

**Influência da pressão de ar comprimido nas propriedades mecânicas e físicas de concreto projetado via úmida aplicado em túneis NATM****Influence of compressed air pressure on the mechanical and physical properties of wet shotcrete applied in NATM tunnels**

DOI:10.34117/bjdv6n11-488

Recebimento dos originais: 23/10/2020

Aceitação para publicação: 23/11/2020

**Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva**

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil  
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000  
rodrigorogério@uni9.pro.br

**Maeli dos Santos Tavares**

Pós Graduanda em Geotecnia  
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil  
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000  
maeli\_tavares@hotmail.com

**Ana Mariana Aparecida do Nascimento**

Engenheira Civil  
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil  
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000  
anamarianaaparecida@gmail.com

**Thiago Henrique de Souza Lima**

Engenheiro Civil  
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil  
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000  
Thiagohenriquecivil23@gmail.com

**RESUMO**

A acomodação excessiva do solo durante escavações em taludes e túneis NATM faz com que o maciço perca sua capacidade autoportante e passe a exercer esforços sobre a estrutura. A aplicação do revestimento de concreto projetado impede esta acomodação exercendo função estrutural, além de tratamento do maciço através do preenchimento de vazios entre a junção da estrutura-macício, possibilitando que aja como suporte em toda a superfície escavada, melhorando sua interação com o maciço. Assim, denota-se que suas propriedades são dependentes do processo de projeção utilizado por via seca ou úmida, bem como equipamentos, pressão de ar comprimido, mão de obra, além das propriedades específicas do concreto projetado como reflexão, deslocamento, liberação de poeira ou névoa. O objetivo do presente trabalho é avaliar através de modelos de correlações a influência da pressão do ar comprimido, nas propriedades físicas, mecânicas e elásticas, além do índice de reflexão durante aplicação de concreto projetado via úmida. Os modelos de correlação foram estatisticamente significativos, ao nível de 95% de confiança, demonstrando que o aumento da pressão de ar

comprimido, possui influência nas propriedades mecânicas e físicas do concreto projetado via úmida.

**Palavras-chave:** Concreto projetado via úmida, túnel NATM, resistência a compressão, módulo de elasticidade, reflexão de concreto.

### **ABSTRACT**

Excessive accommodation of the ground during excavations in embankments and NATM tunnels causes the massif to lose its self-supporting capacity and put stress on the structure. The application of the shotcrete coating prevents this accommodation by exercising a structural function, in addition to treating the massif by filling in the voids between the junction of the structure-massif, allowing it to act as a support on the entire excavated surface, improving its interaction with the massif. Thus, it is noted that its properties are dependent on the spraying process used by dry or wet, as well as equipment, compressed air pressure, labor, in addition to the specific properties of the shotcrete, such as rebound, flaking, dust release or mist. The objective of the present work is to evaluate, through correlation models, the pressure of the tablet pressure, in the physical, mechanical and elastic properties, in addition to the rebound during the application of shotcrete via wet. The correlation models were statistically. At the 95% confidence level, demonstrating that the increase in compressed air pressure has an influence on the mechanical and physical properties of the sprayed concrete via wet.

**Keywords:** Wet mix shotcrete, tunnel NATM, compressive strength, modulus of elasticity, concrete rebound.

## **1 INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos a projeção de concreto vem se destacando cada vez mais no mercado da construção civil por ser um método que apresenta alta velocidade de lançamento e fácil adesão, normalmente utilizado durante o processo de escavação de túneis do tipo NATM, estabilização de encostas e recuperação de reforço estrutural (lajes, vigas e pilares).

Estudos realizados por Figueiredo (1997), Silva (1997), Panet et al. (2001), Goel (2002) e Martins (2008), demonstraram que o revestimento do túnel em concreto projetado é classificado como suporte contínuo, atuando no controle de estabilidade do maciço durante as escavações, exercendo função estrutural, através da distribuição das forças de reação no maciço levado a um novo equilíbrio.

Segundo Panet e Gunot (1983), Oreste (2003) e Ansell (2004), uma das maiores peculiaridades do concreto projetado é seu comportamento mecânico ao longo do tempo, dificultando a estabilidade da estrutura de suporte durante as escavações do túnel, influenciando no alívio de tensões durante o seu avanço.

Conforme recomendações de Gasparin (2007) para proporcionar ao maciço a função de autosuporte, mediante pequenas acomodações e distribuições de tensões, o concreto projetado

deve apresentar baixa reflexão, pega rápida, altas resistências em baixas idades, flexibilidade para as deformações e baixas permeabilidades para conter infiltrações do maciço,

As determinações das propriedades físicas e mecânicas do concreto projetado estabelecidas em projeto utilizam como base banco de dados obtidos de forma empírica, principalmente por meio de ensaios de compressão aos 28 dias. Oluokun et al. (1990), Hellmich, (1999), Morgan et al. (2002), Shütz et al. (2011) e Pillar (2014) avaliaram os parâmetros técnicos obtidos em baixas idades, permitindo estimar o comportamento da estrutura ao longo do tempo, através do desenvolvimento da resistência e da fissuração do concreto projetado. A busca de parâmetros iniciais para o concreto projetado permite que ações corretivas sejam tomadas antes que apresentem patologias. Dentre as vulnerabilidades do concreto projetado uma das principais patologias está relacionada na falha da sua composição e na sua execução, esses dois fatores podem oferecer riscos na obra, principalmente se ocorrer deslocamento do concreto projetado ao longo do avanço do túnel.

De acordo com Prudencio Jr (1990) o objetivo do monitoramento da resistência a compressão do concreto projetado após a sua aplicação, é verificar a sua homogeneidade através da compatibilidade de dosagem entre cimento, aditivo e acelerador de pega.

