

Statistical analysis and conformity testing of concrete in port construction work

Análise estatística e teste de conformidade do concreto de obras portuárias



M. C. LARROSSA^a
milarrossa@gmail.com

M. V. REAL^a
mauroreal@furg.br

C. R. R. DIAS^a
claudio.dias@furg.br

F. C. MAGALHÃES^b
fabiocmagalhaes@gmail.com

Abstract

Conformity control of concrete is part of a range of control and standard methods which must be employed in all construction work to assure its compliance with quality requirements. The compressive strength of the concrete is considered as a random variable that must be controlled by standardized sampling and testing in order to ensure the structural safety. Therefore, the use of a large amount of compressive strength test results of concretes with similar characteristics has been seen as an important tool in the assessment of current standard norms. This paper describes an analysis based on the conformity control used in large port construction works which have recently been carried out in the Rio Grande Port, located in Rio Grande, RS, Brazil. Statistical analyses were performed and acceptance tests of the product were conducted. They were based on the acceptance criteria of different methodologies from different continents and showed the variations that can occur in the results of the conformity testing, depending on the adopted model. It is worth mentioning that the concrete used in port construction works in the region has been in accordance with current Brazilian norms.

Keywords: concrete, port structures, compressive strength conformity control.

Resumo

O controle tecnológico do concreto faz parte de uma gama de controles e métodos normalizados que devem ser empregados em todas as obras para a garantia da conformidade deste produto, visto que a resistência à compressão do concreto é considerada uma variável aleatória que deve ser controlada através de amostragem e realização de ensaios padronizados, podendo assim, garantir a segurança da estrutura. Neste sentido, o uso de uma grande quantidade de resultados de controle tecnológico de concreto com características similares apresenta-se como uma importante ferramenta no processo de aferição das normas técnicas vigentes. O presente trabalho apresenta uma análise com base no controle tecnológico presente em grandes obras portuárias ocorridas nos últimos anos no Porto do Rio Grande, na cidade de Rio Grande - RS. Foram realizadas análises estatísticas e de aceitação do produto, com base nos critérios de aceitação de distintas metodologias de diferentes continentes, mostrando as variações que podem ocorrer nos resultados dos testes de conformidade dependendo do modelo adotado. Verificou-se que a construção das obras portuárias em concreto na região está em conformidade com as normas brasileiras vigentes.

Palavras-chave: concreto, obras portuárias, resistência à compressão, controle tecnológico.

^a Universidade Federal do Rio Grande – FURG; Rio Grande/RS, Brasil;

^b Instituto Federal do Rio Grande do Sul – IFRS, Rio Grande/RS, Brasil.

1. Introdução

O porto marítimo localizado na cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul, é um dos portos com maior atividade no Brasil. Possui oito terminais de administração privados, especializados nas cargas que operam contêineres, graneis agrícolas, petrolíferas, petroquímicas e fertilizantes. Abrigando também, estaleiros destinados à construção e/ou reforma de plataformas de exploração de petróleo.

Visando o atendimento ao mercado consumidor neste porto foram realizadas obras para a melhora das suas características técnicas de navegabilidade, aumento da sua capacidade de recebimento/saída de cargas, redução do tempo de parada de navios para a descarga da carga containerizada e, também, a diversificação das atividades executadas na área portuária. Dentre estas obras foram realizadas a ampliação dos molhes da Barra, a ampliação do cais do terminal de contêineres e o estaleiro Rio Grande.

A ampliação dos molhes, com a utilização de tetrápodes, teve como objetivo a melhora das características técnicas do canal de acesso, possibilitando o aprofundamento da Barra e, por consequência, a possibilidade de aumento da carga transportada pelos navios que chegam ou saem do porto de Rio Grande.

Enquanto que a ampliação do cais do terminal de contêineres tem como objetivo o aumento da sua capacidade de carga/descarga e melhorar a agilidade na movimentação das mercadorias com consequente redução do tempo de permanência dos navios no terminal.

Já a obra da laje de fundo do dique seco é parte importante de um grandioso empreendimento, que é o estaleiro Rio Grande-ERG1, que tem como finalidade principal de construção, conversão e reparo de unidades marítimas para a indústria de petróleo. O dique seco é um dos principais ativos do estaleiro, pois permite a montagem de grandes embarcações/navios/plataformas facilitando o acesso dos blocos à embarcação e permitindo as docagens para correções pós-lançamento.

Figura 1 – Montagem dos tetrápodes da obra de ampliação dos molhes da Barra de Rio Grande (fonte: Migliorini, 2011)



Sendo as principais estruturas destas obras executadas em concreto este artigo apresenta a análise dos resultados obtidos do vasto controle tecnológico deste produto. Os dados foram analisados sob os aspectos estatísticos e de controle de aceitação dos resultados do rompimento de corpos de prova de concreto das obras de ampliação dos molhes (fabricação dos tetrápodes); concreto empregado nas estacas do berço III do cais do terminal de contêineres e da laje de fundo do dique seco do estaleiro.

Como semelhança nas características dos concretos tem-se a resistência característica à compressão de 40,00 MPa aos 28 (vinte e oito) dias, utilização de usinas de concreto especializadas na atividade que atenderam a ABNT NBR 7212 (2012), emprego de rigoroso controle de qualidade durante o preparo, o lançamento, a cura, a moldagem e os ensaios dos corpos de prova até a sua aceitação final. Bem como, o emprego da condição de preparo do tipo A. Os concretos da laje de fundo do dique e tetrápodes são classificados com classe de agressividade ambiental IV e, os concretos das estacas do cais foram considerados, por atender às especificações mínimas da classificação, também, como classe IV de acordo com a ABNT NBR 6118 (2007). Características estas adotadas devido o elevado risco de deterioração das estruturas, visto que foram instaladas/executadas às margens da Laguna dos Patos e do Oceano Atlântico.

1.1 Obra de ampliação dos molhes da Barra de Rio Grande

Os molhes da Barra foram construídos com a função de garantir a navegabilidade do canal de acesso de Rio Grande, mantendo as características do canal sem alterações constantes provocadas pela ação das águas e reduzir o assoreamento do canal. Cada molhe compõe uma lateral do canal de acesso ao Porto de Rio Grande, o molhe oeste no lado do Cassino e o molhe leste no lado de São José do Norte.

A primeira obra para a sua construção foi concluída em 1915 na qual foram utilizadas pedras naturais irregulares em granito. Já a sua ampliação, foi executada no período de 2001 a 2011, com o empregado, além das pedras naturais, blocos pré-moldadas em concreto com peso de 8,00 e 12,50 toneladas, chamadas de tetrápodes.

Os molhes leste e oeste foram estendidos em 350,00 e 700,00 metros, respectivamente, com a utilização de cerca de 1.361.000,00 metros cúbicos de pedra e 12.090,00 unidades de tetrápodes. Os blocos em concreto têm a geometria formada pela intersecção de quatro troncos de cone e, conforme Migliorini (2011) são simplesmente justapostos, encaixados e sobrepostos uns aos outros, formando estruturas mais ou menos regulares e relativamente compactadas ao longo de diques portuários e obras costeiras.

A figura [1] ilustra a montagem dos tetrápodes durante a sua instalação na obra.

Neste artigo é apresentada apenas a análise com os dados do concreto dos tetrápodes de 8,00 toneladas, com traço: 418,00 kg/m³ de cimento, aditivo da marca Glenium® 51 e Metacaulim na proporção de 30,00 kg/m³.

