

Análise probabilística da condição de degradação dos revestimentos pétreos (fixados directamente ao suporte)

Probabilistic analysis of the degradation evolution of stone wall cladding (directly adhered to the substrate)

Ana Silva¹, Jorge de Brito², Pedro L. Gaspar³

¹Eng.ª Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

anasilva931@msn.com

²Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

jb@civil.ist.utl.pt

³Professor Assistente da Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa

pmgaspar@fa.utl.pt

RESUMO: A degradação das construções e seus elementos é um problema grave que afecta o ambiente construído. São, portanto, necessárias ferramentas que permitam modelar a degradação, fornecendo indicações relativamente à sua ocorrência e à influência dos factores ambientais mais condicionantes. Por se tratar de um fenómeno complexo, cuja modelação não é simples, no presente estudo, desenvolve-se uma análise probabilística deste fenómeno. Neste estudo, a degradação dos revestimentos pétreos fixados directamente ao suporte é estimada com base na avaliação das características de 140 revestimentos inspeccionados na zona de Lisboa. Com recurso à regressão logística multinomial, é feita uma análise probabilística da condição de degradação das fachadas ao longo do tempo, sendo analisada a influência de alguns agentes ambientais responsáveis por essa degradação.

ABSTRACT: Environmental factors directly affect a building's performance and durability. They are particularly detrimental in the case of building envelope materials and systems as these tend to exhibit a large exposed area and relatively narrow thickness. Therefore, tools are needed to model degradation and provide an insight into its occurrence and its relationship with the environmental factors that have the worst effect. In this paper the degradation of stone wall cladding directly adhered to the substrate is estimated based on the evaluation of the characteristics of 140 wall cladding systems inspected in Lisbon, Portugal. Because it is a complex phenomenon, a probabilistic analysis is developed using multinomial logistic regression. The analysis focuses on the environmental factors that most influence the overall degradation of the façades (condition level). Probabilistic patterns are thus obtained for the evolution over time of each condition level according to their exposure level to outdoor environmental conditions.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Wekesa et al. [1], a qualidade e a durabilidade das construções são essenciais na qualidade de vida de todos e são componentes críticos na estabilidade social e económica das nações. De facto, a degradação visual da superfície exterior dos edificios afecta não só a

qualidade do espaço urbano [2] [3] como constitui uma das maiores preocupações dos seus proprietários, visto que, na maioria dos casos, estes estabelecem as acções de manutenção com base apenas na aparência do edificio [4]. Além disso, a degradação dos revestimentos tem consequências directas no conforto dos

utilizadores assim como nos custos de reparação e manutenção [5].

As construções estão expostas a condições ambientais que contribuem para a sua degradação, afectando a sua durabilidade e vida útil [6]. Os revestimentos são particularmente sensíveis ao efeito dos agentes ambientais visto que possuem uma espessura relativamente reduzida e uma grande superfície de exposição sob a influência directa destes agentes [7]. Torna-se assim fundamental avaliar e classificar os processos de degradação de modo a planear de forma informada acções de manutenção e reparação [8]. Por sua vez, Noortwijk e Frangopol [9] referem que um factor essencial na definição de planos de manutenção se prende com a incerteza relativa à degradação dos revestimentos e ao momento no qual é necessário actuar. Assim sendo, a avaliação dos factores ambientais de degradação é uma parte fundamental da previsão da vida útil [10].

No presente estudo, pretende-se conhecer a distribuição probabilística, ao longo do tempo, da condição da degradação dos revestimentos pétreos fixados directamente ao suporte com base na avaliação das características de 140 revestimentos inspeccionados na zona de Lisboa. Considera-se ainda de enorme importância um conhecimento relativamente aprofundado da forma como as diferentes características e agentes de degradação contribuem para a degradação global dos revestimentos das fachadas, para além da idade. Para tal, propõe-se a utilização da regressão logística multinomial, sendo esta uma técnica estatística correntemente utilizada em diferentes áreas do conhecimento científico. Com recurso a esta técnica, é possível prever a probabilidade da ocorrência de cada um dos níveis, para cada um dos casos estudados, definindo-se a expressão probabilística equivalente.

2. ENQUADRAMENTO

Straub [11] refere que existem diferentes métodos de avaliação do estado de degradação dos edifícios e seus componentes que têm por base a classificação hierárquica das anomalias e a definição de parâmetros de condição associados as mesmas. A avaliação da condição da degradação dos revestimentos é, regra geral, realizada através de uma análise comparativa de

anomalias detectadas [3]. Muitos autores utilizam sistemas de classificação de anomalias no intuito de exprimir a degradação visual e funcional dos elementos analisados [12] [13] [14]. A maioria das metodologias utiliza uma escala qualitativa baseada em diferentes níveis de degradação [15] balizada através da condição verificada em campo [16] [17]; as anomalias são assim caracterizadas e classificadas de acordo com uma escala de variáveis discretas que variam desde o nível "0" (ausência de degradação visível) ao nível "4" (degradação generalizada, sendo necessária uma acção correctiva imediata) [4]. Shohet e Paciuk [18] propõem um sistema de complexidade intermédia onde associam a cada nível de degradação a extensão da anomalia detectada, correspondendo cada nível de degradação à média entre a degradação física e visual das fachadas inspeccionadas. Haagenrud et al. [19], numa abordagem ligeiramente diferente, definem os níveis da degradação em função da condição dos elementos estudados e do grau de consequência decorrente das anomalias detectadas. Estas metodologias são alvo de algumas críticas no sentido em que os níveis de degradação são estabelecidos com base apenas nas anomalias detectadas no momento da inspecção, não tendo em conta a noção de risco ou a probabilidade de transição de um nível para outro. Florentzou et al. [20] propõem assim um sistema de classificação mais complexo, onde utilizam a noção de risco e definem os níveis de degradação em termos probabilísticos fazendo-os variar entre 0 (sem probabilidade de ocorrência) e 1 (máxima probabilidade de ocorrência). Por sua vez, Mayer e Wornell [21] sugerem diferentes metodologias de inspecção técnica de edifícios. Estes autores referem com uma importância hierárquica crescente, a inspecção visual qualitativa, a definição de níveis de degradação e a aplicação de métodos probabilísticos que incorporem a noção de risco.

