

Análise do Ensaio de Resistência à Compressão de Corpos de Prova de Concreto com uso de Ferramentas de Probabilidade.

Celso Luiz Santiago Figueirôa Filho, Universidade Federal da Bahia
Márcio André Fernandes Martins, Universidade Federal da Bahia
Ana Luiza Brasileiro Costa, Universidade Federal da Bahia
Edilson Machado de Assis, Fundação para o Desenvolvimento de Bauru
Lila Martins Guimarães, Universidade Católica do Salvador

RESUMO

Os resultados de ensaios de resistência à compressão de corpos de prova de concreto foram analisados por meio de distribuições estatísticas não usuais nesta área, sendo testados modelos estatísticos tradicionalmente usados em análise de confiabilidade. Os valores de resistências à compressão foram modelados por métodos paramétricos conforme as distribuições normal, exponencial, weibull e também modelos q-gaussiana, q-exponencial e q-Weibull. Três traços diferentes foram utilizados e os resultados dos ajustes foram comparados por meio de dois indicadores diferentes, o índice de Akaike (AIC) e o coeficiente de determinação (R^2). Além disso, amostras foram obtidas a partir do corte transversal dos corpos de prova em duas metades e as resistências das duas camadas (inferior e superior) foram modeladas por meio de metodologia utilizada em confiabilidade de sistemas e mostraram comportamentos distintos entre elas, comprovando a heterogeneidade do corpo de prova.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Wallevik [1], o concreto se transformou no material mais utilizado nas civilizações modernas, após o descobrimento do cimento Portland, sendo assim, a produção de concreto implica em um longo e criterioso processo de fabricação tendo cada etapa suas particularidades. Portanto, seguir normas e especificações assegura as características mínimas necessárias à destinação deste material.

O artigo trata de analisar o ensaio de resistência à compressão com o uso de ferramentas de confiabilidade seguindo os procedimentos da NBR 5739 [2].

A norma solicita que o corpo de prova deve ser cuidadosamente centralizado no prato inferior observando-se o sentido de moldagem. Contudo, não há recomendação efetiva quanto à orientação do corpo de prova na máquina de ensaio. A heterogeneidade do corpo de prova resulta da estruturação física da forma, pois é constituída apenas de uma base inferior e de uma superfície lateral cilíndrica, bem como da sua moldagem em duas camadas. Salienta-se que esses parâmetros não são comumente levados em consideração na execução do ensaio de compressão. Segundo Petry [3], a porcentagem de poros com diâmetros maiores que 50 nm diminui à medida que aumenta a profundidade da camada de concreto, fato que indica uma maior porosidade na superfície do concreto.

O ensaio de determinação da resistência à compressão de um corpo de prova de concreto possui fatores externos ao fenômeno da ruptura (forma do corpo de prova, idade, tipo de conservação prévia, condições em que se fazem as distribuições das forças aplicadas, tensões iniciais, etc.) e outras inerentes ao próprio fenômeno (dimensões do corpo de prova, velocidade de aplicação das cargas e das deformações, etc.) que tornam praticamente impossível conhecer o seu valor exato. Os resultados dos ensaios devem portanto estar sempre referido às condições em que foram obtidos e, infelizmente, pouco se sabe ainda sobre a maneira de relacionar todos estes fatores.

Segundo Weibull [4], a ruptura dos materiais é determinada pelas tensões internas em um ponto, assumindo que, por meio de uma combinação adequada das três principais tensões ou cortantes, um valor característico para o material em questão pode ser calculado. Este valor é considerado decisivo na afirmação se a ruptura foi alcançada ou não.

1 Doutorando, Engenheiro Mecânico – Universidade Federal da Bahia

2 Doutor, Engenheiro Químico – Universidade Federal da Bahia

3 Mestranda, Engenheira Civil – Universidade Federal da Bahia

4 Doutor, Engenheiro Civil – Fundação para o Desenvolvimento de Bauru

5 Graduanda, Engenheira Civil- Universidade Católica do Salvador

Ainda para Weibull [4], medidas experimentais conduzem a resultados que dificilmente estarão de acordo com esta teoria. Entretanto, considerando as leis elementares da probabilidade como ponto de partida, uma teoria pode ser desenvolvida com uma formulação de acordo com os resultados considerados inconsistentes com a teoria clássica.

Não há clareza quanto à originalidade das funções densidade de probabilidade usadas em confiabilidade (Pham et al. [5]). Segundo Berberan-Santos et al. [6], o uso da exponencial esticada¹ tem registro anterior ao artigo de Weibull [7], em um trabalho de Kohlrausch descrevendo a descarga de capacitor. Muitas propostas de generalização do modelo de Weibull têm sido feitas. Quase todas apresentam a estrutura exponencial, seja simplesmente exponencial, exponenciais aninhadas² ou exponenciais de várias funções.

As funções exponenciais são usualmente encontradas em sistemas com interação fraca ou sem interação. Sistemas complexos usualmente apresentam interações espaciais de longo alcance, ou memória de longa duração, ou efeitos de cooperação/competição, como pode ser visto em Bak [8]. Para sistemas complexos, as distribuições estatísticas são geralmente leis de potência, ao passo que para sistemas simples ocorrem leis exponenciais.

