

Probe penetration test applied for evaluating shotcrete compressive strength

Ensaio de penetração de pino aplicado na avaliação da resistência à compressão de concreto projetado



W. R. L. DA SILVA ^a
wilsonecv@gmail.com

L. R. PRUDENCIO JR ^b
prudenciouk@hotmail.com

A. L. DE OLIVEIRA ^c
alexandre@ifsc.edu.br

Abstract

This study presents a methodology for evaluating shotcrete compressive strength. Because of the high surface roughness and low thickness of the concrete layer observed in shotcrete structures, the proposed methodology is based on the probe penetration test. In a first phase, the variability of the probe penetration test was investigated to define the number of tests that are required to characterise the test correlation curve. Then, a procedure that can be applied to define the correlation curve was described. This procedure includes the moulding of shotcrete plates in loco, the control of the discharge energy of the pins, the extraction of the plates' samples to determine the concrete compressive strength, and statistical analysis. With the test correlation curve, an evaluation of the structure and data analysis can be performed. To verify the applicability of the proposed methodology, the structure of a shotcrete tunnel in a small hydropower plant was investigated. In the analysed structure, strength results that were non-compliant with the project specifications and a lack of concrete homogeneity were observed. Since the analysed methodology allowed for the characterisation of the considered structure conditions, the proposed solution is adequate for evaluating the compression strength of shotcrete structures.

Keywords: non-destructive testing, shotcrete, probe penetration test.

Resumo

Este trabalho visa apresentar uma metodologia de avaliação da resistência à compressão de concreto projetado. Em função da elevada rugosidade superficial e da baixa espessura da camada de concreto, observada em estruturas de concreto projetado, a metodologia proposta tem por base o ensaio de penetração de pinos. Em uma primeira etapa, a variabilidade do ensaio de penetração de pinos foi investigada de modo a definir a quantidade de ensaios necessários para a definição da curva de correlação do ensaio. Em seguida, o procedimento empregado na definição da curva de correlação foi definido. Tal procedimento inclui a moldagem de placas de concreto projetado in loco; o controle da energia de disparo dos pinos; a extração de testemunhos das placas para determinação da resistência à compressão do concreto; e a análise estatística dos dados. De posse da curva de correlação do ensaio, procede-se com a avaliação da estrutura e análise dos dados. De modo a verificar a aplicabilidade da metodologia proposta, a estrutura de concreto projetado de um túnel em uma Pequena Usina Hidrelétrica foi investigada. Na estrutura em questão, foram observados resultados de resistência não-conformes com as especificações de projeto e indícios de falta de homogeneidade do concreto. Uma vez que a metodologia em questão possibilitou a caracterização das condições da estrutura avaliada, pode-se afirmar que a solução proposta neste trabalho é adequada para a avaliação da resistência à compressão de estruturas de concreto projetado.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, concreto projetado, ensaio de penetração de pinos.

^a Wilson Ricardo Leal da Silva (wilsonecv@gmail.com) Czech Technical University in Prague. Wilson R. L. da Silva is a PhD student at the Czech Technical University in Prague sponsored by EU Erasmus program.

^b Luiz Roberto Prudencio Jr. (prudenciouk@hotmail.com) – Federal University of Santa Catarina. Luiz Roberto Prudencio Jr., Dr., is a Professor at the Department of Civil Engineering at the Federal University of Santa Catarina, Brazil.

^c Alexandre Lima de Oliveira (alexandre@ifsc.edu.br) – Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Florianópolis. Alexandre Lima de Oliveira, Dr., is a Professor at Federal Institute of Santa Catarina.

1. Introdução

O uso de concreto projetado no revestimento de túneis é uma prática comum. No entanto, nem sempre a correta técnica de projeção e a dosagem apropriada são empregadas. Um exemplo de uma estrutura em concreto projetado que apresentou indícios de não conformidade nas propriedades mecânicas do concreto foi o revestimento do túnel de tomada d'água de uma Pequena Central Hidroelétrica, PCH, localizada na cidade de Santa Rosa de Lima, SC, Brasil.

Na estrutura em questão, indicada na Figura 1, três semanas após a aplicação do concreto projetado nas paredes do túnel, parte do revestimento de concreto começou a apresentar problemas estruturais decorrentes, provavelmente, do processo de projeção e/ou do procedimento de dosagem dos materiais constituintes do concreto projetado. Logo, o presente trabalho foi realizado com o objetivo inicial de definir uma metodologia para avaliação de estruturas de concreto projetado, e posteriormente, avaliar a resistência à compressão do revestimento do túnel de modo a verificar a aplicabilidade e eficiência da metodologia proposta.

Inicialmente, a extração de testemunhos foi cogitada para determinar a resistência à compressão do concreto no revestimento do túnel. Todavia, em função da inclinação das paredes do túnel, da variação da espessura da camada de revestimento de concreto, detalhada na Figura 1, e do elevado custo de extração de testemunhos, essa opção foi descartada. Assim sendo, a possibilidade do emprego de ensaio não destrutivo foi considerada. A partir deste ponto, o tipo de ensaio não-destrutivo a ser utilizado teve de ser devidamente escolhido de acordo com as características da estrutura.

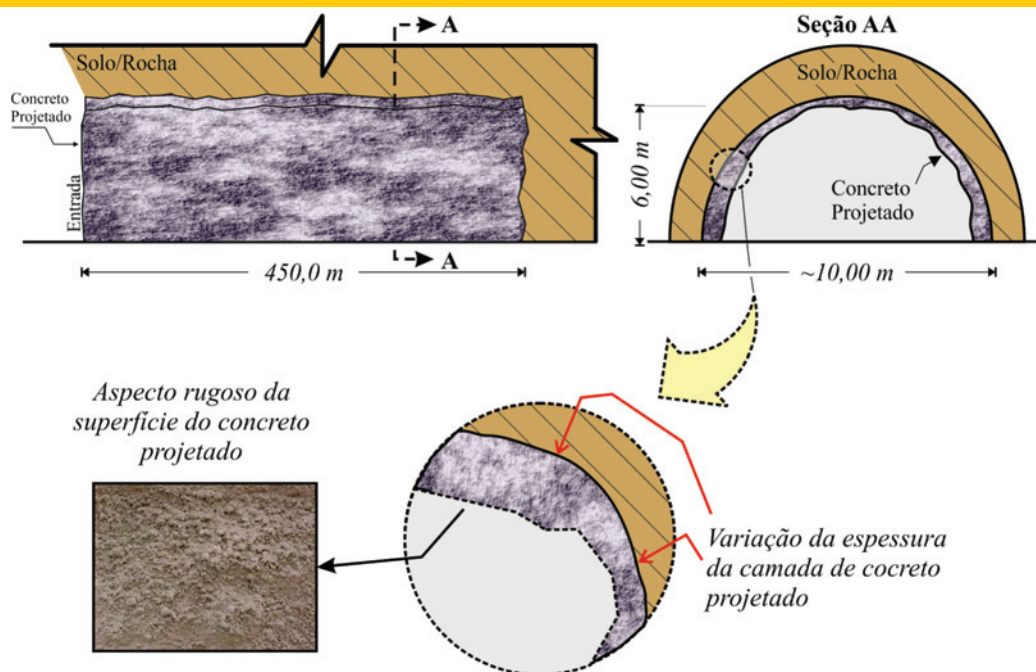
2. Ensaios não destrutivos considerados para avaliação da estrutura

São vários os ensaios não destrutivos aplicados na avaliação de estruturas de concreto, [1,2], tais como: ensaio de arrancamento de pino, ensaio de penetração de pino, método da maturidade, ensaio de esclerometria, ultra-som, eco-impacto, entre outros. No presente trabalho, a possibilidade do uso de ensaio de esclerômetro de reflexão, ensaio de arrancamento de pino e ensaio de penetração de pino foi levado em consideração. Tal medida está associada à questões técnicas, econômicas e práticas, discutidas ao longo desta seção.

