

MODELAGEM ESTATÍSTICA DO TEMPO DE PEGA DO CIMENTO DE UMA EMPRESA DO RAMO DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

STATISTICAL MODELING OF CEMENT SETTING TIME IN A CONSTRUCTION COMPANY.

MODELADO ESTADÍSTICO DEL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO EN UNA EMPRESA CONSTRUCTORA.

Kaique Silva Sousa ¹
Marcelo de Paula ²

RESUMO: Neste artigo apresentamos um estudo de modelagem estatística via regressão do tempo de pega do cimento. Consideramos como variáveis explicativas as componentes químicas e físicas de sua composição. Utilizamos os dados dos relatórios de ensaio da Empresa Itambé. Realizamos um resgate bibliográfico e uma análise descritiva das variáveis de cada tipo de cimento envolvido no estudo, bem como análise de correlações. Na análise inferencial realizamos testes de comparação seguido da modelagem do tempo de pega em função das variáveis da composição dos cimentos. Apresentamos resultados comparativos, definindo as variáveis que mais influenciam no tempo de pega de cada cimento.

Palavras Chave: Modelagem estatística. Tempo de pega. Cimento portland. Modelos lineares generalizados. Regressão.

ABSTRACT: In this article we present a study of statistical modeling via regression of cement setting time. We consider the chemical and physical components of its composition as explanatory variables. We used data from the test reports of Empresa Itambé. We performed a bibliographic review and a descriptive analysis of the variables of each type of cement involved in the study, as well as correlation analysis. In the inferential analysis, we performed comparison tests followed by modeling the setting time as a function of the cement composition variables. We present comparative results, defining the variables that most influence the setting time of each cement.

Keywords: Statistical modeling. Catch time. Portland cement. Generalized linear models. Regression.

RESUMEN: En este artículo presentamos un estudio de modelado estadístico mediante regresión del tiempo de fraguado del cemento. Consideramos los componentes químicos y físicos de su composición como variables explicativas. Utilizamos datos de los informes de prueba de la Empresa Itambé. Se realizó una revisión bibliográfica y un análisis descriptivo de las variables de cada tipo de cemento involucradas en el estudio, así como un análisis de correlación. En el análisis inferencial, realizamos pruebas de comparación seguidas de modelado del tiempo de fraguado en función de las variables de composición del cemento. Presentamos resultados comparativos, definiendo las variables que más influyen en el tiempo de fraguado de cada cemento.

Palabras-clave: Modelado estadístico. Tiempo de captura. Cemento Portland. Modelos lineales generalizados. Regresión.

Submetido 21/02/2022

Aceito 12/12/2022

Publicado 13/02/2023

¹ Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-9517>. E-mail: kaiquesousa@ufob.edu.br.

² Doutor em Estatística, Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0234-7270>. E-mail: marcelop@ufob.edu.br.

Introdução

O cimento se caracteriza por um pó fino com características aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, originário da palavra “caementum”, do latim significa pedra natural de rochedos e não esquadrejada. Um construtor inglês, Joseph Aspid, em 1824, na ilha britânica de Portland, obteve através de uma combinação de calcário de argila, que após pulverização e calcinação, formava-se um composto com alto poder ligante e o denominou como Cimento de Portland. Essa substância, após adição de água, começa um processo de solidificação ao entrar em contato com o ar e depois de seco mesmo submetido novamente a água não irá se decompor; além disso, esse composto possuía altas resistências mecânicas.

Existem no Brasil aproximadamente cinco tipos básicos de cimento e três especiais, cada um com suas características e propriedades, sendo a diferença apenas na composição; por exemplo, o gesso no cimento altera suas características de forma que aumenta a pega, a escória aumenta sua durabilidade na presença de sulfato, calcário pode ser utilizado em maior quantidade reduzindo assim o custo do cimento. Neste artigo será abordado o cimento de Portland composto CP II-F-32, que é o cimento de Portland com a adição de material carbonático, CP II-Z-32 que é o cimento de Portland com adição de material pozolânico (6 a 14% de sua composição), CP IV-32-RS é o cimento Portland com adição de material pozolânico (15 a 50% de sua composição), tornando-o resistente a sulfatos com baixo calor de hidratação, CP V-ARI é o cimento Portland com alta resistência inicial e alta reatividade em baixas idades, CP II-F-40 é o cimento de Portland com adição de calcário, possuindo assim um desempenho superior aos outros.

Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de determinação de variáveis químicas e físicas da composição dos cimentos que são influentes no tempo de pega para cada tipo, por meio da modelagem estatística. Inicialmente, foi realizada uma análise descritiva dos tipos de cimento envolvidos no estudo, bem como as variáveis estudadas, seguido de um resgate bibliográfico do método de modelagem estatística, testes de comparação e, por fim, modelagem do tempo de pega em função das variáveis químicas e físicas da composição dos cimentos. Para isso, usamos relatórios de ensaio de cinco tipos de cimento (CP II-F-32, CP II-Z-32, CP IV-32-RS, CP V-ARI, CP II-F-40), provenientes da Empresa Itambé.

Metodologia

Nesta pesquisa atribuímos uma abordagem quantitativa com uma natureza aplicada cujos objetivos são descrever e explicar o comportamento do tempo de pega do cimento por meio de outras variáveis que o compõem. Embora trata-se de uma pesquisa que envolve experimentos acerca dos ensaios elaborados e divulgados pela Empresa Itambé, todo o procedimento de obtenção dos dados foi documental, já que os dados e as informações quantitativas contidas nos relatórios de ensaios laboratoriais dos tipos de cimento estão disponibilizados pela empresa Itambé, por meio de seu site.

No que tange as etapas da pesquisa, iniciamos com uma busca virtual dos dados contidos nos relatórios disponibilizados pela empresa. De posse do banco de dados dos cinco tipos de cimentos, fizemos a análise e a modelagem estatística em três abordagens que se intercomunicam: análise descritiva, análise inferencial e ajuste dos modelos de regressão linear (BUSSAB & MORETTIN, 2013).

Tipos de cimento

Abordamos neste artigo cinco tipos de cimento, a saber:

CP II-F-32: Cimento Portland composto com filer, cujas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. Recomenda-se não utilizar na necessidade de desforma rápida sem cura térmica, concreto protendido pré-tensionado e em meios fortemente agressivos. Este cimento atende à NBR 16697. Tem adição de filer calcário, em teor entre 11 e 25%.

