

## ESTUDO DA DUREZA SUPERFICIAL DO CONCRETO EM DIFERENTES ALTURAS DE PILARES

*Study of the surface hardness in concrete in different heights of pillars*

PESCA, Ivo Dadalto (1); PAIGEL, Gabriel Agrisi (1); CINTRA, Danielli Cristina Borelli (2); VIEIRA, Geilma Lima (3); HELENE, Paulo (4)

(1) Graduando em Engenharia Civil, MULTIVIX - Vitória (*ivodadaltopesca@gmail.com; g.agrisi@gmail.com*)

(2) Doutoranda PUC-Rio - Departamento de Engenharia Civil (*daniellicbc@gmail.com*);

(3) Professora Doutora do PPGEC - UFES - Brasil (*geilma.vieira@gmail.com*);

(4) Professor Doutor USP. PhD Engenharia (*paulo.helene@concretophd.com.br*)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Espírito Santo - Av. Fernando Ferrari, 514, prédio CT-1, sala 101, Goiabeiras, Vitória ES/Brasil. CEP: 29075-910

### Resumo

A dureza superficial do concreto pode ser determinada pelo ensaio de esclerômetro de reflexão, de acordo com a ABNT NBR 7584:2012, um método não destrutivo e de fácil execução, que fornece elementos para avaliação da qualidade do concreto e estimativa de sua resistência à compressão. Neste estudo avalia-se estatisticamente a variação da dureza superficial do concreto em três diferentes alturas de 10 pilares de seção transversal de 19 cm x 19 cm e 170 cm de altura, sem armadura. Os pilares foram moldados em laboratório, utilizando-se concretos de classe de consistência S100 e S200, vibrados ou não, e também concreto autoadensável, lançados a uma altura de queda de 2m, totalizando duas réplicas de cada tipo de pilar. Cerca de 100 dias após as concretagens, foram realizados os ensaios de dureza superficial do concreto na base, no meio e no topo dos pilares. A análise dos resultados indica que os valores de dureza superficial para os concretos com consistência têm significativa variação ao longo da altura dos pilares, sendo que o concreto da base possui maior dureza superficial do que as demais alturas, portanto uma melhor qualidade do material. Já para o concreto autoadensável, a variação da dureza superficial nas diferentes alturas de pilares não é significativa.

*Palavra-Chave: esclerometria, pilar, concreto*

### Abstract

The surface hardness of the concrete can be determined by rebound hammer test according to ABNT NBR 7584:2012 a non-destructive and easy to perform method, which provides guidance for assessing the quality of concrete and estimation of its compressive strength. This study evaluates statistically the variation of the surface hardness of the concrete in three different heights of 10 pillars of cross section of 19cm x 19cm and 170cm in height without reinforcement. The pillars were cast in the laboratory, using consistency concrete class S100 e S200, vibrated or not, and also self-compacting concrete, cast a fall height of 2m, totaling two replicas of each type of pillar. About 100 days after the concreting were carried out the surface hardness by rebound hammer test in the base, middle and top of the pillars. Analysis of the results indicates that the surface hardness values for concrete with consistency has significant variation along the height of the pillars, and the concrete base has further surface hardness than other heights, thus a better quality of material. For the self-compacting concrete, the variation of the surface hardness in different heights of the pillars is not significant.

*Keywords: rebound hammer, pillar, concrete*

## 1 Introdução

Pilares são elementos estruturais responsáveis pela transferência dos esforços oriundos das vigas, ou diretamente das lajes, para as fundações, estando sujeitos preponderantemente a esforços de compressão. A região da base dos pilares tende a ser o ponto mais vulnerável à ocorrência de manifestações patológicas em pilares, que podem comprometer a capacidade resistente e a durabilidade da estrutura (MEDEIROS et al, 2010, 2113 e QUINTANA, 2005). A base de pilares é prejudicada, desde a etapa de concretagem, pela alta concentração de armadura nas emendas de barras, pela altura elevada de lançamento e pela dificuldade de acesso para o adensamento do concreto. Durante a fase de utilização da estrutura, é uma região de alta concentração de esforços e geralmente exposta a agentes agressivos, como o acúmulo de resíduos de produtos químicos, de limpeza e umidade.

