo com o método ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).



Figura 3.3 – Produção do concreto

Com base nas características dos materiais citados acima, desenvolveu-se os seguintes traços exibidos na Tabela 2 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo). Também é mostrada a quantidade de aditivo usada (calculada em relação a massa de cimento) e o fator água-cimento.

Tabela 2 - Traço dos concretos.

Concreto	Traço	Plastificante	Fator a/c
C30	1:1,95:3,05	0,50%	0,5
C35	1:1,13:2,01	0,50%	0,42

Para determinar a consistência do concreto a ser produzido e garantir sua trabalhabilidade, fixou-se o abatimento do tronco de cone (Slump Test) em 70 ± 10 mm. Tal propriedade foi garantida e pode ser observada na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Procedimento de *slump* Test

O Processo de concretagem e adensamento dos blocos se deu através do lançamento do concreto dividindo-o em três camadas sendo cada camada adensado com um vibrador de imersão do tipo agulha. Já os corpos de prova (CPs) foram moldados em duas camadas e cada camada sendo adensada com 12 golpes segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os blocos foram desmoldados após três dias e os CPs após 24 horas da concretagem. Ambos receberam cura ao ar livre em condições similares. A Figura 3.5 mostra o bloco sendo adensado e sua aparência final após o desmolde.



Figura 3.5 - Adensamento e aparência final do bloco.

Os ensaios de resistência a compressão dos corpos de prova foram realizados nas idades de 7, 21 e 28 dias. Para realizar o teste de compressão foi utilizada uma prensa servo-controladora modelo DL 20000-EMIC e PC 200 com carga máxima de 2000 kN e velocidade de aplicação de carga de 0,45 MPa/s.

Sabendo que a existência de barras de aço geram interferência e influenciam no resultado dos testes de esclerometria se fez necessária a utilização do Profoscope Bewehrungs-Sucher um aparelho capaz de identificar e localizar toda a armação contida no bloco.

O método utilizado para localização das barras, a pacometria, foi feita em cada face do bloco possibilitando o mapeamento das barras e estribos. Para executar o método alguns cuidados foram tomados. Primeiramente cada face do bloco passou por um lixamento enérgico com disco carborundum e para a remoção do material pulverulento ainda aderido foi utilizado um pincel.

Após o mapeamento das armaduras foi realizado o ensaio de esclerometria segundo os protocolos normativos da NBR 7584 (ABNT, 2012). Foram ensaiadas três faces de cada bloco sendo cada face correspondente a uma das idades 7, 21 e 28 dias. Para cada idade executou-se 16 impactos obtendo-se assim o índice esclerométrico desses 16 pontos. Em uma planilha de excel foram lançados os índices esclerométricos individuais e através de uma média aritmética foi calculado o valor médio desses dados. Todos os valores dos índices esclerométricos individuais que obtiveram uma diferença de mais de 10% do valor médio obtido foram desprezados. Após a seleção dos dados, após o cálculo de uma nova média aritmética obteve-se o valor do índice esclerométrico médio (I_m). Por fim chegou-se ao resultado do índice esclerométrico efetivo (I_e) através do produto entre o (I_m) e K (constante do aparelho equivalente a 0,98).

4 RESULTADOS

4.1 Resistência a compressão dos corpos de prova

O resultado do teste de compressão dos CPs referentes as classes de resistências C30 e C35 encontram-se no gráfico da Figura 4.1.

Os resultados obtidos exibidos no Gráfico 1 mostram que em 7 dias o concreto da classe de resistência C30 obteve um desempenho a resistência à compressão igual a 24,93 MPa, e aos 28 dias teve um aumento de 30% chegando a 36,6 MPa. Esse aumento no desempenho do concreto em relação à resistência à compressão é esperado, já que o processo de hidratação dos grãos de cimento Portland acontece de forma progressiva através de uma reação topoquímica (da extremidade para o centro da partícula) que resulta na formação de hidratos como C-H-S (Taylor, 1997) promovendo o enrijecimento da pasta.