O presente estudo engloba assim estas três metodologias utilizando os diferentes graus de complexidade relativamente aos sistemas de classificação de anomalias. Em primeiro lugar, recorre-se ao trabalho de campo na avaliação da degradação de 140 revestimentos pétreos fixados directamente ao suporte na região de Lisboa. Em seguida, procede-se à hierarquização das anomalias em níveis de degradação que não são só uma escala qualitativa balizada através da

condição verificada em campo mas também entram em linha de conta com a percentagem do revestimento afectada por cada anomalia, sendo depois calculado um indicador da degradação global dos revestimentos (para maior esclarecimento ver Silva et al. [22]) - Tabela 1. Por fim, sendo o principal foco do presente estudo, com recurso à regressão multinomial, faz-se uma análise probabilística da condição da degradação ao longo do tempo e quantifica-se a influência dos factores ambientais mais relevantes em termos de probabilidade de ocorrência de cada um dos níveis de condição considerados.

3. REGRESSÃO LOGÍSTICA MULTINOMIAL

A análise de regressão é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas quando se pretende identificar a relação entre duas ou mais variáveis. Esta técnica estuda o comportamento de uma variável dependente face a outras variáveis independentes, também designadas de explicativas, responsáveis pelo comportamento da variável dependente.

Quando se pretende conhecer a relação entre uma variável dependente qualitativa e variáveis independentes categóricas (factores) ou numéricas (covariáveis), é necessário recorrer à regressão categorial. Esta análise de regressão tem diferentes definições em função da variável dependente a modelar. Quando a variável dependente é nominal dicotómica, a regressão categorial é designada de regressão logística, sendo uma técnica estatística utilizada na definição de modelos de previsão [23]. Por sua vez, a regressão logística pode ser expandida à regressão logística multinomial que é usada quando a variável dependente é nominal policotómica; ao contrário da regressão logística binária, onde a variável dependente é uma escolha binária, geralmente a presença ou ausência de uma determinada característica, na regressão logística multinomial podem existir mais de duas escolhas (a variável dependente possui mais de duas classes mutuamente exclusivas) [24]. Esta técnica estatística descreve assim as relações entre uma variável categórica alvo (variável dependente) e as variáveis explicativas em termos de probabilidade de uma dada ocorrência [25].

A função usada na regressão logística para estimar a probabilidade de uma determinada realização j ($j = 1, \dots, n$) da variável dependente ser o “sucesso”, $P[Y_i = 1] = \hat{\pi}_j$, é a função logística cuja forma genérica, para mais do que uma variável independente X_i ($i = 1, \dots, p$) é dada pela expressão (1).

$$\hat{\pi} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \dots + \beta_p X_{pj}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \dots + \beta_p X_{pj}}} \quad (1)$$

O método de ajuste utilizado na regressão logística é o método da máxima verosimilhança. Este estima os coeficientes de regressão (B) que maximizam a probabilidade de encontrar as realizações da variável dependente amostrada, isto é, que maximizem a verosimilhança destes valores [26]. Se todas as n observações de Y forem independentes, então a função de verosimilhança (L) que dá a probabilidade conjunta $P(Y = y_1, Y = y_2, \dots, Y = y_n)$ de se observarem os valores (y_1, y_2, \dots, y_n) é dada pela expressão (2).

$$L = P(Y = y_1) \times P(Y = y_2) \times \dots \times P(Y = y_n) = \prod_{j=1}^n \pi_j^{y_j} (1 - \pi_j)^{1-y_j} \quad (2)$$

Em problemas de estimação de parâmetros baseados em máxima verosimilhança, geralmente é mais conveniente trabalhar com o negativo do logaritmo da função de verosimilhança [27]. Sucintamente, como $\ln(L)$ é uma transformação monótona de L , o vector que maximiza $\ln(L)$ é o mesmo que maximiza L . No entanto, não é possível obter analiticamente uma solução deste sistema, razão pela qual se recorre a um algoritmo computacional que maximize $\ln(L)$. Assim sendo, a função da verosimilhança, para o modelo com variáveis qualitativas, passa a ser dada pela expressão (3) [28] [29].

$$LL = \sum_{j=1}^J \{y_j \ln(\hat{\pi}_j) - (n_j - y_j) \ln(1 - \hat{\pi}_j)\} \quad (3)$$

Onde: n_j representa o número de elementos que pertence a cada subpopulação; y_j o número de sucessos em cada subpopulação; $\hat{\pi}_j$ representa a probabilidade de ocorrência dessas subpopulações.

Deste modo, os parâmetros da regressão logística são obtidos através de um processo iterativo cujo critério de paragem inclui um número máximo de iterações permitidas ou outros critérios de convergência [30].

4. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA CONDIÇÃO DE DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DA IDADE DOS REVESTIMENTOS

No presente estudo, começou-se por avaliar a probabilidade que cada revestimento tem de possuir uma dada condição de degradação em função da sua idade. Por idade entende-se o período de tempo que separa a data da última intervenção no revestimento (obras de beneficiação ou reparação) da data da inspecção.

Dos 140 casos estudados, nenhum apresenta níveis de degradação nos extremos da escala adoptada, isto é, nenhum apresenta nível 0 de degradação (sem degradação visível) ou nível 4 (degradação generalizada). Assim sendo, as análises efectuadas apenas entram em linha de conta com os níveis 1, 2 e 3 de degradação e, na regressão multinomial efectuada com recurso ao software estatístico SPSS, a condição da degradação é a variável dependente, com três classes mutuamente exclusivas: "É do nível 1"; "É do nível 2"; "É do nível 3". É perceptível que um caso que pertença, por exemplo, ao nível 1 de degradação não pode pertencer a nenhum dos outros níveis. A regressão multinomial permite assim conhecer, em função da idade, a probabilidade que um revestimento tem de pertencer a cada um dos níveis de degradação.

