

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO: COMPARAÇÃO ENTRE ESCLEROMETRIA E RUPTURA DE CORPO DE PROVA

Autor: Lucas Reis Lobraico da Silva (lucas.lobraico@edu.pucrs.br)

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Girardi (ricardo.girardi@pucrs.br)

Resumo

Para garantir a qualidade das obras, é fundamental o acompanhamento por profissionais habilitados e a realização de ensaios técnicos para avaliar a resistência à compressão do concreto, seja por método destrutivo, ou não destrutivos. Neste sentido, o presente trabalho visa analisar e comparar a resistência à compressão do concreto obtida por meio de ensaio não destrutivo (esclerometria) e destrutivo, através da ruptura de corpos de prova cilíndricos de concreto moldado em laboratório para três (03) níveis de resistência teórica. Os resultados do estudo demonstram no primeiro traço (15 MPa) que ambos os métodos atingiram a resistência definida, ocorrendo uma variação de aproximadamente 39% na resistência à compressão obtida entre os métodos na idade de 28 dias, sendo que o método destrutivo apresenta menor resistência. Já no segundo traço (25 MPa), a determinação da resistência por meio da esclerometria conduz a resultados superiores em aproximadamente 28%, em relação ao ensaio destrutivo. A menor diferença entre a resistência à compressão obtida por ambos os métodos, ocorreu no traço de resistência teórica de 35 MPa, onde a esclerometria foi superior em apenas 16%, em relação ao ensaio destrutivo na idade de 28 dias. Por fim, diante dos resultados obtidos entre os ensaios de esclerometria e de ruptura de corpos de prova, a resistência obtida pelo método não destrutivo deve ser utilizada com cautela, visando a segurança estrutural de uma edificação, porém pode ser indicada como ferramenta de auxílio ou complementar aos ensaios destrutivos.

Palavras-chave: Concreto; Ensaios em Concreto; NBR 7584; NBR 5739.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um grande expoente da circulação de capital financeiro no país, empregando pessoas e aquecendo o mercado imobiliário, não só por meio de novas edificações, mas também em reformas, adequações e ampliações de antigas construções. Segundo os dados do SINDUSCON-RS (2024), o Produto Interno Bruto (PIB) da construção tem uma projeção de 6,0% de crescimento para 2024, sendo que os novos empreendimentos não constitui a maior parcela deste, e sim, as reformas em geral.

É de suma importância destacar que as reformas/ampliações das edificações existente são corriqueiras, pois buscam revitalizar, modernizar e adaptar os ambientes, bem como proceder à manutenções preventivas e/ou corretivas. Por outro lado, segundo o IBGE (2024), a construção civil gera 50% de resíduo sólido urbano, impactado de forma direta o meio

ambiente, e há um grande agravante, pois, uma parcela significativa não é destinada de forma correta e adequada.

Para a realização de novas obras, reforma/ampliação/adequação, segundo o CREA (2024) é preciso o acompanhamento por profissional habilitado, pois por mais simples que seja a obra, qualquer erro e/ou falha pode concorrer à uma criticidade. Em complementação, ao se trabalhar com reforma é preciso uma análise técnica minuciosa sobre a concepção inicial do empreendimento, por meio da análise dos antigos projetos, bem como em muitas vezes o estudo e execução de um plano de ensaios sobre a estrutura.

Os ensaios realizados para identificar a qualidade e integralidade da estrutura são fundamentais para auxílio do engenheiro responsável. Os mesmos, seguem em duas linhas distintas de execução, método destrutivo ou não, os quais podem concorrer na busca de resultados de quantificação, ou atuarem como técnicas complementares. Os ensaios mais corriqueiros no estado endurecido do concreto é o rompimento do corpo de prova de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e o índice esclerométrico por reflexão com base na NBR 7584 (ABNT, 2012).

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar a resistência à compressão do concreto, obtida com o auxílio de ensaio não destrutivo (esclerometria) e o destrutivo, por meio da resistência à compressão medida diretamente sobre corpos de prova cilíndricos de concreto para três (03) níveis de resistência teórica de dosagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o concreto é um composto obtido da mistura de agregados, aglomerante(s) e água, podendo eventualmente conter adições minerais e/ou aditivos químicos. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) juntamente com os relatórios da Global Cement Report (2020) apontam que é utilizado em torno de 10 bilhões de metros cúbicos de concreto por ano, tornando o segundo material mais utilizado no mundo, só perdendo para a água.

Neville (2016) tem uma visão geral e ampla, o concreto é qualquer massa ou produto produzido, a partir de um meio cimentício. Atualmente esse meio é o produto da reação entre o cimento Portland e a água. Esse aglomerante, pode ser produzido por uma larga gama de cimentos e também conter pozolanas, escória de alto forno e entre outros. Além dessas

características e possibilidades em sua composição, durante a hidratação, junto aos agregados podem ser curados a vapor, autoclavados, extrudados e entre outros processos, na forma de concreto.

Para Recena (2017) dentre os concretos convencionais a grande variável a ser controlada é a relação água/cimento, sendo dispensado o uso de aditivos químicos para obter a resistência inicialmente especificada. Já para o concreto de alta resistência, a introdução de aditivos e adições minerais é necessária para atingir as propriedades definidas, tendo a ótica da otimização da zona de transição.

2.2 Propriedades do Concreto

O concreto deve apresentar diversas propriedades, sendo isso que o torna um material essencial na construção civil. Essas propriedades devem ser divididas em estado fresco e estado endurecido. Além do mais, o concreto é um material que inicialmente no seu estado fresco se adapta em inúmeros formatos, tendo facilidade para manuseio e inserção em diferentes cenários ao custo acessível e competitivo.

2.2.1 Estado Fresco

Segundo Helene e Andrade (2010) as propriedades do concreto no estado fresco perduram por um curto período, entre 1 e 5 horas. Dentro deste estimado tempo, é necessário realizar o transporte, lançamento e adensamento.

Neville (2016) também complementa, explicando a diferença do fenômeno de endurecimento do concreto com a pega do cimento, pois ocorre simplesmente porque parte da água é absorvida pelos agregados, se não estiverem saturados, parte é perdida por evaporação, e parte é removida pelas reações químicas.