O controle de qualidade do concreto projetado é bem mais complexo do que para o concreto convencional, devido às condições de moldagem e do número reduzido de amostras dos ensaios, comprometendo a confiabilidade dos resultados. Normas como ACI 506R-2 (1990), ASTM C-1140 (1991) e ABNT-NBR 13070 (2012) estabelecem a moldagem de placas em concreto projetado para que amostras sejam extraídas de sua parte central, a metodologia adotada é devido à dificuldade de moldar corpos de prova, não apresentando a mesma facilidade como encontrado para ensaio padrão do tipo cilíndrico. Corpos de prova extraídos de painéis são menos propensos a sofrer vazios, porque eles são cortados ou extraídos a partir das regiões centrais dos painéis, em que o concreto projetado é mais denso e menos sujeito a porosidade (Pillar 2014). As propriedades mecânicas do concreto projetado são fortemente afetadas pelas condições laboratorial ou real da estrutura, Banthia et al. (1994) verificaram que sua resistência pode chegar a 30% a menos do que em concretos moldados em corpos cilíndricos bem compactados.

Uma das principais características da projeção está relacionada ao tipo de equipamento que será utilizado, dependendo das condições de trabalho e do tipo de homogeneização da mistura. Os dois tipos de processo de projeção são realizados através das técnicas denominadas via seca ou via úmida, que acabam interferindo na reflexão, fenômeno ao qual o concreto não fica aderido à superfície durante a projeção.

O método via seca é conhecido pelo concreto ser levado à máquina de projeção a seco, através da mistura de agregados e cimento conduzidos por ar comprimidos por meio de um mangote até o bico de projeção, onde será adicionado água, sendo uma das suas desvantagens o alto índice de reflexão. Os equipamentos de projeção para via úmida do concreto tem a função de seguir até a bomba juntamente com a água necessária e já misturada, com ajuda do ar comprimido faz de forma acelerada a projeção no bico. De acordo com Figueiredo (1997) e Garshol et al. (2005), em virtude do maior controle da composição da mistura do concreto pelo método via úmida, a projeção possui maior produtividade, menor geração de poeira e reflexão. Os aceleradores de pega são essenciais no processo via úmida, permitindo o jateamento em superfícies verticais e tetos como em túneis, reduzindo a reflexão do concreto projetado.

Na literatura científica poucos estudos avaliam o melhoramento dos parâmetros técnicos do concreto projetado através da variação das pressões de ar comprimido em diferentes idades. Com base no exposto, o objetivo do presente trabalho é avaliar através de modelos de correlações a influência da pressão do ar comprimido, nas propriedades físicas, mecânicas e elásticas, além do índice de reflexão durante aplicação de concreto projetado via úmida. Assim através dos modelos de correlação propõe-se contribuir para o monitoramento do concreto projetado via úmida durante a aplicação em estabilização de encosta e túneis do tipo NATM.

## **2 MATERIAS E MÉTODOS**

### **2.1 CARACTERÍSTICAS DO TRAÇO DE CONCRETO PROJETADO VIA ÚMIDA**

Para avaliar os parâmetros mecânicos de concreto projetado via úmida, o traço foi realizado com cimento tipo CPV-ARI-RS nas proporções (1:2,35:1,70), de cimento, areia e pedrisco, com consumo de cimento de 420 kg/m<sup>3</sup> e relação água/cimento de 0,40, dentro das especificações (ABNT-NBR 14026, 2012). A consistência dada pelo abatimento do tronco de cone (ABNT-NBR NM 67,1998) previamente de 40 ± 10 mm para *Slump* inicial (Figura 1a), e 200 ± 30 mm para o *Slump* final (Figura 1b) após a adição de aditivos. Os aditivos utilizados durante a projeção do concreto foram polifuncional (2,35 l/m<sup>3</sup>), superplastificante (0,96 L/m<sup>3</sup>) e acelerador de pega (22 l/m<sup>3</sup>).

Figura 1. (a) *Slump* inicial sem adição de aditivos, (b) *Slump final* após adição de aditivos.



(a)

(b)

Fonte: Autores (2020).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO PROJETADO VIA ÚMIDA

Durante a aplicação do concreto projetado via úmida, após o avanço das escavações do túnel tipo NATM, através de placas metálicas (Figura 2 a) foram projetadas 4 placas (Figura 2 b) de acordo com a metodologia proposta pela norma ABNT-NBR 13070 (2012), para as seguintes pressões de ar ( $5,0 \text{ kg/cm}^2$ ;  $7,5 \text{ kg/cm}^2$ ;  $10 \text{ kg/cm}^2$  e  $12,5 \text{ Kg/cm}^2$ ) totalizando 16 placas. Para manter a eficiência da pressao de ar comprimido, a projeção das placas de concreto foi realizada a uma distância de 20 m, com bico de projeção tipo afunilado, através de uma bomba de rotor modelo Aliva (Figura 2c).

Após a moldagem as placas foram submetidas à extração de 8 amostras (Figura 2 d) com dimensões 100 x 200 mm conforme a ABNT-NBR 7680 (2015), submetidos à resistência a compressão (ABNT-NBR 5739, 2018) e módulo de elasticidade (ABNT-NBR 8522, 2017), avaliadas nos períodos 1°, 3°, 7° e 28° dia, totalizando 32 amostras, para cada pressão de ar. Através de 3 amostras extraídas de cada placa nos seguintes períodos 1°, 3°, 7° e 28° dia, foi determinada a absorção de água, segundo a metodologia proposta pela norma ABNT-NBR 9778 (2009), em seguida secas em estufa para serem utilizadas nos ensaios a compressão.

Durante a projeção das placas foi colocada uma lona plástica, sob o local de aplicação, para realização dos ensaios de reflexão seguindo a norma (ABNT-NBR 13317, 1995), obtendo assim uma representação da porcentagem de reflexão através do índice de reflexão com base na quantidade projetada. O controle da reflexão é de grande importância durante a aplicação de concreto projetado, possibilitando identificar a não conformidade com o especificado durante o processo de dosagem dos aditivos e verificação de perda de material.