1.2 Obra do berço III do terminal de contêineres de Rio Grande

Com a construção do terceiro trecho o cais de atracação do terminal de contêineres atingiu 900,00 (novecentos) metros de compr-

Figura 2 – Estacas protendidas pré-moldadas (fonte: Banco de imagens FURG)



mento, passando a comportar, a partir do ano de 2008, 03 (três) navios simultaneamente. Em concomitante com a instalação de mais equipamentos fez com que o objetivo de redução do tempo de permanência dos navios no terminal fosse alcançado, aumentando a capacidade de carga e descarga e de escoamento de mercadorias containerizadas.

O cais foi executado com estruturas em concreto armado, a maior parte pré-moldado, sendo estas peças divididas em estacas pré-moldadas protendidas e peças estruturais pré-moldadas. Segundo Gireli (2007) as estacas pré-moldadas protendidas possuem seção circular vazada no centro, com diâmetro interno de 50,00 centímetros, e diâmetro externo de 80,00 centímetros, com comprimento total de 48,00 metros. Enquanto que as peças pré-moldadas do cais possuem seção transversal π .

Neste trabalho será utilizado apenas o banco de dados das estacas pré-moldadas que são apresentadas na figura [2].

O concreto empregado na fabricação das peças teve como especificações a utilização de cimento Portland Pozolânico de fabricação nacional (CP IV-32-RS) na proporção de 400,00 kg/m³ e fator A/C de 0,40. Este cimento é resistente à sulfatos e segue especificações da norma brasileira ABNT NBR 5736 (1991). Foi utilizado como agregado graúdo, brita 1 e agregados miúdos provenientes de jazida, além de aditivo superplastificante, o Glenium® 51.

1.3 Obra da laje de fundo do dique seco

Conforme Favarin (2011) o dique seco é um dos principais ativos de um estaleiro, pois apesar de necessitar de maiores investimentos, facilita o acesso dos blocos à embarcação por estar no plano horizontal e permite docagens para correções pós-lançamento.

O dique seco do estaleiro Rio Grande interliga o estaleiro à Laguna dos Patos de forma direta, com sua base abaixo do nível da água em cerca de 13,80 metros, operando seco durante as atividades de construção e montagem. Porém quando há necessidade de entrada ou saída de embarcações, ele passa por uma operação de enchimento, que possibilita que a embarcação seja docada ou desdocada através da sua flutuação.

As dimensões da laje de fundo são de 350,00 metros de comprimento, 133,00 metros de largura e altura variando de 0,56 a 1,00 metro, demandaram que o lançamento do concreto fosse executada em partes. Conforme registram Larrossa *et. al.* (2011) “devido as suas grandes dimensões o lançamento do concreto da laje de fundo foi executado por etapas, chamadas panos de concretagem, sendo, portanto inevitável a ocorrência de juntas de construção, que foram previamente programadas e, principalmente, impermeabilizadas”.

O concreto foi fabricado com cimento uruguaio da marca ANCAP (na proporção de 380 kg/m³) classe de resistência 40, com grande semelhança deste cimento com a classificação do Cimento Portland Comum CP I, ANBT NBR 5732 (1991). Com agregados graúdo e miúdo oriundos da região de Pelotas – RS, aditivo polifuncional da marca Rheotec® 418 e sílica ativa. A figura [3] ilustra o dique.

Figura 3 – Vista aérea do dique seco do estaleiro Rio Grande - ERG I



Tabela 1 – Coeficiente de variação para variação global pelo ACI 214 (2002) para $f_{ck} > 34,5$ MPa

Classe de operação	Coeficiente de variação para diferentes padrões de controle (%)				
	Excelente	Muito bom	Bom	Razoável	Ruim
Ensaio de obra	< 7,00	7,00 – 9,00	9,00 – 11,00	11,00 – 14,00	> 14,00
Ensaio em laboratório	< 3,50	3,50 – 4,50	4,50 – 5,50	5,50 – 7,00	> 7,00

1.4 Justificativa

Requisito básico em qualquer projeto estrutural em concreto armado ou protendido, a resistência à compressão é a propriedade mais utilizada como critério de aceitação do material. No entanto, a resistência à compressão do concreto caracteriza-se como uma variável aleatória, com uma distribuição de probabilidades que varia em função de características dos materiais, do processo produtivo, execução, entre outros. A variação inerente aos ensaios de aceitação do concreto, sobretudo a resistência, torna fundamental a utilização de metodologias estatísticas para uma correta análise dos dados. O presente trabalho apresenta uma análise com base no controle tecnológico presente em grandes obras portuárias ocorridas nos últimos anos no Porto do Rio Grande, na cidade de Rio Grande – RS, sob o ponto de vista de critérios de aceitação de distintas metodologias de diferentes continentes, mostrando as variações que podem ocorrer nos resultados dos testes de conformidade dependendo do modelo adotado. Além de demonstrar os cuidados atualmente empregados na indústria da construção civil durante a produção de concreto a fim de atender às normas brasileiras.

2. Metodologia

O estudo do controle de qualidade dos concretos foi realizado através da análise estatística dos dados de rompimento dos corpos de prova aos 28 (vinte e oito) dias de idade. Todavia conforme Azevedo e Diniz (2008) é fato bastante conhecido que a resistência à compressão do concreto depende do nível de controle de qualidade exercido em todas as fases da produção do concreto. Para a análise são necessários dados amostrais dos produtos, extraídos ao longo do tempo e do processo produtivo, com o intuito de verificar necessidades de mudança e melhoria deste, para adequação máxima à conformidade. Neste trabalho como ferramentas para a análise estatística dos dados dos resultados da resistência dos exemplares dos concretos em estudo foi realizada a análise detalhada desta característica, utilizando-se a média, o desvio padrão, análise do coeficiente de variação, gráfico de controle de Shewart e aderência às distribuições de probabilidade Normal e Lognormal.

E para a verificação do nível de controle e desempenho do processo produtivo foi realizada a investigação da aceitação dos lotes de concreto pelas normas brasileira (ABNT NBR 12655, 2006), norte-americana (ACI 318, 2011) e europeia (EN 206-1, 2000).

2.1 Média dos valores de resistência dos exemplares rompidos

O valor da resistência à compressão média dos lotes de concreto torna-se importante visto a sua utilização como parte do parâmetro do

cálculo da resistência estimada e, conseqüentemente, verificação da aceitação ou rejeição do concreto. É calculada conforme a equação [1].

$$f_{cm} = \frac{\sum f_i}{n} \quad (1)$$

Onde:

- f_{cm} é o valor da resistência média do lote de concreto, expresso em MPa;
- f_i é o valor das resistências encontradas nos exemplares rompidos, expresso em MPa;
- n é o número de elementos rompidos (exemplares).

2.2 Desvio padrão da amostra

O desvio padrão mede a variabilidade em unidades lineares, desempenhando papel importante nos métodos estatísticos e é mais usado em aplicações do que, por exemplo, a variância (WALPOLE *et. al.*, 2009). É calculado através da utilização da equação [2].

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Onde:

- s é o desvio padrão da dosagem, expresso em MPa;
- f_{cm} é o valor da resistência média do lote de concreto, expresso em MPa;
- f_i é o valor das resistências encontradas nos exemplares rompidos, expresso em MPa;
- n é o número de elementos rompidos (exemplares).

2.3 Coeficiente de variação da amostra

O coeficiente de variação (CV) é outra medida do grau de dispersão existente nos dados em análise, indicando o controle de qualidade do processo produtivo. Quanto menor o valor deste parâmetro mais concentrados em torno da média estarão os valores e melhor será a qualidade do concreto. É obtido através da equação [3].

$$CV = \frac{s}{f_{cm}} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

- CV é o coeficiente de variação do lote, expresso em porcentagem;
- s é o desvio padrão da dosagem, expresso em MPa;
- f_{cm} é o valor da resistência média do lote de concreto, expresso em MPa.