Dentro do aspecto do estado fresco do concreto, existe algumas características para se analisar, dentre eles, cabe ressaltar alguns a trabalhabilidade, coesão, segregação, exsudação, as quais são relevantes para determinar a qualidade do concreto, quando fresco.

Para Recena (2017), a trabalhabilidade é um conceito relativo, o qual não se liga a plasticidade do concreto, pois quando há uma trabalhabilidade ótima de um concreto para a execução de uma peça de pavimentação ou tubo de concreto se tem um material mais seco, em contrapartida a trabalhabilidade ótima exigida para um concreto ser bombeado, a plasticidade deverá ser mais elevada.

Neville (2016) traz a trabalhabilidade em consonância a Recena (2017), mas destacando algumas particularidades e apontamentos dos principais fatores, o teor de água na mistura, pois a adição de água aumenta a lubrificação entre as partículas. Por outro lado, para ter as condições ótimas do mínimo de vazios ou maior adensamento sem segregação, o agregado e a granulometria devem ser considerados pois tem influência neste aspecto.

Outros dois fatores que influenciam na trabalhabilidade é o tempo e a temperatura. O concreto fresco é enrijecido no decorrer do tempo, mas pode se confundir com o tempo de pega do cimento. Esse fato ocorre simplesmente porque os agregados absorvem parte da água, ocorre a evaporação quando exposto ao sol, as temperaturas elevadas e/ou vento.

Neville (2016) também explica sobre a coesão e segregação, elas sempre andam juntas pois para ter um concreto com ótima trabalhabilidade não podendo segregar, sendo coeso a sua mistura. Para a segregação define como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, de tal modo que a distribuição não seja mais uniforme. Neville (2016) separa esse conceito em duas formas. A primeira, as partículas maiores tendem a se separar, já que deslizam em superfícies inclinadas ou se assentam mais que as partículas finas. Já na segunda, ocorre principalmente nas misturas com excesso de água, o qual ocorre a separação da pasta (água e cimento) dos agregados.

Uma outra característica que se tem no estado fresco, mas pode trazer algumas alterações para o estado endurecido é a exsudação, a qual Neville (2016) caracteriza como uma segregação da qual parte da água tende a migrar para a superfície do concreto recém-lançado. É causado pela incapacidade dos agregados sólidos da mistura em reter a água de amassamento. Se o acabamento do concreto for realizado quando ainda estiver uma camada de água advinda da exsudação, a camada superficial se torna fraca e porosa, para isso, espera até a evaporação dessa fina camada e utiliza-se desempenadeiras de madeira. Caso a evaporação de água da superfície do concreto for maior que a velocidade de exsudação, pode ocorrer fissuração por retração plástica.

Para Catusso et al. (2015), independentemente do tipo de cimento e fator água/cimento, no experimento realizado, no concreto ao ocorrer a exsudação teve também a carbonatação da peça com maior fator na face superior, chegando em alguns casos a 200% de diferença as laterais e parte inferior da peça.

2.2.2 Estado Endurecido

A abrangência do estado endurecido do concreto, existe algumas características para se analisar, dentre eles: durabilidade, porosidade, permeabilidade e a resistência, os quais são aspectos relevantes para determinar a saúde do concreto quando fresco.

Segundo Helene e Andrade (2010) o estado endurecido do concreto inicia-se juntamente com a hidratação do cimento, o qual faz parte do concreto.

Para Neville (2016) a resistência a compressão no estado endurecido tem grande importância ao período e qualidade de hidratação que o concreto obteve nos seus estágios iniciais, pois quanto mais tempo de hidratação o concreto teve, maior será sua resistência perante a resistência calculada inicialmente.

Ambos os autores, tanto Helene e Andrade (2010) quanto Neville (2016), relacionam a resistência a compressão como uma principal propriedade para o concreto endurecido, não desqualificando as demais propriedades, pois também são importantes para os variados padrões empregado.

Neville (2016) também explica e correlaciona a resistência com a porosidade, independentemente dos poros capilares estiverem com água ou vazios. Um experimento realizado por ele, destacou que quando aplicava a pasta com uma grande pressão, adensando e deixando bem compactado, conseguia obter uma resistência muito elevada em comparação a quando existia grande porosidade.

Recena (2017) trata a durabilidade do concreto muito na razão de qual ambiente ele estará inserido, da forma de como será tratado, mantido e usado. Pelo concreto ser um material cerâmico e frágil, sendo suscetível a retração o qual culmina na fissuração, independente dos materiais empregados e do traço que for aplicado. A fissura sempre será o caminho mais fácil para entrada de água e agentes agressivos, muitas vezes sendo o fator determinante da durabilidade.

Neville (2016) traz a ideia que a permeabilidade é a facilidade de um líquido ou gás pode se deslocar dentro do concreto, traz o visão para um ambiente de estanqueidade, onde se deve ter a menor porosidade possível, pois é possível trabalhar com reservatórios de líquidos entre outros.

Já Vale et al. (2022) trazem porosidade como uma solução para ambientes drenantes, onde o fluido deve percorrer o mais rápido possível o material, um exemplo trazido por eles é

em uso na drenagem urbana, podendo evitar enchentes. Outro ponto analisado foi o da resistência mecânica, o qual mais poroso for, menor será sua resistência.

2.3 Métodos de Ensaio

Os ensaios realizados em estrutura de concreto são de grande relevância, trazendo dados extraídos dos materiais, os quais tem um papel de grande importância e para alguns casos devem ter suas estruturas preservadas, não podendo ter uma amostra retirada ou nem menos danificada. Para isso foi dividido em duas partes, o método destrutivo e não destrutivo. Segundo Mello et al (2020), o ensaio não destrutivo é realizado a um material que não altere de forma permanente suas propriedades, seria um dano imperceptível ou nulo. E alguns ensaios que atendem estas especificações de END (Ensaio Não Destrutivo) visando a resistência à compressão é a esclerometria, e o ultrassom.

