



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Avaliação da estrutura interna e da resistência à compressão do concreto com base nos modelos de Powers e Powers-Brownyard adaptado

Assessment of internal structure of concrete and its compressive strength according the Powers and adapted Powers-Brownyard models

Victor Estolano (1); Nilvan Teixeira (2); Sara Martins (2); Paulo de Araújo Régis (3); Antônio Acacio de Melo Neto (3)

(1) *Doutorando(a) em Engenharia Civil, LabTag - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE*

(2) *Mestrando(a) em Engenharia Civil, LabTag - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE*

(3) *Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado, LabTag - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE*

Av. da Arquitetura s/n - Cidade Universitária, Recife – PE, CEP 50740-550

Resumo

Este artigo tem o objetivo de avaliar diferentes misturas de concreto a partir do modelo de Powers-Brownyard adaptado para analisar a estrutura interna. Além disso, utilizou-se o modelo de Powers para previsão da resistência à compressão, comparando os valores obtidos experimentalmente com os valores estimados. Foi realizada a dosagem dos concretos pelo método IPT/USP, onde foi encontrado o teor de argamassa ideal de 47%. A partir dele, foram dosados cinco traços, onde os três primeiros tiveram a trabalhabilidade fixada de acordo com a classe de consistência S50, com uma proporção cimento/agregado de 1:3, 1:4 e 1:5. Nos demais traços, com proporções cimento/agregado de 1:3 e 1:5, a relação a/c foi mantida constante e igual à do traço 1:4. A estrutura interna dos concretos foi analisada e verificou-se que houve uma boa relação linear entre os compostos resistentes e a resistência à compressão medida aos 28 dias. Em vista disso, constatou-se que quanto maior a relação a/c menor é a resistência à compressão e a quantidade de compostos resistentes. O modelo de Powers mostrou-se satisfatório quando se pretende comparar traços com diferentes relações água/cimento e mantendo-se constante a relação água/materiais secos.

Palavras-Chave: Modelo de Powers-Brownyard, Modelo de Powers, Resistência à Compressão.

Abstract

This paper aims to evaluate different concrete mixtures from Powers-Brownyard's adapted model to analyze the internal structure. In addition, Powers' model was used to predict the compressive strength, comparing values obtained experimentally with estimated values. The mixtures design were made by IPT/USP's method, where was found the ideal mortar content of 47%. From this, five proportions were made, where the first three had the workability according the S50 consistency class with 1:3, 1:4 and 1:5 cement/aggregate ratio. In the other proportions, with 1:3 and 1:5 cement/aggregate ratios, the a/c ratio was fixed and equal to the 1:4 mixture. The concrete internal structure was analyzed and was found that there was a good linear relationship between the resistant compounds and the compressive strength at 28 days. Thereby, it has been found that as the higher a/c ratio increases, the compressive strength and the amount of resistant compounds decreases. The Powers' model was satisfactory when comparing concrete mixtures with different water/cement ratios and keeping water/dry materials ratio constant.

Keywords: Powers-Brownyard's Model, Powers' Model, Compressive Strength

1 Introdução

Modelos para prever o comportamento do concreto são uma ferramenta importante para a obtenção de estimativa de alguns dados e auxiliam na escolha do traço desejado, sem a necessidade de realizar um extenso programa experimental.

Em pastas de cimento, o modelo mais conhecido é o de Powers-Brownyard (1948), no qual os autores dividem os componentes da pasta em: pasta hidratada, cimento anidro e poros capilares. Este modelo foi posteriormente adaptado para representação da estrutura interna do concreto (HELENE, 1992) e sua aplicabilidade no concreto tornou-se viável uma vez que os compostos não presentes no modelo original da pasta são os agregados, que são quimicamente inertes. Segundo Helene (1992), o caráter inerte atribuído na maioria das vezes aos agregados permite avaliar o comportamento do concreto pelas propriedades inerentes à pasta.

Uma das propriedades mais importante do concreto é a resistência à compressão. Abrams (1918) concluiu por meio de um extenso programa experimental que a resistência à compressão é função somente da relação água/cimento da mistura. Em 1958, Powers inferiu que a resistência à compressão era função somente da relação gel/espaco da pasta, onde o gel corresponde a uma camada composta por todos os hidratos formados na reação de hidratação do cimento, que se forma inicialmente na superfície dos grãos do cimento anidro. Nota-se que a teoria de Powers (1958) corrobora com a de Abrams, uma vez que a quanto maior a relação a/c menor é a resistência à compressão. Desta forma, pode-se afirmar que quanto maior a relação a/c, menor será a relação gel/espaco, e consequentemente, menor será a resistência à compressão do concreto.