O uso do esclerômetro de reflexão foi a primeira possibilidade de teste a ser considerada, devido à simplicidade e baixo custo do ensaio. Este ensaio é baseado na avaliação do rebote de uma massa quando disparada contra uma superfície com uma energia padronizada. O ensaio de esclerometria é amplamente aplicado na avaliação de estruturas acabadas. Exemplos de aplicações deste ensaio são apresentados em [3], onde o ensaio de esclerometria é empregado na estimativa da resistência de estruturas de concreto armado, e [4], no qual o ensaio de esclerometria é recomendado para a avaliação da uniformidade de estruturas de concreto. No que tange à avaliação de túneis, Bilgin et al, [5] apresenta uma aplicação prática deste ensaio, contudo o estudo é direcionado à avaliação da dureza superficial de rochas com a intenção de prever a energia necessária para seu o desmonte. Tal ensaio poderia ser empregado na avaliação do túnel em questão caso o acabamento superficial do mesmo fosse regular.

Os resultados do ensaio de esclerometria de reflexão são afetados por uma série de fatores, como por exemplo, 1) a condição de

Figura 1 - Túnel investigado e detalhes esquemático da variação da espessura da camada de concreto projetado



umidade da superfície do concreto; II) presença de uma camada superficial de concreto carbonatado; III) orientação do instrumento, [6]. Esses fatores, aliados às características de construção do túnel, principalmente devido à elevada rugosidade superficial, praticamente inviabilizam o uso do esclerômetro de reflexão para a avaliação da estruturas em concreto projetado.

O emprego do ensaio de arrancamento de pino também foi considerado como uma das possibilidades de avaliação da estrutura em questão. O princípio deste ensaio consiste em medir a tensão de cisalhamento necessária para arrancar um pino cravado na massa do concreto, [1]. O ensaio de arrancamento de pino é amplamente empregado na avaliação da qualidade do concreto em estruturas acabadas, dando-se destaque aos ensaios tipo Lok-test e CAPO, [7]. Todavia, no que tange à avaliação de estruturas de concreto projetado, o ensaio de arrancamento de pino é comumente empregado na estimativa da resistência à compressão de concreto em idades iniciais, [8]. Além disso, Malhotra & Carino, [1], ressalta-se que o ensaio de arrancamento de pino demandaria um elevado tempo de ensaio. Com base no exposto, e aliado ao comprimento total do túnel, a possibilidade de empregar o ensaio de arrancamento de pino na avaliação da estruturas em concreto projetado foi descartada.

Por fim, a aplicação do ensaio de penetração de pinos foi considerada. Este ensaio baseia-se na absorção da energia cinética inicial do pino pelo concreto. Neste caso, uma parcela da energia cinética do pino disparado é absorvida pela fricção entre o pino e o concreto, e uma outra parcela na fratura do concreto, [2].

Assim como o ensaio de esclerometria, o ensaio de penetração de pinos é empregado na avaliação da uniformidade do concreto na estrutura, [9]. Porém, quando o ensaio de penetração de pinos é utilizado na estimativa da resistência, recomenda-se construir uma curva de correlação empregando-se o tipo particular de concreto a ser investigado, [1,2,10].

Um dos ensaios de penetração de pinos apresentados na lite-

ratura é o proposto por Al-Manaseer e Nasser, [11] que consiste no uso de uma pistola com sistema de molas semelhante ao esclerômetro. Todavia, o método mais reconhecido é o ensaio de penetração com a pistola de Windsor, [6,12], que faz uso de cargas explosivas para projeção dos pinos no concreto. Este método envolve o uso de uma arma para a cravação do pino de aço no concreto endurecido, medindo-se, posteriormente, o comprimento exposto. Diferentemente do ensaio de esclerometria, o ensaio de penetração de pinos não é fortemente afetado pelas condições superficiais do concreto. Todavia, assim como no ensaio de esclerometria, a dureza e dimensão do agregado graúdo pode afetar os resultados do ensaio, [1,2].

Como exemplo prático e direcionado à obras de túneis, o ensaio de penetração de pinos, adaptado por um sistema pneumático, foi empregado por Iwaki, [8] no controle de qualidade da resistência à compressão em uma estrutura de concreto projetado, onde uma boa correlação para valores de resistência de até $30,0\text{MPa}$ foi obtida. O limite de resistência de $30,0\text{MPa}$ está associado ao nível de energia cinética aplicado no sistema pneumático descrito por Iwaki, [8]. Em se tratando do ensaio com a pistola de Windsor, o limite de resistência avaliado é de até $40,0\text{MPa}$ segundo o mesmo autor. Dentre as vantagens observadas para este ensaio, destaca-se o seu baixo custo e simplicidade já que pode ser facilmente realizado por um técnico devidamente treinado e, principalmente, velocidade em tratando de estruturas que demandem uma elevada quantidade de ensaios. Com base no exposto, o ensaio de penetração de pinos foi o escolhido para a avaliação da estrutura analisada neste trabalho. O sistema de aplicação de energia no ensaio de penetração de pinos utilizado nesta pesquisa consiste em uma adaptação da pistola de Windsor.

Uma vez definido o tipo de ensaio não-destrutivo a ser empregado para a avaliação da estrutura de concreto projetado, a metodologia proposta foi definida conforme apresentado no item que segue.

Figura 2 –Equipamentos utilizados no ensaio de penetração de pinos: pistola, pinos, cartuchos (pólvora)



Tabela 1 – Dosagem do concreto projetado no túnel

Material	Dosagem
Cimento CP IV 32 RS	400 Kg/m ³
Areia natural	720 Kg/m ³
Pó-de-pedra	120 Kg/m ³
Pó-de-pedra 4,75/12,5mm	980 Kg/m ³
Aditivo acelerador de pega	40 l/m ³

3. Metodologia para a avaliação da estrutura de concreto projetado

O metodologia proposta neste trabalho é dividida em duas etapas. A primeira consiste na definição da curva de correlação do ensaio não-destrutivo, isto é, a relação entre o comprimento exposto do pino e a resistência à compressão do concreto. A segunda etapa, por sua vez, diz respeito à realização de ensaios *in loco* ao longo da extensão do túnel. A combinação dos resultados das duas etapas descritas anteriormente foi empregada para avaliar quais os trechos da estrutura em questão apresentavam resistência característica à compressão inferior à especificada em projeto, neste caso, $f_{ck}=25,0MPa$.

Para a realização dos ensaios de penetração de pinos utilizou-se a pistola *Walsywa – Modelo DFG 40S*. Além disso, cartuchos de 22,0mm e pinos de 55,0x6.35mm (comprimentoxdiâmetro) foram empregados. Os equipamentos utilizados na realização do ensaio são ilustrados na Figura 2. A pistola em questão foi adotada em substituição à pistola de *Windsor* devido à dificuldade de obtenção e elevado custo. A primeira vez que esse tipo de pistola foi empregado no Brasil com o intuito de se prever propriedades do concreto, como resistência à compressão, foi no trabalho desenvolvido por Vieira, [13]. Atualmente, este método vem sendo vastamente empregado para averiguação das possíveis não conformidades em estruturas de concreto armado, merecendo destaque os trabalhos desenvolvidos por Evangelista, [14], e Pinto & Baggio, [9]. De acordo com a literatura, o ensaio de penetração de pinos é caracterizado por uma elevada variabilidade, [1,2,14]. Tal variabilidade deve-se tanto a fatores associados ao operador e erros do equipamento quanto à característica heterogênea do concreto. O erro do operador, desde que devidamente qualificado para a realização dos ensaios, pode ser considerado mínimo, e a variabilidade provém principalmente de fatores associados ao equipamento, como, por exemplo, variação da carga de pólvora no cartucho. Quanto ao concreto, a presença de agregados graúdos e distribuição de vazios na massa afetam sobremaneira os resultados obtidos no ensaio sendo considerados como os principais responsáveis para a elevada variabilidade do ensaio em questão, [2]. Devido à elevada variabilidade deste ensaio, um maior número de testes, quando comparado, por exemplo, com o ensaio de esclerometria, é necessário para detectar variações significativas de resistência do concreto. Entretanto, alguns resultados publicados,

[15-17], indicam que o coeficiente de variação do ensaio de penetração de pinos não seria tão elevado, o que permitiria a redução do número total de testes necessários para obter resultados confiáveis quando da investigação da resistência do concreto em estruturas acabadas.