Na Tabela 2, apresenta-se o teste do rácio da verosimilhança entre o modelo nulo (só com a constante) e o modelo final completo. A opção *Model fitting criteria* produz os critérios de informação de Akaike (AIC) e o critério Bayesiano de Schwarz (BIC); estes critérios penalizam o desvio (-2 vezes o logaritmo da verosimilhança (-2LL) que é uma medida que avalia o ajuste do modelo aos dados [31]), o primeiro em função do número de parâmetros do modelo e o segundo em função da dimensão da amostra: quanto menores forem os valores de AIC e BIC melhor é o ajuste do modelo [32]. No entanto, estes parâmetros servem, regra geral, apenas como termo de comparação entre modelos, não devendo ser analisados por si só. No presente caso, verifica-se que os valores de AIC, BIC e -2LL são inferiores para o modelo final, o que indica que este possui um melhor ajuste aos dados do que o modelo apenas com a constante. Através da análise do teste do rácio de verosimilhanças, verifica-se que sendo $G^2(2) =$

129,556 e $p < 0,001$ a variável independente (idade) é explicativa da condição da degradação dos revestimentos.

Os testes do Qui-quadrado (Pearson) - $X^2(92) = 88,304$ com $p = 0,59$ - e do desvio - $D(92) = 46,467$ com $p = 1,0$ - permitem concluir que a hipótese nula não pode ser desprezada, confirmando assim que a idade influencia significativamente a condição da degradação.

Os pseudo- R^2 de Cox & Snell e de Nagelkerke podem ser interpretados de forma análoga à do R^2 na regressão múltipla linear [33]; no entanto, enquanto o pseudo- R^2 de Cox & Snell nunca atinge o valor máximo de 1, o pseudo- R^2 de Nagelkerke pode atingir esse valor [34]. No presente caso, os valores do pseudo- R^2 de Cox & Snell ($R^2_{CS} = 0,604$), de Nagelkerke ($R^2_N = 0,734$) e de McFadden ($R^2_{MF} = 0,535$) indicam um modelo com qualidade adequada.

O teste do rácio da verosimilhança (*likelihood ratio test*) para a idade apresenta um $G^2(2) = 129,556$ com $p = 0,000$ valor muito inferior ao p-value de 0,05, podendo assim afirmar-se, uma vez mais, que a idade influencia de forma significativa a condição da degradação.

Analisada a validade estatística do modelo, obtêm-se as estimativas dos parâmetros do modelo (Tabela 3). No caso, da regressão multinomial, onde a variável dependente possui três classes, admitindo que a classe 0 é a classe de referência, a probabilidade da variável dependente Y tomar o valor de qualquer uma das três classes é dada por [28]:

$$P(Y=0|X) = \frac{1}{1 + e^{B_{10}+B_{11} \cdot X_1 + \dots + B_{1p} \cdot X_p} + e^{B_{20}+B_{21} \cdot X_1 + \dots + B_{2p} \cdot X_p}} \quad (4)$$

$$P(Y=1|X) = \frac{e^{B_{10}+B_{11} \cdot X_1 + \dots + B_{1p} \cdot X_p}}{1 + e^{B_{10}+B_{11} \cdot X_1 + \dots + B_{1p} \cdot X_p} + e^{B_{20}+B_{21} \cdot X_1 + \dots + B_{2p} \cdot X_p}} \quad (5)$$

$$P(Y=2|X) = \frac{e^{B_{20}+B_{21} \cdot X_1 + \dots + B_{2p} \cdot X_p}}{1 + e^{B_{10}+B_{11} \cdot X_1 + \dots + B_{1p} \cdot X_p} + e^{B_{20}+B_{21} \cdot X_1 + \dots + B_{2p} \cdot X_p}} \quad (6)$$

Os coeficientes de regressão (B) são os apresentados na Tabela 3 e foram determinados, tal como referido, através do método da máxima verosimilhança. É então possível estabelecer o modelo logístico multinomial que permite determinar a probabilidade de cada condição de degradação em função da idade, tal como indicado nas expressões (7) a (9).

$$P(Y = \text{"É de nível 1"}) = \frac{e^{24,331 - 0,427 \cdot \text{Idade}}}{1 + e^{24,331 - 0,427 \cdot \text{Idade}} + e^{19,125 - 0,321 \cdot \text{Idade}}} \quad (7)$$

$$P(Y = \text{"É de nível 2"}) = \frac{e^{19,125 - 0,321 \cdot \text{Idade}}}{1 + e^{24,331 - 0,427 \cdot \text{Idade}} + e^{19,125 - 0,321 \cdot \text{Idade}}} \quad (8)$$

$$P(Y = \text{"É de nível 3"}) = \frac{1}{1 + e^{24,331 - 0,427 \cdot \text{Idade}} + e^{19,125 - 0,321 \cdot \text{Idade}}} \quad (9)$$

Ilustra-se assim, na Figura 1, a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo. O modelo determina estas probabilidades com base na frequência de cada nível de degradação observado em cada subpopulação. Como seria esperado, a probabilidade de ser do nível 1 vai diminuindo ao longo do tempo; por um lado, observa-se que os revestimentos mais recentes possuem uma maior probabilidade de pertencer a esta condição da degradação; por outro, verifica-se que a partir dos 68 anos a probabilidade de pertencer a este nível é inferior a 1%. A probabilidade de ser do nível 2 aumenta, inicialmente, ao longo do tempo, tendo um pico máximo por volta dos 54 anos, idade para a qual se obtém a probabilidade máxima de 56,7%, começando a decrescer a partir desse ponto. Quanto ao nível 3 de degradação, verifica-se que a sua probabilidade vai aumentando com a idade, sendo praticamente inexpressiva até aos 50 anos e tendo uma enorme representação a partir dos 70 anos.