O objetivo do trabalho é avaliar a estrutura interna de diferentes traços de concreto a partir do modelo de Powers-Brownyard adaptado, conforme exposto em Helene (1992), estabelecendo uma correlação entre o percentual de compostos resistentes e a resistência à compressão. Executou-se também uma comparação entre a resistência à compressão estimada pelo modelo de Powers (1958) e a obtida experimentalmente.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o Cimento Portland composto com fíler, CP II-F 40, com características físicas e mecânicas de acordo com a ABNT NBR 11578:1991 apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Composição química do cimento CP II-F 40 (%)

	PF	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Eq. Alc.	RI
Limites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	≤ 2,5
Média	3,84	2,77	2,92	3,37	4,30	62,09	19,37	0,77	0,12	0,63	1,63

Tabela 2 - Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F 40.

Ensaio		Resultados	Limites NBR
Finura	Resíduo na peneira 75 µm (%)	0,2	≤ 10,0
	Blaine (m ² /Kg)	461,3	≥ 280
Massa específica (g/cm ³)		3,11	-
Início de Pega (min)		156	≥ 60
Fim de Pega (min)		207	≤ 600
Água de Consistência Normal (%)		29,2	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	35,4	≥ 15
	7 dias	42,0	≥ 25
	28 dias	49,2	≥ 40

O agregado miúdo e o agregado graúdo utilizados neste estudo procedem de Sirinhaém - PE, os quais são ensacados e distribuídos pela empresa AREIASIL. A Tabelas 3 apresentam as características dos mesmos e a Figura 1 exibe a curva de distribuição granulométrica dos agregados. Foi utilizada água potável do abastecimento público da região metropolitana do Recife distribuído pela Compesa.

Tabela 3 - Características do agregado graúdo e miúdo

	Areia	Brita
Massa específica (kg/dm ³)	2,63	2,75
Massa unitária compactada (kg/dm ³)	1,573	1,575
Módulo de finura	1,11	7,03

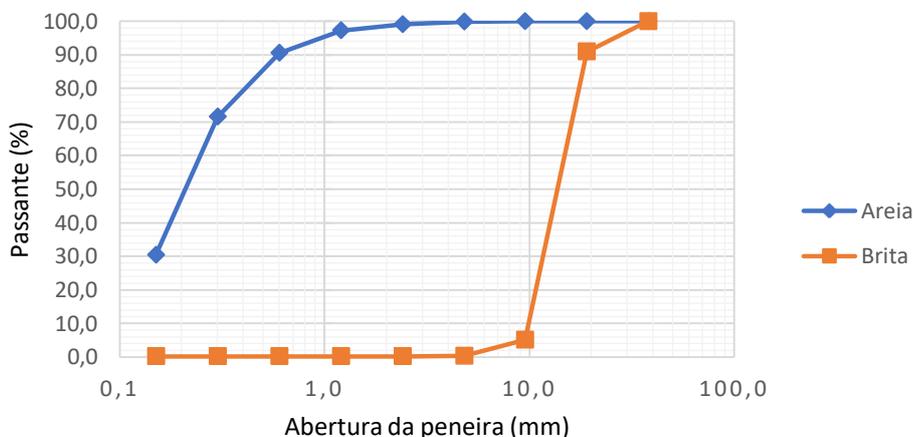


Figura 1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo e miúdo.

2.2. Métodos

2.2.1 Dosagem experimental

Nesta pesquisa a dosagem dos concretos foi realizada pelo método IPT/USP, onde encontrou-se o teor de argamassa ideal de 47% para o traço intermediário (1:4). A partir dele, foram feitas as demais misturas (1:3 e 1:5), e visando um maior controle da consistência para a dosagem pelo método do IPT/USP, nessas misturas o abatimento fixado foi o de 80 ± 10 mm, estando na classe de consistência S50 conforme a NBR 8953: 2015. Além dos traços citados, foram confeccionadas duas misturas adicionais, com as proporções 1:3 e 1:5, onde foi fixada a relação a/c encontrada no traço 1:4 (0,51), como pode ser visto na Tabela 4. O objetivo da confecção destes dois últimos traços foi verificar a influência da variação da proporção de agregado na resistência à compressão e no abatimento, mantendo-se constante a relação a/c.

Tabela 4 - Misturas utilizadas no programa experimental.