Em função da existência de divergências, optou-se pela determinação do coeficiente de variação do ensaio de penetração de pinos com os equipamentos utilizados nesta pesquisa. É importante observar que a determinação do coeficiente de variação do ensaio deu-se previamente à realização das etapas descritas no início deste item. Destaca-se que os resultados provenientes do estudo preliminar, empregado para determinação do coeficiente de variação do ensaio de penetração de pino, são necessários para a definição do número de ensaios a serem realizados nas etapas seguintes, ou seja, as etapas 1 e 2. Desse modo, e visando facilitar o entendimento do programa experimental, optou-se por apresentar os resultados da etapa preliminar juntamente à descrição desta.

3.1 Determinação do coeficiente de variação do ensaio de penetração de pino

3.1.1 Descrição do programa experimental

Os ensaios para a determinação do coeficiente de variação do ensaio de penetração de pino foi realizado em placas de concreto projetado com dimensões de 0,60x0,60x0,15m (larguraxcomprimentoxaltura) e composição idêntica à empregada em obra. A dosagem do concreto utilizado na projeção das placas e do túnel é destacada na Tabela 1. Os moldes das placas foram inclinados em um ângulo de 60° (em relação ao plano horizontal) e as mesmas foram moldadas durante a projeção do concreto no túnel. Tal medida tem por objetivo não apenas representar as condições observadas em obra, mas também evitar a incorporação de material refletido e consequente formação de lentes de concretagem de baixa resistência.

Quanto ao ensaio de penetração de pinos, inicialmente levantou-se a hipótese de medir o ângulo de inclinação dos pinos cravados e o comprimento exposto do mesmo. Todavia, por medidas práticas, necessárias em função das condições de iluminação do túnel e também devido a elevada quantidade de ensaios a serem realizados, a determinação do comprimento médio exposto do pino deu-se através da média de duas medidas do comprimento

Figura 3 –Leitura do comprimento exposto do pino

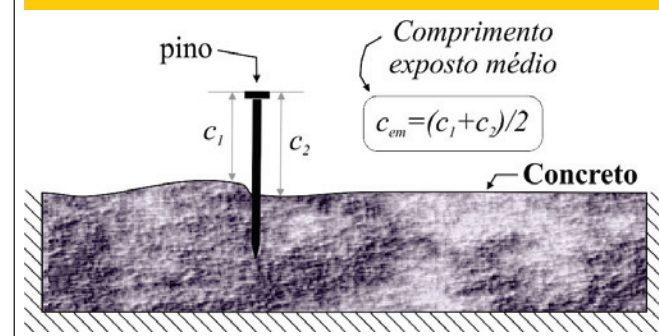
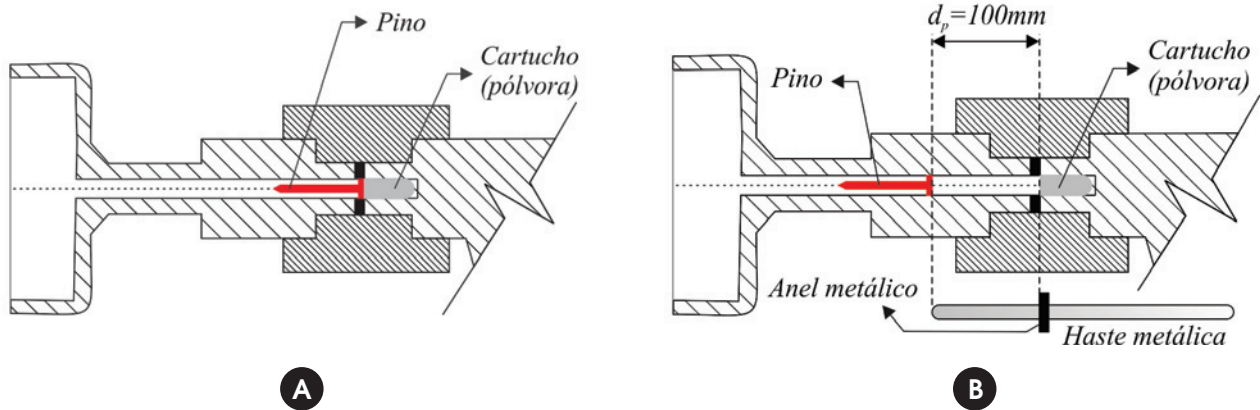


Figura 4 – Energia de propulsão (disparo): (a) energia máxima e (b) energia reduzida



exposto, efetuadas com uso de paquímetro digital, conforme ilustrado na Figura 3. Destaca-se, ainda, que a elevada rugosidade do acabamento do túnel, bem como no acabamento superficial das placas de concreto, também consiste em um fator determinante para a adoção do método de mensuração utilizado neste trabalho. O ensaio de penetração de pino foi realizado com energia de propulsão, ou disparo, controlada (energia cinética). Tal controle fez-se necessário em função da observação dos resultados dos ensaios em idades iniciais que indicaram que o uso de energia máxima de disparo resultava, em sua maioria, na penetração completa do pino. Esta resposta inicial está provavelmente associada ao baixo nível de resistência do concreto projetado no túnel.

A redução da energia de disparo foi obtida aumentando-se a distância entre a cápsula onde a carga de pólvora é inserida e o pino, conforme indicado na Figura 4. O controle da distância, $d_p=100mm$, do pino em relação à carga da pólvora, indicada na Figura 4b, deu-se por meio de uma haste metálica com diâmetro semelhantes à cabeça do pino e fim de curso delimitado por um

anel metálico soldado à haste. Tal procedimento foi realizado ao longo de todo o programa experimental tendo como objetivo reduzir erros e, ao mesmo tempo, facilitar a execução do ensaio, uma vez que o operador não precisa se preocupar em medir a distância exata do pino no cano de disparo toda a vez que o ensaio tem que ser executado.

Um total de dez ensaios foram realizados na mesma placa de concreto quando a mesma completou 28 dias de idade. Em cada ensaio, a massa de pólvora contida nos cartuchos utilizados no ensaio foi mensurada e o coeficiente de variação da mesma foi determinado. Com o objetivo de reduzir os possíveis erros causados pelo operador, todos os ensaios foram realizados pela mesma pessoa, adequadamente qualificada para tanto. Os resultados obtidos são discutidos no item que segue.

3.1.2 Resultados e discussão dos resultados

Os resultados do comprimento penetrado do pino e a massa do cartucho com pólvora são apresentados na Figura 5. O comprimento penetrado do pino foi determinado pela diferença entre o comprimento médio do pino, neste caso, $54,9mm$, e o comprimento exposto médio medido conforme indicado na Figura 3. Os valores de comprimento penetrado médio do pino e massa de pólvora média, obtidos com base nos valores individuais destacados na Figura 5, são listados na Tabela 2.

Com base nos resultados da Tabela 2, obteve-se um coeficiente de variação total de $8,1\%$. A obtenção de um baixo valor de coeficiente de variação está conectada, entre outros fatores, à pequena variação da carga de pólvora contida no cartucho. Além disso, o fato dos ensaios terem sido realizados pelo mesmo operador, e da mistura de concreto projetado ter sido produzida com agregados graúdos com dimensão máxima de $9,5mm$, também contribuem para a redução da variabilidade total do ensaio, [1,2]. Devido à medidas práticas conectadas à elevada quantidade de ensaios a serem realizados, e com base na baixa variabilidade da massa de pólvora, optou-se por não mensurar a massa de pólvora ao longo das demais etapas experimentais.