Figura 2. (a) Placa metálica para ensaio do concreto projetado dimensões conforme ABNT-NBR 13070 (2012), (b) Projeção das placas conforme ABNT-NBR 13070 (2012), (c) bomba de rotor modelo Aliva, (d) extração de amostras de concreto conforme ABNT-NBR 7680 (2007).



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Autores (2020).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados médios de resistência a compressão ( $f_c$ ), módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), índice de reflexão (IR) e absorção ( $Ab$ ), obtidos através da extração dos testemunhos das placas, são apresentados na tabela (1).

Tabela 1. Resultados médios de resistência a compressão ( $f_c$ ), módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), absorção por imersão (Ab) e índice de reflexão (IR), para amostras de concreto para diferentes pressões de ar comprimido e idades.

Pressão de ar comprimido kg/cm <sup>2</sup>	Dia	$f_c$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	Índice de reflexão (%)	Absorção (%)
5	1°	7,20 (4,30)	13,09 (6,90)	11,3	15,3
	3°	11,29 (4,13)	15,70 (3,96)		12,7
	7°	17,4 (3,15)	18,12 (6,31)		10,8
	28°	22,70 (2,20)	25,50 (5,37)		8,9
7,5	1°	8,08 (6,70)	13,29 (4,15)	12,5	14,6
	3°	14,46 (6,13)	16,50 (3,32)		11,3
	7°	19,20 (4,32)	20,28 (5,10)		9,6
	28°	26,40 (4,60)	29,70 (3,80)		8,10
10	1°	9,40 (5,20)	14,09 (6,80)	15,2	13,05
	3°	16,04 (5,2)	18,95 (11,26)		10,11
	7°	23,70 (1,9)	24,21 (6,38)		8,4
	28°	33,20 (1,5)	35,90 (5,12)		7,2
12,5	1°	11,90 (2,90)	15,10 (4,5)	18,7	12,9
	3°	19,08 (6,3)	24,20 (6,32)		9,1
	7°	26,30 (5,39)	27,78 (4,22)		7,9
	28°	35,64	38,20		6,3



		(3,99)	(2,22)		
--	--	--------	--------	--	--

Onde: Valores em parênteses representam o coeficiente de variação das amostras.

Fonte: Autores (2020).

Antes da realização das correlações entre os parâmetros obtidos no ensaio de compressão (resistência e módulo de elasticidade), ensaios físicos (absorção e índice de reflexão) com pressão de ar comprimido foi realizada uma análise de distribuição de frequência, para verificar se a normalidade poderia ser aceita para esses parâmetros, validando as correlações estatísticas para os diferentes períodos. A normalidade foi avaliada pelos limites de assimetria e de curtose, entre -2 e + 2, valores estatísticos fora deste intervalo indicam desvios significativos da normalidade, invalidando os procedimentos estatísticos aplicados a verificação dos dados. A tabela (2) demonstra os intervalos de assimetria e curtose para os parâmetros mecânicos e físicos das amostras de concreto projetado via úmida avaliada nos seguintes períodos (1°, 3°, 7° e 28° dia), para os diferentes tipos de pressão de ar. Os valores do índice de reflexão são os mesmos para todos os períodos, por ser um parâmetro obtido durante a moldagem das placas.

Tabela 2. Resultados obtidos de assimetria e curtose para amostras de concreto, moldadas em diferentes idades e pressão de ar comprimido.

Dia	Parametros	Assimetria	Curtose
1°	$f_c$	0,53	-0,58
	$E_{ci}$	0,73	-0,29
	Absorção	0,23	-1,73
	Índice de reflexão	0,62	-0,3
3°	$f_c$	-0,04	0,15
	$E_{ci}$	1,06	0,50
	Absorção	0,24	-0,43
	Índice de reflexão	0,62	-0,30
7°	$f_c$	0,40	-0,84
	$E_{ci}$	-0,01	-1,25
	Absorção	0,62	-0,30
	Índice de reflexão	0,62	-0,30
28°	$f_c$	-0,25	-1,20
	$E_{ci}$	-0,14	-1,42
	Absorção	-0,08	-0,56
	Índice de reflexão	0,62	-0,30

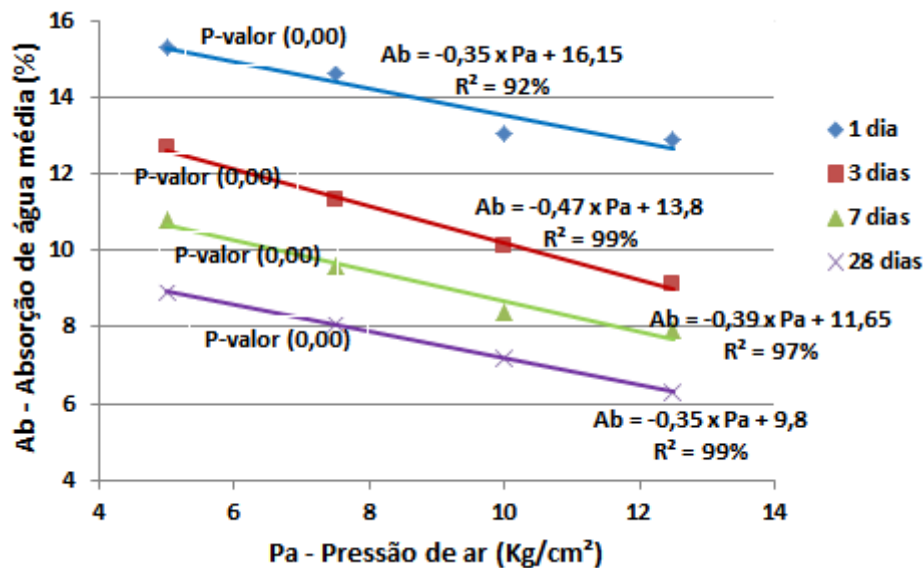
Fonte: Autores (2020).