Identificação	Proporções (1:m)	Traço unitário	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Relação a/c	Teor de ar aprisionado (%)
Traço I	1:4	1:1,35:2,65	418,29	561,94	1109,24	0,51	3,33
Traço II	1:3	1:0,88:2,12	526,77	461,04	1116,62	0,43	2,15
Traço III	1:5	1:1,82:3,18	348,47	630,01	1108,01	0,62	2,89
Traço IV	1:3	1:0,88:2,12	506,20	443,03	1073,00	0,51	1,71
Traço V	1:5	1:1,82:3,18	356,79	645,05	1134,46	0,51	4,38

Para o ensaio de resistência à compressão (NBR 5739: 2018), foram moldados 3 corpos de prova para duas idades de cura: 7 e 28 dias, para cada traço. Os resultados deste ensaio foram comparados com as resistências estimadas a partir do modelo de Powers.

2.2.2 Modelo de Powers-Brownyard adaptado

Para a realização deste trabalho foram adotados alguns valores referentes as reações de hidratação do cimento, conforme será detalhado a seguir:

- A água requerida para as reações de hidratação foi considerada igual a 22% da água de amassamento;
- A porosidade do gel C-S-H foi considerada igual a 28%;
- A reação química entre o cimento e a água se dá com redução de volume, devido às grandes forças interiores de coesão, de tal forma que a água não evaporável, ou seja, aquela quimicamente combinada, sofre uma contração de cerca de 25,4% de seu volume original;

Além desses valores, Helene (1992) sugere um modelo para representar a composição física do concreto fresco e endurecido. Neste modelo admite-se as seguintes hipóteses:

- A mudança do volume do corpo de prova é desprezível;
- A quantidade de água adsorvida aos agregados é passível de evaporar-se junto à água livre ou capilar.

- No cálculo do volume de agregados, admite-se como estando completamente secos e que não absorvam água.

Para o cálculo dos volumes dos constituintes do concreto, foram adotadas as seguintes formulações:

- a) Volume total do concreto para o traço unitário (V_t)

$$V_t = V_c + V_a + V_b + V_h + V_{ar} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

V_c : Volume de cimento

V_a : Volume de areia

V_b : Volume de brita

V_h : Volume de água

V_{ar} : Volume de ar aprisionado

- b) Volume de produtos sólidos da pasta hidratada (V_{pt})

$$V_{pt} = V_c + P_{hrq} \times (1,0 - C_{hqc}) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

P_{hrq} : Percentual da água de amassamento requerida para as reações químicas (neste trabalho considerou-se 22%)

C_{hqc} : Contração do volume da água quimicamente combinada (foi considerada igual a 25,4%).

- c) Volume de água adsorvida ao gel C-S-H

$$V_{\text{água gel}} = (Por_{C-S-H} \times V_{pt}) / (1 - Por_{C-S-H}) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$V_{\text{água gel}}$: Volume de água adsorvida ao gel C-S-H

Por_{C-S-H} : Porosidade do gel C-S-H, em porcentagem, fixada em 28%.

- d) Volume de ar absorvido

$$V_{ar\ ab} = P_{hrq} \times C_{hqc} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$V_{ar\ ab}$: Volume de ar absorvido para compensar a retração causada pelas reações químicas de hidratação da pasta.

2.2.3 O modelo de Powers para previsão da resistência à compressão

Powers (1958) estabeleceu um modelo de previsão da resistência à compressão em função do grau de hidratação e da relação a/c do concreto, que é representado pela Equação V:

$$f_c = k_1 \left[\frac{0,68 \times a}{0,32 \times a + a/c} \right]^{k_2} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

f_c : resistência à compressão axial, em MPa.

k_1 e k_2 : constantes que dependem dos materiais utilizados. Os valores adotados foram $k_1 = 120$ e $k_2 = 3$ (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

a : grau de hidratação da pasta. Aos 28 dias em cura úmida, foi considerado um grau de hidratação de 67% (TAYLOR, 1997).

É importante salientar que, como mostra a Equação V, no modelo de Powers, a resistência à compressão varia em função da relação água/cimento e do grau de hidratação, sendo então a comparação entre diferentes traços de concreto aplicável apenas para concretos com diferentes relações água/cimento.

3 Resultados

O diagrama de dosagem foi obtido por meio do método do IPT/USP, conforme está exposto na Figura 2. A construção do mesmo foi realizada com os pontos dos resultados dos traços I, II e III, que correspondem aos traços considerados tradicionais para a este método de dosagem.