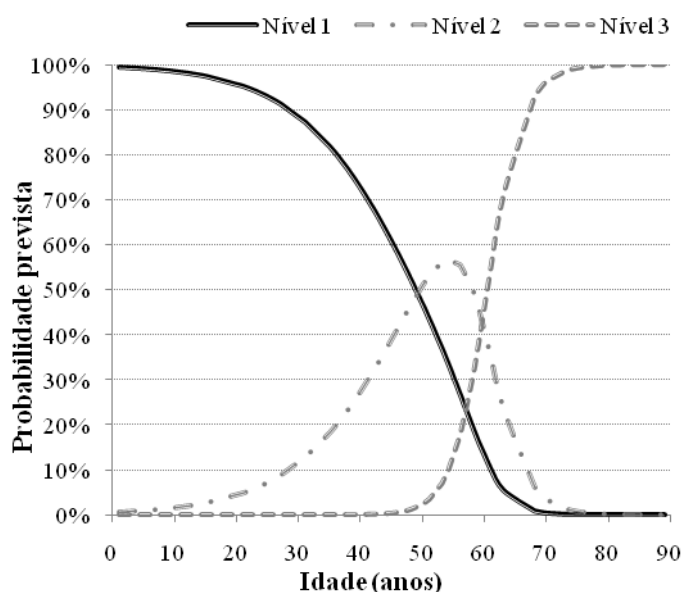


Figura 1 - Distribuição probabilística da condição da degradação segundo a idade dos casos estudados

5. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA CONDIÇÃO DE DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DOS AGENTES AMBIENTAIS

Ao longo do tempo, os revestimentos estão sujeitos a uma série de agentes ambientais que contribuem para e fomentam a sua degradação.

De facto, os agentes ambientais são os maiores responsáveis pela degradação dos revestimentos. No presente estudo, foram analisados como agentes ambientais a exposição à humidade, a acção combinada de vento-chuva e a proximidade do mar, sabendo que estes três factores se encontram directamente interligados.

Analisando a probabilidade da condição da degradação em função destes três factores, é possível concluir que apenas a exposição à humidade apresentava um efeito estatisticamente significativo sobre a probabilidade da condição de degradação. De facto, Lourenço et al. [35] referem que a humidade é a maior fonte de problemas nos edifícios em todo o mundo.

Na Figura 2, apresenta-se a distribuição probabilística da condição da degradação segundo a idade e em função da exposição à humidade. Em termos genéricos, é possível verificar que os casos com exposição baixa à humidade se encontram deslocados ligeiramente para a direita relativamente aos casos com elevada exposição à humidade; tal indica que os casos onde a exposição à humidade é baixa têm durante mais tempo o nível 1 de degradação, surgindo os casos com os níveis 2 e 3 em idades mais avançadas. Por outras palavras, os casos expostos a menores níveis de humidade degradam-se mais lentamente, sendo possível quantificar a diferença de vida útil estimada em relação aos casos com níveis de exposição à humidade mais desfavoráveis. Por exemplo, veja-se o caso de dois revestimentos com a mesma idade, 61 anos: para uma exposição baixa à humidade, a probabilidade de ser do nível 1 é de 16,1% enquanto que, para uma exposição alta, a mesma probabilidade baixa para 1,3%. Revestimentos com exposição baixa à humidade possuem uma probabilidade máxima de pertencer ao nível 2 de degradação de 65,8% aos 58 anos, enquanto que para uma exposição alta esse pico ocorre aproximadamente 5 anos mais cedo, aos 53 anos, sendo de cerca de 63,2%. Quanto ao nível 3, a par do que foi referido até agora, verifica-se que a probabilidade de pertencer a este nível começa a aumentar mais cedo para uma exposição elevada à humidade, sendo superior a 90% a partir de 63 anos, enquanto que, para os casos com exposição baixa, a probabilidade de pertencer ao nível 3 de degradação só começa a ser superior a 90% a partir de 73 anos. Verifica-se assim uma diferença de cerca de 7 anos em

relação à probabilidade de se atingir uma condição de nível 3, igualmente apontada como o limite de vida útil do revestimento [22] [36].

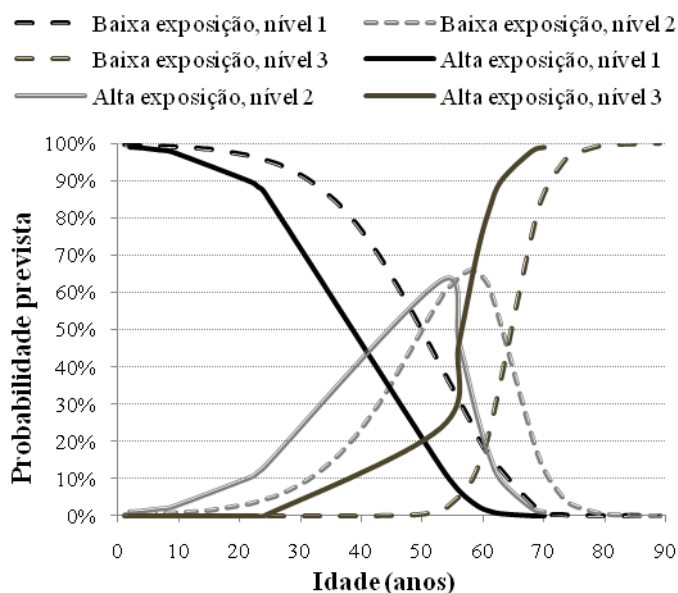


Figura 2 - Distribuição probabilística da condição da degradação segundo a idade dos casos estudados e em função da exposição à humidade