O cimento de classe de resistência C35 também atingiu aos 28 dias o f_{cj} esperado equivalente 41,6 MPa. No entanto, o fato de ter sido usado um cimento Portland do tipo CP-V ARI, a matriz cimentícia apresentou em apenas 7 dias um resultado de resistência à compressão equivalente a 98,65% da alcançada aos 28 dias. Essa alta resistência nas primeiras idades de concretos produzidos com o cimento Portland do tipo CP-V ARI ocorre pelo fato dos grãos desse aglomerante apresentarem maior superfície específica (superior a 300 m²/kg NBR 5733 (ABNT, 1991)) comparada a dos outros tipos de cimento. Isso promove uma aceleração do tempo de reação dos processos de hidratação do cimento resultando assim em uma maior resistência nas primeiras idades.

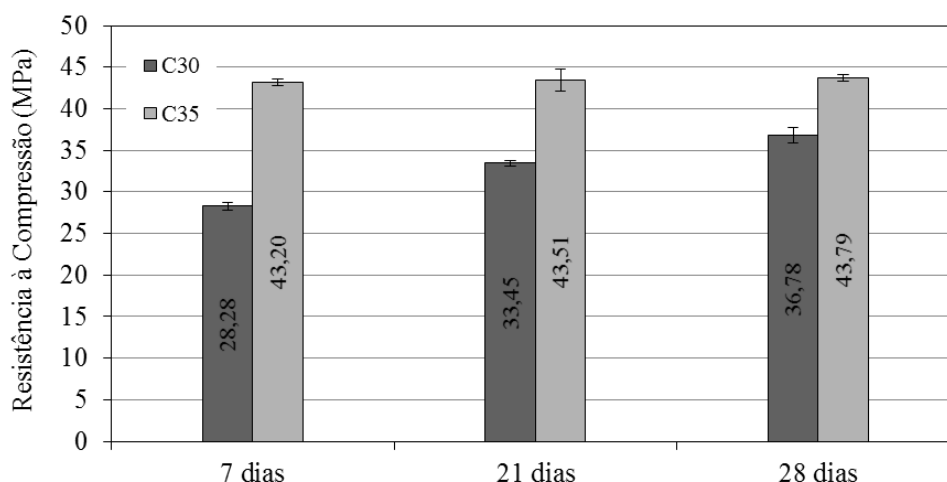


Figura 4.1 - Resistência à compressão dos corpos de prova.

4.2 Esclerometria

O resultado dos I_m (índice esclerométrico médio) e I_e (índice esclerométrico efetivo) para as classes de resistência C30 e C35 são apresentadas na Tabela 3 de acordo com as idades de 7, 21 e 28 dias. Como descrito na metodologia, o I_e foi obtido pela Equação 1 descrita abaixo.

$$I_e = I_m \times 0,98$$

onde 0,98 é a constante equivalente do esclerómetro, fornecida pelo fabricante do aparelho.

Tabela 3 - Índices esclerométricos dos blocos C30 e C35.

Esclerometria	Idade (dias)	I_m	I_e
Bloco C30	7	32,66	32,01
	21	34,19	33,51
	28	34,69	34,00
Bloco C35	7	35,81	35,09
	21	39,88	39,08
	28	39,88	39,08

Através da Tabela é possível perceber o aumento dos índices esclerométricos conforme as idades dos concretos. Isso se justifica pelo processo de endurecimento da superfície do concreto (Câmara, 2006; Xu & Li, 2018), tal fato reforça o que já foi abordado nos ensaios de compressão dos corpos de prova que indicam o ganho de resistência do concreto ao passar das idades.