Segundo a NBR 7584 (ABNT, 2012), esclerometria é um método de ensaio não destrutivo que mede a dureza superficial do concreto, fornecendo elementos para a avaliação da qualidade do concreto endurecido e estimativa de sua resistência à compressão. Neste ensaio é utilizado um equipamento denominado esclerômetro de reflexão, também conhecido como Martelo de Schmidt. O equipamento é composto por um sistema massa-martelo impulsionado por uma mola, que se choca com a superfície do concreto através de um pistão de impacto que possui uma ponta esférica. Depois de solta, a massa martelo sofre uma reflexão pelo pistão ainda em contato com a superfície do material. A energia do impacto é, em parte, utilizada na deformação permanente provocada na área de ensaio e, em parte, conservada elasticamente propiciando o retorno da massa-martelo. A distância percorrida no retorno pela massa chama-se índice esclerométrico (IE). Vale frisar que o ensaio esclerométrico apenas mede propriedades da região superficial do concreto. A grande vantagem do esclerômetro se deve ao fato de ser um equipamento leve, barato e de fácil manuseio.

Este trabalho apresenta um programa experimental, cujo objetivo é estudar a qualidade do concreto em diferentes alturas de pilares, por meio da avaliação da dureza superficial, sob a possível influência dos fatores consistência do concreto, adensamento e altura do pilar, além da interação entre estes fatores. A análise dos resultados é feita estatisticamente através de planejamento fatorial para concretos de classe de consistência S100 e S200, e concreto autoadensável. Pretende-se contribuir para uma definição de procedimentos mais eficientes de concretagem de pilares, com mais vantagens do ponto de vista econômico, construtivo e de desempenho estrutural. Os resultados dos ensaios realizados também podem servir como parâmetros em pesquisas posteriores.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Planejamento fatorial

Considerando os fatores controláveis variando conjuntamente, através de combinações entre seus níveis, o planejamento fatorial busca a eficiência e economia do processo experimental, desde que os seguintes princípios sejam adotados: a replicação, a aleatoriedade e a blocagem, conforme Montgomery (2005). A variável resposta é a dureza superficial do concreto. Os fatores controláveis são: a consistência do concreto, que varia em dois níveis (classes de consistência S100 e de S200); altura do pilar, variando em três níveis (base, meio e topo) e o adensamento interno mecânico, que varia em dois níveis (vibrado e não-vibrado). Os demais fatores relevantes são considerados constantes. As variáveis aplicadas ao planejamento fatorial para concretos com abatimento estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis aplicadas ao planejamento fatorial para concretos com consistência

| Variável resposta              | Fatores controláveis     |                   | Fatores constantes  |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------|---|
| Dureza superficial do concreto | Consistência do concreto | S100              | Características geométricas dos pilares;<br>altura de lançamento;<br>origem dos componentes do concreto;<br>equipe de concretagem;<br>idade das amostras. |
|                                |                          | S200              |   |
|                                | Altura no pilar          | Base (0)          |   |
|                                |                          | Meio ( $\ell/2$ ) |   |
|                                |                          | Topo ( $\ell$ )   |   |
|                                | Adensamento mecânico     | Sim (V)           |   |
| Não (NV)                       |                          |                   |   |

A variável resposta também é avaliada para as diferentes alturas de pilar com concreto autoadensável, porém analisada estatisticamente em separado, pelo fato do material possuir características físicas, mecânicas e componentes consideravelmente distintos dos concretos de maior consistência.