CP II-Z-32: Cimento Portland composto com pozolana, cujas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. Recomenda-se não utilizar na necessidade de desforma rápida sem cura térmica. Este cimento atende à NBR 16697 e sua composição leva de 6 a 14% de pozolana.

CP IV-32 RS: Cimento Portland Pozolânico resistente a sulfatos com baixo calor de hidratação, possibilitando o uso em concretagem de grandes volumes e a temperaturas elevadas. Além disso, o alto teor de pozolana (15 a 50% em sua composição) proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. Não é recomendado para uso em argamassa armada, concreto de desforma rápida sem

cura térmica e concreto protendido pré-tensionado. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento. Este cimento atende à NBR 16697.

CP V-ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial tem alta reatividade em baixas idades por conta do grau de moagem a que é submetido. O clínquer é o mesmo utilizado em um cimento convencional, mas permanece no moinho por mais tempo. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais nas primeiras idades, proporcionando maior rendimento ao concreto. É utilizado onde se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação, não é indicado para concreto massa. Este cimento atende à NBR 16697. Contém adição de até 10% de filer calcário.

CP II-F-40: Cimento Portland composto de filer calcário (11 a 25% em sua composição) se destaca pelo maior grau de finura, proporciona uma maior resistência em todas as idades. Utilizado em concreto armado, argamassa estabilizada, concreto para pavimentos, pisos industriais, artefatos de cimento e concreto protendido. Não é recomendado para meios agressivos, concreto com agregados reativos, concreto magro, solo cimento e concreto massa. Este cimento atende à NBR 16697.

Variáveis químicas

Com respeito ao elenco de variáveis químicas consideradas neste trabalho temos:

Al₂O₃ (Óxido de Alumínio); **SiO₂** (Óxido de Silício); **Fe₂O₃** (Óxido de Ferro); **CaO** (Óxido de Cálcio): NBR 14656 – Óxidos formadores dos complexos químicos básicos do cimento C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF. A determinação destas porcentagens, por espectrometria de raios X, permite o cálculo de índices de caracterização (índice de Hidraulicidade, Fator de Saturação em Cal, Módulos de Sílica e de Alumínio).

MgO: NBR 14656 – (Óxido de Magnésio) Teor controlado por ser expansivo.

SO₃: NBR 14656 – (Trióxido de Enxofre) Dado utilizado como indicador da quantidade de gesso (regulador do tempo de pega) adicionado ao cimento.

Perda ao Fogo: NBR NM 18 – Perda de massa por calcinação a 950°C. Indica início da hidratação e presença de CaCO₃ (por adição ou recarbonatação).

CaO Livre: NBR NM 12 – Teor controlado por ser expansivo. Inerente à fabricação do cimento, decorre da não combinação integral das matérias-primas durante a clínquerização.

Resíduo Insolúvel: NBR NM 15 – Porção do cimento que não é solúvel em ácido clorídrico diluído a 10% em ebulição. Indica quantidade de componentes não-hidráulicos no cimento.

Equivalente Alcalino: NBR 14656 – Expressa a quantidade de Na_2O e K_2O . Teor controlado porque, em contato com agregados reativos, os álcalis podem formar compostos expansivos.

Variáveis físicas

Quanto as variáveis físicas associadas ao cimento elencamos:

Tempo de pega – NBR NM 65: Tempo decorrido entre o lançamento de água e o enrijecimento total da pasta. Neste artigo assumimos o tempo de pega do cimento como sendo a variável resposta adotada.

Blaine – NBR 16372: Superfície específica, do cimento Portland e outros materiais em pó, determinados através de um aparelho chamado permeabilímetro. Caracteriza a finura, que influi no grau de atividade do cimento.

Expansibilidade a quente – NBR 11582: Afastamento das extremidades da agulha de Le-Chatelier medido após cura em ebulição. Os dados observados sobre esta variável para os cinco tipos de cimentos assumem apenas três valores numéricos: zero, meio e um.

Consistência normal – NBR NM 43: Consistência na qual a sonda de Tetmajer penetra uma distância de (6 ± 1) mm da placa base.

Finura na peneira #200 – NBR 11579: Massa retida na peneira 200, com malha de abertura 0,075 mm.

Finura na peneira #325 - NBR 11579: Massa retida na peneira 325, com malha de abertura 0,044 mm.

Análise e modelagem estatística

Com relação à análise sob a abordagem descritiva das variáveis químicas e físicas de cada um dos cinco tipos de cimentos, adotamos as seguintes medidas: Valor Mínimo, Valor

Máximo, Valor Médio, Desvio-Padrão Amostral e Coeficiente de Variação em % (GOMES, 1990).

Na análise inferencial realizamos o procedimento da Análise de Variância Fator Único (ANOVA – *One Way*) para comparação entre os 5 tipos de cimentos, quanto aos tempos médios de pega. Neste artigo, o tempo de pega do cimento é a diferença entre o tempo inicial e o tempo final de pega em minutos. Valores de *p-value* menores do que o nível de significância adotado de 0,05 (ou 5%) implica que há pelo menos um tipo de cimento como tempo médio de pega diferente dos demais. É importante destacar que, para a realização da ANOVA, foi verificada anteriormente a normalidade dos dados por meio do teste de *Shapiro-Wilk*, a 5% de significância, para cada um dos cinco tipos de cimentos.

Para a modelagem estatística, adotamos os modelos de regressão linear para o ajuste da variável resposta tempo de pega do cimento, após a verificação de sua normalidade. As componentes físicas e químicas de cada tipo de cimento compuseram o vetor de variáveis explicativas. Os modelos clássicos de regressão são utilizados para estudar e estabelecer uma relação entre uma variável de interesse, denominada variável resposta ou variável dependente, e um conjunto de fatores ou atributos, chamados de variáveis de entrada ou variáveis explicativas (McCULLAGH, et. Al., 1989).

O modelo de regressão linear múltiplo é expresso por

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Em que:

Y_i : É a variável resposta referente a *i*-ésima observação, com $i = 1, 2, \dots, n$.