2. METODOLOGIA

Os experimentos desenvolvidos visam estudar as propriedades de concretos endurecidos, tais como: resistência à compressão, índice de vazios, absorção e massa específica. Estas propriedades são consideradas indispensáveis para explicar a influência do processo de moldagem do corpo de prova e do seu procedimento de colocação na máquina de ensaio na avaliação do potencial de resistência dos concretos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Católica do Salvador (UCSal) e no laboratório de uma empresa que realiza ensaios tecnológicos em concreto. Posteriormente foi realizada uma análise estatística por meio de distribuições de confiabilidade para a análise dos dados.

2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

O cimento utilizado no programa experimental foi o cimento Portland CP II-Z 40 RS, cujos resultados das características físicas, químicas e mecânicas, foram fornecidos pelo fabricante. Com base nos dados obtidos, verifica-se que a amostra de cimento atendeu aos requisitos das NBR 11598 [9] e NBR 5737 [10] como CP II-Z 40 RS.

Utilizou-se areia quartzosa, proveniente do areal Otomar localizado na Região Metropolitana de Salvador. O agregado graúdo, de origem gnáissica, foi oriundo da Pedreira Civil, cuja jazida também se situa nesta capital. Os resultados obtidos com base nos requisitos da NBR 7211 [11], constata-se que a areia empregada neste experimento não se enquadrou na zona granulométrica utilizável devido ao teor de material retido acumulado na peneira com abertura de 1,18 mm ter sido inferior a 5%. Verifica-se ainda que o agregado graúdo não atendeu aos limites da zona classificada como 9,5/25, em virtude da porcentagem retida acumulada na peneira com abertura de 19mm ser inferior a 2.

2.2. CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA DE ENSAIO

Para realização dos ensaios de compressão em concreto, foi utilizado uma prensa hidráulica de acionamento elétrico, sistema servo controlado, modelo 2401290, série 11659, com resolução de 0,01 tf e de capacidade máxima de 100 tf. O referido equipamento foi calibrado em 09/01/2017 e atende aos requisitos da NBR NM ISO 7500-1 [12].

2.3. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Através do processo de moldagem estabelecido na NBR 5738 [13] os traços de concreto, proporção de materiais que constituem a mistura composta por cimento, agregados graúdos (pedras), agregados miúdos (areia) e água., foram elaborados por meio de misturas experimentais com o intuito de avaliar a influência da heterogeneidade do corpo de prova de concreto na avaliação de sua resistência à compressão. Além disso, foram realizados os ensaios de índice de vazios, absorção e massa específica. As composições e os dados dos concretos no estado fresco estão representados na Tabela 1.

Os concretos foram fabricados com uma única classe de consistência S160 ($100 \text{ mm} \leq A < 160 \text{ mm}$) e relações água/cimento iguais a 0,45; 0,55 e 0,65. Para cada traço, foram realizadas duas amassadas, tendo-se obtido na primeira 36 corpos de prova e 18 corpos de prova na segunda, resultando num total de 54 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm. Destes 54: 36 foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão (12 aos 7 dias e

¹ A distribuição Weibull também pode ser chamada de exponencial esticada.

² São exponenciais em cascata como por exemplo $\exp[-\exp(x)]$

24 aos 28 dias), enquanto dos 18, obtidos na segunda amassada, 6 foram submetidos aos ensaios de absorção, massa específica e índice de vazios (3 aos 7 e 3 aos 28 dias). Os 12 corpos de prova restantes foram cortados e deram origem a 24 metades, que foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão (6 aos 7 dias, 18 aos 28 dias). Sendo assim, foram confeccionados um total de 162 corpos de prova de concreto, cujos procedimentos de moldagem e cura obedeceram aos critérios da NBR 5738 [13]. Cabe ainda destacar que dos 108 corpos de prova (100 mm x 200 mm) submetidos ao ensaio de resistência à compressão, 54 foram ensaiados com as suas bases sobrepostas ao prato inferior da máquina, enquanto no exame dos demais 54 os topos localizaram-se sob o prato superior do equipamento. Na Tabela 2 encontram-se as listas dos ensaios realizados com os correspondentes procedimentos normativos utilizados.

Tabela 1 – Dados e composições dos concretos no estado fresco.

Traço	Proporções (em massa)	Relação água/cimento (em massa)	Consumo de cimento	Massa específica	Índice de consistência
	cimento : areia : brita	a/c	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(mm)
T-1	1,000:1,231:2,351	0,450	483	2431	130
T-2	1,000:1,728:2,873	0,550	392	2413	160
T-3	1,000:2,23:3,396	0,650	330	2399	167

Tabela 2 – Plano de ensaios em concreto.