### 2.2 Pilares

O programa experimental é composto por cinco tipos de pilares diferentes, com duas réplicas de cada pilar, totalizando dez pilares, com seção transversal de 19cm x 19cm, altura de 170cm e sem armadura para evitar a interferência das barras de aço nas propriedades do concreto a serem estudadas. Todo trabalho experimental foi

desenvolvido no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

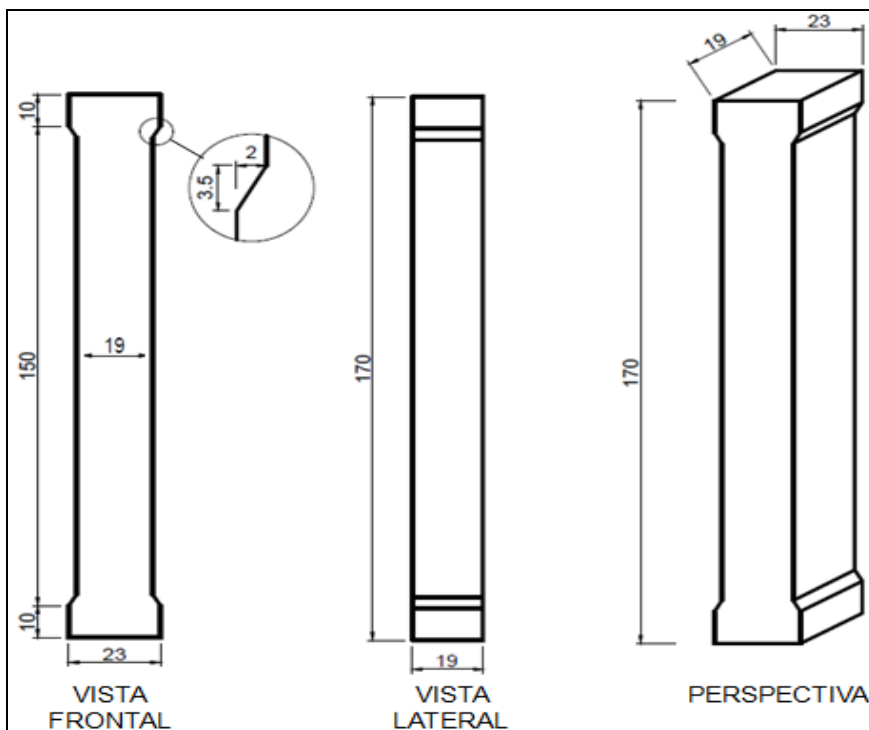


Figura 1: Geometria dos pilares

### 2.2.1 Materiais

O concreto utilizado na fabricação dos pilares foi preparado em betoneira estacionária de eixo inclinado. A cada betonada, cerca de 175 litros, moldou-se dois pilares e doze corpos de prova cilíndricos de diâmetro  $\Phi 100\text{mm}$ . Em todas as betonadas foram realizados os ensaios de controle e aceitação do concreto conforme a ABNT NBR 12655 (2015), que são ensaios de consistência em estado fresco e ensaio de resistência à compressão, em estado endurecido, este realizado conforme a ABNT NBR 5739 (2007). Para os concretos com consistência S100 e S200 foram feitos ensaios de abatimento do tronco de cone, conforme a ABNT NBR NM 67 (1998), realizados após o final da mistura e também antes da moldagem dos corpos de prova, que ocorreu entre as concretagens do primeiro e do segundo pilar. No caso do concreto autoadensável foram realizados os ensaios para controle de qualidade e aceitação no estado fresco prescritos no item 6.3 da ABNT NBR 15823-1 (2010). No total foram executadas cinco betonadas de concreto. Os traços adotados foram testados antecipadamente e estão apresentados na Tabela 2, sendo que

o traço do concreto autoadensável é o mesmo utilizado em obras de grande porte em região de alta agressividade ambiental, em Vitória-ES.