β_0 : É o coeficiente linear da reta, também denominado de intercepto da reta.

β_j : É o *j*-ésimo coeficiente de regressão associado a *j*-ésima variável explicativa, com $j = 1, 2, \dots, k (k \geq 2)$.

ε_i : É o *i*-ésimo erro associado a *i*-ésima observação, seguindo uma distribuição normal com média zero e variância constante σ^2 , isto é, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$, com $i = 1, 2, \dots, n$.

Matricialmente temos

$$Y = XB + \varepsilon$$

Onde:

- Y : É a matriz linha de dimensão $n \times 1$ que denota o vetor de observações da variável resposta, isto é, $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$.
- X : É a matriz de dimensão $(k + 1) \times n$ que denota a matriz de delineamento composta pelas observações das variáveis explicativas.
- B : É a matriz linha de dimensão $(k + 1) \times 1$ que denota o vetor dos coeficientes de regressão, isto é, $B = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)^T$.
- ε : É a matriz linha de dimensão $n \times 1$ que denota o vetor de erros aleatórios, isto é, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)^T$.

O vetor de estimadores dos coeficientes de regressão $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k)^T$ é obtido via o método dos mínimos quadrados por meio da expressão (McCULLAGH, et. Al., 1989):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Em que:

- $\hat{\beta}$: É a matriz linha de dimensão $(k + 1) \times 1$ que denota o vetor de estimativas dos coeficientes de regressão, isto é, $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k)^T$.
- X : É a matriz de dimensão $(k + 1) \times n$ que denota a matriz de delineamento composta pelas observações das variáveis explicativas.
- X^T : É a matriz transposta de X com dimensão $n \times (k + 1)$.
- Y : É a matriz linha de dimensão $(k + 1) \times 1$ que denota o vetor de observações da variável resposta, isto é, $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$.

Seleção de variáveis

Adotamos o Método do *Stepwise*, esta ferramenta é utilizada na construção de modelos para identificar um subconjunto útil de variáveis preditoras. O *Stepwise* pode ser aplicado de três formas, sendo eles: (1) *forward*, quando cada preditor é adicionado individualmente na equação; (2) *backward* quando todos os preditores são adicionados na equação de uma única vez e são retirados um por um, até sobrar apenas os preditores; (3) *blockwise* quando os preditores são adicionados na equação em blocos. Este método costuma ser uma estratégia

utilizada para estudos explanatórios, quando o pesquisador não possui uma teoria consistente sobre o fenômeno estudado. Em regressão desta natureza a seleção dos preditores para a equação é realizada estatisticamente, sem a necessidade de um modelo teórico a ser seguido. Neste tipo de estudo, o pesquisador elabora um modelo teórico de investigação ao qual inclui suposições acerca das relações entre as variáveis de estudo, porém, não há afirmações consistentes sobre essas relações.

O processo consiste na adição da variável mais significativa e remoção da variável menos significativa, durante cada etapa do processo (HOSMER, et. Al., 2000).

Variáveis a serem removidas: O algoritmo calcula uma estatística F e um *valor-p* para cada variável no modelo. Se o modelo contiver j variáveis, então F para qualquer variável, X_r , está nessa formula:

$$F = \frac{\left(\frac{SSE_{(j-X_r)} - SSE_j}{DF_{X_r}} \right)}{MSE_j}$$

Onde:

$SSE_{(j-X_r)}$ = erro SS para o modelo que não contenha o X_r ;

SSE_j = erro SS para o modelo que contenha o X_r ;

MSE_j = MS erro para o modelo que contenha o X_r .

DF_{X_r} = graus de liberdade para variável X_r .

Se o valor p de cada variável for maior do que o valor de exclusão especificado em Alfa para remoção, o algoritmo exclui a variável com o valor p mais alto do modelo, calcula a equação de regressão, exibe os resultados e, a seguir, inicia a próxima etapa.

Variáveis a serem adicionadas: Se o algoritmo não puder remover uma variável o procedimento tenta adicionar uma variável. O algoritmo calcula uma estatística F e um *valor-p* para cada modelo após inclusão de uma variável e/ou exclusão de uma variável. Se o modelo contiver j variáveis, então F é calculado pela fórmula:

$$F = \frac{\left(\frac{SSE_j - SSE_{(j+xa)}}{DF_{xa}} \right)}{MSE_{(j+xa)}}$$

Onde:

SSE = erro SS antes de x_a ser adicionado ao modelo;

$SSE_{(j+x_a)}$ = erro SS depois de x_a ser adicionado ao modelo;

DF_{x_a} = graus de liberdade para variável x_a ;

$MSE_{(j+x_a)}$ = MS erro depois de x_a ser adicionado ao modelo.

Se o valor p correspondente à estatística F for menor que o valor especificado (nível de significância) para entrada da variável, o algoritmo adiciona a variável com o menor valor p ao modelo, calcula a equação de regressão, exhibe o resultado e muda para uma nova etapa. Quando nenhuma outra variável puder ser inserida ou excluída do modelo, o processo termina.

Análise de resíduos

Após ajustar o modelo de regressão linear obtemos o conjunto de valores preditos pelo modelo, denotados por $\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \dots, \hat{Y}_n$. O i -ésimo resíduo é definido como a diferença entre Y_i e a i -ésima observação predita \hat{Y}_i pelo modelo, isto é,

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Os resíduos fornecem informações sobre as causas de o modelo não ter se ajustado bem aos dados, o que acontece, em geral, quando uma ou mais suposições sobre o modelo ou sobre os erros não são verdadeiras. Para a análise de resíduos neste artigo adotamos o procedimento gráfico resíduos padronizados *versus* ordem de entrada.

Resultados e discussão

Consideramos dados dos relatórios de ensaios dos cinco tipos de cimento, compreendido, no período de abril de 2021 a setembro de 2021 para os cimentos CP II-F-32, CP IV-32 RS, CP V-ARI e CP II-F-40, e no período de outubro de 2019 a março de 2020 para o cimento CP II-Z-32.

As Tabelas 01 e 02 apresentam as medidas descritivas das variáveis químicas e físicas respectivamente.

Tabela 01. Medidas descritivas das variáveis químicas.