Estes dois ensaios mencionados pelo Mello et al (2020), são os mais empregados no ramo da construção civil diante da vasta gama de exemplares existentes para analisar a resistência à compressão do concreto, pois têm um baixo custo em especial a esclerometria e também podem ser usados em diversos casos de obra. Complementando com o teste de radiografia, mas não tão usual quanto aos anteriormente mencionados.

Na mesma linha, Negri et al, (2024) utiliza dois ensaios, esclerometria e de ultrassom, pois os dois têm grande utilização no mercado, para obter uma correlação com a compressão axial através de corpos de prova com diferentes datas de rompimento.

O ensaio destrutivo para obter a resistência à compressão seria a ruptura de corpos de prova, o qual pode-se realizar a moldagem do mesmo, ou realiza a extração em uma estrutura já realizada. Todos os métodos realizam alguma alteração física, química.

Ambos são normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a qual tem parâmetros e processos para realizar cada análise, elas são a NBR 5739 (ABNT, 2018) e a NBR 7584 (ABNT, 2012).

2.4 O Uso da Esclerometria e da Ruptura de Corpos de Prova

O ensaio de esclerometria é normatizado pela NBR 7584 (ABNT, 2012). Para a execução é necessários alguns materiais, eles são: Disco ou prisma de carborundum, máquina politriz com acessórios para desbaste e polimento de superfície do concreto e do esclerômetro, tendo este dispositivo separados em quatro modelos com energia de percussão diferentes, como mostra nas Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos e aplicações para cada esclerômetro.

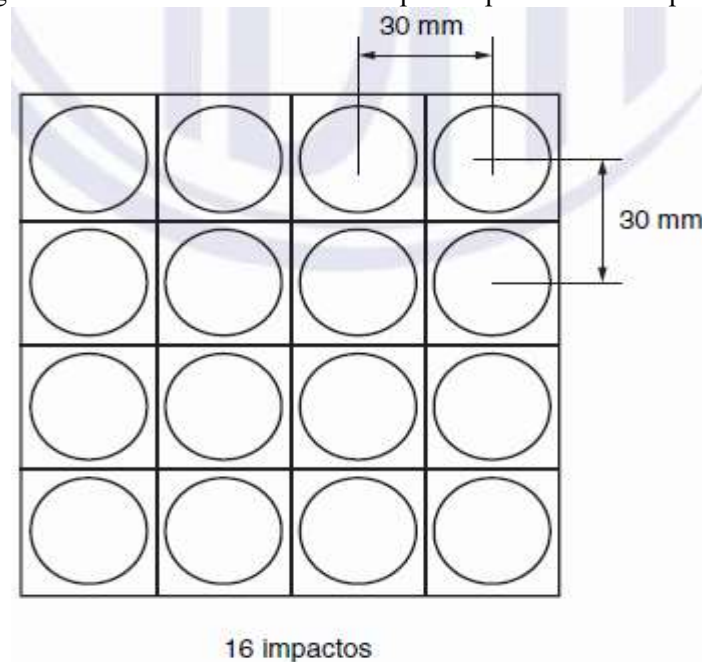
TIPO	INDICAÇÃO
Energia de percussão de 30N.m	Obras de grandes volumes de concreto, como concreto-massa e pistas protendidas de aeroportos.
Energia de percussão de 2,25N.m	Com ou sem fita registradora automática, que pode ser utilizado em casos normais de construção de edifícios e postes.
Energia de percussão de 0,90 N.m	Com ou sem aumento de área da calota esférica da ponta de haste, indicado para concretos de baixa resistência.
Energia de percussão de 0,75 N.m	Com ou sem fita registradora automática, que é mais apropriada para elementos, componentes e peças de concreto de pequenas dimensões e sensíveis aos golpes.

Fonte: Adaptada pelo Autor (2024)

A NBR 7584 (ABNT, 2012) determina que as superfícies do concreto devem ser secas ao ar, limpas e planas. A área ensaiada deve ser preparada com um polimento com prisma ou disco de carborudum com movimentos circulares e toda a poeira superficial deve ser removida a seco.

Ademais, devem ser realizados dezesseis (16) impactos distribuídos uniformemente no corpo de prova, mantendo uma distância mínima de 30 milímetros entre os pontos de aplicação da percussão, não sendo permitido realizar um impacto sobre o mesmo ponto. A Figura 1 apresenta a distribuição dos locais de aplicação da percussão pelo equipamento.

Figura 1 – Distâncias mínimas entre pontos para realizar impactos.



Fonte: NBR 7584 (ABNT, 2012)

Para encontrar o índice esclerométrico, segundo a NBR 7584 (ABNT, 2012) é preciso realizar a média aritmética entre as dezesseis (16) medidas individuais realizadas. Despreza-se todo o índice esclerométrico individual que estiver afastado mais de 10% da média, e recalcula-se novamente média com os índices restantes. Após, restando no mínimo cinco índices com dispersão inferior a 10% em torno da média, o resultado é considerado, do contrário deve ser desconsiderado.

Para uma correção do valor médio obtido de uma área de ensaio para um índice correspondente à posição horizontal, é determinado pela NBR 7584 (ABNT, 2012) a consulta dos coeficientes de correção fornecido pelo fabricante do instrumento de medição (esclerômetro). Após encontrar o índice esclerométrico médio (IE), é possível determinar o índice esclerométrico efetivo ($IE\alpha$) através da Equação 1:

Equação 1 – Cálculo do índice esclerométrico médio.

$$IE\alpha = k \cdot IE$$

Onde:

$IE\alpha$: índice esclerométrico médio efetivo;

k: coeficiente de correção do índice esclerométrico;

IE: índice esclerométrico médio.

Fonte: NBR 7584 (ABNT, 2012)

Segundo Ramalho e Fonseca (2020), o ensaio de esclerometria é um importante instrumento para avaliações das estruturas de concreto, já seu uso não se deve ser o substituto perante aos métodos tradicionais, sendo utilizado como uma técnica para análise complementar.