Tabela 2 – Composição dos concretos produzidos

| Consistência do concreto | Relação água cimento a/c | Consumo de materiais em massa (kg) por m <sup>3</sup> de concreto |                 |         |         |      |               |                    |              |
|--------------------------|--------------------------|---|-----------------|---------|---------|------|---------------|--------------------|--------------|
|                          |                          | Cimento CP III – 40 RS  | Areia de jazida | Brita 0 | Brita 1 | Água | Plastificante | Superplastificante | Sílica ativa |
| S 100                    | 0,52                     | 350   | 822,85          | 299,95  | 819,98  | 182  | -             | -                  | -            |
| S 200                    | 0,52                     | 350   | 822,85          | 299,95  | 819,98  | 182  | 3,50          | -                  | -            |
| Autoadensável            | 0,40                     | 550   | 776,00          | 750,00  | -       | 220  | 2,75          | 3,20               | 50,00        |

### 2.2.2 Concretagem

Os pilares foram moldados com dois conjuntos idênticos de formas de madeira compensada plastificada de 20 mm de espessura, enrijecidas com gravatas de madeira e tirantes metálicos. O lançamento do concreto na forma foi feito com baldes de 10 litros, despejados sobre uma calha de madeira previamente umedecida, posicionada no topo da forma, conferindo uma altura de queda do concreto de 2m. Durante o lançamento do concreto autoadensável, uma das formas se abriu na região inferior do pilar, devido à alta pressão do concreto mais fluido, que acabou alargando a base de um dos pilares concretados e demandou reforço lateral na base das formas.

Para os concretos de consistência S100 e S200, a moldagem do primeiro pilar de cada betonada foi feita com o lançamento do concreto em camadas de aproximadamente 25cm de altura, totalizando sete camadas, atendendo à prescrição do item 9.6 da ABNT NBR 14931 (2004) sobre a altura máxima de camadas para vibração de concreto, que é  $\frac{3}{4}$  do comprimento da agulha do vibrador ou 50cm, o que for menor. Cada camada de concreto foi adensada durante 12 segundos por vibrador de imersão, agulha com diâmetro de 25 mm e 33 cm de comprimento. Foram feitas marcações no mangote do vibrador para controlar a profundidade de penetração da agulha nas camadas de concreto, já que o operador do vibrador praticamente não tinha visibilidade das camadas inferiores dentro da forma, considerando-se que a ponta da agulha penetrasse cerca de 5 cm na camada inferior, a fim de promover a costura de aderência entre as camadas, procedimento chamado de revibração do concreto (ANDRIOLO, 1984 e CINTRA et al, 2013). A moldagem do segundo pilar de cada betonada foi feita com o lançamento contínuo do

concreto, sem nenhum tipo de adensamento, procedimento adotado também para ambos os pilares de concreto autoadensável.

Por fim os pilares foram cobertos com lona plástica para evitar a perda de água do concreto por evaporação precoce e para facilitar seu endurecimento. No terceiro dia após sua concretagem os pilares foram transportados com um guincho para o local de armazenamento e em seguida desformados.

### 2.2.3 Ensaio Esclerométrico

O método que consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de uma forma padronizada é conhecido como "*rebound hammer method*". Usando-se uma determinada massa com uma dada energia, mede-se o valor do ricochete, sendo este o índice esclerométrico (IE). O ricochete depende do valor da energia cinética antes do impacto e quanto desta energia é absorvida durante o impacto, sendo a energia absorvida relacionada à resistência e à rigidez do concreto (ACI 228, 2003).