Tal como referido, a acção vento-chuva e a proximidade do mar não apresentam um efeito estatisticamente significativo sobre a probabilidade da condição de degradação; no entanto, apresentam um efeito estatisticamente significativo sobre a exposição à humidade. Fisicamente, esta conclusão retirada de modelos estatísticos faz todo o sentido. É fácil compreender que os revestimentos mais próximos do mar estão mais sujeitos à humidade, sendo a acção do vento, um efeito catalisador desta acção. Verificou-se assim através de uma regressão logística binomial, que a probabilidade de um dado caso possuir uma baixa exposição à humidade, em função da proximidade do mar e da acção vento chuva é dada pela expressão (10).

$$P(Y = \text{"Baixa exposição à humidade"}) = \frac{1}{1 + e^{-(0,313 - 2,992 \cdot \text{Mar} + 1,663 \cdot \text{Vento})}} \quad (10)$$

Nesta expressão, quando a distância ao mar é menor do que 5 km, substitui-se a variável Mar por 1 e, caso contrário, substitui-se por 0; relativamente à variável Vento, caso a acção vento-chuva for moderada, esta variável toma o valor 1 e, caso contrário, toma o valor 0. Obtêm-se assim os valores presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Probabilidade prevista para a exposição à humidade em função da acção vento-chuva e da proximidade do mar

Acção vento-chuva	Proximidade do mar	Probabilidade prevista (baixa exposição à humidade)	Probabilidade prevista (alta exposição à humidade)
Moderada	< 5 km	26,58%	73,42%
Severa	< 5 km	6,42%	93,58%
Moderada	> 5 km	87,83%	12,17%
Severa	> 5 km	57,76%	42,24%

Os valores obtidos são, de facto, coerentes com a realidade e confirmam estatisticamente o que se sabe empiricamente. Pode-se então retirar as seguintes conclusões: os revestimentos mais próximos do mar, a menos de 5 km, têm maior probabilidade de possuir uma exposição alta à humidade; por outro lado, revestimentos com a mesma proximidade do mar mas sujeitos a uma acção vento-chuva severa têm maior probabilidade de ter uma exposição alta à humidade.

Além destes três agentes ambientais, existe ainda uma outra condicionante que influi na degradação dos revestimentos, que é a orientação. Verifica-se através de uma regressão logística multinomial que existe uma relação causal entre a orientação e os três agentes ambientais considerados. De facto, a orientação do revestimento está relacionada com a agressividade do meio ambiente, sendo geralmente os quadrantes Norte e o Poente os mais agressivos em Portugal, o primeiro porque é mais húmido e frio e o segundo porque apresenta ventos dominantes e maior probabilidade de ocorrência da combinação de vento e chuva [36]. Analisando a probabilidade da condição da degradação em função da orientação, verificou-se que esta variável possui um efeito estatisticamente significativo sobre a probabilidade da condição de degradação, para um nível de significância de 10% (p-value = 0,1). Nas Figuras 3 a 5, apresenta-se a distribuição probabilística da condição da degradação segundo a idade e em função da orientação.

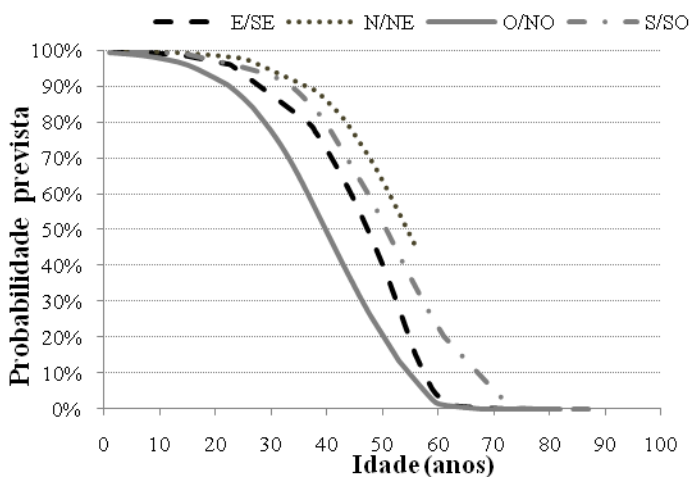


Figura 3 - Distribuição probabilística da condição 1 de degradação segundo a idade dos casos estudados e em função da orientação

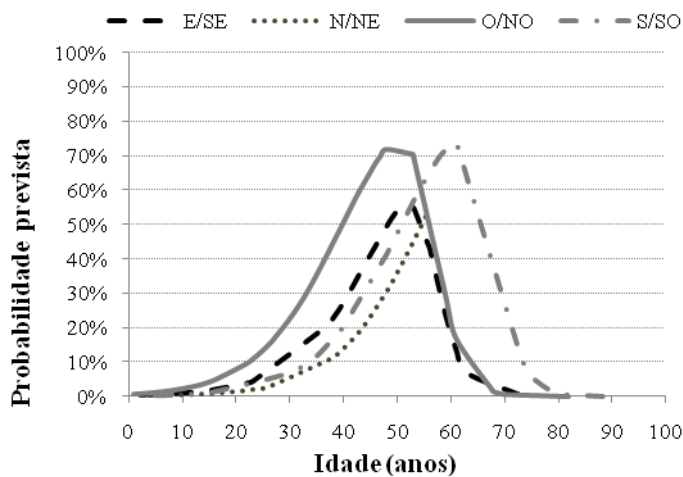


Figura 4 - Distribuição probabilística da condição 2 de degradação segundo a idade dos casos estudados e em função da orientação

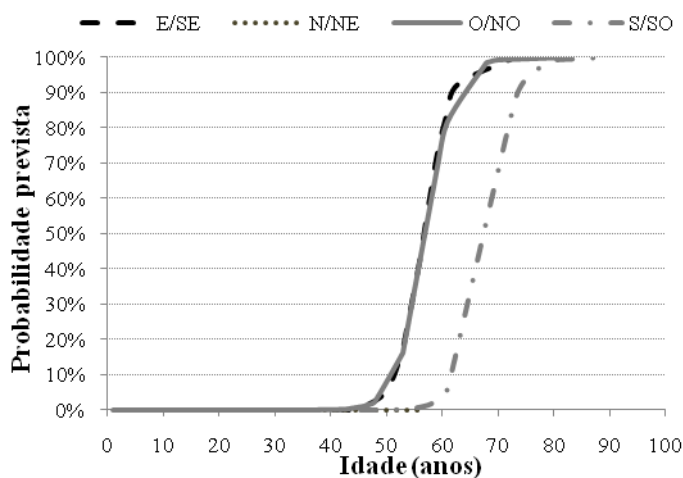


Figura 4 - Distribuição probabilística da condição 3 de degradação segundo a idade dos casos estudados e em função da orientação