Diante disso a própria NBR 7584 (ABNT, 2012), afirma que o ensaio esclerométrico não substitui nenhum outro método, mas é utilizado como complementar. Ademais, a norma não recomenda utilizar este método na avaliação direta a resistência à compressão, a menos que haja uma correlação confiável com outros ensaios, tais como: compressão axial e extração de testemunho.

Visando uma comparação em senários distintos de corpos de prova, um extraído e outro moldado, Lecheta e Couto (2012), obtiveram resultados aproximados analisando o corpo de prova extraído e a esclerometria, mas não iguais. Já outra análise entre o corpo de prova extraído e esclerometria comparando com corpo de prova moldado obtiveram resultados de resistência à compressão próximos.

A determinação da resistência à compressão é normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), a qual apresenta as orientações necessária de todas as etapas do ensaio. Inicialmente o

corpo de prova deve ser retificado e/ou tendo sua base capeada, pois esta preparação inicial é fundamental para deixar planificado e sem alterações na superfície, visando a perfeita aplicação da carga sobre a amostra.

Após planificar a base do corpo de prova, iniciasse o preparo ao rompimento, centralizando entre os pratos e certificando que tanto a amostra quanto os pratos onde serão depositados estejam secos. Posteriormente é realizado o carregamento continuamente do corpo de prova por uma presa, evitando dar choques, este carregamento é expressado por um gráfico o qual mostra a força aplicada pela deformação gerada no exemplar. O carregamento só é cessado quando houver uma queda de força que indique uma ruptura.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

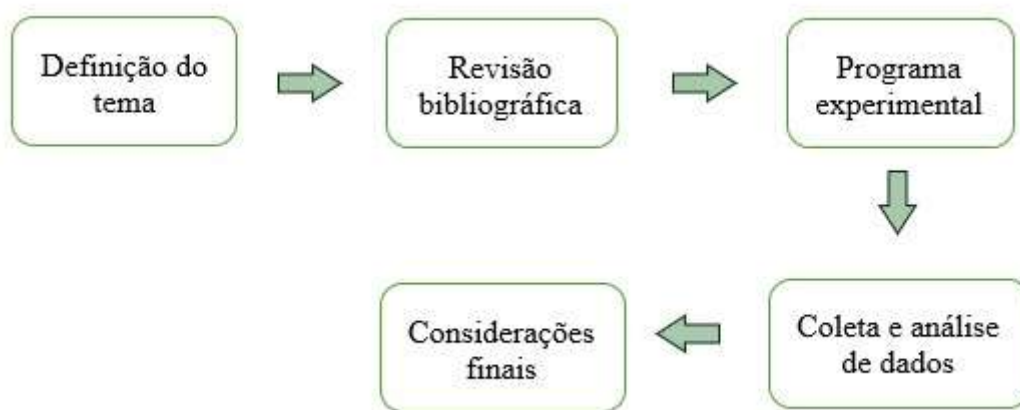
3.1 Método de Pesquisa

A presente pesquisa tem abordagem quantitativa, pois tem como objetivo analisar e quantificar os dados extraídos, por exemplo, com auxílio de gráficos e tabelas. Também, apresenta caráter explicativa, tendo sido realizado experimento prático com a moldagem de amostras em concreto, as quais serão a fonte de coleta de dados a serem analisados Nascimento e Souza (2016).

3.2 Método de Trabalho

O fluxo do método de trabalho para desenvolvimento foi estabelecido conforme a apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Método de trabalho



Fonte: O Autor (2024)

A definição do tema deu-se pelo interesse do autor em aprofundar os conhecimentos acerca dos métodos de determinação da resistência à compressão do concreto. Diante disso,

procedeu a revisão bibliográfica por meio de trabalhos extraídos de livros, artigos e revistas acadêmicas, cuja finalidade é obter o embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho.

Após, foi elaborado um programa experimental, visando a reprodução de três (03) traços de concreto, visando analisar se algum fator está relacionado, sendo reproduzido em massa, para as resistências características à compressão ($f_{ck,proj}$) de 15, 25 e 35MPa, ambos calculados pelo método de dosagem desenvolvido por Recena (2017). Em todos os concretos foram utilizados os mesmos materiais: cimento CP V ARI, areia média e brita 1 de basalto.

A reprodução dos traços foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da PUCRS, sendo moldados seis (06) corpos de prova (10 x 20 cm) com base na NBR 5738 (ABNT, 2015) e um (01) cubo (25 cm de aresta), para cada traço. É preciso registrar que os corpos de prova cilíndricos e cúbicos foram desmoldados com três (03) dias de idade, e após passaram por cura ao ar, pois teve objetivo de simular as situações adversas observadas em algumas obra que não realizam a cura úmida do concreto, bem como permitindo a padronização do processo nas amostras ensaiadas.

A moldagem do cubo foi necessária, pois no corpo de prova cilíndrico não é possível realizar o ensaio de esclerometria, conforme a metodologia definida pela NBR 7584 (ABNT, 2012).

As amostras foram ensaiadas aos 7, 14 e 28 dias de idades, com base na NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7584 (ABNT, 2012) para efetuar as comparações. Por fim, para o ensaio de esclerometria foi utilizado um aparelho de reflexão, já calibrado, com energia de percussão de 2,25N.m., sendo executado na posição horizontal de (0°) diante a face lateral do cubo.

Os ensaios de esclerometria, foi realizado sob uma mesa, utilizando um outro cubo para apoiar um ao outro e evitar um possível movimento durante o ensaio, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Fixação dos cubos no ensaio esclerométrico.



Fonte: O Autor (2024)

Por fim, os resultados obtidos no ensaio não destrutivo de esclerometria estão apresentados nos Apêndices A e B ao término do presente trabalho.

4 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 Moldagem dos Concretos

Na Tabela 2 estão apresentados os traços de concreto calculados pelo método de Recena (2017) para as resistência características à compressão de 15, 25 e 35 MPa.