Os valores estatísticos estão dentro do intervalo de -2 a +2, nesse caso, o valor de assimetria e curtose padronizado está dentro do intervalo esperado para dados de uma distribuição normal. Assim os parâmetros obtidos pelo concreto projetado via úmida, estão dentro da faixa esperada para dados de uma distribuição normal, podendo ser utilizado como variável dependente na realização de correlações com a pressão de ar comprimido como variável independente.

### 3.1 CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA COM PRESSÃO DE AR

Segundo Couto et al. (2003) o tipo de cura pode cura empregada pode influenciar na absorção de água do concreto, assim para manter as mesmas condições de ensaios todas as amostras foram submetidas em cura ao ar livre, protegidos contra ações climáticas. A figura (3) demonstra uma correlação linear com  $R^2$  acima de 92%, demonstrando que através do aumento da pressão de ar comprimido, houve uma redução significativa da absorção nas amostras de concreto durante o aumento das idades, apresentando modelos com nível de significância de 95% e valores de P-valor  $< 0,05$ .

Figura 3. Correlação entre absorção de água e pressão de ar comprimido.

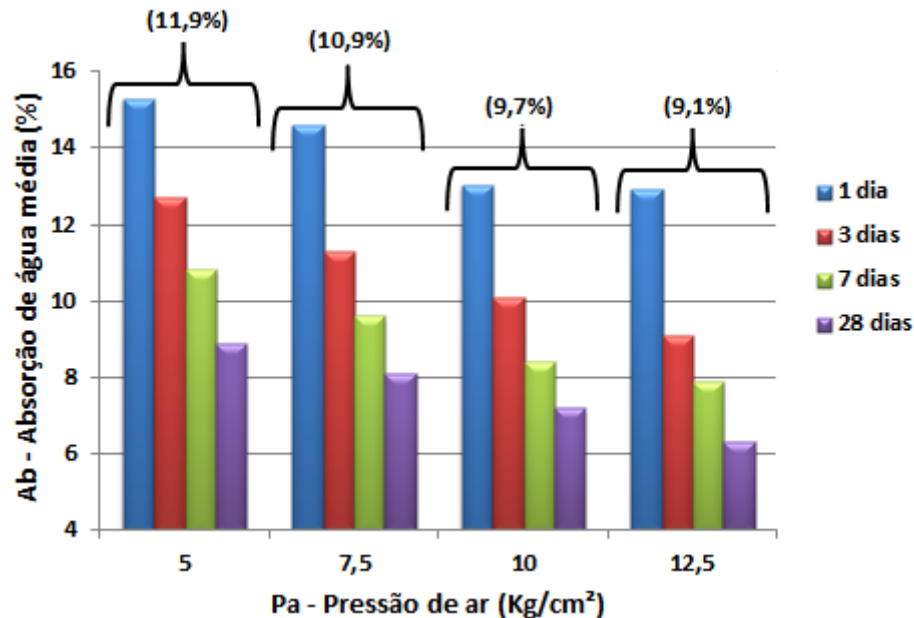


Fonte: Autores (2020).

De acordo com a figura (4) ao qual apresenta a média dos valores de todas as idades, para os diferentes tipos de pressão, considerando a pressão máxima de 12 kg/cm<sup>2</sup>, ao qual obteve menor absorção por imersão, a disparidade dos resultados é de 23,5%, 16,5 e apenas 7%, para as pressões de 5, 7,5 e 10 Kg/cm<sup>2</sup>. De acordo com Ginouse et al. (2014) e Feys et al. (2016)

o processo de bombeamento provoca uma alteração nos vazios de ar do concreto fresco, sendo que o aumento do teor de ar altera a reologia do concreto fresco.

Figura 4. Comparação entre absorção por imersão (Ab) para diferentes idades e pressão de ar comprimido. (Valores em parentêses indicam a média dos valores nas difentes idades).



Fonte: Autores (2020).

Todas as amostras foram projetadas com mesma relação a/c, pois estudos realizados por Zhang e Zong (2014), o grau de absorção de água afetam a estrutura de poros da pasta de cimento. A hidratação do cimento Portland possui aos 28 dias de cura cerca de 70-80% de grau de hidratação (TAYLOR, 1997). Considerando os valores da absorção do concreto, encontrados ao 28º dia, todos estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura (Meneses, 2010 e Figueiredo, 2011) para concreto projetado via úmida. Gasparim (2007) e Meneses (2010) classificam a qualidade do concreto após a absorção como excelente inferior a 6%, boa entre 6% e 8%, razoável entre 8% e 9% e ruim acima de 9%. Considerando os valores de absorção ao 28º dia, as amostras para as pressões de ar comprimido (5 e 7,5 Kg/cm²) estão associadas a um concreto razoável, já as amostras moldadas para as pressões (10 e 12,5 kg/cm²) permitiram classificar o concreto com uma boa qualidade.