Variáveis Químicas										
Medidas	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	P. Fogo %	CaO L. %	R. Ins. %	Eq. Alc. %
CP II-F-32										
Média	4,12	18,30	2,83	61,48	2,56	2,58	6,73	1,39	1,10	0,70
Desvio-padrão	0,06	0,15	0,07	0,49	0,41	0,06	0,19	0,28	0,22	0,02
Coef. Variação	1,45%	0,83%	2,37%	0,80%	15,91%	2,50%	2,82%	20,09%	19,72%	2,90%
CP II-Z-32										
Média	8,43	21,17	3,22	53,42	2,44	2,53	7,04	0,84	11,02	0,78
Desvio-padrão	0,34	0,53	0,06	0,93	0,67	0,11	0,24	0,19	0,76	0,03
Coef. Variação	4,05%	2,51%	1,87%	1,73%	27,65%	4,43%	3,42%	22,76%	6,90%	3,89%
CP IV-32 RS										
Média	9,60	29,14	3,89	44,91	2,75	2,18	5,22	1,20	24,97	1,09
Desvio-padrão	0,33	0,59	0,12	0,90	0,42	0,07	0,34	0,21	0,71	0,03
Coef. Variação	3,44%	2,02%	3,02%	2,00%	15,29%	3,00%	6,50%	17,53%	2,85%	3,05%
CP V-ARI										
Média	4,36	18,44	2,89	62,90	2,99	2,84	3,54	1,63	0,56	0,67
Desvio-padrão	0,10	0,21	0,07	0,44	0,38	0,06	0,18	0,25	0,10	0,03
Coef. Variação	2,41%	1,16%	2,30%	0,70%	12,81%	2,09%	5,14%	15,33%	18,40%	5,01%
CP II-F-40										
Média	4,28	18,06	2,82	61,00	3,41	3,00	5,97	1,58	0,83	0,68
Desvio-padrão	0,09	0,30	0,09	0,69	0,46	0,06	0,12	0,36	0,15	0,03
Coef. Variação	2,05%	1,68%	3,04%	1,13%	13,51%	1,91%	2,09%	22,51%	18,13%	4,40%

Fonte: Resultados estatísticos de autoria própria obtidos por meio do Software R, cujos dados são baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, compreendendo os anos de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, verificamos que as variáveis “MgO” (Óxido de Magnésio), “CaO L.” (Óxido de Cálcio livre) e “R. Ins.” (Resíduo Insolúvel) apresentaram maior variabilidade (maior coeficiente de variação) para os cimentos CP II-F-32, CP V-ARI e CP II-F-40. Já para os cimentos CP II-Z-32 e CP IV-32 RS, apenas as variáveis “MgO” e “CaO L.” apresentaram maior variabilidade, isto é, uma maior heterogeneidade nos dados. Em contrapartida, a variável “CaO” (Óxido de Cálcio) apresentou a menor variabilidade (menor coeficiente de variação), para todos os cinco tipos de cimentos e, portanto, maior homogeneidade nos dados.

Tabela 02. Medidas descritivas das variáveis físicas.

Variáveis Físicas											
Medidas	Exp. Quente	Tempo de Pega (min)		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à Compressão (MPa)			
	mm	Início	Fim	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP II-F-32											
Média	0,19	188,49	250,48	26,15	3340,16	2,55	10,29	14,86	27,98	33,04	40,95

Desv-padrão	0,30	8,21	9,58	0,33	61,34	0,86	2,18	0,72	1,07	1,13	0,60
Coef. Var.	159,38%	4,36%	3,82%	1,26%	1,84%	33,83%	21,24%	4,83%	3,81%	3,41%	1,47%
CP II-Z-32											
Média	0,23	260,32	314,76	28,48	3710,32	1,22	6,46	14,14	27,31	33,80	42,13
Desv-padrão	0,38	11,60	14,38	0,27	83,32	0,26	1,05	0,89	1,47	1,33	1,00
Coef. Var.	164,73%	4,46%	4,57%	0,95%	2,25%	21,33%	16,26%	6,29%	5,39%	3,92%	2,37%
CP IV-32 RS											
Média	0,21	228,10	291,90	30,36	4326,35	0,50	2,40	13,92	25,21	31,44	44,44
Desv-padrão	0,36	16,91	16,79	0,20	85,73	0,14	0,47	1,06	1,32	1,42	0,95
Coef. Var.	172,08%	7,41%	5,75%	0,67%	1,98%	28,96%	19,48%	7,59%	5,22%	4,53%	2,15%
CP V-ARI											
Média	0,20	173,44	232,97	29,79	4392,81	0,07	0,38	23,88	37,69	44,56	52,96
Desv-padrão	0,33	8,77	10,34	0,26	53,91	0,03	0,19	1,18	1,05	0,79	0,89
Coef. Var.	168,32%	5,06%	4,44%	0,87%	1,23%	49,08%	49,26%	4,93%	2,78%	1,76%	1,68%
CP II-F-40											
Média	0,29	171,98	231,19	29,59	4393,17	0,02	0,20	23,21	37,30	44,03	52,46
Desv-padrão	0,40	10,14	10,31	0,25	83,14	0,02	0,10	1,01	0,83	0,84	0,92
Coef. Var.	139,56%	5,90%	4,46%	0,86%	1,89%	74,13%	50,76%	4,37%	2,22%	1,90%	1,76%

Fonte: Resultados estatísticos de autoria própria obtidos por meio do Software R, cujos dados são baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, compreendendo os anos de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

A partir da Tabela 2, verificamos que as variáveis físicas “#200” (peneira com malha de abertura 0,075 mm) e “#325” (peneira com malha de abertura 0,044 mm) foram as que apresentaram uma maior dispersão de valores em seus dados e a variável “Cons. Normal” (Consistência normal) uma menor dispersão de valores, para todos os cinco tipos de cimento.

Cabe ressaltar que, uma vez que a variável “Exp. Quente” (Expansibilidade a quente) assume apenas três valores (zero, meio e um) foi a variável que apresentou uma variabilidade discrepantemente maior em relação às demais. Neste contexto, não se aplica a análise descritiva comparativa.