Ensaio	Idade	Quantidade de corpos de prova (n)					
	dias	T-1 (S160)		T-2 (S160)		T-3 (S160)	
		a/c = 0,450		a/c = 0,550		a/c =0,650	
		Amassadas					
		1 ^a	2 ^a	1 ^a	2 ^a	1 ^a	2 ^a
Resistência à compressão, NBR 5739	7	12	3	12	3	12	3
	28	24	9	24	9	24	9
Índice de vazios/absorção/massa específica, NBR 9778	7	-	3	-	3	-	3
	28	-	3	-	3	-	3
Total de corpos de prova ensaiados por traço (n)		36	18	36	18	36	18
		54		54		54	

2.4. EXPERIMENTO DE COMPRESSÃO

Segundo a NBR 5739 [2], para a execução do ensaio deve ser determinar o diâmetro utilizado para o cálculo da área da seção transversal com exatidão de $\pm 0,1$ mm, pela média dos diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo-de-prova, além de determinar a altura do corpo-de-prova que deve ser medida sobre seu eixo longitudinal, com precisão de 0,1 mm, incluindo o capeamento. Os corpos-de-prova devem ser rompidos à compressão em uma idade específica; para essa pesquisa fizemos os rompimentos aos 28 dias.

Ainda segundo a NBR 5739 [2], antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e do corpo-de-prova devem estar limpas e secas e os corpos-de-prova deve ser cuidadosamente centralizado no prato inferior, com o auxílio dos círculos concêntricos de referência, observando-se o sentido de moldagem.

Tomados esses cuidados da NBR 5739 [2], devemos observar a escala de força escolhida para o ensaio de forma que a força de ruptura do corpo-de-prova ocorra no intervalo em que a máquina foi calibrada. O carregamento de ensaio deve ser aplicado continuamente com velocidade constante e sem choques, com a velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, encerrando o carregamento quando houver uma queda de força que indique sua ruptura.

2.5. CRITÉRIOS DE MOLDAGEM

Para uma melhor moldagem a NBR 5738 [13], determina que as dimensões do corpo de prova deve ser no mínimo três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo do concreto e para isso as partículas de dimensão superior à máxima nominal devem ser eliminadas por peneiramento do concreto, de acordo com a ABNT NBR NM 36. Antes de proceder à moldagem dos corpos de prova, os moldes e suas bases devem ser convenientemente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral ou outro lubrificante que não reaja com o cimento. A superfície de apoio dos moldes deve ser rígida, horizontal, livre de vibrações e outras perturbações que possam modificar a forma e as propriedades do concreto dos corpos de prova durante sua moldagem e início de pega.

Ainda segundo a NBR 5738 [13], deve ser realizada uma prévia remistura da amostra para garantir a sua uniformidade e preencher os moldes em duas camadas de concreto para formas de dimensões de 100 mm x 200 mm, utilizando uma concha de seção U. Os golpes, distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde para um melhor adensamento devem ser com uma haste que penetre aproximadamente 20 mm, tendo o cuidado de atravessar toda a espessura da primeira camada, evitando-se golpear a base do molde, além de cada uma das camadas seguintes também deve ser adensada em toda sua espessura, fazendo com que a haste penetre aproximadamente 20 mm na camada anterior. Deve-se bater levemente na face externa do molde, até o fechamento de eventuais vazios. A última camada deve ser moldada com quantidade em excesso de concreto, de forma que, ao ser adensada, complete todo o volume do molde e seja possível proceder ao seu rasamento, eliminando o material em excesso. Em nenhum caso, é aceito completar o volume do molde com concreto após o adensamento da última camada. Ainda segundo a NBR 5738 [13], independentemente do método, após o adensamento da última camada, deve ser feito o rasamento da superfície com a borda do molde, empregando para isso uma régua metálica ou uma colher de pedreiro adequada. Após a desforma, os corpos de prova devem ser transportados em caixas rígidas contendo serragem ou areia molhada ou similar.

2.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA PARAMÉTRICA POR MEIO DE DISTRIBUIÇÕES

Mudanças de variáveis adequadas permitem traçar um gráfico cartesiano para cada distribuição com o gráfico do modelo representado por uma linha reta. Os dados amostrais são resistências à compressão em MPa organizadas em ordem crescente e os valores de não confiabilidade $F_q(x)$ são estimados usando a aproximação de Bernard do median rank fornecida em (Johnson, [14]), onde n é a quantidade de corpos de prova, i é o número de ordem da falha variando de 1 até n .

$$\hat{F}_i = \frac{i-0,3}{n+0,4}, (1)$$

Os parâmetros da distribuição são calculados pela maximização do coeficiente de determinação R^2 . Procedimentos similares de mudança de variáveis são utilizados para as distribuições q-Gaussiana e Normal.

As análises paramétricas de confiabilidade buscam um modelo matemático que melhor explique os dados amostrais. Uma vez estabelecido o modelo e seus parâmetros, as medidas de tendência central (por exemplo: média), as medidas de dispersão (como o desvio padrão) e os valores probabilísticos limítrofes são todos calculados a partir do modelo e não das amostras.

A média de uma distribuição de probabilidade é o primeiro momento e está definida por:

$$\mu_x = \bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, (2)$$

O desvio padrão padrão é a raiz quadrada da variância e esta é definida como o segundo momento (ou momento de segunda ordem) em relação à média. Os momentos em relação à média são chamados de momentos centrais e os momentos que prescindem do cálculo da média são os momentos crus (a média é o momento cru de primeira ordem). O desvio padrão da variável aleatória x é:

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x)dx}, (3)$$

Um detalhe importante é que nem todas as distribuições possuem todos os momentos, a integral pode resultar em infinito. De fato não há obrigatoriedade matemática da existência de momentos, especialmente os de ordem elevada. Fenômenos naturais como terremotos por exemplo, não possuem média (vide Borges [15]).