Verifica-se também que os índices do bloco C35, para todas as idades, foram superiores ao do bloco C30, devido a maior taxa de hidratação do cimento Portland CP-V ARI e a consequente rigidez da peça obtida já nas primeiras idades. Pode-se observar também que, para as idades de 21 e 28 dias, os índices esclerométricos

obtidos do bloco C35 foram idênticos, corroborando com os valores muito próximos de resistência à compressão dos CP's obtidos nessas mesmas idades.

4.3 Curvas de calibração

Baseados nos resultados de compressão dos corpos de prova e dos testes de esclerometria foi feita a correlação desses dados conforme a idade correspondente do concreto e a sua classe de resistência possibilitando assim a construção da curva de calibração do esclerômetro (Figura 4.2).

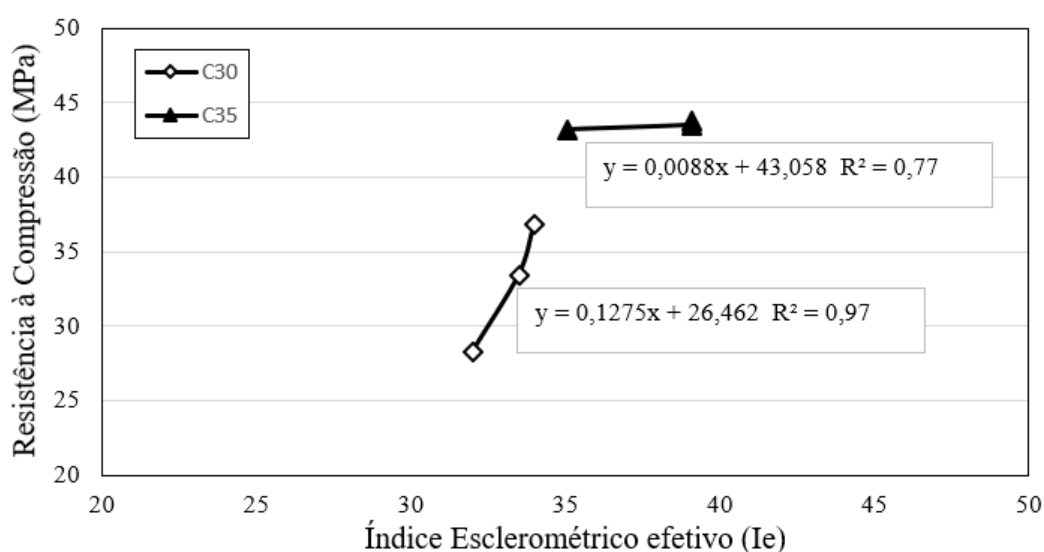


Figura 4.2 - Curvas de calibração dos concretos convencionais C30 e C35.