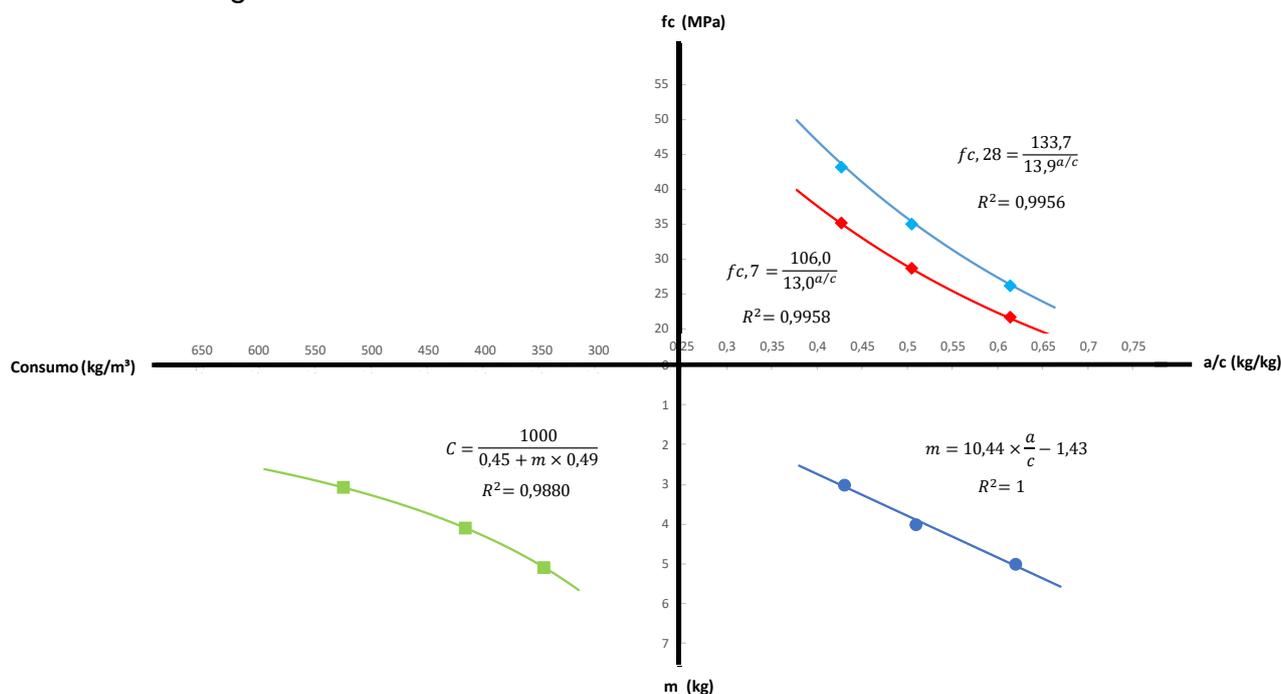


Figura 2 – Diagrama do método do IPT/USP.

3.1 Discussões acerca do modelo de Powers-Brownyard adaptado

No concreto fresco, conforme mostra a Tabela 5, o volume total de agregados do traço II (1:3) foi inferior ao do traço III (1:6). Estes valores ajudam a compreender melhor a influência do percentual de cada constituinte na consistência do concreto. Nos traços I, II e III obtiveram-se abatimentos dentro da faixa pré-estabelecida de 80 ± 10 mm devido ao semelhante volume de água da mistura (aproximadamente 22%), o que corrobora com a Lei de Lyse. No Traço IV, devido ao aumento do volume de água, houve um aumento do abatimento; em contrapartida, a diminuição do volume de água acarretou na diminuição do abatimento do Traço V. A redução da fluidez do Traço V também dificultou o seu adensamento, resultando num maior percentual de ar aprisionado.

Tabela 5 – Volumes absolutos (m³), porcentagens dos componentes e abatimento do concreto fresco.

Materiais	Traço I		Traço II		Traço III		Traço IV		Traço V	
Cimento	0,32	13,5%	0,32	16,9%	0,32	11,2%	0,32	16,3%	0,32	11,5%
Areia	0,51	21,5%	0,33	17,6%	0,69	24,1%	0,33	17,0%	0,69	24,7%
Brita	0,96	40,4%	0,77	40,6%	1,16	40,3%	0,77	39,1%	1,16	41,3%
Água	0,51	21,4%	0,43	22,7%	0,62	21,6%	0,51	25,9%	0,51	18,2%
Ar aprisionado	0,08	3,3%	0,04	2,2%	0,08	2,9%	0,03	1,7%	0,12	4,4%
Volume total de concreto fresco	2,39	100,0%	1,90	100,0%	2,87	100,0%	1,97	100,0%	2,80	100,0%
Abatimento (mm)	75		80		80		200		10	

Com relação à constituição do concreto no estado endurecido, faz-se necessário o cálculo dos constituintes da pasta após as reações de hidratação. De acordo com as Tabelas 6 e 7, e observando graficamente a Figura 3, verifica-se um aumento dos percentuais de compostos resistentes proporcional ao aumento da resistência à compressão do concreto. Tal comportamento já era esperado para os Traços I, II e III, uma vez que esta comparação pode ser realizada entre os valores de resistência à compressão pela Lei de Abrahms, sendo então os concretos com menor relação a/c os mais resistentes. Pela Lei de Abrahms, portanto, não seria possível explicar o motivo de concretos com a mesma relação a/c possuírem diferentes comportamentos mecânicos, mesmo variando outros fatores, como a relação água/materiais secos.