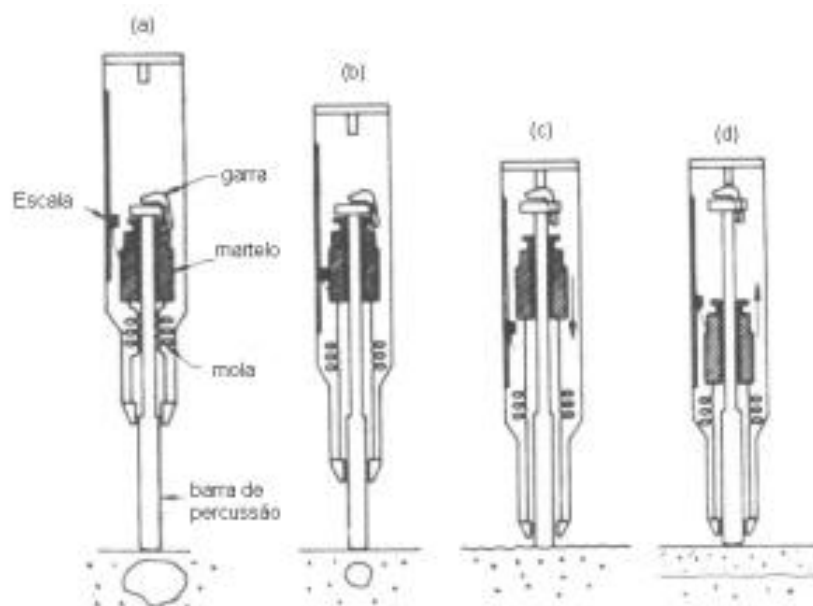


Figura 2: Esquema do ensaio de esclerometria (ACI 228,2003).

Cerca de cem dias após as concretagens dos pilares, foram realizados os testes de esclerometria, conforme ABNT NBR 7584 (2012). Antes de qualquer ensaio, a superfície dos pilares foi lixada, limpa e seca. Em seguida foram marcadas as referências para medição como é apresentado na Figura 3.

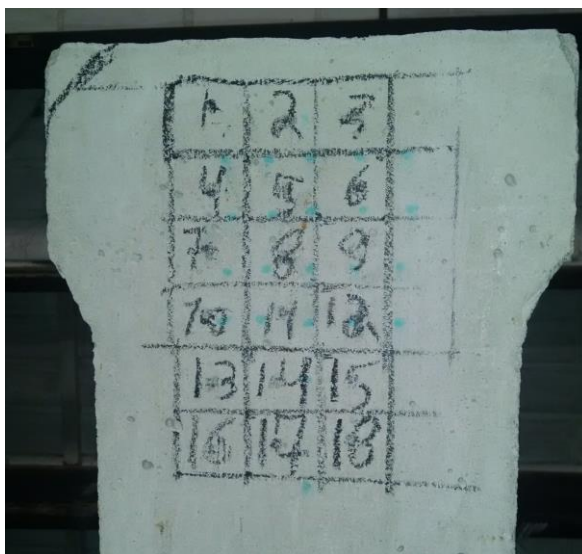


Figura 3: Malha de referência de pontos de medição na superfície do pilar

As medições de dureza superficial foram feitas na base, no meio e no topo do pilar, na face frontal e também na face posterior, sempre pelo mesmo operador de equipamento. A Figura 4 ilustra os pilares ensaiados.



Figura 4: Pilares moldados em laboratório

### 3 Resultados

#### 3.1 Concretos

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos seguintes ensaios: consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, conforme a ABNT NBR NM 67 (1998); ensaio de tempo de escoamento (T500) e espalhamento (SF), conforme a ABNT NBR 15823-2; habilidade passante, conforme a ABNT NBR 15823-3 (Anel J) e ABNT NBR 15823-4 (HP); viscosidade (Funil V), conforme a ABNT NBR 15823-5; e resistência à compressão do concreto, conforme a ABNT NBR 5739 (2007) realizados em corpos de prova cilíndricos de diâmetro  $\Phi 100\text{mm}$ .