### 3.2 CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ COM PRESSÃO DE AR

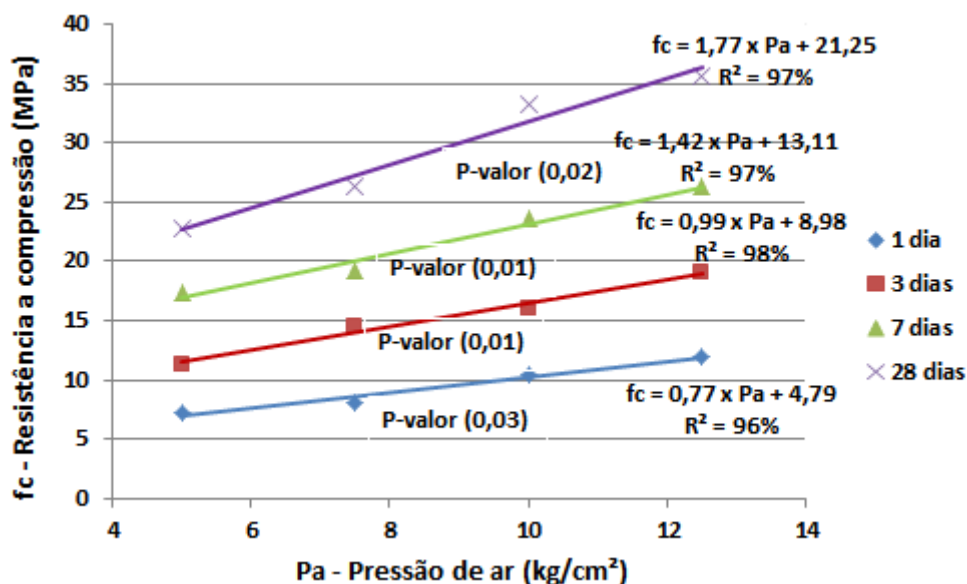
Com intuito de melhorar a trabalhabilidade e homogeneização do concreto foram utilizados aditivos para que não haja uma perda significativa de água, e proporcione acelerar o tempo de pega e impedir a movimentação do maciço de solo. Segundo Melbey (1996) o uso de aditivos contribui para controlar temperaturas elevadas e alto teor de umidade dentro dos

túneis, ao qual interferem na perda de água, acarretando na retração e fissuras no decorrer da obra, seja na idade inicial ou final.

Os modelos de correlação obtidos entre resistência a compressão e pressão de ar comprimido, foram estatisticamente significativos, com  $R^2$  acima de 96%, demonstrando que o aumento da pressão de ar comprimido interfere nas propriedades mecânicas do concreto projetado conforme figura (5). Todos os modelos de regressão, associando os ensaios de compressão com pressão de ar comprimido, foram estatisticamente significativos no nível de significância de 95% ( $P$ -valor  $< 0,05$ ).

De acordo com Corrêa et al. (2020) a partir da análise de variância da resistência à compressão do concreto é possível verificar se existem diferenças significativas entre os tratamentos, a análise de variância é utilizada para analisar a variabilidade nas médias.

Figura 5. Correlação entre resistência a compressão e pressão de ar comprimido.



Fonte: Autores (2020).

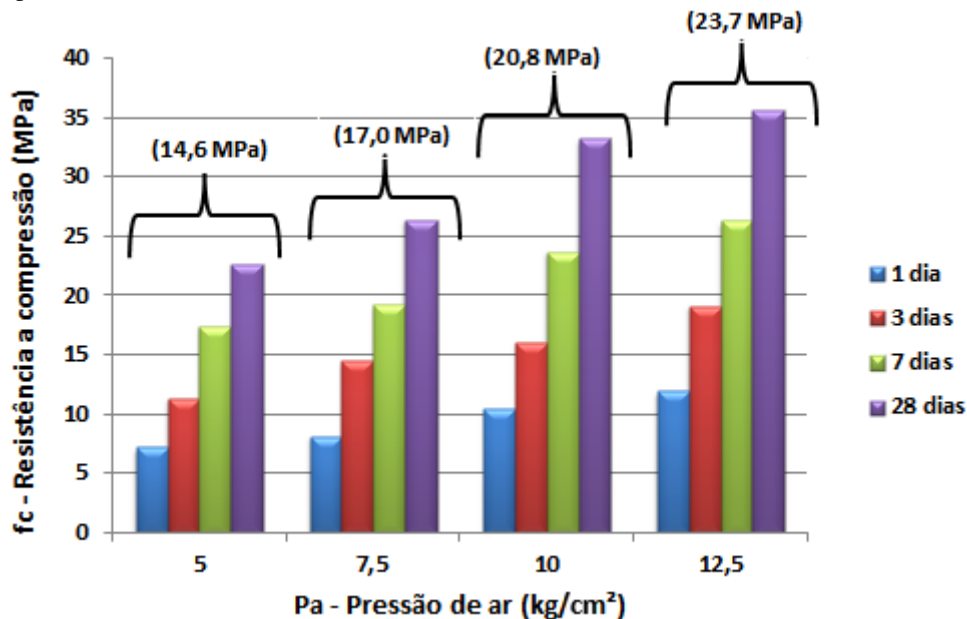
Independente do período dos ensaios das amostras, os maiores valores de resistência a compressão e menores índices de absorção foram expressos para a pressão de 12,5 kg/cm<sup>2</sup>. Segundo Figueiredo (2011) quanto maior a pressão de ar, maior a velocidade do jato de concreto e, portanto, maior será o nível de compactação do material, proporcionando assim uma maior resistência à compressão.

A influência do acelerador de pega e pressão de ar comprimido contribuiu para maiores ganhos de resistência inicial, mas ao longo do tempo à medida que o aditivo perde seu efeito a hidratação diminuiu estabilizando a resistência, porém ao final do período de 28 dias a pressão

de ar comprimido é responsável pelo aumento da resistência devido a compactação do concreto.

De acordo com a figura (6) os melhores resultados encontra-se para a pressão de 12 kg/cm<sup>2</sup> de pressão de ar comprimido, com uma dispersão variando em 38,4%, 28,3% e 12,3%, para as respectivas pressões de 5,7 e 10 kg/cm<sup>2</sup>.

Figura 6. Comparação entre resistência a compressão ( $f_c$ ) para diferentes idades e pressão de ar comprimido. (Valores em parênteses indicam a média dos valores nas diferentes idades).