A norma ACI 214 (2002) indica uma escala para avaliação da qualidade do concreto segundo o coeficiente de variação, conforme a tabela [1].

2.4 Gráficos de controle de Shewhart

Os gráficos de controle de Shewhart, metodologia desenvolvida em 1924 pelo físico Walter A. Shewhart, apresentam de forma visual valores incomuns e tendências existentes nos resultados. Fornecem informações do processo produtivo que devem ser interpretados para auxílio na tomada de decisões, reduzindo assim o risco de não conformidades no produto final. São utilizados os limites de controle calculados a partir dos dados e limites de alerta com base na variação do processo de produção (GIBB e HARRISON, 2010).

É constituído de linhas horizontais sendo uma linha central (CL) que é um valor de referência da característica controlada. Existem também linhas que representam o limite superior de controle (UCL) e limite inferior de controle (LCL), podendo ser adicionados o limite de alerta superior (UWL) e o limite de alerta inferior (LWL). A tabela [2] demonstra o cálculo dos limites.

2.5 Distribuição normal

Para os autores Walpole *et. al.* (2009) a distribuição Normal é a mais importante das distribuições de probabilidade e estatística. É representada pela curva normal, em forma de sino, e descreve adequadamente muitos fenômenos que ocorrem na natureza.

De acordo com Devore (2006) a equação matemática para a distribuição de probabilidade da variável normal depende de dois parâ-

metros, média e desvio padrão. Possuindo valores de densidade conforme equação [4].

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot (x-\mu)^2}, -\infty < x < +\infty \quad (4)$$

Onde:

- $\pi = 3,14159\dots$;
- $e = 2,71828\dots$;
- μ = média;
- σ = desvio padrão.

2.6 Distribuição lognormal

Magalhães (2009) relata que a distribuição Lognormal de probabilidade é a distribuição de uma variável aleatória cujo logaritmo segue uma distribuição Normal. O modelo Lognormal de distribuição de probabilidades não possui simetria em relação à média dos resultados. Esta distribuição de probabilidade tem sido muito estudada como alternativa ao modelo proposto por Gauss, quando este último não apresenta aderência adequada aos resultados estudados. A distribuição Lognormal é dada pela equação [5].

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2}, 0 \leq x < \infty \quad (5)$$

$\lambda = E(\ln x)$
 $\xi = \sqrt{\text{Var}(\ln x)}$

Para o teste de aderência dos conjuntos de dados analisados neste artigo foram utilizados os testes de ajustamento de Kolmogorov-Smirnov, assim como Magalhães (2009), para uma significância de 95,00 %. Estes testes foram realizados a fim de determinar qual dos modelos de distribuição, Normal ou Lognormal, representa melhor aderência aos valores de resistência à compressão analisados.

2.7 Aceitação do concreto conforme ABNT NBR 12655 (2006)

A norma brasileira especifica os ensaios e metodologias para o controle de aceitação do concreto, especificando a realização de ensaios de consistência, segundo a ABNT NM 67 (1996) e ensaios de resistência à compressão, segundo a ABNT NBR 5739 (2007).

Tabela 2 - Limites de controle e limites de alerta para formulação dos gráficos de controle de Shewhart		
Limites	Identificação dos limites	Equação
Linha central	LC	f_{cm}
Limite superior de controle	UCL	$f_{cm} + 3.s$
Limite inferior de controle	LCL	$f_{cm} - 3.s$
Limite de alerta superior	UWL	$f_{cm} + 2.s$
Limite de alerta inferior	LWL	$f_{cm} - 2.s$

Tabela 3 - Valores de Ψ_6 segundo a ABNT NBR 12655 (2006)											
Condição de preparo	Número de exemplares										
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	≥ 16
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02

Tabela 4 - Critérios de conformidade da resistência à compressão EN 206-1 (2000)

Produção	Número "n" de resultados de ensaios da resistência à compressão no grupo	Critério 1	Critério 2
		Média dos "n" resultados (f_{cm}) MPa	Qualquer resultado individual de ensaio (f_{ci}) MPa
Inicial	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4,00$
Contínua	≥ 15	$\geq f_{ck} + 1,48.s$	$\geq f_{ck} - 4,00$

Os lotes das amostras são formados por "n" exemplares conforme o método de amostragem a ser utilizado, devendo representar a amassada de concreto em análise. Os exemplares são formados por 02 (dois) corpos de provas cada um e toma-se como resistência do exemplar o maior dos dois valores obtidos no ensaio, tanto quando for utilizada a amostragem parcial ou a amostragem total, $f_{ck,est}^1$ ou $f_{ck,est}^2$, respectivamente. E para a aceitação do lote em ambos os métodos o $f_{ck,est}$ deve ser superior ao f_{ck} .

2.7.1 Controle estatístico do concreto por amostragem parcial ($f_{ck,est}^1$)

A moldagem de corpos de prova é realizada em algumas betonadas, atendendo ao mínimo de exemplares, que para concretos do grupo I (até C 50) são no mínimo 06 (seis) conjuntos. As equações de cálculo dividem-se de acordo com o número de exemplares formados, conforme segue.

a) Número de elementos "n" tal que $6 \leq n < 20$, a resistência característica estimada é determinada pela equação [6]:

$$f_{ck,est}^1 = 2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1} - f_m}{m-1} \tag{6}$$

Onde:

- $m = n/2$;
- f_1, f_2, \dots, f_m são os valores de resistência dos exemplares organizados em ordem crescente.

Atendendo-se ainda a condição de que o valor de $f_{ck,est}$ não deve ser inferior a $\Psi_6.f_1$, adotando para Ψ_6 os valores apresentados na tabela [3], em função da condição de preparo do concreto e do número de exemplares da amostra.

b) Quando o número de elementos for superior a vinte, $n \geq 20$, a resistência característica estimada é dada pela equação [7]:

$$f_{ck,est}^1 = f_{cm} - 1,65.s \tag{7}$$

2.7.2 Controle estatístico do concreto por amostragem total ($f_{ck,est}^2$)

As amostras são extraídas de todas as amassadas de concreto, utilizando-se, também, duas possibilidades para a determinação da resistência característica estimada.

- a) Para número de elementos menor que vinte ($n \leq 20$) o valor da resistência característica estimada do lote é igual ao valor da menor resistência dentre os exemplares ensaiados.
- b) Para $n > 20$, colocam-se os resultados dos ensaios dos exemplares em ordem crescente e o valor da resistência estimada é igual ao valor do elemento que representa o quinto percentil.

2.8 Aceitação do concreto conforme ACI 318 (2011)

A norma norte-americana ACI COMMITTEE 318 (2011) especifica a amostragem de rotina e a fabricação de peças moldadas (cilindros) que devem ser curados e testados sob procedimentos padronizados. Refletindo assim, o valor da resistência potencial do concreto ($f_{ck,est}^4$), em vez da resistência efetiva do concreto na estrutura. As equações [8] e [9] são utilizadas para o cálculo da resistência estimada à compressão, para concretos com $f_{ck} \geq 35,00$ MPa. A notação utilizada foi alterada para melhor entendimento.

$$f_{cm} = f_{ck,est}^4 + 1,34.s \tag{8}$$

$$f_{cm} = 0,90.f_{ck,est}^4 + 2,33.s \tag{9}$$

Sendo que o $f_{ck,est}^4$ do lote é o menor valor calculado dentre as equações específicas.