Tabela 3 – Resultados dos ensaios para controle e aceitação do concreto

| Betonadas | Estado fresco            |                          | Estado endurecido |                               |                         |
|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|
|           | Parâmetro de referência  | Consistência obtida      | Idade (dias)      | Resistência média - fcm (MPa) | Desvio padrão - s (MPa) |
| 1         | Consistência S100        | Abatimentos: 90mm/90mm   | 28                | 39                            | 0,2                     |
|           |                          |                          | 100               | 46                            | 1,5                     |
| 2         | S100                     | Abatimentos: 95mm/95mm   | 28                | 34                            | 1,0                     |
|           |                          |                          | 100               | 39                            | 0,9                     |
| 3         | Consistência S200        | Abatimentos: 200mm/195mm | 28                | 36                            | 0,6                     |
|           |                          |                          | 100               | 41                            | 1,4                     |
| 4         | S200                     | Abatimentos: 185mm/180mm | 28                | 34                            | 0,6                     |
|           |                          |                          | 100               | 35                            | 0,8                     |
| 5         | T <sub>500</sub> : > 2 s | T <sub>500</sub> : 2,5 s | 28                | 65                            | 0,9                     |
|           | SF: 550 a 650            | SF: 635mm                |                   |                               |                         |
|           | Anel J: $\geq$ 25mm      | Anel J: 25mm             | 100               | 71                            | 0,9                     |
|           | HP: $\geq$ 0,8           | HP: 0,8                  |                   |                               |                         |
|           | Funil V: 9 a 25 s        | Funil V: 9 s             |                   |                               |                         |



De acordo com os resultados obtidos considera-se que as propriedades requeridas para os diferentes concretos da pesquisa foram atendidas, tanto no estado fresco como no endurecido.

### 3.2 Pilares

A média dos resultados dos índices esclerométricos para as diferentes alturas de pilares com concreto de abatimento está representada na Figura 5. Observa-se que o concreto da região da base dos pilares apresenta os maiores valores de índices esclerométrico e, portanto, de dureza superficial do concreto, exceto para o concreto S200 não vibrado. Tal fenômeno é atribuído à maior pressão sofrida nessa região durante a concretagem, conferindo uma compactação mais efetiva do concreto, considerado um efeito de revibração.