No que tange a análise inferencial, neste artigo apresentamos na Tabela 03 os diagnósticos obtidos por meio da Análise de Variância Fator Único (ANOVA – One Way) para comparação entre os 5 tipos de cimentos, quanto aos tempos médios de pega. Vale relembrar que o tempo de pega do cimento é a diferença entre o tempo inicial e o tempo final de pega em minutos. Para o seu diagnóstico e interpretação, os valores de *p-value* menores do que o nível de significância adotado de 0,05 (ou 5%) significa que há pelo menos um tipo de cimento como tempo médio de pega diferente dos demais.

Tabela 03. Análise de Variância (ANOVA fator único) do tempo médio de pega considerando os cinco tipos de cimento.

Fonte da variação	gl	SQ	MQ	F	F crítico	valor-p
Entre Grupos	4	3147,120818	786,780205	36,71518	2,400678	3,861E-25*
Dentro dos grupos	311	6664,508929	21,429289			
Total	315	9811,629747				

*Valor numérico aproximadamente igual a zero. (Fonte: Resultados obtidos por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>).

À luz do resultado da ANOVA na Tabela 03 constatamos que há diferença significativa entre os tempos médios de pega dos cimentos. A partir do teste de Tukey a 5% de significância detectamos a seguinte configuração do maior para o menor tempo médio:

- (a) Cimento **C3** (CP IV-32 RS): maior tempo médio de pega.
- (b) Cimentos **C1** (CP II-F-32), **C4** (CP V-ARI) e **C5** (CP II-F-40): não há diferença significativa entre estes três cimentos, que estão empatados em segundo lugar.
- (c) Cimento **C2** (CP II-Z-32): menor tempo médio de pega.

Com relação a modelagem do tempo de pega dos cimentos, a Tabela 04 apresenta as estimativas dos coeficientes de regressão dos modelos ajustados finais para cada cimento, após a seleção de variáveis via método do *Stepwise*. Para fins de comparação das estimativas dos coeficientes de regressão entre os tipos de cimentos, padronizamos a variável resposta tempo de pega TP da seguinte forma:

$$Z = \frac{TP - \underline{TP}}{S_{TP}}$$

Em que:

- TP : Tempo de pega do cimento em minutos (Tempo decorrido entre o lançamento de água e o enrijecimento total da pasta);
- \underline{TP} : Tempo médio de pega do cimento;
- S_{TP} : Desvio-padrão amostral do tempo de pega do cimento.

Tabela 04. Ajuste dos modelos de regressão após seleção de variáveis via *Stepwise*.

CP II-F-32						
	Estimativa	IC(95%)		Erro padrão	Valor t	P-value
Intercepto	-12.293	-21.8686	-2.7175	4.886	-2.516	0.0145*
X6 (SO ₃)	4.758	1.0530	8.4636	1.890	2.517	0.0145*
CP II-Z-32						
	Estimativa	IC(95%)		Erro padrão	Valor t	P-value
Intercepto	-22.5248	-46.5838	1.5342	12.2752	-1.835	0.0716 .
X6 (SO ₃)	-2.6654	-4.7812	-0.5496	1.0795	-2.469	0.0165*
X11 (Cons. N.)	0.9790	0.0923	1.8657	0.4524	2.164	0.0345*
X12 (#200)	1.1439	0.2585	2.0293	0.4518	2.532	0.0140*
CP IV-32 RS						
	Estimativa	IC(95%)		Erro padrão	Valor t	P-value
Intercepto	23.322	7.6929	38.9506	7.974	2.925	0.00486 **
X3 (Fe ₂ O ₃)	-3.054	-5.3693	-0.7396	1.181	-2.586	0.01215*
X6 (SO ₃)	-5.256	-9.4253	-1.0875	2.127	-2.471	0.01632*
CP V-ARI						
	Estimativa	IC(95%)		Erro padrão	Valor t	P-value
Intercepto	-1.8014	-3.7076	0.1048	0.9726	-1.852	0.0688 .
X5 (MgO)	0.6021	-0.0299	1.2342	0.3225	1.867	0.0666 .
CP II-F-40						
	Estimativa	IC(95%)		Erro padrão	Valor t	P-value
Intercepto	-18.9525	-29.7558	-8.1493	5.5120	-3.438	0.00109**
X1 (Al ₂ O ₃)	4.6692	1.9925	7.3460	1.3657	3.419	0.00116**
X5 (MgO)	-0.6098	-1.1353	-0.0843	0.2681	-2.274	0.02667*
X9 (Res. Ins.)	1.6480	0.1622	3.1337	0.7581	2.174	0.03381*
X12 (#200)	-13.1321	-26.0265	-0.2377	6.5789	-1.996	0.05063.

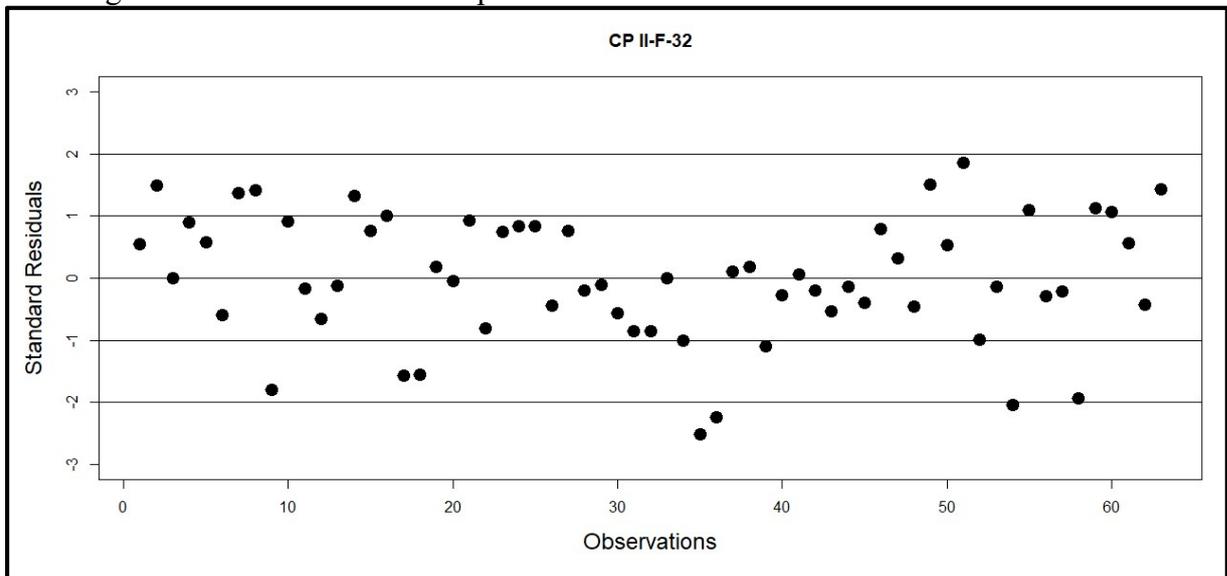
Legenda das significâncias: (***) significante a 0,1%. (**) Significante a 1%. (*) Significante a 5%. (.) Significante a 10% (Fonte: Resultados obtidos por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>).