Esta curva faz com que a estimativa da resistência a compressão axial de um concreto ensaiado com o esclerômetro possa ser mais eficiente, prática e confiável para um mesmo traço utilizado para o ensaio. Essa possibilidade viabiliza o uso do esclerômetro já que essa curva gerada pode ser empregada em todos os casos em que se fizer análise com este equipamento para o mesmo traço utilizado no desenvolvimento do ensaio aumentando de forma significativa a assertividade das medições pelo esclerômetro. Mas é importante ressaltar que esta curva é particular para este traço em questão, ou seja, o uso desta curva no ensaio com o esclerômetro em outros traços tornam os resultados duvidosos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolvido caracterizou os métodos não destrutivos mais utilizados na construção civil, retratando seu funcionamento e pontuando os principais cuidados a serem tomados na utilização de cada ensaio com base nos fatores e condições de contorno que influenciam de forma a distorcer os resultados. A esclerometria foi o método utilizado para o estudo de caso detalhado através da criação de uma curva de calibração de um esclerômetro com o intuito de facilitar e aumentar a confiabilidade dos resultados de ensaios não destrutivos in loco. Uma consideração importante é que os resultados obtidos nesse estudo referem-se a um aparelho em particular, mas a metodologia se aplica a outros. A curva criada contempla concretos das classes de resistência C30 e C35 com resultados registrados entre as idades de 7 a 28 dias fornecendo valores de resistência a compressão confiáveis. Neste estudo de caso, é importante ressaltar que a curva de calibração desenvolvida pode ser aplicada apenas para concretos de mesmo traço e classe de resistência.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 1991. *NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial*, RJ: s.n.
- ABNT, 2012. *NBR 7584: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão*, RJ: ABNT.
- ABNT, 2012. *NBR 7584: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão*, RJ: ABNT.
- ABNT, 2015. *NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, RJ: ABNT.
- ABNT, 2015. *NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, RJ: ABNT.
- ABNT, 2015. *NBR12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle, Recebimento e Aceitação – Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT, 2019. *Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ACI 228.1R-03, 2003. *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*, s.l.: American Concrete Institute.
- ACI 228.1R-03, 2003. *In-place methods to estimate concrete strengths*, s.l.: s.n.
- ACI 228.2R-98, 2004. *Nondestructive Test Methods for Evaluation of*, s.l.: American Concrete Institute.
- ACI 364.1R, 1993. Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation. *ACI Material Journal*, Sep/Oct, pp. 479-498..
- Alwash , M., Sbartai, Z. M. & Breyse, `., 2016. Non-destructive assessment of both mean strength and variability of concrete: A new bi-objective approach. *Construction and Building Materials*, Volume 113, pp. 880-889.
- Alwash, M. et al., 2017. Factors affecting the reliability of assessing the concrete strength by rebound hammer and cores. *Construction and Building Materials*, Volume 140, pp. 354-363.

American Concrete Institute, 2013. *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*, s.l.: American Concrete Institute.

ASTM C 803, 1990. *Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete*. s.l.:s.n.

ASTM C1074-11, 2011. *Standard Practice for Estimating Concrete Strength*. s.l.:s.n.

Bauer, E., Castro, E., Oliveira Filho, A. & Pavón, E., 2014. Critérios para aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios. *Iº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado*, 06 a 09 Agosto.

Bogue, Herfort & Ludwig, 1955. *The Chemistry of Portland Cement*. Second Edition ed. New York: Soil Science .

Breysse, D., 2012. Nondestructive evaluation of concrete strength: an historical review and new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*, Volume 33, pp. 139-163.

Câmara, E., 2006. *Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos*, Santa Catarina: UFSC.

Carino, N., 1997. *Nondestructive Test Methods Engineering Handbook*. CRC Press, Chap. 19 ed. s.l.:Concrete Construction.

Carino, N., 2001. The Maturity Method: From Theory to Application. *National Institute of Standards and Technology*.

Clark, M., McCann, D. & Forde, M., 2003. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *Elsevier*, Volume 36, pp. 265-275.

Copeland, B. e., 1964. *Scientist American*.

Corr, D. J., Juenger, M. C. G., Monteiro, P. J. M. & Bastacky, J., 2004. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. *Cement & Concrete Composites*, Volume 26, p. 1007–1012.

Davis, A., 2003. The nondestructive impulse response test in North America:1985–2001. *NDT&E International*, 36(4), pp. 185-193.

Dr. Edward G. Nawy, P. C., 2008. *Concrete Construction Engineering*. second ed. London, New York: CRC Press.

Duarte, R., 2016. *Ensaaios não destrutivos para concreto*, s.l.: Ibracon.

Esclerometria com equipamento modelo Silvershmidt type (s.d.) Juliana Fadini Natalli.

Evangelista, A., 2002. *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não-destrutivos*, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Falcão Bauer, 2022. *Medição remota de temperatura e resistência a compressão pelo método da maturidade*. s.l.:Revista O EMPREITEIRO.

Freiesleben Hansen, P. a. P., 1977. *Maturity computer for controlled curing and hardening of*. 1, 19-34. ed. s.l.: Nordisk Betong.