A determinação do número total de ensaios, n , a serem realizados na para cada placa de concreto avaliada na etapa 2 tem por base

Figura 5 – Resultados individuais do comprimento penetrado dos pinos e massa de pólvora no cartucho

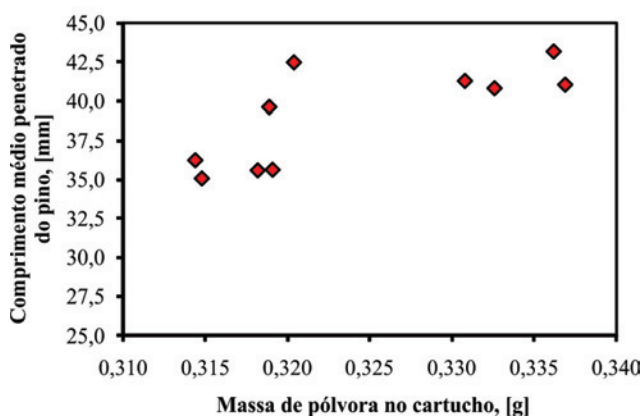


Tabela 2 – Comprimento cravado médio do pino e massa de pólvora média

Ensaio de penetração de pinos	
Valor médio, (mm)	39,10
Desvio-padrão, (mm)	3,20
Coefficiente de variação, (%)	8,1
Número de ensaios	10
Massa de pólvora no cartucho	
Valor médio, (g)	0,324
Desvio-padrão, (g)	0,009
Coefficiente de variação, (%)	2,7
Número de cartuchos	10

a definição do erro máximo relativo, E , descrito na equação (1).

$$n = t_{\alpha/2, (n-1)}^2 \cdot \frac{CV^2}{E^2}, \tag{1}$$

onde: CV equivale ao coeficiente de variação do ensaio em valor percentual, E corresponde ao erro máximo relativo em valor percentual, n é número total de ensaios, $t_{\alpha/2}$ corresponde à constante da distribuição t Student, [18], para um valor de significância $\alpha/2$. Destaca-se que o valor de α foi definido como 5,0%. Além disso, cabe mencionar que a solução da equação (1) é obtida através de processo iterativo uma vez que o valor da constante $t_{\alpha/2}$ é função de n.

Quanto menor erro relativo máximo admitido, maior é a quantidade de ensaios a serem realizados. Todavia, fatores como custo de realização dos ensaios, tempo de trabalho no interior do túnel e custo dos equipamentos devem ser levados em consideração de modo a minimizar a quantidade de ensaios e, conseqüentemente, os custos diretos e indiretos relacionados à execução deste. Em função destas variáveis, e em acordo com o corpo técnico responsável pela execução do túnel, optou-se por um erro relativo máximo de 10,0%.

Aplicando-se os valores de coeficiente de variação do ensaio de penetração de pino, $CV=8,1\%$ destacado na Tabela 1, e erro máximo relativo, $E_R=10,0\%$, na equação (1) obteve-se um valor de número total de ensaios, n, igual à seis, $n=6$. Cabe destacar que o valor resultante da equação (1) é igual a 5,1, contudo este valor foi arredondado para o número inteiro imediatamente superior. Assim sendo, em cada placa de concreto foram realizados 12 ensaios, sendo 6 aos 13 dias e 6 aos 36 dias de idade.

3.2 Etapa 1: Determinação da curva de correlação do ensaio de penetração de pino

A definição da correlação entre os resultados do ensaio de penetração

de pino e resistência à compressão do concreto foi determinada através de ensaios realizados em duas placas de concreto. As placas de concreto têm dimensões de $0,60 \times 0,60 \times 0,15m$ foram moldadas com concreto projetado cuja composição corresponde àquela utilizada no túnel em questão e coincidente com a dosagem utilizada na Etapa 1. Previamente à realização do ensaio de penetração de pino, quatro testemunhos de $75,0mm$ de diâmetro foram extraídos das placas de concreto. Em função da variação da espessura da placa de concreto, resultante do processo de produção das mesmas no túnel, a altura dos testemunhos variou entre $93,0mm$ e $159,8mm$. Em cada uma das placas de concreto foram realizados 12 ensaios de penetração de pino. Tal número tem por base os resultados referentes ao estudo de determinação do coeficiente de variação do ensaio de penetração de pino apresentada na seção 3.1.

O ensaio de resistência à compressão dos testemunhos foi realizado em diferentes idades, neste caso, dois testemunhos aos 13 e dois aos 36 dias. Tal medida foi efetuada com o objetivo de cobrir um maior espectro de resistências à compressão para definição da curva de correlação. É importante observar que a qualidade/integridade do testemunho deve ser avaliada antes da execução do ensaio. Os testemunhos que apresentarem falhas de moldagem, conhecidas como lentes de concretagem no caso de concreto projetado, devem ser descartados da análise e uma nova extração deve ser realizada.

Após a realização dos ensaios propostos neste item, a curva de correlação entre o comprimento exposto penetração de pino e a resistência à compressão foi determinada através de regressão linear segundo o modelo descrito na equação (2). O erro da previsão, E_p , para valores individuais e médios da curva de correlação foi calculado através da equação (3) e (4), respectivamente. Destaca-se que o valor de significância, α , necessário para determinar o intervalo de confiança da curva de correlação, equivale ao valor empregado no cálculo da resistência característica do concreto, ou seja, 5,0%, [19]. Dentre diversas referências, a descrição detalhada do processo de regressão linear, bem como das equações utilizadas para a determinação do erro da previsão são encontradas em [18].

$$y = a + b \cdot x \pm E_p \tag{2}$$

$$E_{p-individual}(x_i) = \pm t_{\alpha/2, (n-2)} \cdot S_e \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}}, \tag{3}$$

$$E_{p-medio}(x_i) = \pm t_{\alpha/2, (n-2)} \cdot S_e \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}}, \tag{4}$$

onde e correspondem, nesta ordem, às variáveis dependente e independente; a e b equivalem, respectivamente, ao coeficiente linear e coeficiente angular da reta; $E_{p-individual}$ é o erro da previsão para valores individuais e $E_{p-medio}$ é o erro da previsão para valores médios; S_e corresponde ao erro padrão da estimativa e é calculado por meio da equação (5); n refere-se ao tamanho da

amostra, ou seja, número de pontos utilizados para definir a curva de correlação; \bar{x} corresponde ao valor médio da variável x ; e S_{xx} é o somatório dos resíduos da variável x , dado pela equação (6).

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (a + b \cdot x_i))^2}{n - 2}}, \quad (5)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (6)$$

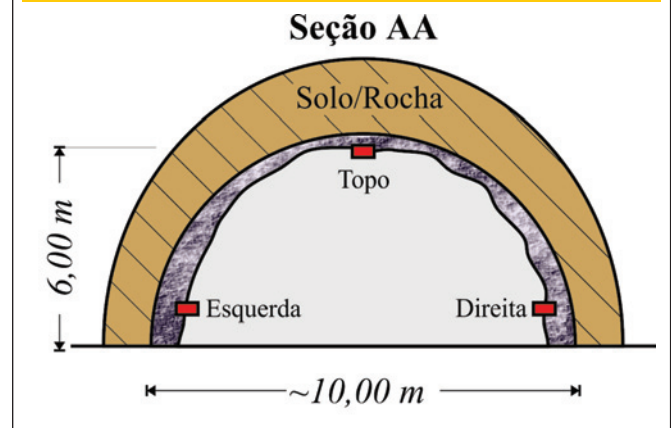
Além da curva de correlação, os resultados obtidos nos ensaios realizados nas placas foram utilizados para uma segunda verificação do coeficiente de variação do ensaio. Para tanto, calculou-se o coeficiente de variação dos resultados de cada uma das placas para diferentes idades e o coeficiente de variação médio, CV_m , através da equação (7).

$$CV_m = \frac{s_m}{\bar{x}_m}, \quad (7)$$

onde s_m é a média do desvio-padrão, s_j , de cada uma das placas para diferentes idades, tal valor é calculado através da equação (8); \bar{x}_m é a média dos valores médios obtidos em cada uma das placas para diferentes idades; e CV_m corresponde ao coeficiente de variação médio.

$$s_m = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N s_j^2}, \quad (8)$$

Figura 6 – Localização dos pontos onde os ensaios de penetração de pino em cada uma das seções transversais avaliadas no túnel



sendo N o número de grupos amostrais, neste caso, $N=4$.