A inspeção visual de como os pontos se posicionam em torno da reta representativa do modelo é a forma mais básica de comparação da qualidade dos ajustes das distribuições. O coeficiente de determinação se constitui numa maneira mais precisa de comparação. Quanto mais próximo da unidade, mais adequado é o modelo empregado.

O índice de Akaike, ou Critério de Informação Akaike (AIC) é um índice que pode auxiliar na comparação de modelos com diferentes números de parâmetros (veja Akaike [16]). Supõe-se que o modelo mais eficiente seja aquele que possui o menor AIC é dado assintoticamente por p , em que p é o número de parâmetros a serem estimados no modelo, e definiu seu critério de informação como: $AIC = -2 \log L(\theta) + 2(p)$

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. COMPARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES

A Figura 1 mostra os ajustes das 6 distribuições testadas considerando todos os corpos de prova íntegros do traço $a/c=0,45$ ensaiados aos 28 dias de idade. Note que os coeficientes de determinação dos ajustes das q-distribuições são sempre maiores que os das distribuições originais. A distribuição q-Weibull foi a mais ajustada de todas. Isto se evidencia tanto por inspeção visual quanto por comparação de seu coeficiente de determinação R^2 .

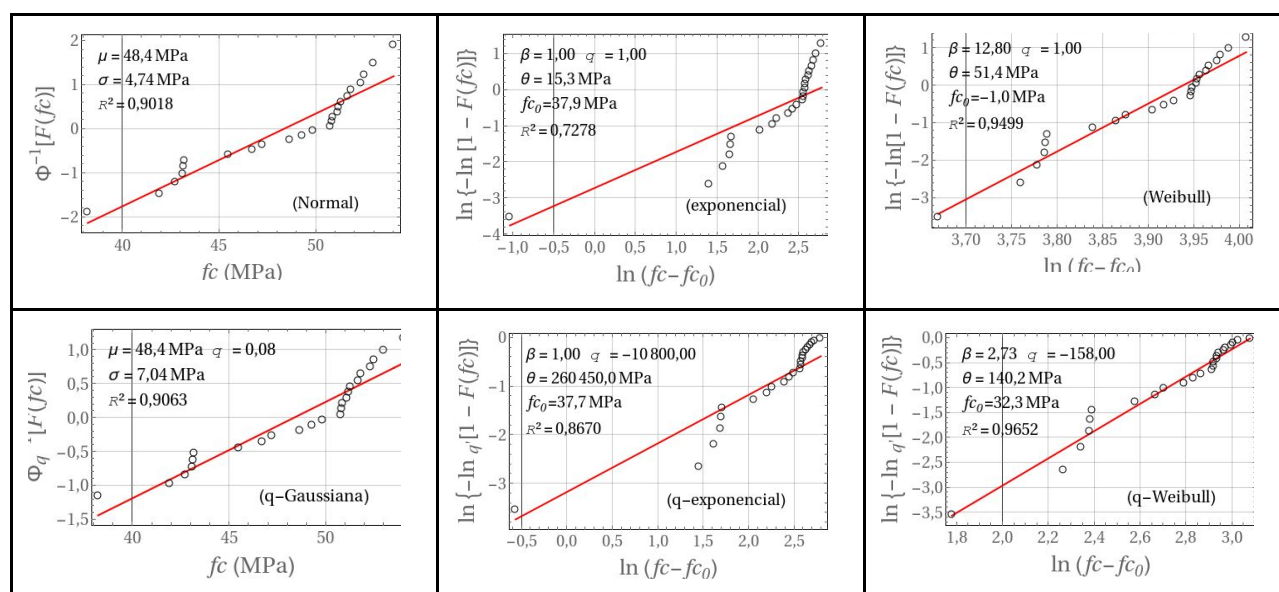
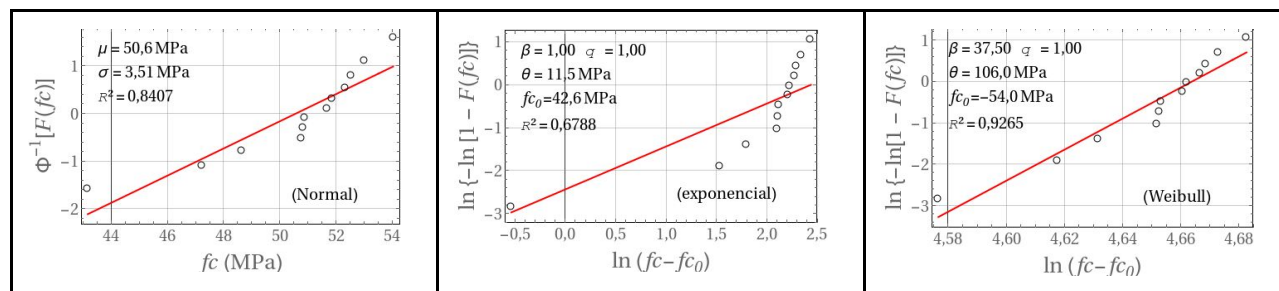


Figura 1 - Ajustes das distribuições para todos corpos de prova íntegros (28 dias $a/c=0,45$)

A análise dos resultados obtidos a partir dos corpos de prova com a base posicionada no prato inferior da máquina de ensaios (doravante representados por \downarrow) apresenta o mesmo comportamento encontrado anteriormente, as q-distribuições melhores e a q-Weibull com o melhor resultado entre todas (vide Figura 2).