Com relação aos resultados apresentados na Tabela 4, verificamos que, para o cimento CP II-F-32 a variável explicativa que permanece no modelo é apenas o SO₃, ou seja, é a única variável significativa que explica o tempo de pega deste tipo de cimento. Para o cimento CP II-Z-32 as variáveis explicativas que se mostraram significativas para modelar o tempo de pega foram o SO₃, Consumo Normal e #200. O cimento CP IV-32 RS apresentou as variáveis explicativas Fe₂O₃ e SO₃ como significativas para o modelo. Para o cimento CP V-ARI apenas a variável explicativa MgO foi verificada como significativa para o modelo. Por fim, o cimento

CP II-F-40 apresentou as variáveis explicativas Al_2O_3 , MgO, Resíduo Insolúvel e #200 como significativas para a composição do modelo.

As figuras 1 a 5 apresentam os gráficos dos resíduos padronizados. Notamos que os resíduos padronizados se distribuem de maneira aleatória em torno da origem (linha central horizontal), sugerindo independência estocástica entre si, para cada um dos cinco tipos de cimentos.

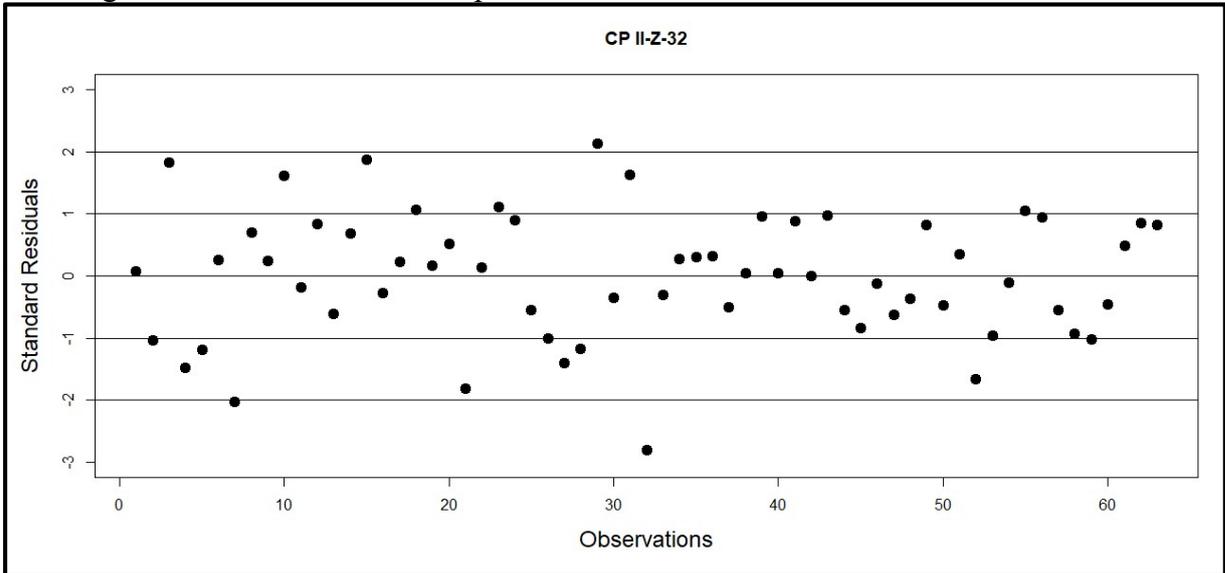
Figura 1. Gráfico dos resíduos padronizados referentes ao cimento C1: CP-II-F-32.



Fonte: Gráfico de autoria própria obtido por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

O gráfico apresentado na Figura 01 mostra visualmente que há apenas dois resíduos padronizados fora do intervalo ± 2 desvios-padrão e nenhum resíduo fora do intervalo ± 3 desvios-padrão. Esse fato aponta que, além da independência estocástica, há uma concentração maior de resíduos em torno da origem zero, cuja quantidade vai diminuindo em direção aos valores 3 e -3, sugerindo que os resíduos padronizados têm uma distribuição aproximadamente normal.

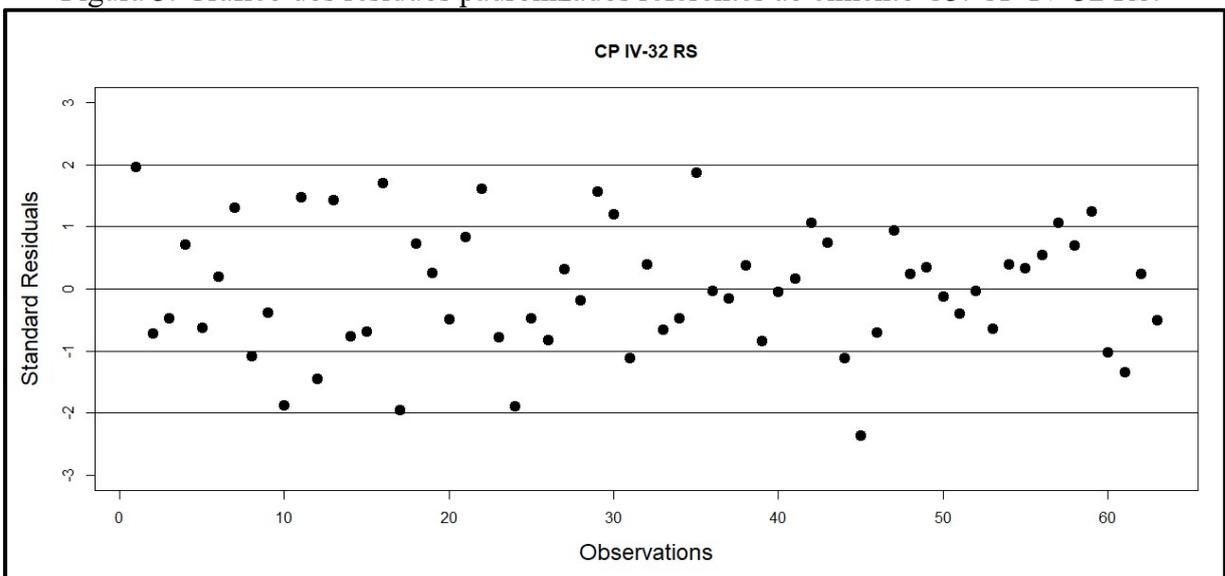
Figura 2. Gráfico dos resíduos padronizados referentes ao cimento C2: CP-II-Z-32.