2.9 Aceitação do concreto conforme EN 206-1 (2000)

A norma europeia indica que devem ser moldados corpos de prova, e as análises através de resultados individuais ou da média dos resultados de ensaio de dois ou mais corpos de prova fabricados de uma amostra e ensaiados com a mesma idade. A aceitação do concreto é avaliada, por dois critérios, em corpos de prova ensaiados com mesma idade:

- a) Grupos de "n" resultados de ensaios consecutivos da resistência média à compressão do concreto (f_{cm}) com ou sem sobreposição (Critério 1);
- b) Cada resultado individual do ensaio de resistência à compressão do concreto (f_{ci}) (Critério 2).

O $f_{ck,est}^5$ é calculado de acordo com o critério adotado conforme indicado na tabela [4].

Tabela 5 (a e b) - Dados do concreto dos tetrápodes (a - lote 1 ao 7 e b - lote 8 ao 14)

a							
Dados	Lotes						
Quinzena	1	2	3	4	5	6	7
Período	05/24/08 06/08/08	06/09/08 06/24/08	06/25/08 07/10/08	07/11/08 07/26/08	07/27/08 08/11/08	08/12/08 08/27/08	08/28/08 09/12/08
n	33	33	63	167	262	122	131
s (MPa)	2,50	2,26	5,04	5,94	4,42	3,48	4,02
CV (%)	5,79	5,32	11,26	11,97	9,05	6,79	8,59
f_{cm} (MPa)	43,09	42,47	44,76	49,63	48,84	51,32	46,84
$f_{ck,est}^1$ (MPa)	38,97	38,74	36,45	39,83	41,55	45,57	40,20
$f_{ck,est}^2$ (MPa)	40,00	40,20	40,00	41,37	41,25	46,73	41,63
$f_{ck,est}^4$ (MPa)	39,74	39,44	36,69	39,77	42,83	46,65	41,45
$f_{ck,est}^5$ (MPa)	39,39	39,12	37,31	40,84	42,30	46,16	40,89

b							
Dados	Lotes						
Quinzena	8	9	10	11	12	13	14
Período	09/13/08 09/28/08	09/29/08 10/14/08	10/15/08 10/30/08	10/31/08 11/15/08	11/16/08 12/01/08	12/02/08 12/17/08	12/18/08 12/26/08
n	72	90	74	68	84	75	25
s (MPa)	3,23	5,26	5,56	3,95	4,08	5,51	4,42
CV (%)	6,85	9,42	9,89	7,02	7,33	9,70	6,84
f_{cm} (MPa)	47,14	55,83	56,23	56,25	55,59	56,84	64,55
$f_{ck,est}^1$ (MPa)	41,82	47,15	47,06	49,73	48,87	47,74	57,27
$f_{ck,est}^2$ (MPa)	42,65	48,89	46,98	50,51	48,10	48,38	56,30
$f_{ck,est}^4$ (MPa)	42,82	48,42	48,08	50,95	50,13	48,88	58,64
$f_{ck,est}^5$ (MPa)	42,37	48,05	48,00	50,40	49,56	48,68	58,02

Tabela 6 - Dados do concreto das estacas do cais do terminal de contêineres

Dados	Lotes				
Mês	1	2	3	4	5
Período	10/09/06 11/06/06	11/10/06 12/07/06	12/11/06 01/08/07	01/10/07 02/01/07	02/12/07 02/27/07
n	39	72	81	99	36
s (MPa)	2,90	4,40	3,82	1,87	2,08
CV (%)	5,17	7,86	6,53	3,02	3,50
f_{cm} (MPa)	56,13	55,99	58,56	61,89	59,50
$f_{ck,est}^1$ (MPa)	51,34	48,72	52,25	58,81	56,07
$f_{ck,est}^2$ (MPa)	51,44	51,44	53,48	59,21	55,77
$f_{ck,est}^4$ (MPa)	52,24	50,09	53,44	59,39	56,71
$f_{ck,est}^5$ (MPa)	51,83	49,47	52,90	59,13	56,42

Tabela 7 (a e b) – Dados do concreto da laje de fundo (a – lote 1 ao 7 e b – lote 8 ao 13)

a							
Dados	Lotes						
Mês	1	2	3	4	5	6	7
Período	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	mai/09	jun/09
n	35	130	106	162	364	441	593
s (MPa)	2,58	4,88	5,00	5,53	3,82	3,69	3,25
CV (%)	4,34	9,50	9,42	11,39	7,59	7,53	6,70
f_{cm} (MPa)	59,45	51,33	53,03	48,55	50,39	49,07	48,52
$f_{ck,est}^1$ (MPa)	55,19	43,28	44,79	39,42	44,08	42,98	43,16
$f_{ck,est}^2$ (MPa)	55,20	42,20	43,50	40,80	44,70	43,30	42,80
$f_{ck,est}^4$ (MPa)	56,00	44,40	45,99	39,62	45,27	44,12	44,16
$f_{ck,est}^5$ (MPa)	55,63	44,11	45,64	40,36	44,73	43,61	43,71

b						
Dados	Lotes					
Mês	8	9	10	11	12	13
Período	jul/09	ago/09	set/09	out/09	nov/09	dez/09
n	158	414	609	892	807	160
s (MPa)	4,66	3,93	4,35	3,40	3,76	4,09
CV (%)	8,84	7,48	8,83	7,10	7,84	8,88
f_{cm} (MPa)	52,79	52,52	49,26	47,98	47,95	46,02
$f_{ck,est}^1$ (MPa)	45,09	46,04	42,08	42,36	41,75	39,27
$f_{ck,est}^2$ (MPa)	45,70	44,80	42,20	42,10	42,00	40,60
$f_{ck,est}^4$ (MPa)	46,54	47,25	43,43	43,42	42,91	40,54
$f_{ck,est}^5$ (MPa)	45,89	46,70	42,82	42,94	42,39	39,97

Tabela 8 – Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov para o concreto dos tetrápodes

Lote	Quant. exemplar (n)	s (MPa)	Diferença máxima		D (0,05; n)	Decisão
			Normal	Lognormal		
1	33	2,50	0,1087	0,1033	0,2367	Lognormal
2	33	2,26	0,1009	0,1104	0,2367	Normal
3	63	5,04	0,1582	0,1512	0,1713	Lognormal
4	167	5,94	0,0495	0,0746	0,1052	Normal
5	262	4,42	0,1029	0,1164	0,0840	-
6	122	3,48	0,0496	0,0571	0,1231	Normal
7	131	4,02	0,1287	0,1135	0,1188	Lognormal
8	72	3,23	0,0868	0,0750	0,1603	Lognormal
9	90	5,26	0,0994	0,0857	0,1434	Lognormal
10	74	5,56	0,0739	0,0832	0,1581	Normal
11	68	3,95	0,0746	0,0720	0,1649	Lognormal
12	84	4,08	0,0819	0,0945	0,1484	Normal
13	75	5,51	0,0855	0,0699	0,1570	Lognormal
14	25	4,42	0,1873	0,1987	0,2720	Normal