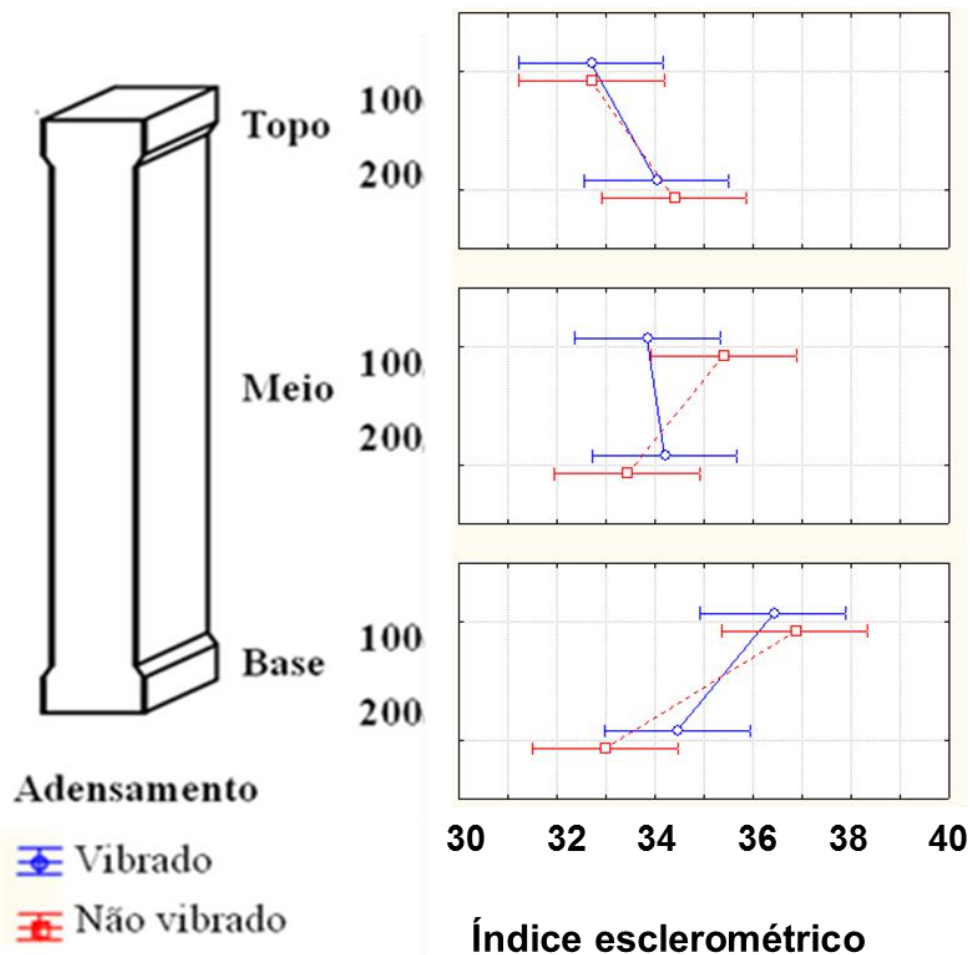


Figura 5: Valores médios de índice esclerométrico em diferentes alturas de pilares, concretos de classe de consistência S100 e S200, vibrado e não vibrado - barras horizontais denotam 0,95 de intervalo de confiança

Na Tabela 4 é apresentada a análise de variância (ANOVA), feita no programa Statistica, versão 10, que avalia estatisticamente a importância que cada fator tem nos resultados e quais combinações entre fatores exercem maior influência, adotando-se um nível de significância estatística  $\alpha = 0,05$ . Observa-se que a altura do pilar, além da interação entre os fatores consistência e altura influenciaram significativamente os resultados dos índices esclerométricos do concreto.

Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) do índice esclerométrico do concreto em relação aos fatores controláveis e suas interações, nível de significância  $\alpha = 0,05$ , dos concretos com consistência S100 e S200

| Variável resposta     | Fatores controláveis                | Soma quadrática | Graus de liberdade | Média quadrática | Teste F | Valor p | Significância |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------|---------|---------------|
| Índice esclerométrico | Consistência                        | 6,57            | 1                  | 6,57             | 3,07    | 0,0885  | Não           |
|                       | Adensamento                         | 0,00            | 1                  | 0,00             | 0,00    | 0,9637  | Não           |
|                       | Altura                              | 23,75           | 2                  | 11,88            | 5,54    | 0,0080  | Sim           |
|                       | Consistência x adensamento          | 5,00            | 1                  | 5,00             | 2,33    | 0,1354  | Não           |
|                       | Consistência x altura               | 39,33           | 2                  | 19,66            | 9,17    | 0,0006  | Sim           |
|                       | Consistência x altura               | 1,81            | 2                  | 0,91             | 0,42    | 0,6587  | Não           |
|                       | Consistência x altura x adensamento | 4,12            | 2                  | 2,06             | 0,96    | 0,3923  | Não           |
|                       | Erro                                | 77,16           | 36                 | 2,14             | -       | -       | -             |

Na Figura 5 são apresentadas as médias dos índices esclerométrico ao longo das alturas dos pilares, para os diferentes tipos de concretos considerados na pesquisa.