Pelo modelo de Powers-Brownyard adaptado é possível realizar tal comparação, pois o modelo não leva em consideração somente a relação a/c, mas também outros fatores como o teor de ar aprisionado e o percentual de agregado. Desta maneira, o modelo pode explicar os resultados de resistência à compressão dos Traços I, IV e V, que possuem a mesma relação a/c. Nota-se que para estes traços, também houve uma relação de proporcionalidade entre o percentual de compostos resistentes e a resistência.

Tabela 6 – Volumes absolutos (m³), porcentagens dos componentes e dados de resistência à compressão do concreto endurecido em misturas com diferentes relações água/cimento.

Concreto Endurecido			Traço I			Traço II			Traço III		
Compostos resistentes	Volume de pasta hidratada	Sólidos	0,33	13,6%	85,2%	0,33	17,2%	88,0%	0,33	11,2%	82,5%
		Água de gel	0,13	5,3%		0,13	6,7%		0,13	4,3%	
	Volume de areia		0,51	21,5%		0,33	17,7%		0,69	23,7%	
	Volume de pedra		0,96	40,4%		0,77	40,8%		1,16	39,6%	
	Volume de cimento anidro		0,11	4,4%		0,11	5,6%		0,11	3,6%	
Compostos não resistentes	Volume de ar aprisionado		0,08	3,3%	14,8%	0,03	1,7%	12,0%	0,13	4,4%	17,5%
	Volume de ar absorvido		0,04	1,6%		0,04	2,0%		0,04	1,3%	
	Volume de água livre ou capilar		0,24	9,9%		0,16	8,3%		0,35	11,9%	
Volume total de concreto endurecido			2,39	100,0%	1,89	100,0%	2,92	100,0%			
Porosidade			0,35	14,8%	0,23	12,0%	0,51	17,5%			
Res. à compressão - Powers (MPa)			29,93			42,55			19,57		
Res. à compressão medida (MPa)			34,06			43,67			26,37		

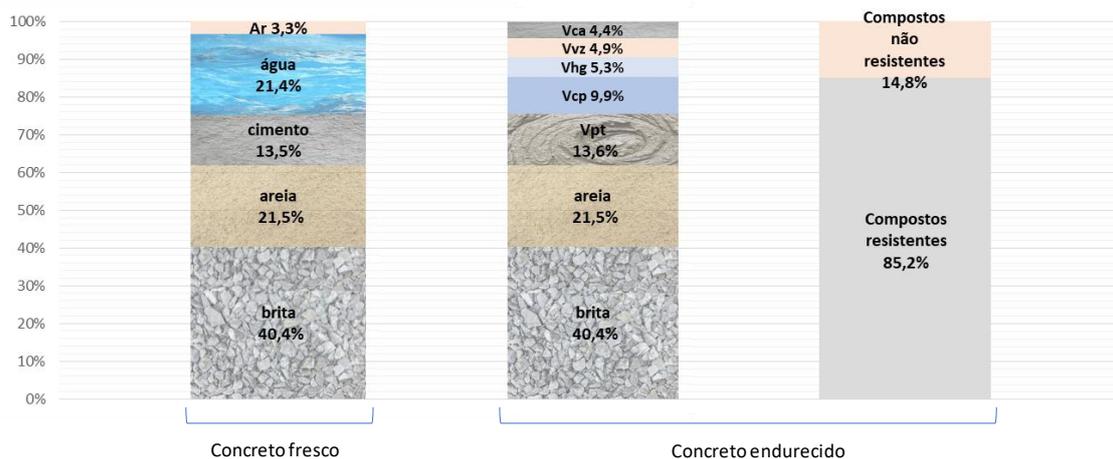
Tabela 7 – Volumes absolutos (m³), porcentagens dos componentes e dados de resistência à compressão do concreto endurecido em misturas com a mesma relação água/cimento.