3. Resultados e discussões

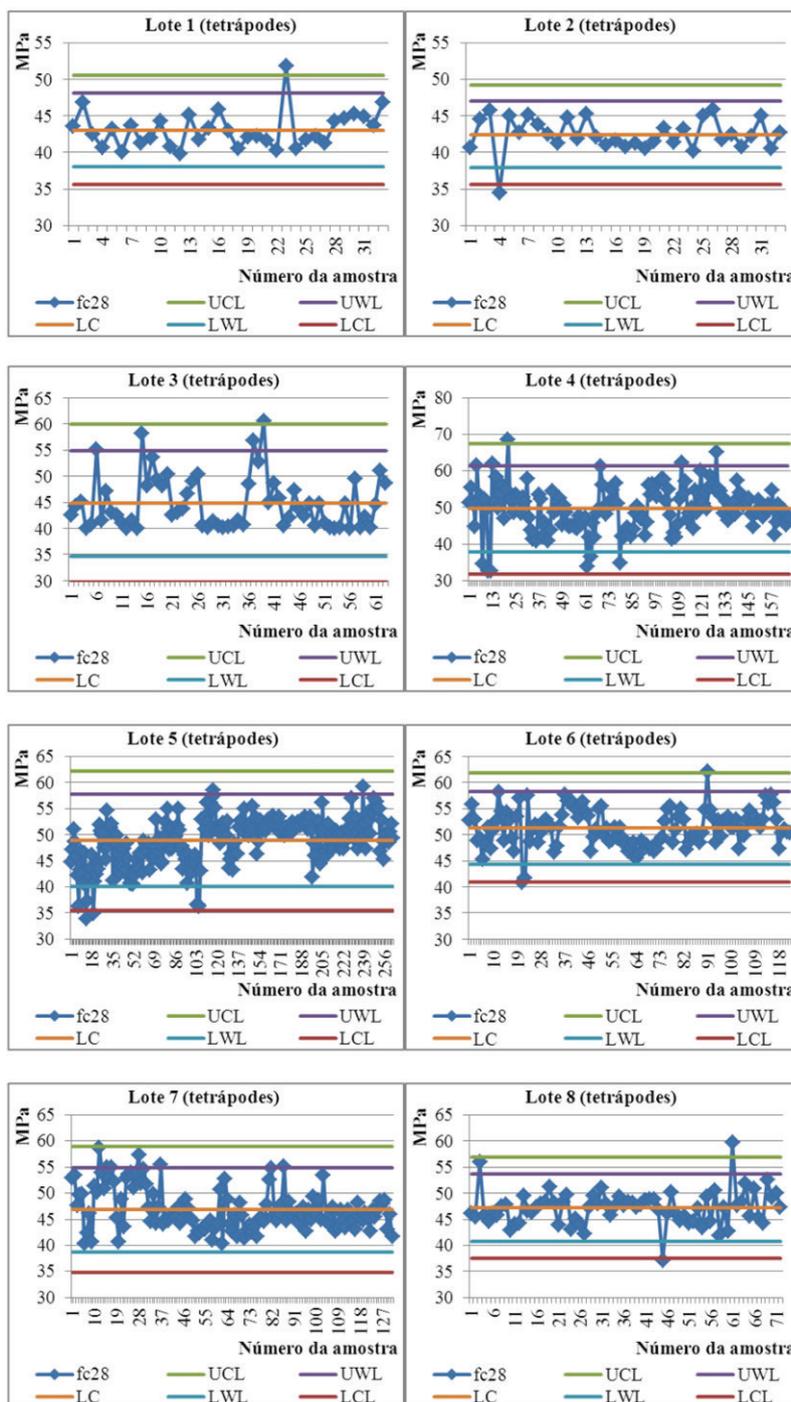
3.1 Apresentação dos dados

Para o concreto dos tetrápodes de 8,00 toneladas foram com-

pilados os valores de rompimento no período de 24/05/2008 à 26/12/2008, dividindo-os em quatorze lotes, conforme resumo da mostrado na tabela [5 (a e b)].

O concreto empregado nas estacas do cais foi produzido no período de 09/06/2006 à 27/02/2007 e os dados foram agrupados em

Figura 4 – Lotes 1 ao 8 do gráfico de Shewhart para os dados dos tetrápodes



cinco lotes para análise conforme a tabela [6]. Para o concreto da laje de fundo, parte em análise neste trabalho, os corpos de prova foram moldados entre os dias 27/11/2008 e 10/11/2009, com ensaios realizados no período de dezembro de 2008 a dezembro de 2009. Os dados foram organizados em treze lotes, de acordo com a tabela [7 (a e b)].

3.2 Análise estatística

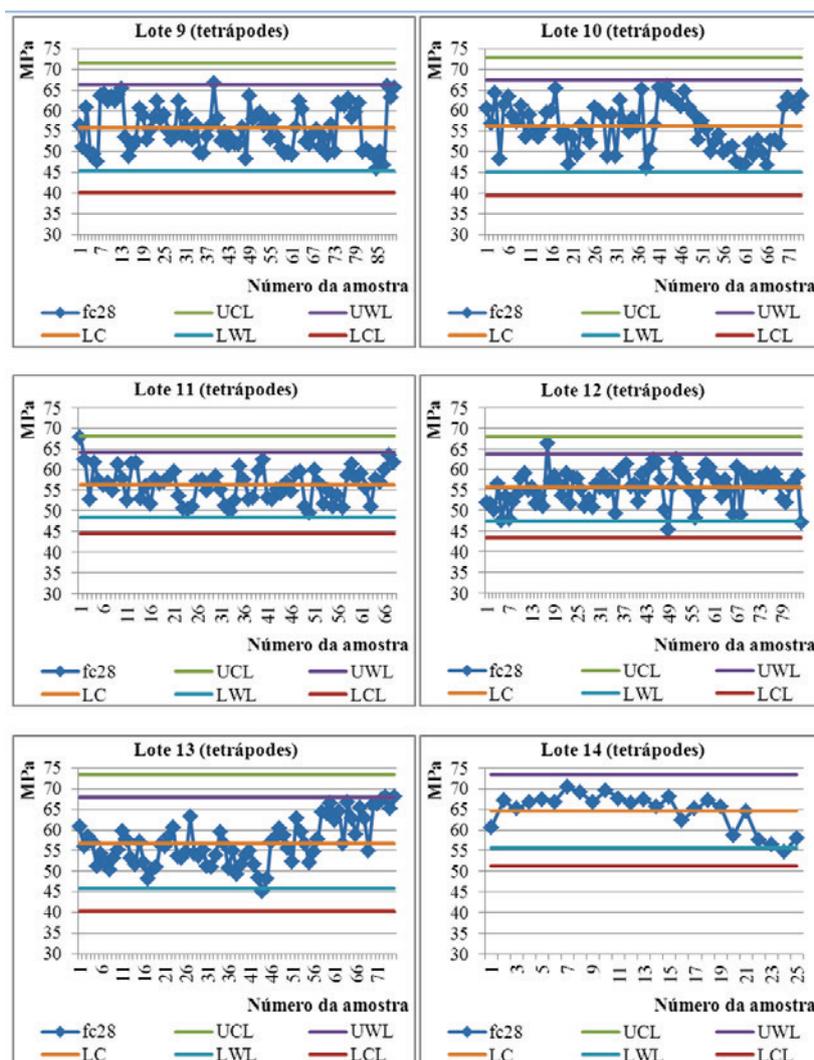
Para a classificação da ACI 214 (2002) os valores dos coeficientes de variação dos concretos ficam na maior parte classificados entre excelente, muito bom e bom e, poucos lotes enquadrados no controle razoável.

A análise com a utilização de Shewhart apresentou principalmente pontos fora dos limites de alerta, porém, também, há alguns pontos fora dos limites de controle nos três grupos de dados.

Os últimos seis lotes (lote 9 ao 14) do concreto dos tetrápodes tiveram as maiores médias, ou seja, maiores valores para o parâmetro central dos gráficos, resultando nos maiores valores para os limites de controle e de alerta. O lote 10 foi o único que os dados dos exemplares não ultrapassaram nenhum dos limites. Os limites de controle foram excedidos em oito dos 1.299,00 exemplares, cerca de 0,62 %, enquanto que os limites de alerta tiveram 38,00 pontos em que foram excedidos, resultando em 2,93 %.