Güçlüer, K., 2020. Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete. *Journal of Building Engineering* , 11 September.

Hiasa, S., Birgul, R. & Necati, F. C., 2017. Processing Methodology for Infrared Thermography Images of Concrete Bridges. *Elsevier*, Volume 190, pp. 205-218.

Instruções de operação SilverSchmidt & Hammerlink (2016) Proceq.

Jones, R., 1949. The Non-Destructive Testing of Concrete. *Magazine of Concrete Research*, No.

Khan, M. I., 2012. Evaluation of non-destructive testing of high strength concrete incorporating supplementary cementitious composites. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 61, pp. 125-129.

Maldague, X., 2001. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, New York: John Wiley & Sons.

Malhotra, V., 1984. *In situ/Nondestructive Testing of Concrete, ACI SP 82*. pp. 1-16 ed. Detroit: American Concrete Institute.

Massoud Nasrollahi, M. & Glenn Washer, P. M., 2015. Estimating Inspection Intervals for Bridges Based on Statistical Analysis of National Bridge Inventory Data. *Journal of Bridge Engineering*, 20(9).

Mehta, P. & Monteiro, P. J. M., 2014. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 2nd ed. São Paulo: IBRACON.

Meneghetti, L. C., 1999. *Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som*, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

Meneghetti, L. C., 2016. *Diagnóstico: pesquisa de antecedentes, inspeção e estudo*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Nascimento, L. B. D., 2022. *Inspeção de estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho*, São Paulo: Universidade São Judas Tadeu.

Natalli, J. F., 2022. *Estudo micro e macroestrutural de concretos brasileiros a partir da década de 1960*, Ouro Preto: Escola de Minas.

Natalli, J. F., Thomaz, E. C. S., Mendes, J. C. & Peixoto, R. A. F., 2021. A review on the evolution of Portland cement and chemical. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 13 April.

Oh, T., Arndt, S.-H. K. e. R. W. & Popovics, J. S., 2013. Comparison of NDT Methods for Assessment of a Concrete Bridge Deck. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(3).

Pedroza, L. F. M., 2018. *Avaliação do desempenho do ensaio não destrutivo de pacometria para a verificação do cobrimento e posicionamento de barras de aço*, Brasília: UNICEUB.

Porto, T. B. & Fernandes, D. S. G., 2015. *Concreto armado*. São Paulo: Copyright.

Ramoel Serafini, D. A. S. R. e. A. D. d. F., 2020. Controle contínuo da resistência de estruturas de concreto pelo método da maturidade. *CONCRETO & Construções*, Abril - Junho, pp. 85-90.

Ramos, D. H., 2019. *Avaliação de ensaios não destrutivos aplicados ao concreto*, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Rocha, J. H. & Póvoas, Y. V., 2017. A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. *Alconpat*, 7(3), pp. 1-16.

Sahuinco, M. H. C., 2011. *Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto*, São Paulo: USP.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2023. *SNIC*. [Online] Available at: <http://snic.org.br/cimento.php> [Acesso em 30 JANEIRO 2023].

Singh, N. & Singh, S. P., 2018. Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques. *Construction and Building Materials*, Volume 181, pp. 73-84.

Soares, A. F. F., 2009. *Software especialista para dosagem de misturas cimentícias*, Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Tavora, M., Oliveira, I. A., Miranda, D. & Medeiros, M. H. F. d., 2017. Utilização do ensaio pull off na determinação da resistência à compressão de concretos comparando com outros ensaios não destrutivos. *2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções*, janeiro.

Taylor, H., 1997. *Cement Chemistry*. 2nd. ed. London: Thomas Telford.

Uemoto, T., 2000. Maintenance of concrete structure and application of nondestructive inspection in Japan. *Proc. Non Destructive Testing in Civil Eng*, pp. 1-11.

Xu, T. & Li, J., 2018. Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test of drilled cores. *Construction and Building Materials*, Volume 188, pp. 820-832.