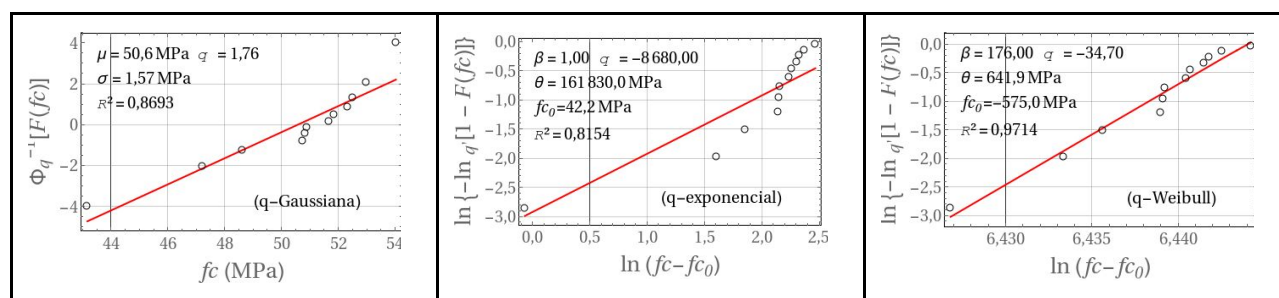


Figura 2 - Ajustes das distribuições para os corpos de prova íntegros com orientação ↓ (28 dias, a/c=0,45)

A Figura 3 mostra os resultados para a posição ↑ como as mesmas tendências no que diz respeito à qualidade dos modelos.

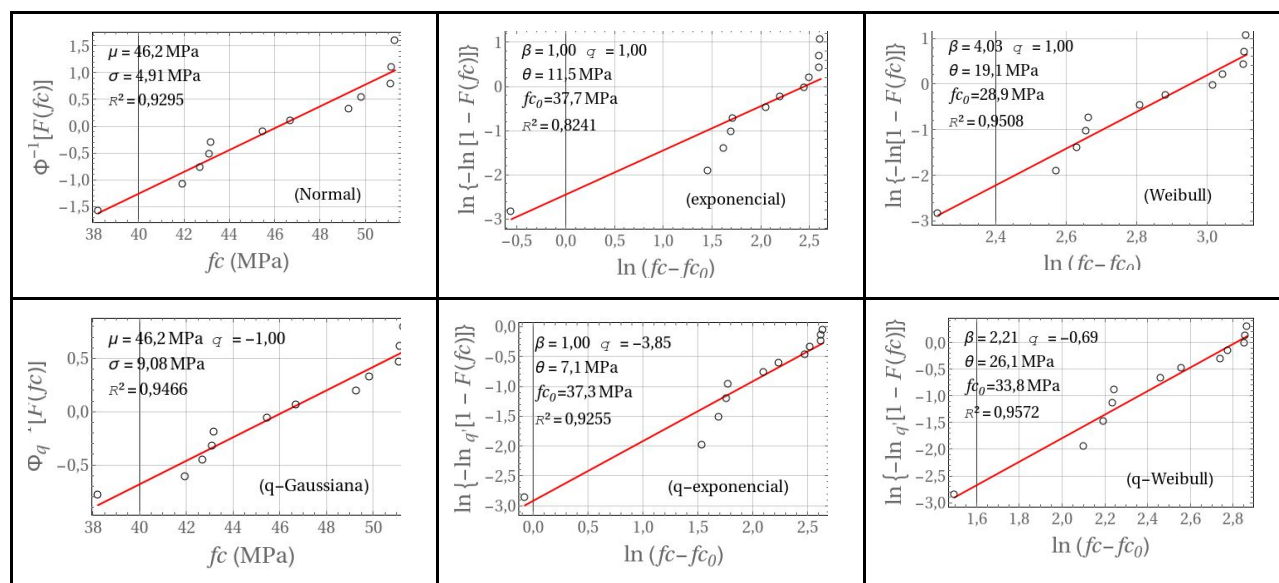


Figura 3 - Ajustes das distribuições para os corpos de prova íntegros com orientação ↑ (28 dias, a/c=0,45)

Observa-se que as distribuições exponenciais (exponencial e q-exponencial) apresentam dificuldades em modelar o problema. Isto é observado visualmente ou ainda por valores muito pequenos (negativos) do parâmetro q . Observa-se também que em todos os casos a distribuição Weibull é melhor que a distribuição Normal. Os coeficientes de determinação do modelo q-Weibull apresentam resultados superiores a todas as outras distribuições também para os traços a/c=0,55 e a/c=0,65. A distribuição Weibull expressa R^2 maiores que a distribuição normal em quase todos os casos estudados.