Em relação à orientação dos revestimentos, é possível verificar que, dentro da amostra analisada, os casos orientados a N/NE não permitem retirar grandes conclusões. De entre todos os casos orientados a N/NE, nenhum possui nível 3 de degradação; esta situação pode ser explicada pelo facto de para esta exposição só existirem casos com idades até aos 56 anos, partindo-se do pressuposto que só a partir dessa idade é que para esta orientação começa a existir probabilidade de ser de condição igual ou superior a 3. Analisando-se as restantes orientações, conclui-se que os casos orientados a S/SO são os mais favoráveis, possuem um intervalo de tempo superior no qual pertencem ao nível 1 de degradação, sendo que apenas a partir de 73 anos é que a probabilidade de pertencerem ao nível 3 de degradação passa a ser muito significativa. Os casos orientados a E/SE possuem uma probabilidade média de 66,67% de serem do nível 1 de degradação, uma probabilidade média de 15,15% de serem do nível 2 e uma probabilidade média de 18,18% de serem do nível 3. Por sua vez, os casos orientados a O/NO possuem uma probabilidade média de 60,00% de serem do nível 1, uma probabilidade média de 22,50% de serem do nível 2 e uma probabilidade média de 17,50% de serem do nível 3.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela 5, indica-se a probabilidade de os revestimentos pertencerem a cada um dos níveis de degradação em função da sua idade. A probabilidade é dada por uma função exponencial, o que implica que de ano para ano o acréscimo ou decréscimo da probabilidade seja mais acentuado. Verifica-se que, entre 49 e 50 anos, a probabilidade de ser do nível 1 é aproximadamente a mesma de ser do nível 2 (na ordem de 49%) e, que entre 59 e 60 anos a probabilidade de ser do nível 2 é semelhante à probabilidade de ser do nível 3 (na ordem de 43%). Nestes intervalos de tempo, há uma maior probabilidade de transição de uma condição de degradação para outra.

Tabela 5 - Probabilidade de pertencer a cada um dos níveis de degradação em função da idade

Intervalo de anos	Probabilidade de pertencer a cada uma das condições		
	Nível 1	Nível 2	Nível 3
[0:10]	99,06%	0,94%	0,00%
[10:20]	97,70%	2,30%	0,00%
[20:30]	93,35%	6,65%	0,00%
[30:40]	78,41%	21,57%	0,02%
[40:50]	58,60%	40,68%	0,72%
[50:60]	29,43%	52,85%	17,72%
[60:70]	3,40%	14,46%	82,15%
[70:80]	0,05%	0,73%	99,22%
[80:90]	0,00%	0,06%	99,94%

Na Tabela 6, indica-se a percentagem de casos correctamente classificados para cada nível de degradação, assim como o número de casos mal classificados. Verifica-se assim que o modelo de regressão logística multinomial, onde a idade é a única variável explicativa, classifica correctamente 89,2% dos casos pertencentes ao nível 1 de degradação, 53,6% dos casos pertencentes ao nível 2 e 84,2% dos casos pertencentes ao nível 3. Em termos globais, o modelo classifica correctamente 81,4% dos casos analisados. A percentagem proporcional de classificações correctas por acaso é determinada através da soma dos quadrados da proporção de casos em cada subgrupo da variável dependente (Bayaga, 2010); no presente caso, é dada por $49,97\% = 100\% \times (0,6642 + 0,22 + 0,1362)$. Verifica-se assim que a capacidade de o modelo classificar correctamente os casos analisados é de cerca de 1,63 vezes superior à classificação feita por mero acaso, o que permite concluir que o modelo é útil.

Tabela 6 - Nível de confiança do modelo

Observado	Previsto			Percentagem de casos correctamente classificados
	É de nível 1	É de nível 2	É de nível 3	
É de nível 1	83	10	0	89,2%
É de nível 2	10	15	3	53,6%
É de nível 3	0	3	16	84,2%
Percentagem global	66,4%	20,0%	13,6%	81,4%

Avalia-se ainda a relação entre a probabilidade de ser de uma dada condição da degradação em função das restantes condições e a idade. Para

isso, recorre-se ao rácio das chances ou odds ratio (OR), que é uma medida estatística usada para avaliar o risco de um resultado particular se um determinado factor está presente [38]; fazendo uma analogia com o diagnóstico de uma doença, pode dizer-se que o rácio das chances indica o quão mais provável é que alguém que está exposto ao factor em estudo tem de desenvolver a doença em comparação com alguém que não está exposto. No presente estudo e em função apenas da idade, foram obtidos os seguintes rácios das chances:

$OR ("É \text{ de nível } 1", "É \text{ de nível } 3" | \text{Idade}) = 0,652;$

$OR ("É \text{ de nível } 2", "É \text{ de nível } 3" | \text{Idade}) = 0,725;$

$OR ("É \text{ de nível } 1", "É \text{ de nível } 2" | \text{Idade}) = 0,652 / 0,725 = 0,899.$

É então possível verificar que as probabilidades de pertencer ao nível 1 de degradação relativamente a pertencer ao nível 3 são de -34,8% por cada ano de idade [$100\% \times (0,652-1)$], isto é, existe uma redução das probabilidades em 34,8% ao ano de ser do nível 1 relativamente a ser do nível 3. Por sua vez, as probabilidades de ser do nível 2 relativamente a ser do nível 3 diminuem 27,5% ao ano. Por último, as probabilidades de ser do nível 1 relativamente a ser do nível 2 diminuem em 10,1% ao ano.