Fonte: Gráfico de autoria própria obtido por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

Assim como na Figura anterior, o gráfico apresentado na Figura 02 também aponta visualmente apenas dois resíduos padronizados fora do intervalo ± 2 desvios-padrão e nenhum resíduo fora do intervalo ± 3 desvios-padrão, sugerindo que os resíduos padronizados têm uma distribuição aproximadamente normal.

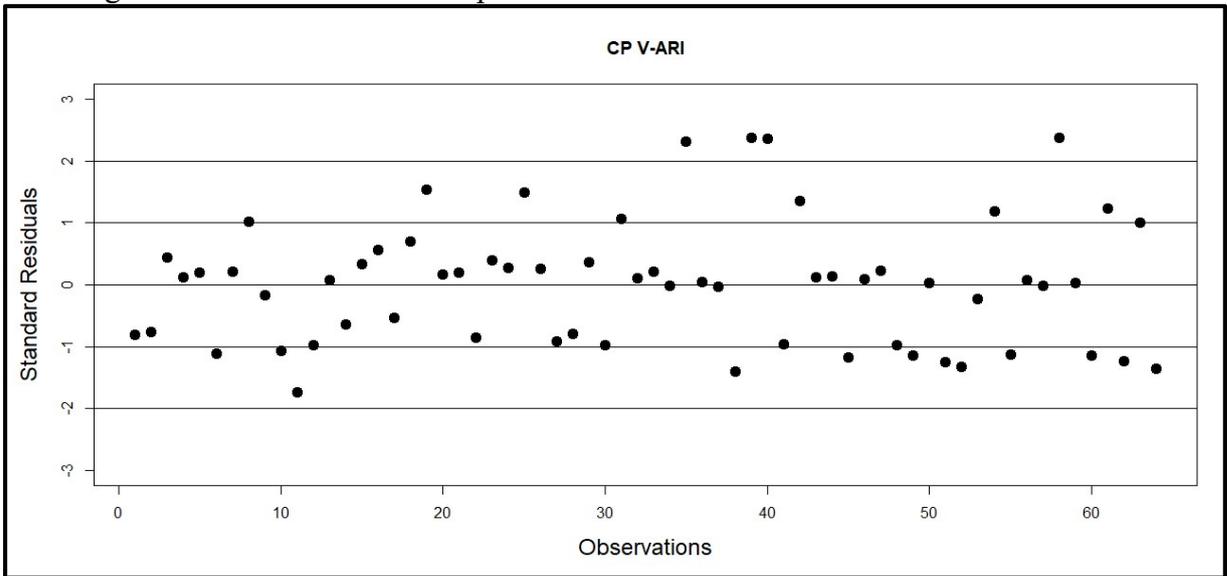
Figura 3. Gráfico dos resíduos padronizados referentes ao cimento C3: CP-IV-32 RS.



Fonte: Gráfico de autoria própria obtido por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

O gráfico apresentado na Figura 03 mostra visualmente apenas um resíduo padronizado fora do intervalo ± 2 desvios-padrão e nenhum resíduo fora do intervalo ± 3 desvios-padrão, sugerindo uma menor dispersão em relação aos dois gráficos anteriores e que os resíduos padronizados têm uma distribuição aproximadamente normal.

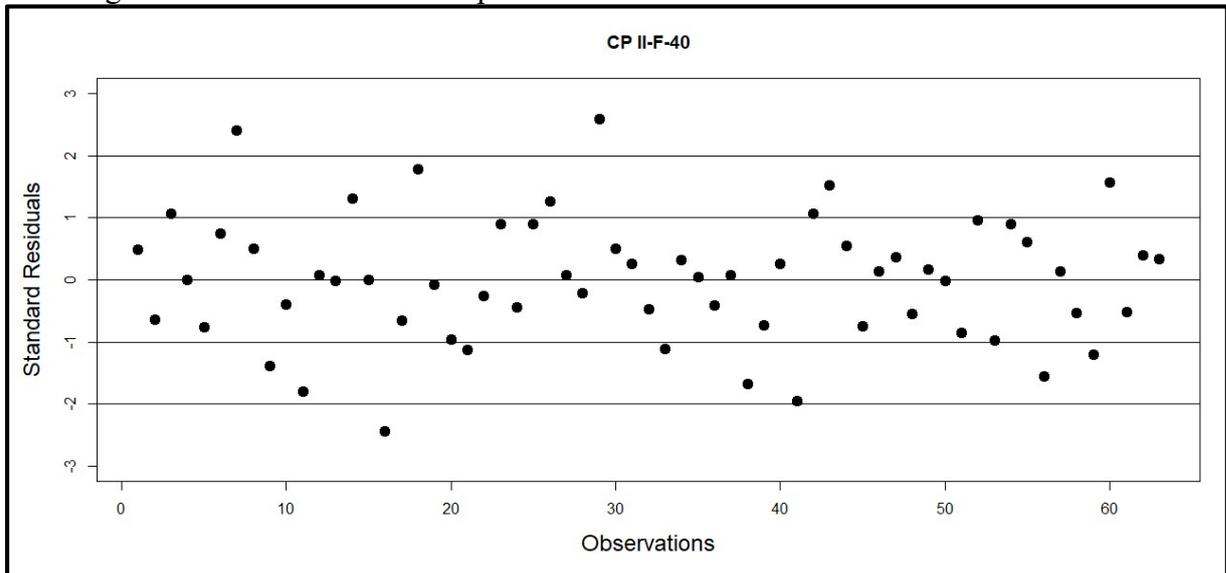
Figura 4. Gráfico dos resíduos padronizados referentes ao cimento C4: CP-V-ARI.