Tabela 3 - Coeficientes de determinação dos ajustes para os traços a/c=0,55 e a/c=0,65

Distribuição	a/c=0,55			a/c=0,65		
	Todos	↓	↑	Todos	↓	↑
q-Weibull	0,9827	0,9629	0,9895	0,9779	0,9600	0,9657
Weibull	0,9810	0,9334	0,9854	0,9645	0,9361	0,9656
q-exponencial	0,8370	0,8707	0,9676	0,8457	0,8908	0,8844
exponencial	0,7110	0,7379	0,9156	0,7321	0,8207	0,7686
q-Gaussiana	0,9758	0,8641	0,9618	0,9794	0,9396	0,9431
normal	0,9758	0,8637	0,9533	0,9651	0,9328	0,9427

As médias encontradas para a posição ↓ foram superiores às calculadas na posição ↑ segundo todas as distribuições empregadas. Isto é um forte indicativo que para as condições do ensaio, a orientação do corpo de prova interfere no resultado de resistência. Os valores dos desvios padrão (quando a distribuição permite o cálculo) são próximos quando comparados quanto à orientação e os das distribuições exponencial e q-exponencial são levemente maiores que as outras.

Tabela 4 - Média e desvio padrão das distribuições ($a/c=0,45$ e 28 dias)

Distribuição	Média (MPa)			Desvio Padrão (MPa)		
	Todos	↓	↑	Todos	↓	↑
q-Weibull	48,3	50,4	46,1	4,46	3,56	4,55
Weibull	48,3	50,5	46,2	4,70	3,50	4,84
q-exponencial	49,7	51,5	46,5	6,96	5,38	5,33
exponencial	53,1	54,1	49,2	15,2	11,5	11,5
q-Gaussiana	48,4	50,6	46,2	4,56	∞	4,53
Normal	48,4	50,6	46,2	4,74	3,51	4,91

As distribuições exponencial e q-exponencial mais uma vez se afastam das demais para o traço $a/c=0,55$ (veja Tabela 4). As médias da distribuição q-Weibull são muito próximas das médias da distribuição normal (diferenças inferiores a 0,6%). Os valores dos desvios padrão para todos os corpos de prova e a orientação ↓ afastaram-se de 2,5% e 1,6% respectivamente. Para os corpos de prova orientados da forma ↑ a variação foi maior, alcançando 12,6%. Embora média e desvio padrão forneçam valores próximos para a maioria dos casos de comparação entre as distribuições q-Weibull e normal, a Tabela 3 mostra que o modelo q-Weibull tem coeficiente de determinação R^2 maior e é mais adequado aos resultados encontrados.

Tabela 5 - Média e desvio padrão das distribuições ($a/c=0,55$ e 28 dias)

Distribuição	Média (MPa)			Desvio Padrão (MPa)		
	Todos	↓	↑	Todos	↓	↑
q-Weibull	35,9	36,2	35,6	3,68	4,41	3,67
Weibull	35,9	36,3	35,5	3,59	4,48	3,070
q-exponencial	37,1	37,4	35,7	5,59	6,082	3,10
exponencial	39,9	40,1	36,7	12,3	12,9	5,80
q-Gaussiana	35,9	36,4	35,4	3,59	4,64	4,54
Normal	35,9	36,4	35,4	3,59	4,48	3,26

Os resultados de média e desvio padrão do traço $a/c=0,65$ também estão próximos para a maioria das distribuições. Os valores dos desvios padrão difere em, no máximo, 6,7% quando q-Weibull e a normal são comparadas. As médias são praticamente iguais e se afastam em até 0,3%.

Tabela 6 - Média e desvio padrão das distribuições (a/c=0,65 e 28 dias)

Distribuição	Média (MPa)			Desvio Padrão (MPa)		
	Todos	↓	↑	Todos	↓	↑
q-Weibull	30,3	31,2	29,4	2,45	2,69	2,21
Weibull	30,3	31,1	29,4	2,29	2,37	2,21
q-exponencial	30,9	31,3	29,8	3,29	2,53	2,80
exponencial	32,5	32,5	31,1	7,23	5,33	5,94
q-Gaussiana	30,3	31,1	29,4	2,87	3,25	2,08
Normal	30,3	31,1	29,4	2,37	2,52	2,14

A tabela 7 apresenta os resultados de AIC. Com apenas 2 parâmetros a distribuição normal vence em 4 casos, sendo seguida pela q-Weibull com 3 casos.

Tabela 7 - AIC para os traços a/c=0,45, a/c=0,55 e a/c=0,65

Orientação	a/c=0,45			a/c=0,55			a/c=0,65		
	Todos	↓	↑	Todos	↓	↑	Todos	↓	↑
q-Weibull	-76,7	-34,0	-26,8	-73,7	-30,7	-27,9	-55,9	-3,8	-24,5
Weibull	-57,6	-20,4	-25,2	-80,8	-21,6	-39,8	-65,9	-22,1	-29,5
q-exponencial	-47,5	-16,4	-27,3	-42,6	-20,6	-35,7	-44,0	-22,7	-22,0
exponencial	-19,6	-6,4	-13,6	-18,1	-8,8	-22,4	-20,0	-13,4	-10,3
q-Gaussiana	-72,0	0,6	-44,0	-86,4	-15,3	-22,6	-68,7	-18,2	-31,5
normal	-54,4	-19,6	-29,4	-88,1	-21,5	-34,4	-79,3	-30,0	-31,9

3.2. COMPARAÇÃO ENTRE CAMADAS

Os corpos de prova divididos foram ensaiados à compressão e distribuição q-Weibull foram ajustadas aos resultados das partes inferiores e superiores. Esta distribuição foi escolhida por apresentar resultados melhores nas análises anteriores. Todos os coeficientes de determinação encontrados foram superiores a 0,96 indicando ajustes de muito boa qualidade (Veja Figura 4).