Como referido no ponto 5 do presente estudo, os factores ambientais são fundamentais na explicação da condição da degradação dos revestimentos. O rácio das chances pode ser estendido a situações relacionadas com a exposição a determinados agentes ambientais. Neste caso, uma dada classe de exposição é designada como de referência (no presente caso, a classe de referência é a exposição baixa à humidade) sendo as restantes calculadas em função desta. O intervalo de OR varia entre 0 e infinito; se o valor de OR for próximo de 1, indica que a exposição à humidade não afecta as chances da condição da degradação; por sua vez, valores inferiores a 1 implicam um decréscimo das chances, representando os valores superiores a 1 um acréscimo das chances [39].

Assim sendo e tendo em conta a humidade como variável explicativa da condição da degradação, são indicados na Tabela 7 os rácios das chances obtidos; é possível verificar que não se calcula o OR para a exposição baixa à

humidade, visto que é redundante (se a exposição à humidade não é alta então é baixa), sendo por isso necessário avaliar os resultados através da relação entre as diferentes classes das variáveis, tal como se exemplifica em seguida:

OR (“É de nível 1”, “É de nível 3” | Humidade alta) = 0,023;

OR (“É de nível 2”, “É de nível 3” | Humidade alta) = 0,074.

Isto indica que um revestimento com exposição alta à humidade comparativamente a um revestimento com exposição baixa tem uma probabilidade de ser do nível 1 0,023 vezes menor do que de ser do nível 3. Dito de outra forma, é possível verificar que um revestimento com exposição alta à humidade relativamente a um revestimento com exposição baixa reduz as chances de pertencer ao nível 1 de degradação em 97,7%. Similarmente, um revestimento com exposição alta à humidade comparativamente a um revestimento com exposição baixa tem uma probabilidade de ser do nível 2 0,074 vezes menor do que de ser do nível 3.

7. CONCLUSÕES

No presente estudo, aborda-se uma análise probabilística da condição de degradação dos revestimentos pétreos fixados directamente ao suporte e a sua relação com alguns factores ambientais mais determinantes. Metodologicamente, recorre-se à regressão logística multinomial, que permite modelar a probabilidade da ocorrência de cada condição de degradação ao longo do tempo. Para tal, são analisados alguns factores ambientais responsáveis pela degradação dos revestimentos, analisando-se as relações causais entre eles, o que permite verificar que a exposição à humidade se encontra directamente relacionada com a proximidade do mar e acção vento-chuva. Também a orientação é analisada no presente estudo, visto que, apesar de não ser uma acção ambiental, influencia o modo como as acções ambientais actuam sobre os revestimentos.

A metodologia proposta é assim capaz de fornecer indicações relativamente a um fenómeno complexo como é a degradação, dando algumas indicações da sinergia entre os distintos agentes de degradação e da forma como estes influenciam os níveis de degradação. Além disso, permite avaliar a probabilidade de transição de um dado

nível de condição (isto é, de estado de degradação) para outro. Esta metodologia, ensaiada no presente estudo para os revestimentos pétreos, pode também ser aplicada a outros revestimentos de fachada. É possível, com base nestes resultados, que, em análises futuras, se venha a englobar a análise de risco assim como o conceito de vida útil associado aos diferentes níveis de degradação.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do ICIST (Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção) e da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).

9. REFERÊNCIAS

- [1] Wekesa B.W., Steyn G.S., Otieno, F.A.O. *The response of common building construction technologies to the urban poor and their environment*. Building and Environment 2010; 45(10): 2327-2335.
- [2] Flores-Colen I., de Brito J. *Premature stains in facades of recent buildings*. Proc. CIB/W87 2nd International Symposium 2003; Lisbon, Portugal: 311-320.
- [3] Gaspar P.L., de Brito J. *Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: A comparison between different degradation indicators*. Building and Environment 2008; 43(11): 1818-1828.
- [4] Balaras C. A., Droutsa K., Dascalaki E., Kontoyiannidis S. *Deterioration of European apartment buildings*. Energy and buildings 2005; 37(5): 515-527.
- [5] Kirkham R.J., Boussabaine H. *Forecasting the residual service life of NHS hospital buildings: a stochastic approach*. Construction Management and Economics 2005; 23(5): 521-529.
- [6] Jernberg, P., Lacasse, M. A., Haagenrud, S. E., and Sjöström, C. *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components*. Joint CIB W80 / RILEM TC 140 - TSL Committee on Service Life of Building Materials and Components, CIB Report, Publication 295, March, 2004.
- [7] Gaspar P.L., de Brito J. *Minimum required*