3.3 Etapa 2: Ensaio de penetração de pino ao longo da camada de concreto projetado no túnel

Esta etapa teve por objetivo avaliar se a resistência da camada de concreto projetado ao longo do túnel atendia o valor especificado em projeto. Todavia, a realização de ensaios de penetração de pinos ao longo de toda a superfície da camada de revestimento seria impraticável, principalmente em função das dificuldades em alcançar todas as regiões correspondentes à abóboda do túnel. Assim sendo, optou-se pela avaliação de três pontos para cada seção transversal pré-definida. Os pontos onde os ensaios foram realizados correspondem às regiões laterais e superior da seção do túnel conforme apresentado na Figura 6. Os ensaios no túnel

Tabela 3 – Resultados do ensaio de penetração de pinos nas placas de concreto

Idade Pinos	Placa 1		Placa 2	
	13 dias	36 dias	13 dias	36 dias
	$C_{\text{exposto médio}}^1$ (mm)	$C_{\text{exposto médio}}^1$ (mm)	$C_{\text{exposto médio}}^1$ (mm)	$C_{\text{exposto médio}}^1$ (mm)
1	34,21	35,05	18,23	19,30*
2	37,64	37,82	20,27	29,67
3	40,05*	33,89	21,82	24,32
4	37,37	36,91	16,59	25,29
5	33,59	32,93	22,65	26,35
6	36,14	35,76	28,68*	27,19
Valor médio, (mm)	35,79	35,39	19,91	26,56
Desvio-padrão, (mm)	1,83	1,83	2,51	2,05

*valores espúrios: excluídos da amostra e não considerados no cálculo de valor médio e desvio-padrão;

Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos testemunhos extraídos das placas

Placa	Testemunho	Resistência à compressão, (MPa)	h/d	Fator de correção	Resistência à compressão corrigida, (MPa)	Resistência à compressão majorada, (MPa)	Média da resistência à compressão majorada, (MPa)	Idade, (dias)
1	1-1	18,3	2,13	1,00	18,3	20,1	20,6	13
	2-1	19,2	2,12	1,00	19,2	21,1		13
	3-1	20,3	1,87	0,99	20,1	22,1	24,3	36
	4-1	25,0	1,58	0,97	24,1	26,5		36
2	1-2	8,7	1,39	0,95	8,2	9,0	9,4	13
	2-2	9,2	1,44	0,95	8,8	9,7		13
	3-2	15,4	1,42	0,95	14,7	16,1	17,8	36
	4-2	18,8	1,37	0,94	17,7	19,5		36

foram realizados num período compreendido entre 40 e 50 dias após a projeção dos últimos 100,0m do revestimento.

As seções do túnel foram avaliadas em diferente direções, pois existe a possibilidade de variação da energia de compactação do concreto em função do ângulo e distância de projeção. Em condições ideais, o concreto deveria ser projetado perpendicularmente à estrutura, contudo em trechos como, por exemplo, o teto do túnel, existem dificuldades técnicas que podem resultar na variação do ângulo de projeção. Entretanto, para uma mesma mistura projetada, resultados experimentais indicam que tal variação não prejudica a correlação entre o ensaio de penetração de pinos mas apenas a resistência do concreto, [20]. Dessa forma, a utilização de um ângulo de 60° na projeção das placas de concreto utilizadas na definição da curva de correlação do ensaio, discutida no item 3.1.1, não apresenta influência significativa na correlação do ensaio.

Em geral, as seções foram demarcadas a cada 5,0m ou 10,0m ao longo do comprimento do túnel. Para cada uma das regiões, três ensaios foram efetuados, resultando num total de nove tiros por seção. Ao todo seiscentos e dez testes foram realizados ao longo dos quatrocentos e cinquenta metros de comprimento do tunel até então executados. Mais especificamente, duzentos e trinta e cinco testes em cada uma das faces laterais e cento e quarenta testes no topo. A quantidade reduzida de ensaios realizados no topo do túnel deve-se a dificuldades encontradas em alcançar o topo do túnel e realizar a leitura do comprimento exposto do pino.

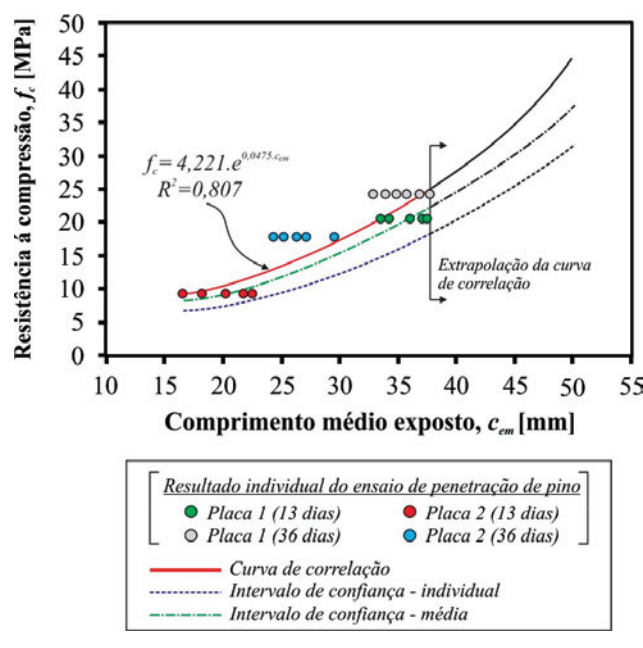
4. Resultados e discussão dos resultados

4.1 Etapa 1: Determinação da curva de correlação do ensaio de penetração de pino

Nesta etapa da pesquisa, duas placas de concreto projetado foram testadas. Os resultados obtidos no ensaio de penetração de pino são listados na Tabela 3. É importante mencionar que os resultados considerados espúrios foram retirados da amostra para a confecção da curva de correlação.

A avaliação do coeficiente de variação médio do ensaio, determinado através dos valores de média e desvio-padrão apresentados na Tabela 3 e das equações (7) e (8), resulta em um coeficiente de variação médio, CV_m , igual à 7,1%. Este valor é compatível com o valor obtido no estudo da variabilidade do ensaio e utilizado na definição do número de ensaios a serem realizados nesta etapa conforme exposto no item 2.1.1.

Figura 7 - Curva de correlação: comprimento exposto do pino x resistência à compressão



Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos testemunhos extraídos das placas são destacados na Tabela 4. Cabe observar que os resultados deste ensaio tiveram que ser corrigidos devido a variação de altura dos testemunhos e possível presença de micro-fissuras nas amostras causadas pela vibração excessiva durante a extração dos testemunhos. As correções foram efetuadas segundo as recomendações apresentadas em [21]. Destaca-se ainda que os valores de resistência média majorada, destacados na Tabela 4, foram utilizados na definição da curva de correlação. A curva de correlação do ensaio de penetração de pino, juntamente com intervalo de confiança dos valores individuais e médios, definido pelas equações (3) e (4), são ilustradas na Figura 7. O limite inferior do intervalo de confiança, destacado na Figura 7, equivale à curva de resistência característica do concreto uma vez que se adotou significância igual a 5,0%.