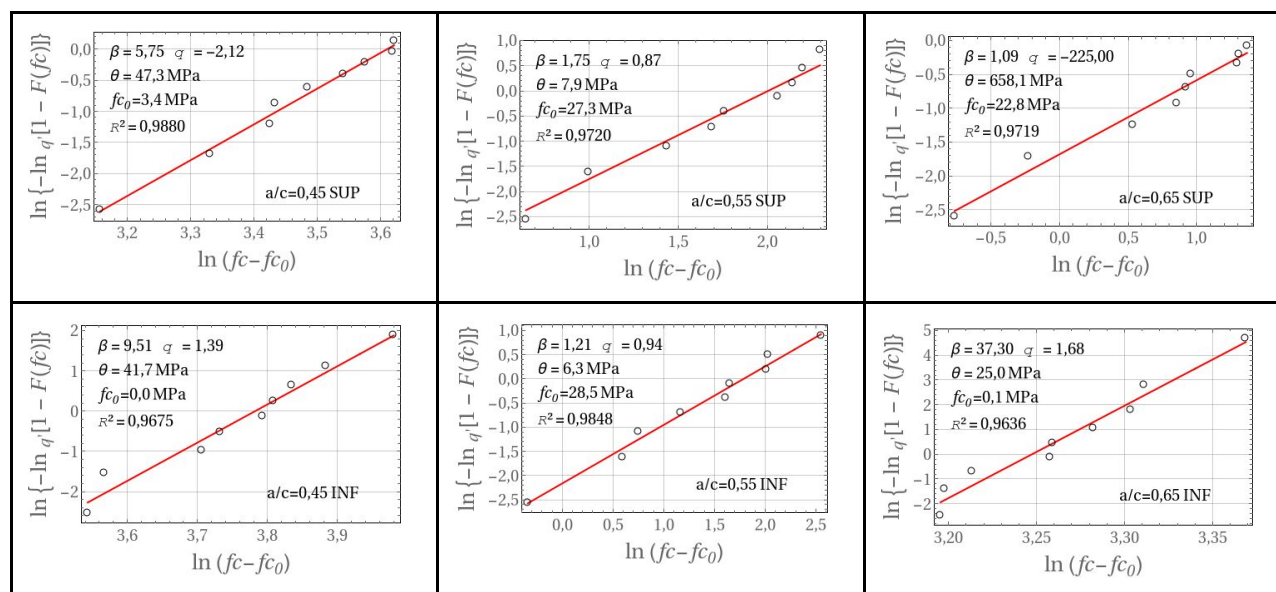


Figura 4 - Ajustes das distribuições para os corpos de prova divididos.

Todas as médias encontradas na parte inferior foram maiores que as da parte superior. O traço de maior variação foi a/c=0,45 com 22,6% de diferença. O traço a/c=0,55 apresentou resultados muito próximos de resistência com diferença entre camadas e 0,84%. Os coeficientes de variação diminuíram à medida em que o fator água/cimento aumenta, indo de 16,3% até 5,2%.

Tabela 8 - Média e desvio padrão das distribuições ajustadas

a/c	Média (MPa)			Desvio (MPa)		Coeficiente de variação	
	Inferior	Superior	Variação%	Inferior	Superior	Inferior	Superior
0,45	43,5	35,5	22,6%	7,11	5,09	16,3%	14,4%
0,55	33,9	33,6	0,84%	4,26	3,47	12,6%	10,3%
0,65	26,4	25,3	4,53%	1,93	1,32	7,3%	5,2%

3.3. ENSAIOS DE ÍNDICES DE VAZIOS, ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA

Como descrito no capítulo anterior, a partir de misturas de concretos fabricados com a mesma consistência e com diversas relações água/cimento, esta pesquisa contemplou também os ensaios de absorção de água, através de imersão, índices de vazios e massa específica.

Os resultados obtidos indicam que:

- para uma mesma consistência e independente da idade dos ensaios, à medida que se diminui a relação água/cimento, os concretos apresentaram menor absorção (por imersão) e menor índice de vazios;
- mantendo-se constante a relação água/cimento e a consistência, a absorção (por imersão) e o índice de vazios dos concretos decrescem com o grau de hidratação da pasta;
- os valores de massa específica atendem aos requisitos estabelecidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015) e decrescem gradativamente com o aumento da relação água-cimento.

Segundo Andrade [17], a absorção de água por imersão (AA) dá indicação da qualidade e permeabilidade do concreto. Assim, a autora sugere:

- $AA \leq 4,5\%$: concretos duráveis;
- $4,5\% < AA \leq 7,0\%$: concreto bom, permeável e não adequado para ambiente agressivo;
- $AA > 7\%$: concreto permeável e inadequado para proteger a armadura por longo período.

Conforme Neville [18], a maioria dos concretos de boa qualidade apresenta valores de absorção (AA) inferiores a 10%, enquanto outros pesquisadores limitam este valor a 5,0%.