Concreto Endurecido			Traço I			Traço IV			Traço V		
Compostos resistentes	Volume de pasta hidratada	Sólidos	0,33	13,6%	85,2%	0,33	16,5%	84,4%	0,33	11,6%	85,9%
		Água de gel	0,13	5,3%		0,13	6,4%		0,13	4,5%	
	Volume de areia		0,51	21,5%		0,33	17,0%		0,69	24,7%	
	Volume de pedra		0,96	40,4%		0,77	39,1%		1,16	41,3%	
	Volume de cimento anidro		0,11	4,4%		0,11	5,4%		0,11	3,8%	
Compostos não resistentes	Volume de ar aprisionado		0,08	3,3%	14,8%	0,03	1,7%	15,6%	0,12	4,4%	14,1%
	Volume de ar absorvido		0,04	1,6%		0,04	1,9%		0,04	1,3%	
	Volume de água livre ou capilar		0,24	9,9%		0,24	12,0%		0,24	8,4%	
Volume total de concreto endurecido			2,39	100,0%	1,97	100,0%	2,80	100,0%			
Porosidade			0,35	14,8%	0,31	15,6%	0,40	14,1%			
Res. à compressão - Powers (Mpa)			29,93			29,93			29,93		
Res. à compressão medida (MPa)			34,06			32,02			35,11		

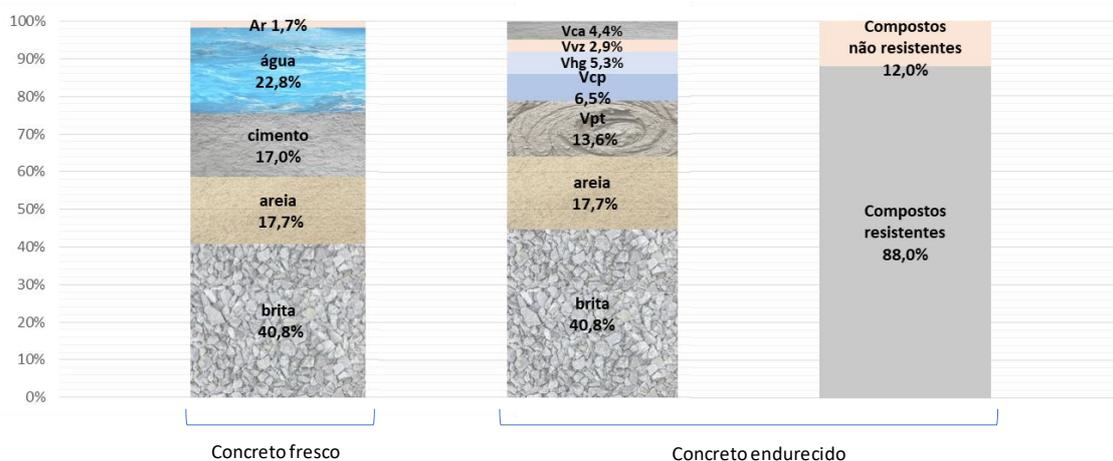
O Traço V foi o que apresentou a maior resistência à compressão e o maior percentual de compostos resistentes, devido ao maior percentual de agregado (66,0%), mesmo apresentando o menor volume de cimento no estado fresco (11,5%). No Traço IV ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

percebe-se o menor volume de agregado (56,1%) e o maior volume de cimento (16,5%), sendo o concreto com menor percentual de compostos resistentes e menor resistência à compressão.

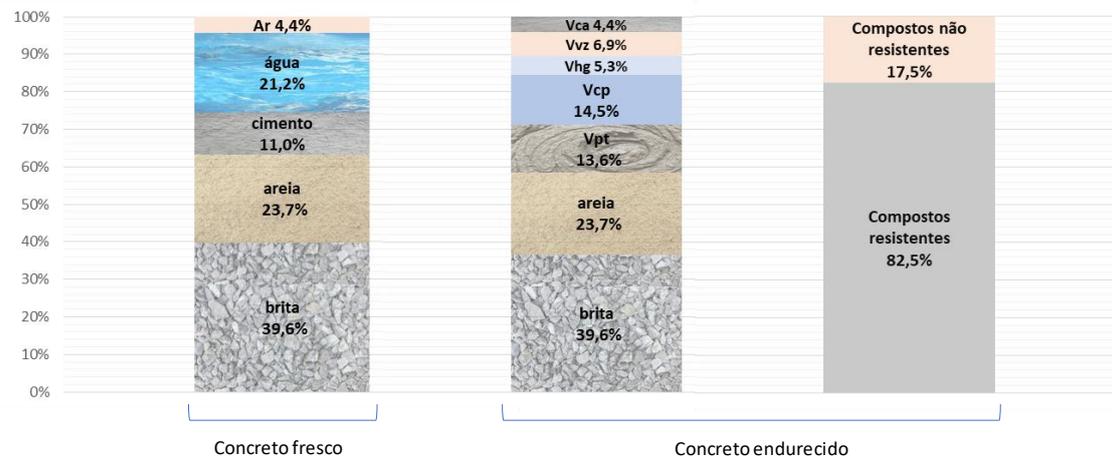
Nesta comparação, uma explicação razoável para que concretos com maior volume de cimento não apresentem maior resistência à compressão está no percentual de água livre ou capilar. Quanto maior o volume de cimento, para uma mesma relação água/cimento, maior então será o volume de água de amassamento, resultando em maior volume de água livre e capilar, que são os principais compostos não resistentes.