Tabela 2 – Traços de Concreto

Material	Traço 1	Traço 2	Traço 3
	15 MPa	25 MPa	35 MPa
	Traço Unitário (em massa)		
Cimento CP V ARI	1,00	1,00	1,00
Areia Média	3,39	2,39	1,73
Brita 1 - Basalto	3,59	2,78	2,24
Relação a/c	0,77	0,59	0,48
Teor de argamassa ($\alpha\%$)	55%		
Teor de água (H%)	9,6		

Fonte: O Autor (2024)

Após a mistura do concreto em betoneira de eixo vertical, foi procedida a verificação do abatimento pelo tronco de cone (*slump test*), conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Abatimento pelo Tronco de Cone (*Slump test*)

Traço de Concreto		
15 MPa	25 MPa	35 MPa
180mm	165mm	135mm

Fonte: O Autor (2024)

Diante dos resultados verificados na Tabela 3 é possível constatar que os concretos reproduzidos estão situados na mesma faixa de trabalhabilidade (150 ± 30) mm.

4.2 Ensaios no Estado Endurecido

4.2.1 Resistência à Compressão pelo Método Destrutivo

As amostras foram ensaiadas nas idades de 7, 14 e 28 dias, segundo a metodologia proposta na NBR 5739 (ABNT, 2018). Ademais, todas as amostras foram preparadas com pasta de enxofre, aplicada junto às bases, visando nivelar completamente a região de contato com o equipamento de compressão.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados das resistência à compressão dos exemplares para os diferentes traços de concreto reproduzidos, conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022).

Tabela 4 - Resistência à Compressão: corpos de prova cilíndricos

Resistência à Compressão do Exemplar (MPa)			
Idade (dias)	Traço 1 (15 MPa)	Traço 2 (25 MPa)	Traço 3 (35 MPa)
7	17,1	23,0	26,3
14	18,5	25,5	31,6
28	20,2	27,4	34,5

Fonte: O Autor (2024)

Através da Tabela 4, é possível verificar o aumento na resistência à compressão em todos os traços reproduzidos, bem como à medida em que a idade de ensaio aumenta. Cabe salientar que somente o terceiro traço (35 MPa) não atingiu a resistência característica à compressão, calculada por meio do método de Recena (2017).

Um dos fatores que certamente prejudicou o desenvolvimento da resistência foi a ausência da cura úmida nas amostras, Neville (2016) cita que após a concretagem é necessário manter o concreto hidratado, pois a perda de água do concreto nas idades iniciais, em especial, é extremamente prejudicial para a resistência mecânica. Lecheta e Couto (2012) vão na mesma linha, do fato da hidratação do concreto nas idades iniciais ter grande relevância para a resistência à compressão do concreto.

Entretanto no presente estudo não foi realizada a cura úmida, pois teve um objetivo de simular condições mais extremas empregada em algumas obras, realizando a desforma, sem qualquer método/prática de cura ou ainda mesmo não sendo aplicada corretamente nos canteiros de obra, a NBR 6118 (ABNT, 2018) recomenda a cura úmida para um período mínimo de sete (07) dias, para proporcionar o correto desenvolvimento da resistência e reduzir a incidência de retração no concreto.

Outro fator que pode ter contribuído com interferência sobre o resultado, é a eventual moldagem, trazendo uma não uniformização do concreto no cilindro, tendo ninho de concretagem, separação dos agregados graúdos da pasta, e ou ensaio inadequado dos exemplares, causando uma leitura equivocadas ou irregulares. Porém, não foram observados desvios quanto as moldagens e ensaios.

4.2.2 Resistência à Compressão pelo Método Não-Destrutivo

No ensaio não destrutivo (esclerometria) é determinado o índice esclerométrico médio efetivo, o qual é coletado inicialmente através da demarcação de dezesseis (16) pontos específicos na superfície lateral da amostra, onde é correlacionado com o valor de ajuste do gráfico, presente no equipamento - esclerômetro. Com isso é possível obter o valor de resistência à compressão (MPa) do material.

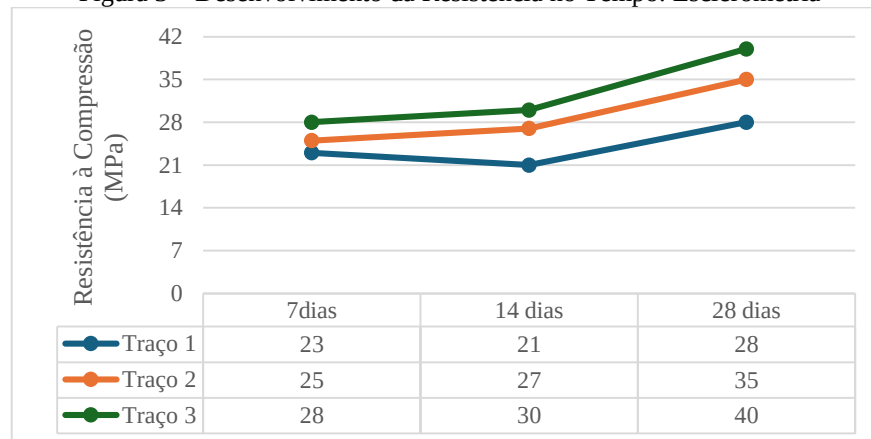
Na Tabela 5 e Figura 3 estão apresentados os valores da resistência à compressão, obtidos pelo ensaio de esclerometria dos concretos moldados.

Tabela 5 – Resistência à Compressão: esclerometria

Resistência à Compressão (MPa)			
Idade (dias)	Traço 1 (15 MPa)	Traço 2 (25 MPa)	Traço 3 (35 MPa)
7	23,0	25,0	28,0
14	21,0	27,0	30,0
28	28,0	35,0	40,0

Fonte: O Autor (2024)

Figura 3 – Desenvolvimento da Resistência no Tempo: Esclerometria



Fonte: O Autor (2024)

Com base nos resultados dos ensaios de esclerometria apresentados na Tabela 5 e na Figura 3, é possível verificar o crescimento da resistência à compressão, à medida em que a idade aumenta, com exceção do Traço 1 (15 MPa) na idade de 14 dias, onde houve redução na resistência, em relação aos 7 dias de idade.