Como pode ser observado na Figura 7, a curva de correlação não cobre intervalos de resistência acima de 25,0MPa. Logo, caso os valores de resistência observados na camada de revestimento do túnel estejam acima dos resultados obtidos nos testemunhos, existe a necessidade de extrapolação da curva de correlação. Todavia, devido ao fato das placas terem sido moldadas durante o processo de projeção a existência de valores *in loco* similares aos observados nas placas de concreto é elevada, o que por sua vez, apresenta indícios de que a camada de revestimento do túnel apresenta resultados não conformes.

A expressão da curva de correlação do ensaio de penetração de pinos é detalhada na equação (9). Destaca-se que o coeficiente de correlação, R^2 , obtido na definição da curva foi de 0,807. Tendo em vistas a variabilidade intrínseca ao ensaio de penetração de pinos, somada a variabilidade associadas as características do concreto projetado, o coeficiente de correlação 0,807 pode ser considerado aceitável. É importante observar que, apesar de considerado aceitável, estudos complementares se fazem necessários de modo a obter um melhor coeficiente de correlação entre os resultados. Tais estudos incluem, por exemplo, o aumento do universo amostral possibilitando, dessa forma, a realização de análises estatísticas mais aprofundadas.

$$f_c = 4,221 \cdot e^{0,0475 \cdot c_{em}},$$

(9)

onde f_c corresponde à resistência à compressão, em [MPa], prevista do concreto para um comprimento médio de exposto c_{em} , em [mm]. De posse da curva de correlação entre o comprimento exposto do pino e a resistência à compressão do concreto, (9), foi possível estimar a resistência à compressão em diferentes pontos da camada de concreto projetada ao longo do túnel conforme apresentado no item que segue.

4.2 Etapa 2: Ensaio de penetração de pinos ao longo da camada de concreto projetado no túnel

Com base na curva de correlação e respectivos intervalos de confiança, ilustrados na Figura 7, definiu-se que seria necessário que o comprimento exposto do pino fosse de, no mínimo, 44,3mm (valores individuais), para que o concreto pudesse ser considera-

do como tendo resistência característica de 25,0MPa ou 39,8mm (valores médios) para que a resistência média da seção tenha um valor característico de 25MPa.

A utilização dos diferentes limites especificados anteriormente dependendo da análise que realizada. No presente trabalho, ambos os valores foram considerados, uma vez que a análise dos resultados diz respeito ora ao resultados individuais do ensaio de penetração de pino realizados em cada uma das regiões das seções do túnel (valores individuais), e ora à média dos resultados do ensaio em cada seção do túnel, ou seja, (valores médios). Cabe observar que, posteriormente à análise inicial através dos limites de comprimento exposto do pino especificados acima, o valor de resistência característica dos diferentes trechos do túnel foram avaliados mediante análise estatística, conforme descrito ao longo deste item.

Os resultados individuais obtidos no ensaio de penetração de pino em cada uma das seções avaliadas são apresentados na Figura 8. As médias dos resultados em cada uma das regiões do túnel são ilustradas na Figura 9. Previamente à discussão destes, cabe mencionar que os valores de faixa de penetração do pino obtidos ao longo do túnel (Figura 8) foram muito similares às faixas de penetração obtidas na placa projetadas. Portanto, nota-se uma excelente condição de comparação das populações, sendo desnecessária a extrapolação dos resultados discutida no item 4.1.

Com base nos resultados apresentados na Figura 8, e considerando o limite de 44,3mm especificado para valores individuais, pode-se afirmar que a resistência à compressão do concreto projetado não atende às especificações de projeto em nenhuma localidade do túnel.

Destaca-se ainda que os resultados da Figura 8 indicam a existência de uma considerável variação do comprimento exposto do pino, e conseqüentemente da resistência estimada correspondente, ao longo do túnel. Os resultados estão mais dispersos na região lateral esquerda do túnel, enquanto que o topo apresenta menor dispersão. A elevada dispersão dos resultados é atribuída não apenas à natureza do material, mas também à possível falta de homogeneidade do concreto projetado decorrente, por exemplo, da falta de controle da técnica de projeção e da dosagem do concreto.

Considerando a Figura 9, e o limite de 39,8mm especificado para valores médios, novamente pode-se concluir que a resistência à compressão do concreto projetado é não conforme, ou seja, não se pode afirmar, com 95% de confiança, que a resistência média do concreto seja superior a 25,0MPa, em todas as seções ao longo do comprimento do túnel.

De modo a fornecer informações mais precisas, possibilitando assim uma futura análise de estabilidade da estrutura seja realizada, procedeu-se com a determinação da resistência característica do concreto projetado em diferentes trechos do túnel para permitir soluções diferenciadas de reforço estrutural por trecho. Para tanto, o túnel foi dividido em 7 trechos conforme ilustrado na Figura 10.

Os resultados individuais de resistência à compressão em cada trecho, previstos através do ensaio de penetração de pino e da equação (9), foram agrupados e a média, f_{cj} , e desvio-padrão, s_{cj} , de cada grupo foram calculadas. De posse destes dados, calculou-se a resistência característica do concreto, f_{ck} , com base na equação (10). O resumo de todos os resultados obtidos nesta análise são apresentados na Tabela 5. Os valores de resistências características definidos em cada um dos trechos é apresentado na Figura 10.

Figura 8 - Valores individuais de comprimento exposto do pino para as regiões (a) lateral direita, (b) lateral esquerda e (c) topo em cada seção do túnel