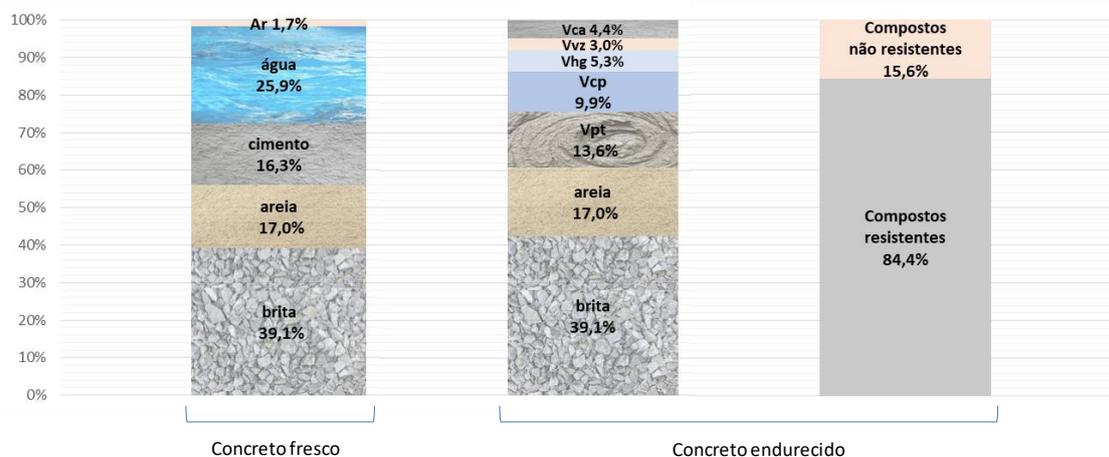
a) Traço I



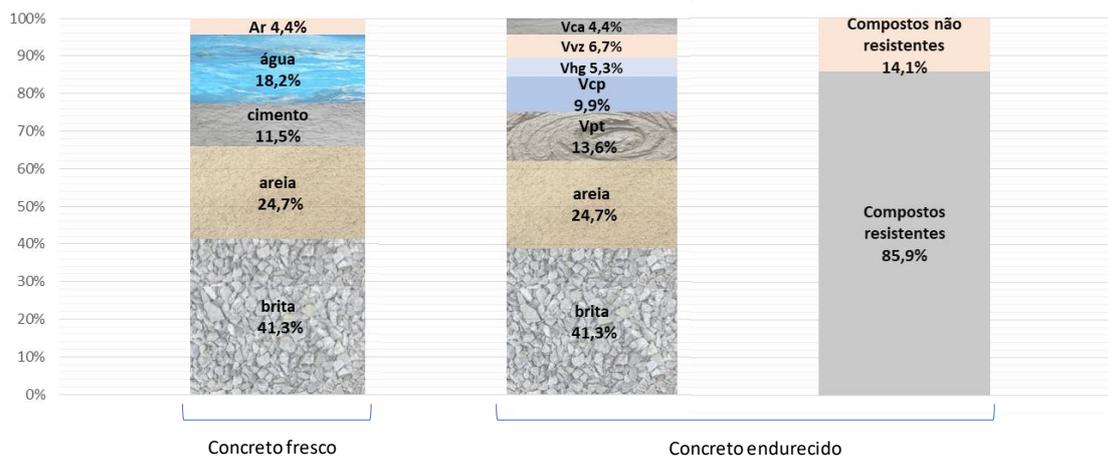
b) Traço II



c) Traço III



d) Traço IV



e) Traço V

Figura 3 – Modelos gráficos dos constituintes do concreto nos estados fresco e endurecido

A Figura 4 mostra uma relação de linearidade encontrada entre a resistência à compressão e os compostos resistentes, o que evidencia que a quantificação dos compostos resistentes é um parâmetro relevante no entendimento do comportamento mecânico do concreto.