O concreto das estacas do terminal de contêineres mostrou dois dos 327,00 exemplares, cerca de 0,61 % pontos além dos limites de controle, enquanto que o limite superior de alerta teve onze pontos em que foram excedidos, resultando em 3,36 %. O lote 5 não teve valores dos exemplares acima ou abaixo os limites, enquanto que os demais tiveram características diferentes, ultrapassando os limites de controle inferior (lote 4) e o superior, no lote 2. Para os resultados de rompimento de corpos de prova da laje de

Figura 5 – Lotes 9 ao 14 do gráfico de Shewhart para os dados dos tetrápodes



fundo, num total 4.871,00 exemplares, sete pontos aleatórios foram detectados em quatro lotes excedendo o limite superior (um ponto nos lotes 7 e 8 e dois pontos nos lotes 5 e 8, cada um) e um lote para o limite inferior (no lote 13), representando 0,14 %, já os limites de alerta em cerca de 3,16 % dos exemplares.

As figuras [4], [5], [6], [7] e [8] demonstram os gráficos de Shewhart para os lotes dos concretos em análise.

Em proporção geral, ambas as distribuições Normal e Lognormal mostraram-se adaptadas aos valores de resistência à compressão dos concretos. Nos dados tiveram alguns poucos lotes que não se enquadram satisfatoriamente em nenhuma das distribuições, porém quando o resultado de uma distribuição encontrou enquadramento a outra obteve mesmo resultado. Por isso pode dizer que ambos os modelos representam de forma adequada os dados. Pois na maior parte dos lotes os valores da diferença máxima são inferiores ao parâmetro de comparação $D(0,05; n)$. As tabelas [8],

[9] e [10] mostram os resultados desta avaliação, para o concreto dos tetrápodes, estacas do cais e laje de fundo, respectivamente.

3.3 Análise dos critérios de aceitação

Assim como especificam as normas brasileiras, as obras em análise tiveram rigoroso controle de qualidade nas suas etapas construtivas. Para o concreto, aos 28 (vinte e oito) dias, da laje de fundo e dos tetrápodes o critério utilizado durante a fabricação foi a amostragem a total da ABNT NBR 12655 (2006) e para as estacas foi a amostragem parcial. O estudo com relação ao critério de aceitação das normas brasileira, norte americana e europeia, mostrou que para os dados da laje de fundo dois dos lotes estariam não conformes, o lote 4, pela norma ABNT NBR 12655 (2006) – critério de amostragem parcial e pela ACI 318 (2011) e o lote 13 pela ABNT NBR 12655 (2006) – critério de amostragem parcial e pela EN 206-1 (2000).

Figura 6 – Lotes 1 ao 5 do gráfico de Shewhart para os dados das estacas do terminal