Fonte: Gráfico de autoria própria obtido por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

O gráfico apresentado na Figura 04 mostra visualmente que há 4 resíduos padronizados fora do intervalo ± 2 desvios-padrão e nenhum resíduo fora do intervalo ± 3 desvios-padrão. Dessa maneira, não há uma dispersão significativamente maior em relação aos três gráficos anteriores, ainda que os resíduos padronizados tenham distribuição aproximadamente normal.

Figura 5. Gráfico dos resíduos padronizados referentes ao cimento C5: CP-II-F-40.



Fonte: Gráfico de autoria própria obtido por meio do Software R, baseados nos relatórios de ensaio da Empresa Itambé, de 2019 a 2021, disponibilizados em <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>.

O gráfico apresentado na Figura 05 apresenta apenas 3 resíduos padronizados fora do intervalo ± 2 desvios-padrão e nenhum resíduo fora do intervalo ± 3 desvios-padrão, sugerindo uma semelhança aos gráficos 01 e 02 no que tange a dispersão dos pontos.

Conclusões

O estudo apresentado conseguiu mostrar que há diferença no tempo pega entre os cinco tipos de cimento estudados. A partir da distinção e análise das variáveis que compõem cada tipo de cimento foi possível estudar a variabilidade de cada uma, como também seu nível de significância para compor o modelo de regressão. Assim modelamos o tempo de pega em cada tipo de cimento.

Neste estudo verificamos quais são as variáveis explicativas significativas para modelar o tempo de pega de cada um dos cinco tipos de cimentos estudados. Assim, foi possível observar a importância da modelagem estatística via modelos de regressão para a identificação de variáveis químicas e físicas que explicam e influenciam de forma significativa o tempo de pega dos cimentos. Além disso, a comparação desses dados estatísticos e seus resultados contribuem para a otimização do uso do cimento de acordo com suas respectivas propriedades, facilitando assim a escolha do cimento de acordo com a necessidade de cada etapa da obra, tendo em vista

cada propriedade e especificação necessária para o uso otimizado de cada um dos cinco tipos de cimento de Portland da fábrica Itambé.

Verificamos que as variáveis possuem variabilidades distintas umas das outras. Para as variáveis químicas, o “MgO”, “CaO L.” e “R. Ins.” apresentaram uma maior variabilidade para os cimentos CP II-F-32, CP V-ARI e CP II-F-40, e para os cimentos CP II-Z-32 e CP IV-32 RS apenas as variáveis “MgO” e “CaO L.” mostraram uma maior variabilidade, ou seja, dados mais heterogêneos. Contudo, a variável “CaO” apresentou menor variabilidade para os cinco tipos de cimento, ou seja, dados mais homogêneos.

Já para as variáveis físicas vimos que “#200” e “#325” apresentaram maior variabilidade e a variável “Cons. Normal” menor variabilidade, para os cinco tipos de cimentos.

Concluimos que a variável química SO₃ (Trióxido de Enxofre) foi constatada como significativa para a modelagem do tempo de pega na maioria dos cimentos analisados, exceto para o CP V-ARI e, o qual apresentou apenas a variável MgO (Óxido de Magnésio) como significativa para predição, e para o CP II-F-40. Verificamos também que a variável MgO foi constatada como significativa para dois dos cinco cimentos analisados. De uma forma geral, concluimos que estas duas variáveis significativas são as que mais explicam e influenciam o tempo de pega dos cimentos estudados.

Referências

ABBAD, G.; TORRES, C. V. Regressão múltipla *stepwise* e hierárquica em Psicologia Organizacional: aplicações, problemas e soluções. **SciELO**, Brasília-DF, 7, p. 19-29, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epsic/a/KFqXQw4JLVkTbYtLqs7PxbnQ/?lang=pt>. Acesso em: 20 dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-294X2002000300004>.

CIMENTO, um Pó que Resiste ao Tempo. Brochura Secil (impressa). Portugal, 1999.

CORDEIRO, G. M. **Modelos Lineares Generalizados.** Campinas: UNICAMP, IMECC, 1986.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** LNEC, Lisboa, 1988.

DEMÉTRIO, C. G. B. **Modelos Lineares Generalizados em Experimentação Agrônômica.** Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento das Ciências Exatas, 2001.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental.** 13.ed. São Paulo, Editora Nobel, 1990.

HEINECK, K. S. **Estudo da influência de cimentações introduzidas sob tensão.** Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 1998.

HOSMER, D. W., LEMESHOW, S. **Applied Logistic Regression**. John Wiley, New York, 2000.

KIHARA, Y., VISEDO, G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. Associação Brasileira de Cimento Portland, Portal ABCP, 2014.

KLEINBAUM, D. G., KLEIN, M. **Logistic Regression: a self-learning text**. New York: Springer-Verlag, 2002.

McCULLAGH, P., NELDER, J.A. **Generalized Linear Models**. 2nd edition, Chapman and Hall: London, 1989.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistic and Probability for Engineers**. 3.ed., Nova Iorque: John Wiley & Sons Inc., 2003.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized Linear Models. **Journal of the Royal Statistical Society A**, v. 135, n. 3, p.370-384, 1972. DOI: <https://doi.org/10.2307/2344614>.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. A reologia da pasta de cimento e a influência da cal. *In*: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1ª ed., 1995. **Anais**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás. p. 25-32. Disponível em: <https://gtargamassas.org.br/eventos/file/2-a-reologia-da-casca-de-cimento-e-a-influencia-da-cal>. Acesso em: 20 jan. 2022.

TRIOLA, Mario F. **Introdução a Estatística**. 7.ed. LTC. Rio de Janeiro, 2008.