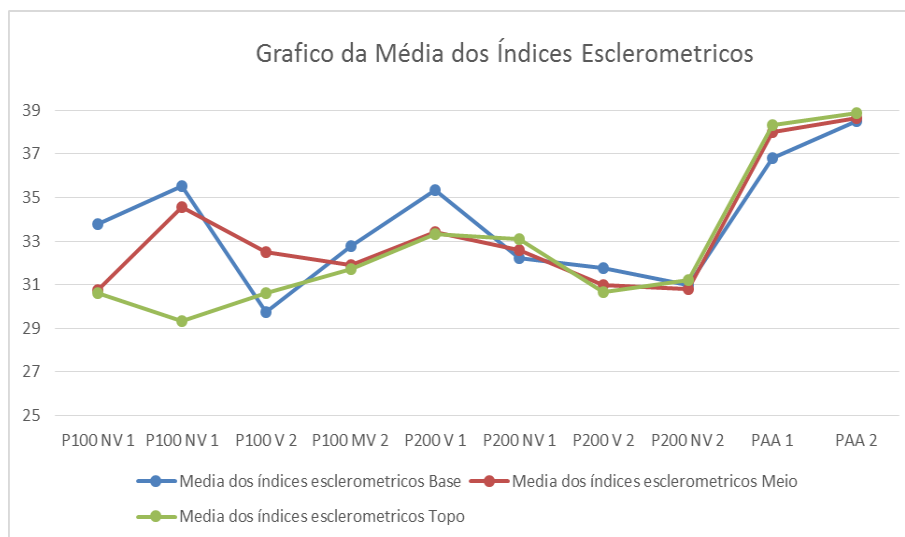


Figura 5: Valores médios dos índices esclerométricos relacionando os diferentes tipos de concretos

## 4 Conclusão

O programa experimental apresentado analisou estatisticamente o estudo da dureza superficial do concreto em diferentes alturas de pilares por meio de ensaios esclerométricos em diferentes alturas de 10 pilares moldados em laboratório, de acordo com as boas práticas recomendadas por normas e bibliografia técnica, sem armadura, com concretos de classe de consistência S100 e S200, vibrados ou não, e também com concreto autoadensável e as conclusões do trabalho são apresentadas a seguir:

- a. a região do topo dos pilares apresentou os menores valores de dureza superficial do concreto, com redução de até 13% em relação à base, indicando que o concreto da base dos pilares apresenta melhor qualidade e resistência, ocorrência atribuída à maior pressão sofrida nessa região durante a concretagem, conferindo uma compactação mais efetiva do concreto;
- b. nos pilares de concreto autoadensável, percebe-se que a variação de dureza superficial do concreto em diferentes alturas é insignificante;
- c. a maior variação dos valores esclerométricos entre base, meio e topo foi observada em um dos pilares não vibrados, conferindo a influência do fator vibração no índice de dureza superficial do concreto;
- d. a altura do pilar, além da interação entre os fatores consistência e altura influenciaram significativamente nos resultados de índice esclerométrico.

A menor porosidade do concreto da base do pilar pode justificar a maior dureza superficial do concreto nessa região, o que promove a durabilidade ao elemento, porém a inadequação ou negligência das etapas de concretagem, tão comuns em situações reais de obra, conforme relatado por Cintra et al (2013), juntamente com a alta taxa de armadura das emendas de barras e o acúmulo de resíduos e umidade na região da base de pilar, acabam comprometendo a qualidade do concreto e o desempenho estrutural do elemento.

## 5 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **In-place methods for determination of strength of concrete**. ACI 228.1R, Detroit, 2003.

ANDRIOLO, F.R. **Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução**. São Paulo: Pini, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 5739**. Concreto – ensaios de compressão de corpo-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7584**. Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_, **NBR 12655** – “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento”. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 14931**. Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1**. Concreto auto-adensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**. Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

CINTRA, D.C.B. et al, Estudo de procedimentos de adensamento do concreto por vibradores de imersão em obras na Grande Vitória-ES. **55º Congresso Brasileiro do Concreto**. Gramado-RS, 2013. p. 8.

MEDEIROS, M.H.F. et al. **Inspeção em prédios no Rio de Janeiro: corrosão em pilares**, Concreto & Construções. São Paulo, 2010, v. 57, p. 58-66.

MEDEIROS, M.H.F. et al. **Inspection of buildings in Rio de Janeiro-Brazil**: proving the greater tendency of corrosion at the base of reinforced concrete columns using potential corrosion technique. American journal of Engineering Research (AJER). 2013, v.2, n. 4, p. 102-112.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 6. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2005.

QUINTANA, C.B., **Influência da armadura transversal e do cobrimento da armadura longitudinal na resistência de pilares de concreto**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. p. 24..