A ocorrência da redução da resistência em uma das idades no ensaio de esclerometria pode ser atribuída a diversos fatores. No caso do primeiro traço (15 MPa), o mais evidente foi a presença de vazios de ar em todas as faces laterais do cubo ensaiado, ao que foi possível identificar, só apresentou divergência nessa data de ensaio.

Em contrapartida, os demais traços apresentaram crescimento contínuo no ganho de resistência à compressão, à medida em que a idade cresce. É preciso registrar as resistências à compressão obtidas pela esclerometria aos 28 dias superaram os valores de entrada pelo método de dosagem de Recena (2017), sendo a menor diferença no terceiro traço, tendo sequência do segundo traço e a maior no primeiro traço.

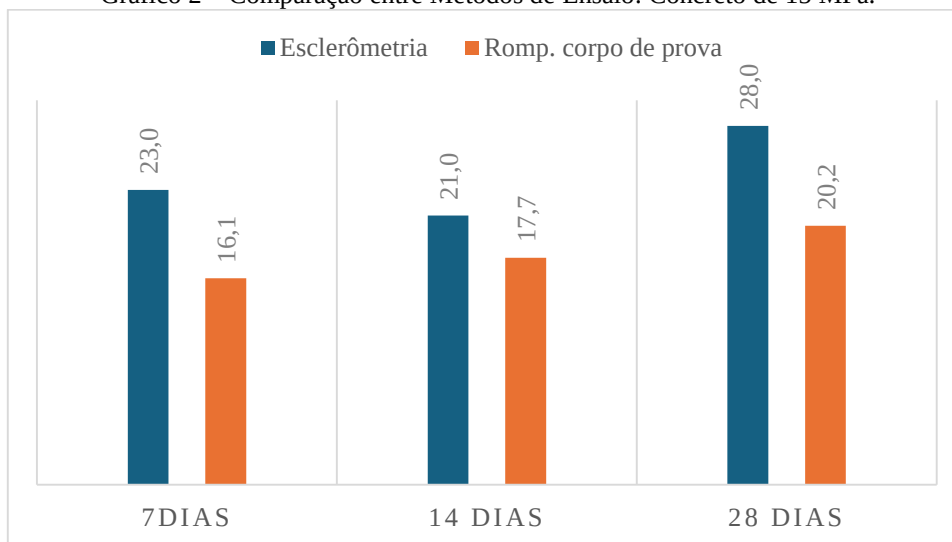
Diante disso, é visível que a resistência prevista pelo método de Recena (2017) foi atingida já aos 7 dias de idade, para os traços de resistência teórica de 15 e 25 MPa. Já para o traço de resistência teórica de 35 MPa, a resistência é verificada aos 28 dias.

4.3 Comparação entre Métodos de Ensaio

4.3.1 Concreto de Resistência à Compressão de 15 MPa

O Gráfico 2 apresenta a comparação da resistência à compressão do concreto de resistência teórica de 15 MPa, obtidos por meio da resistência à compressão e a esclerometria.

Gráfico 2 – Comparação entre Métodos de Ensaio: Concreto de 15 MPa.



Fonte: O Autor (2024)

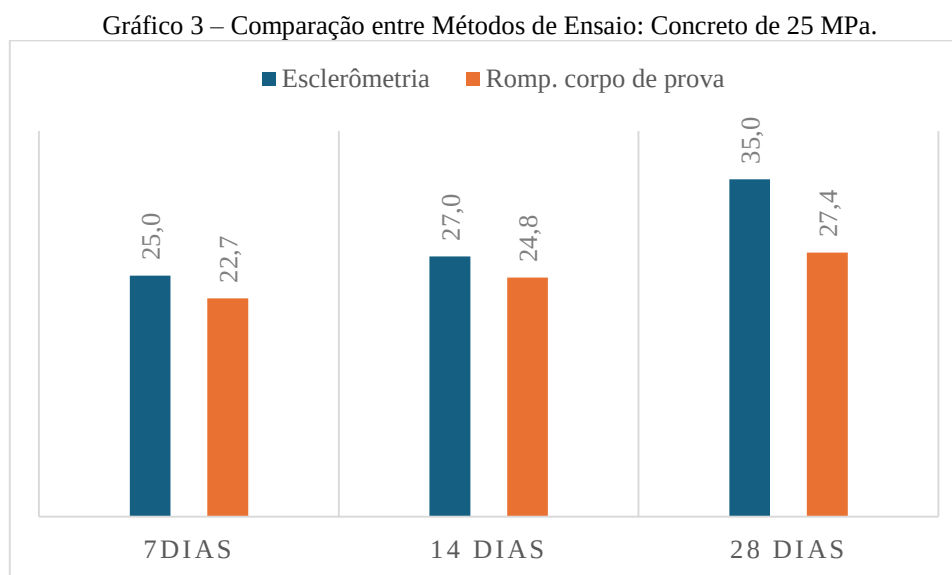
No Gráfico 2 por ambos os métodos as resistências definidas para a idade de 28 dias são atingidas, porém pela determinação via esclerometria, os valores são superiores em aproximadamente 38,6%, quando comparado ao método destrutivo. Ao analisar o tempo de hidratação, a esclerometria conduz a valores superiores em todas as idades, sendo que a diferença entre os dois métodos de ensaios são respectivamente de, 19% aos 14 dias de idade, e aos 7 dias, com diferença de 43%.

Um fator que pode ter influenciado nessa análise é o princípio da esclerometria, pois diante da NBR 7584 (ABNT, 2012) é avaliada a dureza superficial do concreto e, a partir disso, é possível estabelecer uma correlação com a resistência à compressão. Deve-se considerar que a esclerometria analisa apenas a camada superficial do concreto, com uma profundidade máxima de até 50 mm. Dessa forma, se a camada externa estiver menos hidratada do que o núcleo do corpo de prova, haverá uma diferença na resistência analisada no ensaio destrutivo e não destrutivo.

Por outro lado, no ensaio de ruptura do corpo de prova, é avaliado o comportamento do volume integral da amostra cilíndrica, o que pode gerar distorções nos resultados devido ao ensaio realizar a análise total do volume da amostra, diferentemente da esclerometria.