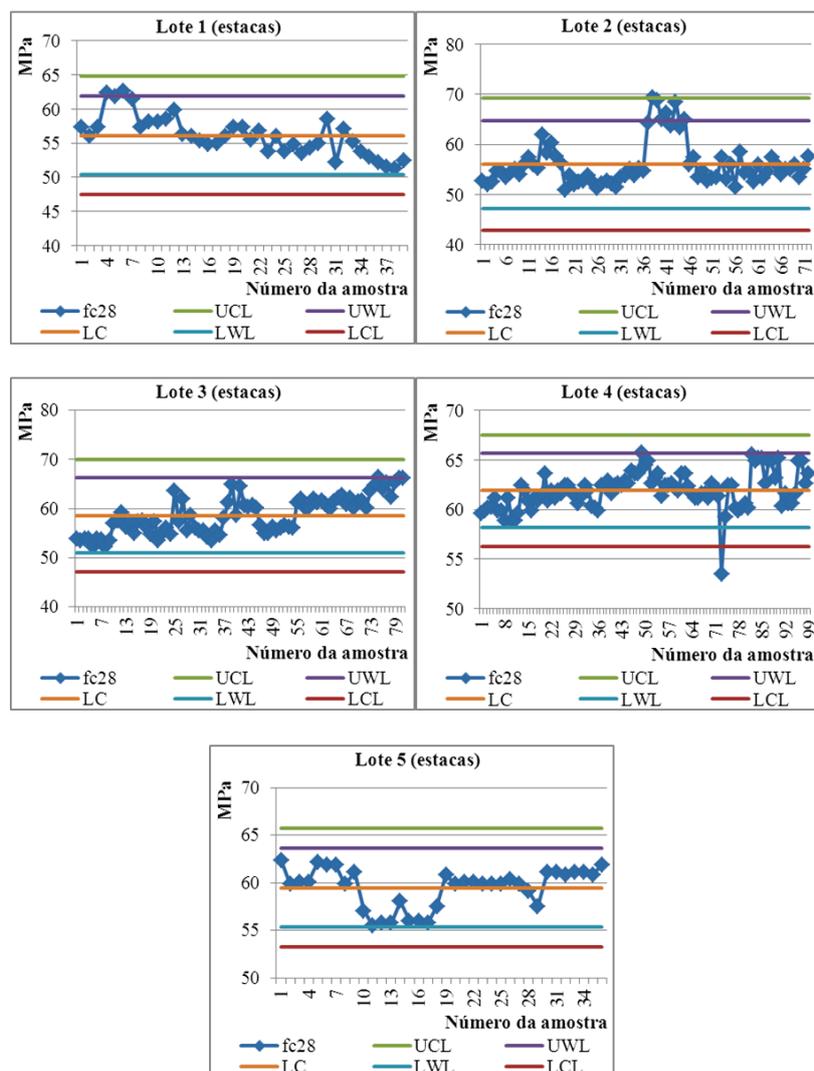


Figura 7 - Lotes 1 ao 8 do gráfico de Shewhart para os dados da laje de fundo

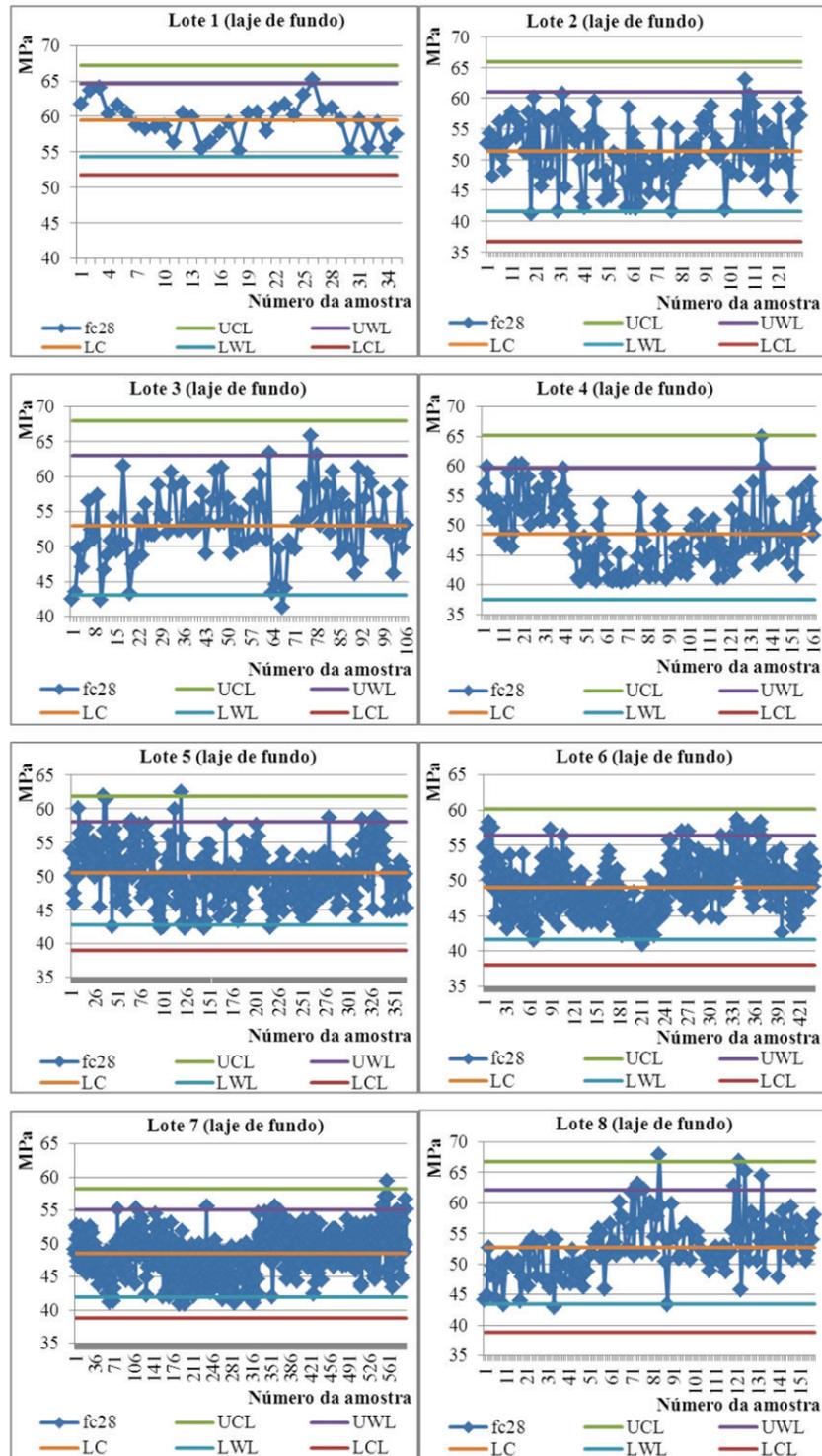


Figura 8 – Lotes 9 ao 13 do gráfico de Shewhart para os dados da laje de fundo

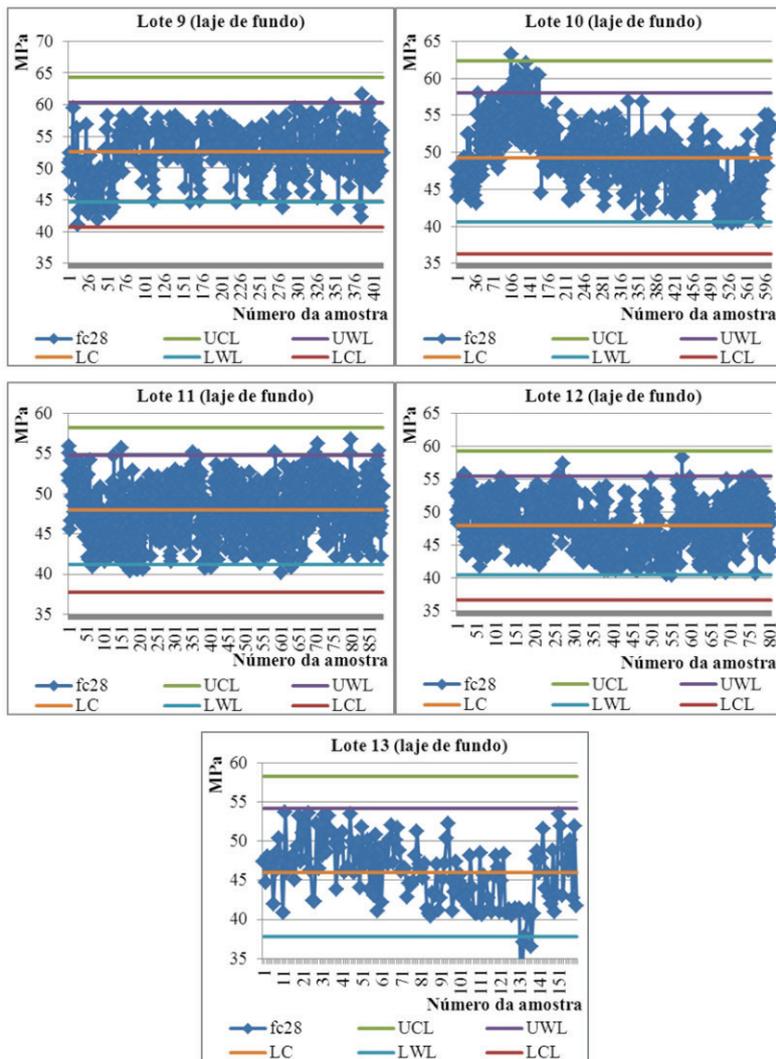


Figura 9 – Resistência estimada pelos métodos da ANBT NBR 12655 (2006), ACI 318 (2011) e EN 206-1 (2000) do concreto da laje de fundo

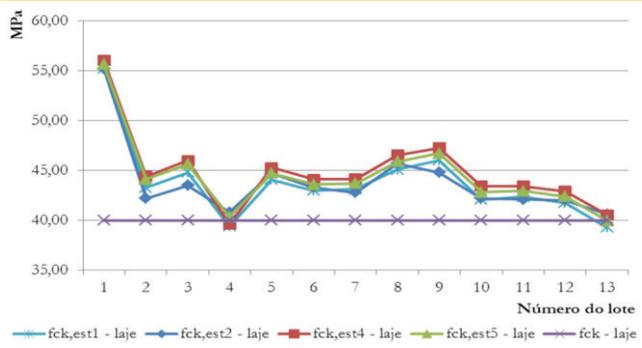


Figura 10 – Resistência estimada pelos métodos da ANBT NBR 12655 (2006), ACI 318 (2011) e EN 206-1 (2000) do concreto dos tetrápodes

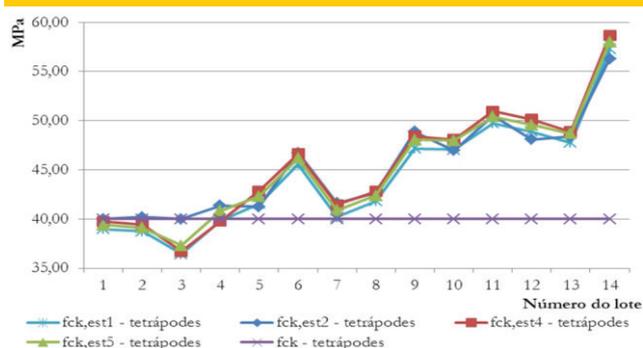


Tabela 9 – Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov para os dados das estacas do cais do terminal

Lote	Quant. exemplar (n)	s (MPa)	Diferença máxima		D (0.05; n)	Decisão
			Normal	Lognormal		
1	39	2,90	0,1123	0,1032	0,2178	Lognormal
2	72	4,40	0,2195	0,2041	0,1603	-
3	81	3,82	0,1220	0,1152	0,1511	Lognormal
4	99	1,87	0,1025	0,0995	0,1367	Lognormal
5	36	2,08	0,2310	0,2366	0,2267	-

Tabela 10 – Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov para o concreto da laje de fundo

Lote	Quant. exemplar (n)	s (MPa)	Diferença máxima		D (0.05; n)	Decisão
			Normal	Lognormal		
1	35	2,58	0,0801	0,0838	0,2299	Normal
2	130	4,88	0,0387	0,0458	0,1193	Normal
3	106	5,00	0,0568	0,0556	0,1321	Lognormal
4	162	5,53	0,0671	0,0668	0,1069	Lognormal
5	364	3,82	0,0617	0,0474	0,0713	Lognormal
6	441	3,69	0,0402	0,0370	0,0648	Lognormal
7	593	3,25	0,0384	0,0517	0,0558	Normal
8	158	4,66	0,0739	0,0578	0,1082	Lognormal
9	414	3,93	0,0696	0,0722	0,0668	-
10	609	4,35	0,0261	0,0279	0,0551	Normal
11	892	3,40	0,0504	0,0531	0,0455	-
12	807	3,76	0,0541	0,0540	0,0479	-
13	160	4,09	0,0582	0,0627	0,1075	Normal

E para os dados dos tetrápodes as normas brasileira (método da amostragem parcial), norte americana e europeia apresentariam não conformidades em até quatro lotes. Os lotes de números 1, 2, 3 e 4 teriam não conformidade pela amostragem parcial da ABNT NBR 12655 (2006) e pela ACI 318 (2011). Ou então, os lotes 1, 2 e 3 pela EN 206-1 (2000).