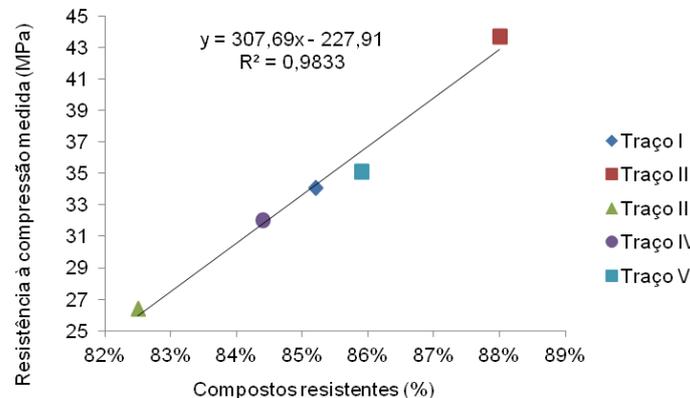


Figura 4 – Gráfico de regressão linear entre a resistências à compressão medida e o percentual de compostos resistentes

3.2 Aplicação do modelo de Powers para previsão da resistência à compressão

A comparação da resistência à compressão entre os valores medidos e estimados pelo modelo de Powers é válida para os Traços I, II e III, pois possuem diferentes relações água/cimento, como pode ser observado na Figura 5. Neste cenário, o resultado foi satisfatório, pois foi obtida uma relação de linearidade com um alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,95$).

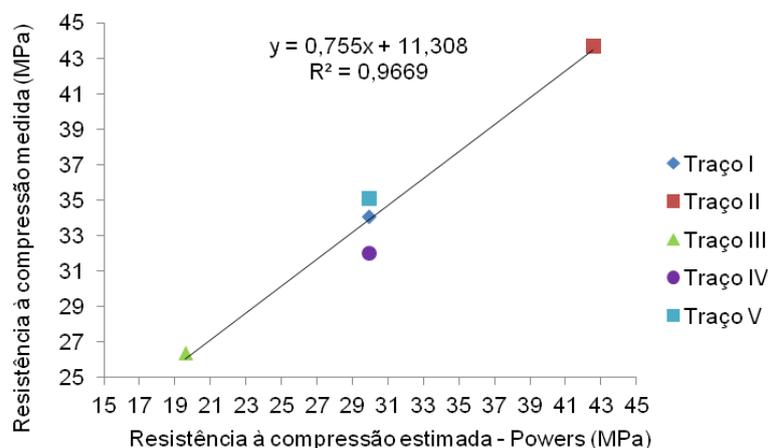


Figura 5 – Gráfico de regressão linear entre as resistências à compressão medida e estimada

Além disso, como mostra a Figura 5, para a formação de uma condição de alto grau de correlação entre os resultados, é necessário que os pontos que compõem a reta contenham resultados de resistência à compressão com a mesma relação água/materiais secos. Neste caso, os Traços IV e V, que contém diferentes relações de água/materiais secos do Traço I, ficaram afastados da reta, e a utilização de um desses dois Traços (IV ou V) acarretaria numa significativa diminuição do R^2 .

4 Conclusões

A partir do que foi discutido acima, as conclusões do trabalho são:

- O modelo de Powers-Brownyard adaptado para aplicações em concretos mostrou-se uma ferramenta razoável, além de calcular os constituintes do concreto, também pode ser um instrumento auxiliar no entendimento dos resultados obtidos em ensaios mecânicos.
- Concretos com a mesma relação água/cimento podem sofrer pequenas variações nos resultados de resistência à compressão, devido aos percentuais de compostos resistentes e não resistentes.
- O modelo de Powers para previsão da resistência à compressão é uma ferramenta limitada quando se propõe comparar concretos com diferentes relações água/materiais secos, mas quando essa condição é mantida, pode-se obter resultados satisfatórios.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal do Ensino Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia no Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro e agradecem ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) pelo apoio técnico para a realização da pesquisa.

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto** – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais** – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

HELENE, P. R. L. **Estrutura interna do concreto**. Pós-graduação em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. Notas de aula.

POWERS, T. C.. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. **Journal of American Ceramic Society**. Illinois, 1 jan. 1958. p. 1-6.

POWERS, T.C.; BROWNYARD, T.L. Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste (Bull. 22), 992pp., Portland Cement Association, Chicago, IL (1948); reprinted from J. Am. Concr. Inst. (Proc.) (1947).

TAYLOR, H.F.M. **Cement Chemistry**. 2ª Ed. London, 1997.



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

TUKITIAN, B.F.; HELENE, P.R.L. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.** In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 12. p. 439-471.