4.3.2 Concreto de Resistência à Compressão de 25 MPa

O Gráfico 3 apresenta a comparação da resistência à compressão do concretos de resistência teórica de 25 MPa, obtidos por meio da resistência à compressão e a esclerometria.



Fonte: O Autor (2024)

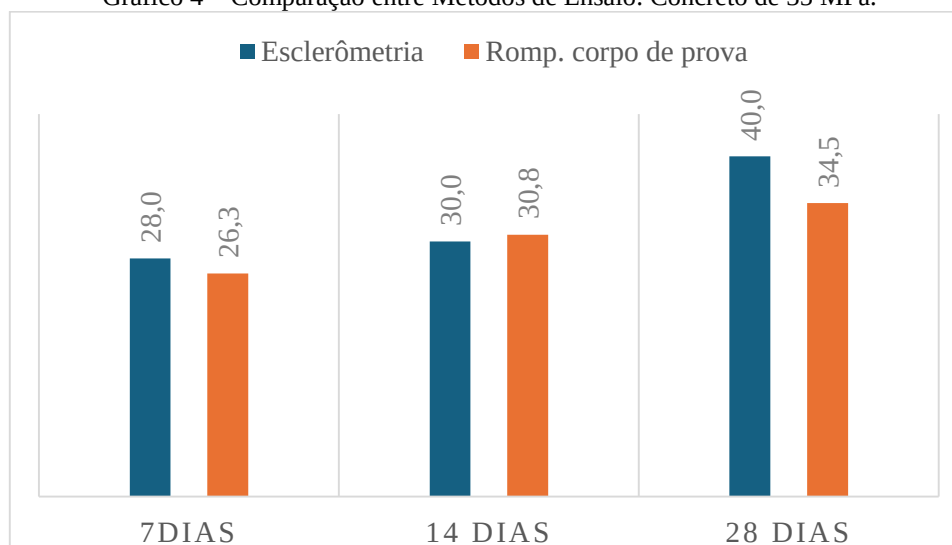
Diante dos dados expostos no Gráfico 3, nos dois ensaios realizados (esclerometria e ruptura do corpo de prova) atingiram a resistência teórica definida para a idade de 28 dias. Por outro lado, ao analisar pontualmente o valor obtido pela esclerometria é superior em aproximadamente 27,7%, quando comparado com o método destrutivo para a idade de 28 dias. Ao analisar as idades iniciais as diferenças são respectivamente de 10,4% aos 7 dias de idade, e de 8,8% aos 14 dias, sendo a esclerometria conduzindo a valores superiores, em relação ao método destrutivo.

Embora os resultados tenham superado a resistência teórica calculada, é preciso registrar que não foram observados efeitos que possam interferir diretamente nos resultados, em ambas as metodologias de ensaio.

4.3.3 Concreto de Resistência à Compressão de 35 MPa

O Gráfico 4 apresenta a comparação da resistência à compressão do concretos de resistência teórica de 35 MPa, obtidos por meio da resistência à compressão e a esclerometria.

Gráfico 4 – Comparação entre Métodos de Ensaio: Concreto de 35 MPa.



Fonte: O Autor (2024)

Com base nos dados apresentados no Gráfico 4, observa-se que o ensaio de esclerometria atingiu a resistência definida para a idade de 28 dias, enquanto o método destrutivo não alcança o valor pré-definido de resistência de dosagem. Nesse sentido, a resistência à compressão obtida pelo ensaio direto dos corpos de prova cilíndricos, proporcionaram a redução de aproximadamente 1,4%.

Entretanto, ao analisar os valores de resistências obtidas na idade de 28 dias, em ambos os métodos, há uma de aproximadamente 15,9%, sendo que a esclerometria conduz a resistências maiores.

Nas demais idades, as diferenças observadas entre os métodos são de 6,7% aos 7 dias, com a esclerometria apresentando valor mais elevado, e de 2,6% aos 14 dias, com o método destrutivo apresentando a maior resistência.

Lecheta e Couto (2012), realizaram comparações próximas a estas analisadas no presente estudo e não obtiveram resultados aproximados, tendo a esclerometria com valor inferior ao rompimento do corpo de prova e sua diferença entre os dois ensaios aos 28 dias foi maior que a analisada neste trabalho, sendo de 35,5%, mas o ensaio destrutivo sendo maior, sendo somente usado um traço de 30 MPa.

Ygor (2021) obtém resultados aproximados de Lecheta e Couto (2012), mas a diferença encontrada foi relativamente menor, sendo aproximadamente, 29,3% o rompimento do corpo de prova maior que a esclerometria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar e comparar a resistência à compressão do concreto, obtida com o auxílio de ensaio não destrutivo (esclerometria) e o destrutivo, por meio da resistência à compressão medida diretamente sobre corpos de prova cilindros de concreto para três (03) níveis de resistência teórica de dosagem.

O estudo realizado permitiu analisar e comparar os concretos em diferentes resistências características à compressão (15, 25 e 35 MPa), quando submetidos aos ensaios destrutivos e não destrutivos. Os resultados mostraram que, em geral, houve crescimento contínuo na resistência à compressão para os ensaios destrutivos à medida em que a idade aumenta. Já os resultados da esclerometria, apesar de tendência de elevação da resistência à compressão, apresentaram variações pontuais e leituras superiores aos ensaios destrutivos, o que pode ser explicado por fator, tal como: a presença de bolhas de ar aprisionado na superfície das amostras, não realização da cura úmida, podendo ter na camada interna das amostras nas idades iniciais mais umidade que a externa, sendo um fator que poderia interferir nos resultados dos ensaios.

No ensaio de esclerometria os resultados obtidos para resistência à compressão aos 28 dias de idade são superiores, quando comparado ao método destrutivo para todos os traços reproduzidos. Na idade de 28 dias de idade, o traço de 15 MPa obteve valor superior de 38,6%, sendo a maior diferença entre os três traços reproduzidos, e as demais a diferença são de 27,7% e 16%, respectivamente para os traços de 25 MPa e de 35 MPa.