Já os lotes do concreto das estacas pré-moldadas protendidas do cais tiveram conformidade e seriam aceitos com folga por todos os métodos/critérios de aceitação das normas analisadas.

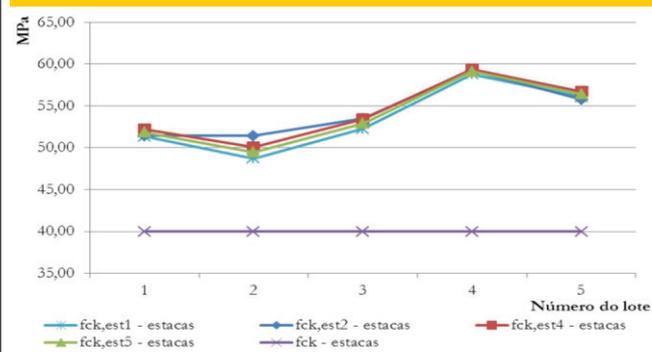
Nas figuras [9], [10] e [11] pode-se, também, verificar que os valores da resistência estimada pela ACI 318 (2011), resultaram em valores superiores às demais normas, seguido pela EN 206-1 (2000) e, depois, pela ANBT NBR 12655 (2006), método da amostragem total. Isto pode ser explicado pelo fato desta metodologia apresentar diferença na definição do f_{ck} , quando comparado aos modelos brasileiro e europeu. Pois na composição as equações do ACI 318 (2011) consideram que 9,00 % dos valores podem ser inferiores ao valor de f_{ck} de projeto, diferente das demais normas que consideram valores inferiores de 7,00 % e 5,00 % para a EN 206-1 (2000) e ABNT NBR 12655 (2006), respectivamente.

As análises estatísticas realizadas mostraram que todos os concretos analisados; laje de fundo, tetrápodes e estacas do cais; atenderam aos requisitos de qualidade em relação à resistência prescritos pelas normas brasileiras em todas as etapas do processo produtivo.

4. Conclusões

Nas análises realizadas com relação ao coeficiente de variação dos lotes pode-se concluir que durante o processo de produção

Figura 11 – Resistência estimada pelos métodos da ABNT NBR 12655 (2006), ACI 318 (2011) e EN 206-1 (2000) do concreto das estacas do terminal



houve um bom controle de qualidade buscando a aceitação de todos os lotes.

A aplicação do método de controle de Shewhart mostrou, de forma clara e simples, a sensibilidade desta metodologia para detectar pequenas alterações nos resultados durante o processo produtivo. Devido a simplicidade de aplicação deste tipo de gráfico de controle o mesmo pode ser empregado para o controle de muitos processos apoiando na constatação de mudanças nas características dos produtos e na verificação de não conformidades.

Para a verificação dos critérios de aceitação das normas analisadas todos os 32,00 (trinta e dois) lotes verificados, para as três obras, tiveram aceitação total pela ABNT NBR 12655 (2006), critério de amostragem total, $f_{ck,est}^2$. Sendo que no caso dos 05 (cinco) lotes de concreto das estacas os mesmos também tiveram aceitação total pelo critério de amostragem parcial, $f_{ck,est}^1$, critério este utilizado durante o processo de produção do concreto.

Já o critério de amostragem parcial da ABNT NBR 12655 (2006) se mostrou o mais rígido, com rejeição de alguns lotes no concreto empregado na laje de fundo e nos tetrápodes. Enquanto que a ACI 318 (2011) se mostrou menos rígida do que as demais normas, seguida pela EN 206-1 (2000). Mesmo que ambas tenham resultado em rejeição de alguns lotes, nos demais os valores das resistências à compressão estimada são superiores aos computados pelos métodos da norma brasileira.

Este trabalho evidenciou o minucioso controle tecnológico do concreto produzido e empregado nas estruturas da laje de fundo do dique seco do Estaleiro Rio Grande – ERG1, tetrápodes utilizados na ampliação dos molhes da Barra do Rio Grande e estacas da ampliação do cais do Terminal de Contêineres do Rio Grande. Controle este que corroborou para a aceitação destas estruturas, confirmação da confiabilidade e segurança necessários e gerou um banco de dados com grande número de resultados experimentais da comprovação da resistência à compressão potencial dos concretos destas infraestruturas.

5. Referências bibliográficas

- [01] ACI COMMITTEE 214. Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-02). American Concrete Institute, 2002.
- [02] ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11). American Concrete Institute, 2011.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Comum. NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Pozolânico. NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2007.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Execução de concreto dosado em central. NBR 7212. Rio de Janeiro, 2012
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. NBR 12655. Rio de Janeiro, 2006.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1996.
- [10] AZEVEDO, C. P. B.; DINIZ, S. M. C. Estudo probabilístico da resistência à compressão de concretos utilizados em fundações. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais..., Salvador – BA, 2008.
- [11] DEVORE, Jay L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. Tradução: Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. E. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2006.
- [12] EN 206-1. Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization. 2000.
- [13] FARIA, Regina H. Y.; REAL, Mauro V.; DIAS, Claudio R. R. Trabalho da disciplina de Confiabilidade em Engenharia Oceânica. 2010. Universidade Federal do Rio Grande.
- [14] FAVARIN, J. V. R. Metodologia de formulação de estratégia de produção para estaleiros brasileiros. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Ed. Rev. São Paulo, 2011. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.
- [15] GIBB Ian; HARRISON Ton. Use of control charts in the production of concrete. Ed. Rev. MPA/BRMCA – ERMCO. 2010.
- [16] GIRELI, Everton Luiz. Concretos pré-fabricados de elevado desempenho da obra do terminal de contêineres do Porto de Rio Grande – Controle de qualidade e os métodos estatísticos. Trabalho de conclusão do curso da Engenharia Civil. Departamento de Materiais e Construção da FURG. Rio Grande, 2007.
- [17] MAGALHÃES, Fabio Costa. Estudo probabilístico da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão dos concretos utilizados na construção do dique seco do estaleiro rio grande, no Superporto, em Rio Grande – RS. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande. Ed. Rev. Rio Grande, 2009. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.
- [18] LARROSSA, M. C.; MAGALHÃES, F. C.; REAL, M. V. Concreto da laje de fundo do dique seco do Polo Naval do Rio Grande: análise estatística básica. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. Anais. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1. p. 1-16.
- [19] MIGLIORINI, A. V. Estudo de fibras de aço em blocos de concreto para a possível utilização em carapaça de molhes. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande. Ed. Rev. Rio Grande, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.
- [20] WALPOLE, Ronald E. et. al. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. Tradução Luciane F. Pauleti Vianna. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.