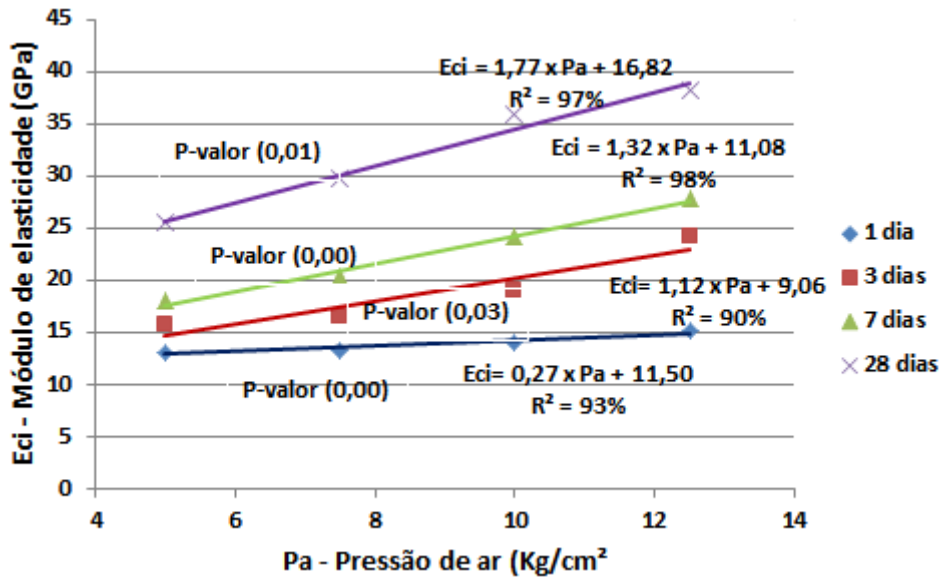
Fonte: Autores (2020).

Na maioria dos estudos de concreto projetado o módulo de elasticidade não é determinado em diferentes idades, adotando-se o módulo de elasticidade aos 28 dias, no entanto, para o presente trabalho, o módulo de elasticidade foi obtido em idades iniciais de hidratação, a fim de estimar o comportamento do concreto projetado via úmida ao longo do tempo.

O aumento da pressão de ar comprimido também contribui com o parâmetro elástico das mostras de concreto projetado, representada pelo módulo de elasticidade. Um dos fatores que influenciam os valores de  $E_{ci}$ , está relacionado as características da matriz da pasta de cimento e da zona de transição. Segundo Melo Neto e Helene (2002) a porosidade da matriz afeta a resistência individual da pasta de cimento causando variações no módulo de elasticidade. A influência do aumento dos valores de  $E_{ci}$ , através da pressão de ar comprimido, é melhor explicada através de modelos com valores de  $R^2$  acima de 90% e P-valor < 0,05.



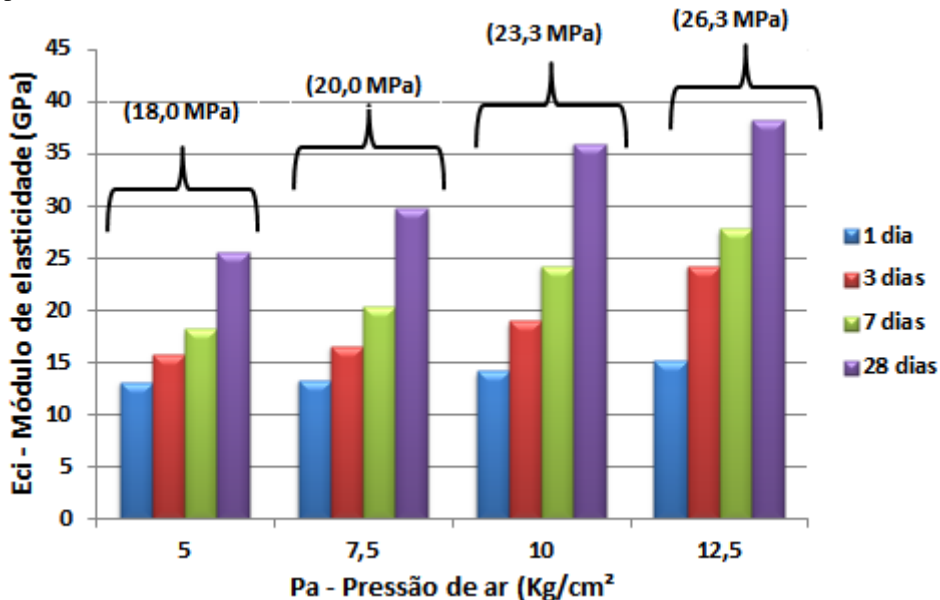
Figura 7. Correlação entre módulo de elasticidade e pressão de ar comprimido.



Fonte: Autores (2020).

Para as amostras ensaiadas ao 28º dia, ao qual atingem maior hidratação do cimento, considerando a pressão máxima de projeção (12,5 kg/cm²), os valores de  $E_{ci}$  apresentam uma disparidade de valores de 36,4% para a pressão de 5 kg/cm², 26% para a pressão de 7,5 kg/cm² e de apenas 3% para a pressão de 10 kg/cm² conforme figura (8).

Figura 8. Comparação entre módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) para diferentes idades e pressão de ar comprimido. (Valores em parentêses idicam a média dos valores nas difentes idades).



Fonte: Autores (2020).