Para Miyake [19], no campo da construção civil, o índice de vazios do concreto é da ordem de duas vezes o da absorção de água. Os resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa enquadram-se nesse intervalo.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio influencia no potencial de resistência à compressão do concreto, motivo pelo qual sugere-se uma revisão da NBR 5739 (ABNT 2018), no que concerne a colocação da base do corpo de prova sobre o prato inferior do equipamento, ou seja, adoção da condição caracterizada pelo símbolo \downarrow . Constata-se portanto que o corpo de prova de concreto não é homogêneo.

Tendo em vista a importância dessa informação, aconselha-se a realização de demais ensaios com uma maior intensidade de amostragem, considerando os diferentes tipos de materiais empregados no mercado brasileiro. Cabe salientar que os ensaios de resistência à compressão em corpos de prova foram tratados conforme um procedimento normalizado, e fornecem resultados que mostram a qualidade potencial do concreto.

A distribuição normal é o modelo probabilístico tradicionalmente usado para descrever a ruptura à compressão de corpos de prova. Neste artigo, as distribuições q-Weibull, Weibull, q-exponencial, exponencial, q-Gaussiana e normal foram testadas quanto à qualidade de ajuste à valores de resistência de corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão.

Três traços diferentes foram utilizados e em todos eles a distribuição que mais bem ajustada foi a q-Weibull. Os ajustes foram feitos utilizando o median rank e mudanças de variável, métodos são largamente empregados em análises de confiabilidade. Os corpos de prova foram rompidos com orientações diferentes. Em metade dos corpos de prova a base foi colocada sobre o prato inferior da prensa e no restante o topo foi colocado sobre o mesmo prato. Os valores de resistência obtidos com a base posicionada no prato inferior da prensa foram maiores do que os encontrados com a orientação contrária (base voltada para o prato superior), independentemente do traço aplicado ou da distribuição

modelada. Isto é um indicativo de que a orientação na máquina de ensaio pode alterar a resistência e que o corpo de prova não é homogêneo ao longo de seu eixo longitudinal (caso fosse não deveria haver resultado diferente).

Os corpos de prova foram divididos em metades iguais por uma seção transversal. As duas metades foram ensaiadas separadamente e observou-se que, na média, as resistências da metade inferior são maiores que as da metade superior. Tal diferença foi pequena para o traço $a/c=0,55$ (menos de 1%), mas foi de 4,5% no traço $a/c=0,65$ e alcançou 22,6% no traço $a/c=0,45$.

As razões pelas quais o traço $a/c=0,55$ apresentou resultados próximos para as partes superior e inferior ainda não são claras e merecem aprofundamento em estudos posteriores. Entretanto a aplicabilidade da distribuição Weibull e da sua generalização q-Weibull para tratar o fenômeno, assim como a falta de homogeneidade do corpo de prova parecem ser relevantes.

REFERÊNCIAS

- [1] WALLEVIK, J. E., WALLEVIK, O. H. Analysis of shear rate inside a concrete truck mixer. Islândia, 2017.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.
- [3] PETRY, S. B. Estudo da permeabilidade à água na camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de cinza volante. 2004. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS.
- [4] WEIBULL, Waloddi. A Statistical Theory of the Strength of Materials. p. 45, 1939.
- [5] PHAM, H; LAI, C D. On Recent Generalizations of the Weibull Distribution. IEEE Trans. Reliability, v. 56, n. 3, p. 454–458, 2007.
- [6] BERBERAN-SANTOS, M; BODUNOV, E N; VALEUR, B. History of the Kohlrausch (stretched exponential) function: Focus on uncited pioneering work in luminescence. arXiv:0804.1814v1 [physics.hist-ph], 2008. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0804.1814v1>>.
- [7] WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. Journal of applied mechanics, p. 293–297, 1951. Disponível em: <<http://web.cecs.pdx.edu/~cgshirl/Documents/Weibull-ASME-Paper-1951.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2013.
- [9] _____. NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.
- [8] BAK, P. How Nature Works. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5737: cimento Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.
- [11] _____. NBR 7211: agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.
- [12] _____. NBR NM ISO 7500-1: Materiais metálicos – Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial – Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão – Calibração do sistema de medição de força. Rio de Janeiro, 2004. 17 p.
- [13] _____. NBR 5738: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos; procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.
- [14] JOHNSON, L G. The Median Ranks of Sample Values in Their Population with an Application to Certain Fatigue Studies. Industry Mathematics, v. 2, p. 1–9, 1951
- [15] BORGES, Ernesto Pinheiro. Manifestações Dinâmicas e Termodinâmicas de Sistemas Não-Extensivos. Instituto nacional de Física do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Rio de Janeiro, 2004.
- [16] AKAIKE, H. A New Look at the Statistical Model Identification, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-19(6), pp. 716–723, 1974.
- [17] _____. NBR 8953: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.
- [18] ANDRADE, Maria Del Carmen. Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras. São Paulo: Pini, 1992. 104 p.
- [19] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.
- [20] MIYAKE, E. T. Determinação da permeabilidade a gás em concreto usado em repositórios para rejeitos radioativos. 1994. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – e Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares - Ipen, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.pelicano.ipen.br>>. Acesso em: 25 mar. 2019.