É importante observar que os resultados de esclerometria podem superestimar a resistência à compressão, pois acusam valores superiores aos obtidos em cilindros de concreto. Desta forma, a resistência obtida pela esclerometria deve ser utilizada com cautela, visando a segurança estrutural de uma edificação. Em paralelo, pode ser utilizada como uma ferramenta de auxílio ou complementar aos ensaios destrutivos.

Para trabalhos futuros, é possível sugerir a realização de (i) estudo similar com concreto leve; (ii) investigação da técnica de ultrassom na determinação da resistência à compressão do concreto; (iii) avaliação e correlação da resistência obtida em testemunhos de concreto extraídos diretamente da estrutura com ensaios não destrutivos.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____**NBR 6118.** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

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

_____**NBR 12655.** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

_____**NBR 16889.** Concreto - Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

CATUSO, A., MENNUCCIO, M. M., ANDRADE, J., MOLIN, D. C. C. **Influência da exsudação na profundidade de carbonatação em concretos.** São Paulo: IBRACON, 2015

FOLHA VITÓRIA. **Realizar obras sem acompanhamento de profissional habilitado é ilegal.** Folha Vitória, 2023. Disponível em: <https://www.folhavitoria.com.br/economia/constroi-es/noticias/construcao-civil-obras-sem-acompanhamento-ilegal-crime-engenheiro/#:~:text=No%20Brasil%2C%20a%20Lei%205.194,um%20t%C3%A9cnico%20industrial%2C%20por%20exemplo>. Acesso em 08/09/2024

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland.** Cap. 29. Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON. São Paulo, 2010.

INTERNETIONAL CEMENT REVIEW. **Global Cement Report** (13th Edition). International Cement Review, 2020. Acesso em 24/09/2024

LECHETA, A., COUTO, D. **Estudo comparativo de ensaios destrutivos e não destrutivos para concreto.** Curitiba: UTFPR, 2012.

MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MELLO, E., SOUZA, I. G., FAFAYTTE. **Ensaaios não destrutivos em concreto.** Goiás: COBREAP, 2020.

NASCIMENTO, F. P.; SOUSA, F. L. L. **Metodologia da Pesquisa Científica: Teoria e Prática - Como Elaborar TCC.** Brasília: Thesaurus, 2016.

NEGRI, R., STEIL, T.L., NEGRI, D. **Ensaaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria para estimar a resistência à compressão do concreto.** Revista Matéria, v.29, n.2, Santa Catarina: Católica, SC e SENAI, SC, 2024.

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

RAMALHO, M. A., FONSECA, R. G. P. **Avaliação da resistência do concreto por ensaio esclerométrico.** Rio de Janeiro: Revista OBRAS CIVIS, 2020.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.

SINDUSCON. **CBIC revisa para 2,3% projeção de crescimento da construção em 2024**, Sinduscon, 2024. Disponível em: <https://sinduscon-fpolis.org.br/cbic-revisa-para-23-projecao-de-crescimento-da-construcao-em-2024/>. Acesso em 08/09/2024

VALE, R. S., OLIVEIRA, J. H., ARMESTO, L. M., SERAFINI, R. **Concreto permeável de cimento Portland: Permeabilidade e resistência à compressão**. São Paulo: Revista REASE, 2022.

TAVARES, Y. A. **Correlação entre resistência à e ensaio de esclerometria: Análise em corpos de prova de concreto moldados in loco e provenientes de extração**. Fortaleza: Unichritus, 2021.

APÊNDICE “A” – Índices esclerométricos e cálculos médios.

Ensaio de 7 dias			
Leitura das Peças			
Número do golpes	Traço 1	Traço 2	Traço 3
1	30	30	33
2	29	29	31
3	28	31	37
4	30	30	42
5	24	30	30
6	25	30	32
7	40	29	32
8	26	30	33
9	30	30	34
10	26	30	31
11	24	29	32
12	30	32	30
13	26	29	30
14	24	35	35
15	29	36	40
16	27	28	30
Índice Esclerométrico Médio Inicial	28	30,5	33,3
Limite Superior	30,8	33,6	36,6
Limite Inferior	25,2	27,5	29,9
Nova média		29,8	31,8
Índice Esclerométrico Médio Final	28,3	29,6	31,5
Ângulo (°)	0	0	0
Valor corrigido	28,8	30,2	32,1
Resistência (MPa)			
Resistência (MPa)	23	24,5	28

Ensaio de 14 dias			
Leitura das Peças			
Número do golpes	Traço 1	Traço 2	Traço 3
1	29	31	34
2	33	30	40
3	24	31	49
4	32	32	32
5	32	30	37
6	27	44	32
7	27	30	32
8	35	30	32
9	35	32	41
10	24	31	42
11	29	32	30
12	26	40	31
13	32	34	32
14	24	29	40
15	26	29	32
16	26	34	32
Índice Esclerométrico Médio Inicial	28,8	32,4	35,5
Limite Superior	31,7	35,7	39,1
Limite Inferior	25,9	29,2	32,0
Nova média			32,8
Índice Esclerométrico Médio Final	27,1	31,1	32,3
Ângulo (°)	0	0	0
Valor corrigido	27,7	31,7	32,9
Resistência (MPa)			
Resistência (MPa)	21	27	29,5

Ensaio de 28 dias			
Leitura das Peças			
Número do golpes	Traço 1	Traço 2	Traço 3
1	30	32	36
2	32	30	39
3	32	42	34
4	38	44	44
5	30	38	32
6	32	36	40
7	30	32	35
8	32	34	39
9	28	32	34
10	36	32	38
11	32	44	40
12	30	32	32
13	30	30	38
14	32	33	34
15	28	30	36
16	34	34	36
Índice Esclerométrico Médio Inicial	31,6	34,7	36,7
Limite Superior	34,8	38,2	40,4
Limite Inferior	28,5	31,2	33,0
Nova média	31,3	33,5	36,8
Índice Esclerométrico Médio Final	31,3	33,5	38,0
Ângulo (°)	0	0	0
Valor corrigido	31,9	34,2	38,8
Resistência (MPa)			
Resistência (MPa)	28	32	40

APÊNDICE “B” – Ábaco do esclerômetro utilizado.