Os valores encontrados do módulo de elasticidade corroboram com os estudos realizados por Metha e Monteiro (2014), que citam que em idades mais avançadas o

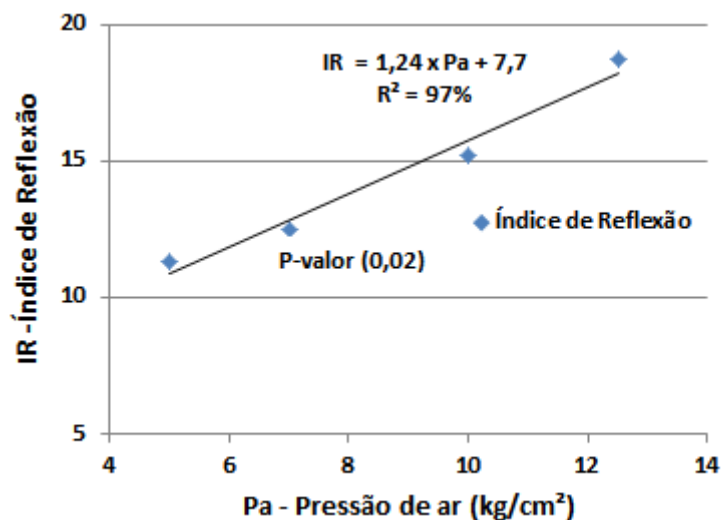
$E_{ci}$  aumenta a uma taxa mais alta do que a resistência à compressão ( $f_c$ ) em virtude da melhora da densidade na interface da zona de transição. Os valores encontrados na tabela (1) demonstram que estes os valores de  $E_{ci}$  podem chegar a maiores valores do que  $f_c$  em virtude da utilização de aditivos associados ao aumento da pressão de ar comprimido.

A pressão de ar comprimido associada absorção de água tem grande influência nas propriedades mecânicas e elásticas, pois à medida que a absorção de água diminui a resistência à compressão e módulo de elasticidade, aumentam significativamente, sendo diretamente proporcionais ao aumento da pressão de ar comprimido e diminuição dos poros da matriz cimentícia.

### 3.3 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE REFLEXÃO E PRESSÃO DE AR

A correlação obtida na figura (9) retrata o comportamento inverso na contribuição nos melhoramentos parâmetros mecânicos, elásticos e físicos com o aumento da pressão de ar comprimido, devido o aumento índice de reflexão acarretar maior desperdício e volume de concreto para avanço de escavações. A figura (9) demonstra uma relação estatisticamente significativa entre pressão de ar e reflexão, com  $R^2$  de 97%, através do teste ANOVA, que indicou P-valor  $< 0,05$ , ao nível de confiança de 95,0%.

Figura 9. Correlação entre índice de reflexão e pressão de ar comprimido

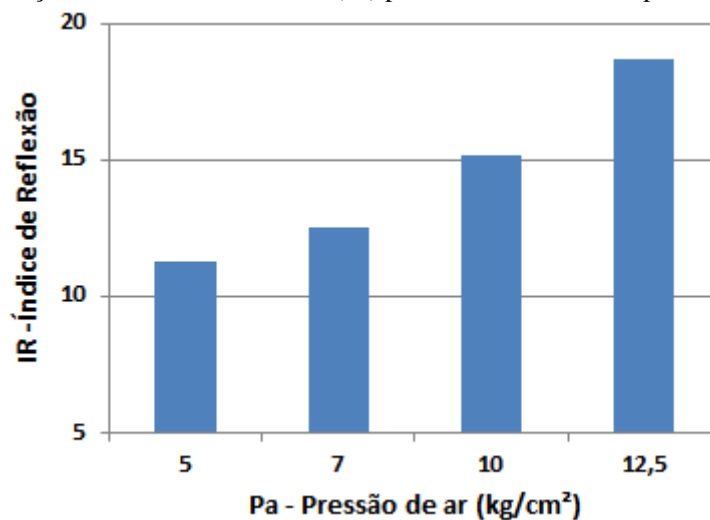


Fonte: Autores (2020).

Segundo Girmscheid e Moser (2001) a reflexão do concreto projetado depende do controle da pressão de ar comprimido, velocidade de projeção de um determinado equipamento de projeção de concreto, quantidade da adição de aditivo acelerador de pega, ao qual acarreta uma alteração no nível de reflexão.

Para Armelino (1997) e Figueiredo (2011), não existe uma relação direta entre o nível de reflexão e a vazão de ar, porém deve-se procurar uma vazão ótima de ar de modo a minimizar a reflexão para um dado diâmetro de mangote, em contrapartida fica evidenciado através da figura (10), que as variações nas pressões de ar comprimido, contribuem para aumentam o índice de reflexão, principalmente para as pressões de 10 e 12 kg/cm<sup>2</sup>, podendo ser controlado através de aditivos do tipo acelerador de pega e plastificante.

Figura 10. Comparação entre índice de reflexão (IR) para diferentes idades e pressão de ar comprimido.



Fonte: Autores (2020).

## 4 CONCLUSÃO

- Através dos ensaios realizados para avaliar interferência da pressão de ar comprimido, nas propriedades mecânicas entre diferentes idades de amostras de concreto foi possível obter modelos de correlação, estatisticamente no nível de significância de 95% (P-valor < 0,05).

- Ao adicionar maior quantidade de aditivo acelerador de pega para um endurecimento mais rápido do concreto projetado é possível diminuir a reflexão, entretanto deve-se ressaltar a importância do controle da pressão e adição de plastificante.

- Existe uma relação direta entre o nível de reflexão e a vazão de ar, porém deve-se procurar uma vazão ótima de ar para garantir a compactação, resistência mecânica, com menores índices de reflexão. Valores de pressão de ar acima 10 kg/cm<sup>2</sup>, contribui para melhor compactação do concreto diminuindo seus vazios, contribuindo nas propriedades de resistência ( $f_c$ ) e rigidez ( $E_{ci}$ ), porém aumentando o índice de reflexão.

- O direcionamento do jato de concreto, a distância e a pressão de ar comprimido, analisadas na presente pesquisa, possuem influência tanto no controle do índice de reflexão como também nas propriedades do concreto projetado.