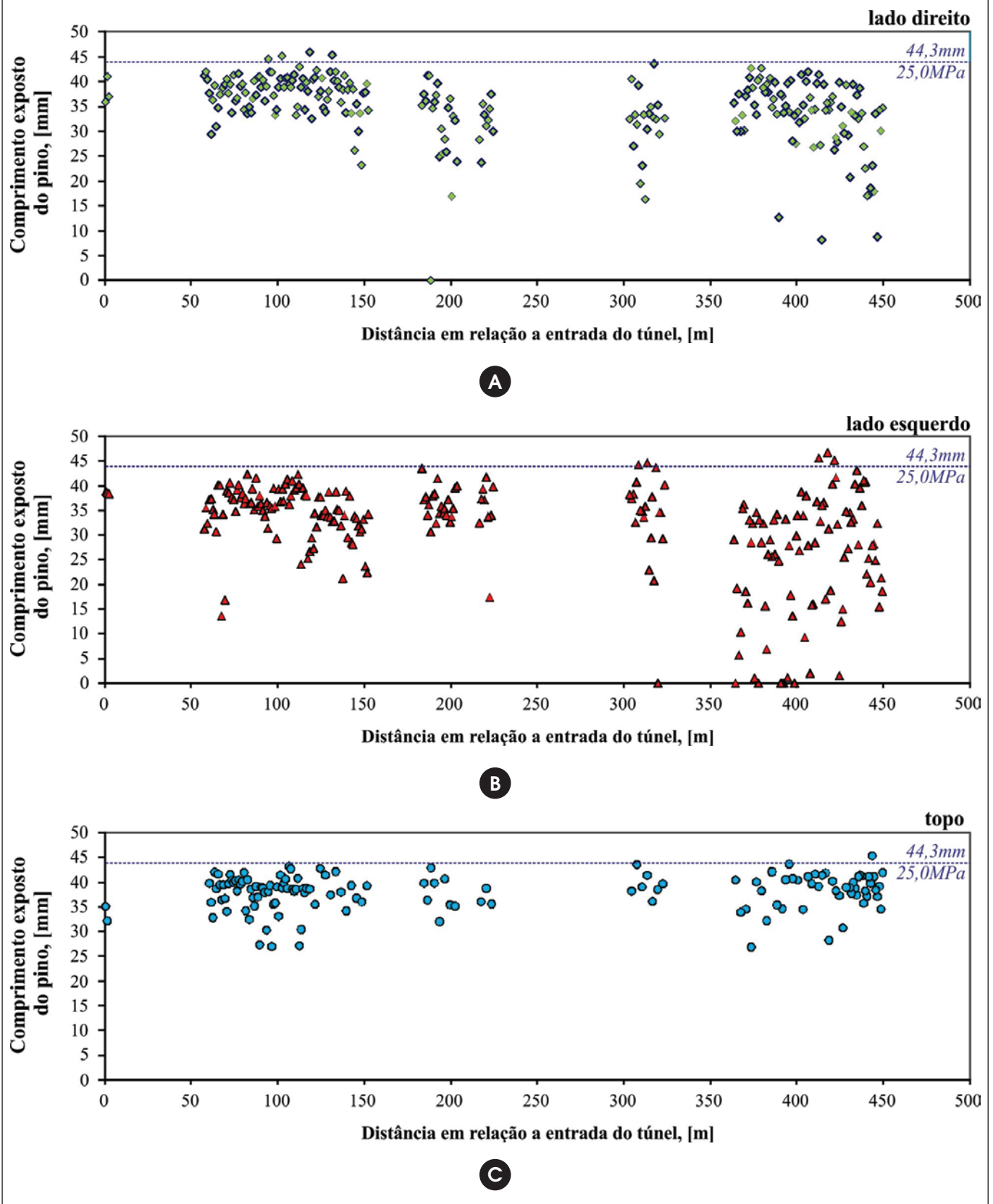


Figura 9 -Valores médios de comprimento exposto do pino para regiões (a) lateral direita, (b) lateral esquerda e (c) topo em cada seção do túnel

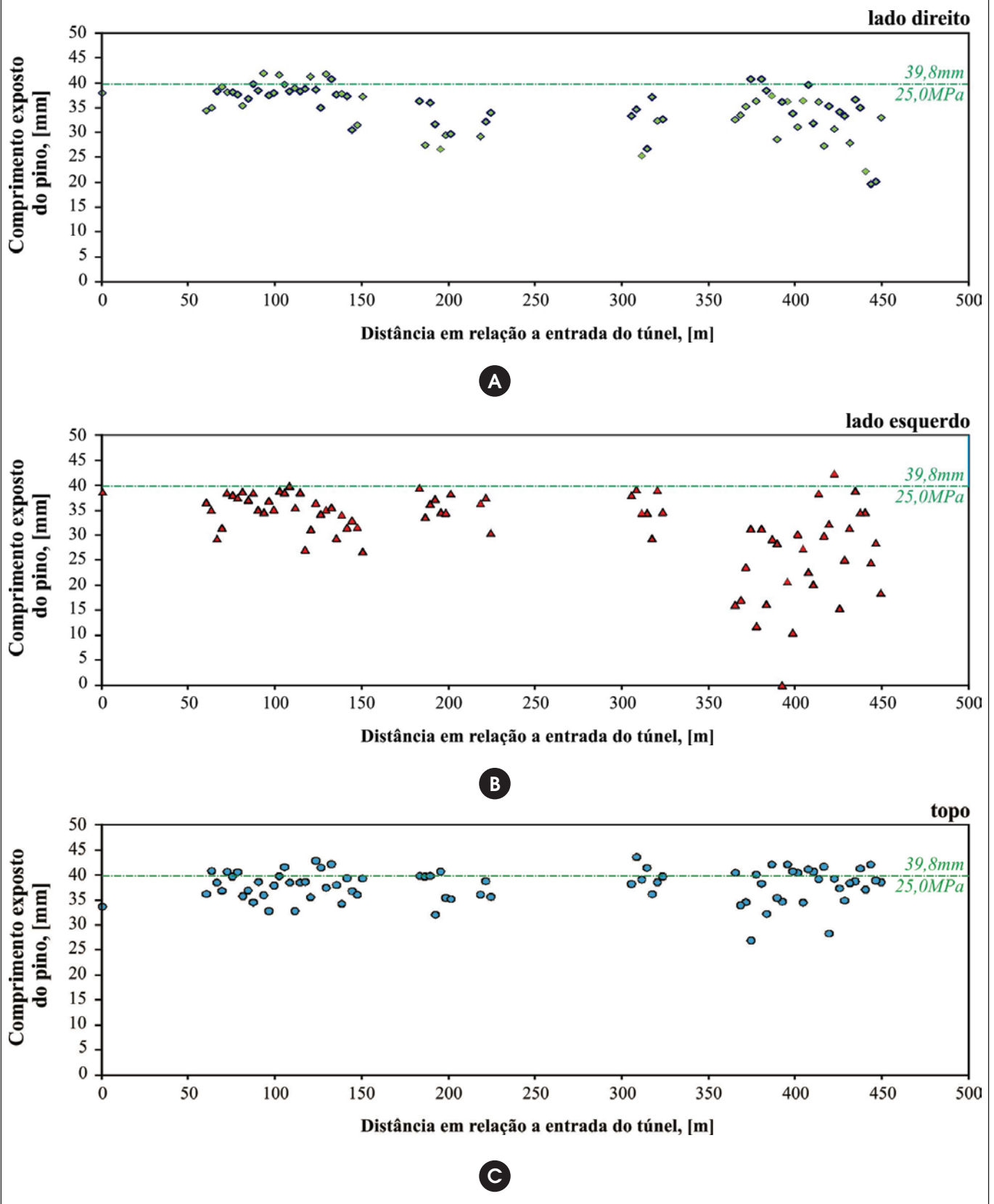
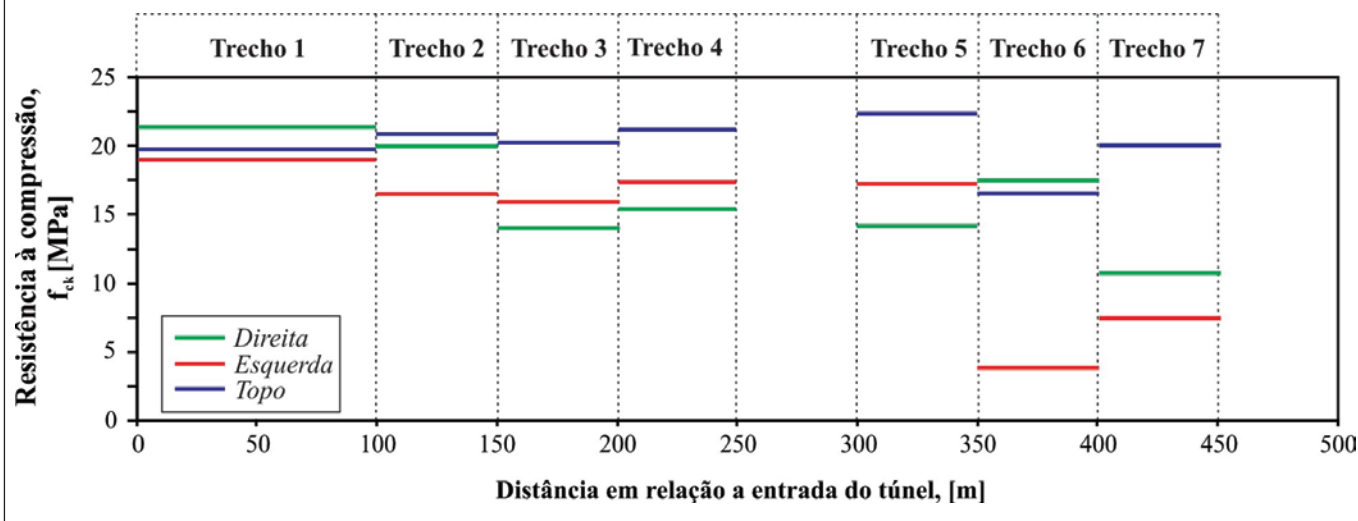


Figura 10 – Resistência característica do revestimento de concreto em diferentes seções do túnel



$$f_{ck} = f_{cj} - 1,645 \cdot s_d \quad (10)$$

Como pode ser observado na Tabela 5, os valores de resistência se encontram abaixo do valor característico especificado em projeto. As seções lateral direita e topo apresentaram, na maioria dos casos, os melhores resultados, enquanto a seção lateral esquerda apresenta os piores, principalmente no trecho final do túnel.