- Assim a presente pesquisa demonstra a importância de avaliar o controle da pressão de ar comprimido, durante a projeção de concreto via úmida, permitindo avaliar o comportamento dos parâmetros mecânicos e físicos a partir de baixas idades, permitindo que ações corretivas sejam tomadas durante a projeção.

### REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13317. Concreto projetado – Determinação do índice de reflexão por medição direta. Rio de Janeiro, RJ, 1995.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7680. Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13070: Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concretos projetados. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14026. Concreto Projetado- especificação. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738. Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2018.

ACI 506R – (1990), Guide for Shotcrete, ACI Manual of Concrete Practice, ACI, Detroit, Michigan, 1990.

ANSELL, A. In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 19, n. 6, p. 587-596, 2004.

ARMELIN, H. S. Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete. Vancouver, Canada, 1997. 262p. Thesis (Doctor of Philosophy). Department of Civil Engineering. University of British Columbia.

ARMELIN, Hugo S.; BANTHIA, Nemkumar. Development of a general model of aggregate rebound for dry-mix shotcrete—(Part II). *Materials and Structures*, v. 31, n. 3, p. 195-202, 1998.

ASTM C 1140-91, “Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels”, American Society of Testing Materials, Philadelphia, 1991.

BANTHIA, N., TROTTIER, J.F., Beaupre, D. “Steel-fiber-reinforced wet-mix shotcrete: comparisons with cast concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 6, No. 3, pp. 430-437. 1994.

CORRÊA, M. S.; BRITO, P. G. M.; DA CUNHA, R. R.; NETTO, A. D. R.; DE ALENCAR, A. F. R.; JUNIOR, F. G. Q. Estudo comparativo de desempenho mecânico e operacional entre aditivos redutores de água. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 61695-61708, 2020.

COUTO, P.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; LOPES, A. N. M. Influência das condições de cura na absorção e permeabilidade de diferentes concretos. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. Anais. São Paulo, Brasil, 2003.

FEYS, D., De SCHUTTER, G.; KHAYAT, K. H.; VERHOEVEN, R.. Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping. *Materials and Structures*, v. 49, n. 11, p. 4657-4677, 2016.

FIGUEIREDO, A. D. Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, p.342, 1997.

FIGUEIREDO, A. D. O controle indireto da energia de compactação do concreto projetado. 53º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Florianópolis-SC. 2011.

GASPARIM, J. C. Concreto projetado elaborado com cimentos especiais: análise segundo parâmetros de durabilidade. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007.

GARSHOL, K.F. Sprayed Membranes. Simpósio Internacional de Impermeabilização de Estruturas Subterrâneas. SIIES, São Paulo, Brasil. V. 1, 2005.



GINOUSE, N.; JOLIN, M.; BISSONNETTE, B. Effect of equipment on spray velocity distribution in shotcrete applications. *Construction and Building Materials*, v. 70, p. 362-369, 2014.

GIRMSCHIED, Gerhard; MOSER, S. Fully automated shotcrete robot for rock support. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 16, n. 3, p. 200-215, 2001.

GOEL, R. K. Experiences with shotcrete support in underground openings in Índia. *Shotcrete for Underground Support IX*, 2002.

HELLMICH, C. "Shotcrete as part of the New Austrian Tunneling Method: From thermochemomechanical material modeling to structural analysis and safety assessment of tunnels", PhD Thesis, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 169 p. 1999.

MARTINS, P.A. Análise Numérica de Escavações Subterrâneas com Ênfase na Interação entre o Maciço e o Suporte em Concreto Projetado a Baixas Idades. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.194, 2008.

MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R. L. **Módulo de Elasticidade**: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 44, Belo Horizonte, 2002. **Anais...** Belo Horizonte, 2002.

MENESES, A. D. B. Concreto projetado como revestimento de túneis na Ferrovia Norte-Sul: análise segundo parâmetros de durabilidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiás, p.166, 2010.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORGAN, D.R., Mcaskill, N.; Heere, R. "Proposed method for determination of early age compressive strength of shotcrete", *Shotcrete Magazine*, v. 4, n. 2, p. 28-31, 2002.

ORESTE, P. P. A procedure for determining the reaction curve of shotcrete lining considering transient conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 36, n. 3, p. 209-236, 2003.

OLUOKUN, F., BURDETTE, E.G., DEATHERAGE, J.H. "Rates of development of physical properties of concrete at early ages". *Transport Research Record No. 1284, Materials and Construction*, National Research Council, Washington, D.C., N. 1284, p. 16-22. 1990.

PANET, M.; GUENOT, A. Analysis of convergence behind the face of a tunnel: Tunnelling 82, proceedings of the 3rd international symposium, Brighton, 7–11 June 1982, P197–204. Publ London: IMM, 1983. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, p. A16, 1983.

PANET, M., GIVET, P. D. C. O., GUILLOUX, A., DUC, J. L. D., PIRAUD, J., Wong, H. T. S. D. H. The convergence–confinement method. Press ENPC. 2001.

PILLAR, N. M. D. P. Propriedades mecânicas nas primeiras idades como preditoras das tensões induzidas e fissuração de concreto projetado reforçado com fibras. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina. p.224. 2014.

PRUDÊNCIO, JR. Dosagem e métodos para controle de concreto projetado. Tese. Universidade de São Paulo, 1990.

SILVA, P. F. A. Concreto projetado para túneis. Pini, São Paulo, p.92, 1997.

SCHUTZ, R.; POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L. Advanced constitutive modelling of shotcrete: Model formulation and calibration. Computers and Geotechnics, v. 38, n. 6, p. 834-845, 2011.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

YUN, K. K; CHOI, P., YEON, J. H. Microscopic investigations on the air-void characteristics of wet-mix shotcrete. Journal of Materials Research and Technology, v. 8, n. 2, p. 1674-1683, 2019.

ZHANG, S. P.; ZONG, L. Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials. Advances in Materials Science and Engineering, 2014.