Por fim, na Figura 10, nota-se que, de uma forma geral, a resistência à compressão do concreto decresce ao longo do comprimento do túnel. Tal tendência era esperada, uma vez que o concreto projetado na entrada do túnel tem idade superior àquele projetado no trecho final do túnel.

5. Considerações finais

No presente trabalho, o ensaio de penetração de pinos foi utilizado

como base para definição de uma metodologia para avaliação da resistência à compressão do concreto projetado. Em função da observações efetuadas durante a realização dos ensaios e dos resultados apresentados neste trabalho, as seguintes conclusões foram obtidas. Quanto à realização dos ensaios, observou-se que a solução de baixo custo proposta neste trabalho apresenta resultados promissores. Neste caso, à pistola de Windsor, comumente empregada no ensaio de penetração de pinos, foi substituída por uma pistola de baixo custo disponível no mercado e empregada para a fixação de pinos de aço em peças de concreto.

Além disso, durante a realização dos ensaios, o controle da energia de disparo mostrou ser um fator importante para garantir que o ensaio apresente sensibilidade suficiente para detectar diferentes níveis de resistência. Por questões práticas, apenas um nível de energia foi utilizado na investigação da estrutura em questão. Entretanto, recomenda-se a avaliação da influência da energia de disparo em concretos com vários níveis de resistência como otimização do método de ensaio proposto neste trabalho.

No que tange à estrutura avaliada, a análise dos resultados mostra que a resistência à compressão do túnel não atendeu às especificações de

Tabela 5 – Resistência característica do concreto projetado em diferentes seções do túnel

Trecho	Seção: direita			Seção: esquerda			Seção: topo			
	f_{cj} (MPa)	s_d (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{cj} (MPa)	s_d (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{cj} (MPa)	s_d (MPa)	f_{ck} (MPa)	
1	0,0 – 100,0m	25,8	2,6	21,6	23,5	3,0	18,6	24,9	3,1	19,8
2	100,0 – 150,0m	25,9	3,6	20,0	22,0	3,6	16,1	26,3	3,4	20,6
3	150,0 – 200,0m	19,7	4,1	13,0	22,2	3,9	15,8	26,0	3,6	20,1
4	200,0 – 250,0m	18,7	2,0	15,4	23,2	3,7	17,2	23,8	1,9	20,8
5	300,0 – 350,0m	19,4	3,7	13,3	23,2	3,7	17,1	27,7	3,2	22,4
6	350,0 – 400,0m	23,4	3,7	17,3	11,8	4,9	3,7	24,7	5,1	16,3
7	400,0 – 450,0m	19,2	4,9	11,2	17,8	6,3	7,5	26,4	3,8	20,2

projeto, $f_{ck}=25,0$ MPa. Contudo, os resultados indicam que, de uma forma geral, a resistência característica do concreto é superior a 15,0 MPa, exceto para os últimos 100,0m da região lateral esquerda do túnel. Com exceção do trecho esquerdo, acredita-se que o valor de f_{ck} entre 15,0 e 20,0MPa poderia ser tomado como referência na avaliação da capacidade de carga da estrutura no seu estado atual e consequente definição do reforços estruturais. Os valores de resistência características foram determinados em diferentes trechos do túnel, sendo os maiores valores observados nos primeiros 150,0m do túnel uma vez que tal trecho tem idade superior àquele projetado no trecho final do túnel.

No estudo de variabilidade do ensaio de penetração de pinos obteve-se o valor de coeficiente de variação de ~8.0%, contudo a variabilidade observada in loco aparenta ser relativamente superior à esta. Tal fato, deve-se principalmente, mas não exclusivamente, a fatores como descontinuidade da espessura da camada de concreto projetado e falta de homogeneidade do concreto projetado decorrente da falta de controle da técnica de projeção.

Por fim, pode-se afirmar que a metodologia proposta é adequado para a estimativa da resistência à compressão de estruturas de revestimento em concreto projetado. Todavia, quando possível, recomenda-se um maior número de repetições dos ensaios de modo a cobrir a variabilidade do mesmo e, dessa forma, obter um melhor coeficiente de correlação entre os resultados.

6. Agradecimentos

Agradecimentos ao Programa Erasmus Mundus External Cooperation Window EMECW – EU-Brazil Startup pela bolsa de doutorando do primeiro autor.

7. Referências

- [01] MALHOTRA, V.M., CARINO, N.J. Penetration Resistance Methods. In: Handbook of non-destructive testing of concrete. 2nd Ed. CRC Press (2004) 33-50.
- [02] NAWY, E.G., Concrete Construction Engineering Handbook. Nondestructive test methods. 2ndEd. CRC Press (2008) 902-975.
- [03] HOBBS, B., KEBIR, M.T. Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete building. Forensic Science International 167 (2007) 167-172.
- [04] ZHU, W., GIBBS, J.C., BARTOS, P.J.M. Uniformity of in-situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements. Cement and Concrete Composites 23 (2001) 57-64.
- [05] BILGIN, N., DINCER, T., COPUR, H. The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages. Tunnelling and Underground Space Technology 17 (2002) 237-247.
- [06] ACI COMMITTEE 228. In-place methods to estimate concrete strength, ACI 228.1R. American Concrete Institute (2003) Farmington Hills, MI,
- [07] SOUTSOS, M.N., BUNGEY, J.H., LONG, A.E., HENDERSON, G.D. In-situ strength assessment of concrete – The European concrete frame building project. In: Non-destructive tests in civil engineering, Tokyo (2000) 583-592,
- [08] IWAKI, K., HIRAMA, A., MITANI, K., KAISE, S., NAKAGAWA, K. A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test. NDT & E International – Independent Non-destructive testing and evaluation 34 (6) (2001) 395-402.
- [09] PINTO, R.C.A., BAGGIO, D. Estudo da Variabilidade do Ensaio Brasileiro de Penetração de Pinos. 46º IBRACON - Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, (2004).
- [10] ACI Committee 228. In-place methods to estimate concrete strength, ACI 228.1R. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2003).
- [11] AL-MANASEER, A.A., NASSER, K.W. Laboratory and field tests with a new non-destructive apparatus. Canadian Journal of Civil Engineering 17 (6) (1990) 904-910.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 803-82: Standard test method for penetration resistance of hardened concrete, 1982.
- [13] VIEIRA, D.P. Método Brasileiro de Penetração de Pinos. XX Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Santiago, Chile (1978).
- [14] EVANGELISTA, A.C.J. Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio não Destrutivos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2002).
- [15] ARNI, H.T., Impact and penetration tests of portland cement concrete. Highway Research Report 378 (55) (1972).
- [16] CARETTE, G.G., MALHOTRA, V.M., In-Situ Tests: Variability and Strength Prediction of Concrete at Early Ages. Malhotra, V.M., Ed., American Concrete Institute, Spec. Publ. SP-82, 111p., (1984).
- [17] KEILLER, A.P., A Preliminary Investigation of Test Methods for the Assessment of Strength of In-Situ Concrete. Tech. Rep. No. 551, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, September, (1982).
- [18] MONTGOMERY, D.C. Applied Statistics and Probability for Engineers, 4thEd. Willey, (2006) 784p.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, (2007).
- [20] PRUDÊNCIO JR. L.R. Contribuição à dosagem de concreto projetado. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação da Universidade de São Paulo – USP, Brasil, (1993).
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7680: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, (2007).