- performance level for rendered facades*. 11th DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul 2008; Istanbul, Turkey: T24.
- [8] Warke P.A., Curran J.M., Turkington A. V., Smith B. J. *Condition assessment for building stone conservation: a staging system approach*. Building and Environment 2003; 38(9-10): 1113-1123.
- [9] Noortwijk J., Frangopol D. *Deterioration and maintenance models for insuring safety of civil infrastructures at lowest life-cycle cost*. Life-cycle performance of deterioration structures: assessment, design and management, edited by Dan M. Frangopol, Eugen Bruhwiler, Michael H. Faber and Bryan Adey, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2004, pp. 384-391.
- [10] McDuling J., Horak E., Cloete C. *Evaluation of environmental degradation factors for service life prediction*. 11th DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components 2008; Istanbul, Turkey: T32.
- [11] Straub A. *Using a condition-dependent approach to maintenance to control costs and performances*. Facilities Management 2003; 1 (4): 380-395.
- [12] Shohet I., Rosenfeld Y., Puterman M., Gilboa E. *Deterioration patterns for maintenance management - a methodological approach*. 8th DBMC, Conference on Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1666-1678.
- [13] Brandt E., Rasmussen M. *Assessment of building conditions*. Energy and Buildings 2002; 34 (2): 121-125.
- [14] Chew M. *Defect analysis in wet areas of buildings*. Construction and Building Materials 2005; 19 (3): 165-173.
- [15] Gaspar P., de Brito J. *Mapping defect sensitivity in external mortar renders*. Construction and Building Materials 2005; 19 (8): 571-578.
- [16] Marteinson B., Jónsson B. *Overall survey of buildings - performance and maintenance*. 8th DBMC, International Conference on the Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1634-1654.
- [17] Freitas V. P., Sousa M., Abrantes V. *Survey of the durability of facades of 4000 dwellings in northern Portugal*. 8th DBMC, International Conference on the Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1040-1050.
- [18] Shohet I., Paciuk M. *Service life prediction of exterior cladding components under standard conditions*. Construction Management and Economics 2004; 22 (10): 1081-1090.
- [19] Haagenrud S., Stordahl P., Eriksson B., Riks E., Krigsvoll G., Garofolo I. *System for Maintenance Management of Historic (Wooden) Buildings (acronym: MMWood)*. Final report, EU-Project ENV4-CT98-0796, 2001.
- [20] Flourentzou F., Brandt E., Wetzel C. *MEDIC - A method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets*. Energy and Buildings 2000; 31 (2): 167-170.
- [21] Mayer P.D., Wornell P. *Assessing the remaining service life of existing building components for insurance*. 8th DBMC, Conference on Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1447-1456.
- [22] Silva A., de Brito J., Gaspar P.L. *Service life prediction model applied to natural stone wall claddings (directly adhered to the substrate)*. Construction and Building Materials 2011; 45(9):3674-3684.
- [23] Choi M., Lee G. *Decision tree for selecting retaining wall systems based on logistic regression analysis*. Automation in Construction 2010; 19(7): 917-928.
- [24] Wang Y. *A multinomial logistic regression modeling approach for anomaly intrusion detection*. Computers & Security 2005; 24(8): 662-674.
- [25] Witten I.H., Frank E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. 2nd Edition, Morgan Kaufman, Boston, Massachusetts, 2005.
- [26] Maroco J. *Análise estatística usando o SPSS*, Edições Sílabo, 3^a Edição, Lisboa, Portugal, 2007.
- [27] Ljung L. *System Identification - Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [28] Hosmer D.W., Lemeshow S. *Applied*

- logistic regression*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [29] Gao S., Shen J. *Asymptotic properties of a double penalized maximum likelihood estimator in logistic regression*. *Statistics & Probability Letters* 2007; 77(9): 925-930.
- [30] Myung I.J. *Tutorial on maximum likelihood estimation*. *Journal of Mathematical Psychology* 2003; 47(1): 90-100.
- [31] Suthar V., Tarmizi R.A., Midi H., Adam M.B. *Students' Beliefs on Mathematics and Achievement of University Students: Logistics Regression Analysis*. International Conference on Mathematics Education Research 2010 (ICMER 2010). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*; Volume 8: 525-531.
- [32] Lewis K.N., Heckman B.D., Himawan L. *Multinomial logistic regression analysis for differentiating 3 treatment outcome trajectory groups for Headache-associated Disability*. PAIN (Article in Press).
- [33] McCoach D. B., Siegle D. *Factors that differentiate underachieving gifted students from high-achieving gifted students*. *Gifted Child Quarterly* 2003; 47(2): 144-154.
- [34] Wuensch K.L. *Binary logistic regression*. East Carolina University, Department of Psychology, 2011.
- [35] Lourenço P.B., Luso E., Almeida M.G. *Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal*. *Building and Environment* 2006; 41(2): 223-234.
- [36] Gaspar P. *Vida útil das construções: desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa da durabilidade de elementos a construção. Aplicação a rebocos de edifícios correntes*. Tese de Doutoramento em Ciências da Engenharia, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2009.
- [37] Bayaga A. *Multinomial logistic regression: usage and application in risk analysis*. *Journal of applied quantitative methods* 2010; 5(2): 288-297.
- [38] Westergren A., Karlsson S., Andersson P., Ohlsson O., Hallberg I.R. *Eating difficulties, need for assisted eating, nutritional status and pressure ulcers in patients admitted for stroke rehabilitation*. *Journal of Clinical Nursing* 2001; 10 (2): 257-269.
- [39] Wells G. *Gale Encyclopedia of Public Health*. The Gale Group Inc., Macmillan Reference USA, New York, 2002.

ANEXO

Tabela 1 - Níveis de degradação propostos para os revestimentos de pedra natural (Silva et al., 2011)

Níveis de degradação	Caracterização das anomalias		% área de RPN afectada
Nível 0	<i>Não apresenta degradação visível</i>		-
Nível 1 <i>Bom estado de conservação</i>	Anomalias visuais ou de degradação da superfície	Sujidade superficial	> 10%
		Manchas de humidade	≤ 15%
		Manchas localizadas	
		Alteração cromática	
	Deficiências de planeza	≤ 10%	
Anomalias de perda de integridade	Degradação do material ^(*) ≤ 1% da espessura da placa	-	
	Degradação do material ^(*) ≤ 10% da espessura da placa	≤ 20%	
Nível 2 <i>Degradação ligeira</i>	Anomalias visuais ou de degradação da superfície	Manchas de humidade	> 15%
		Manchas localizadas	
		Alteração cromática	
		Colonização biológica	≤ 30%
		Vegetação parasitária	
		Eflorescências	
		Deficiências de planeza	> 10% e ≤ 50%
	Anomalias em juntas	Degradação do material das juntas	≤ 30%
		Perda de material - junta aberta	≤ 10%
	Anomalias na fixação ao suporte	Lascagem do elemento pétreo na zona dos bordos	≤ 20%
		Lacuna parcial do elemento pétreo	
	Anomalias de perda de integridade	Degradação do material ^(*) ≤ 10% da espessura da placa	> 20%
Degradação do material ^(*) > 10% e ≤ 30% da espessura da placa		≤ 20%	
Fissuras de largura ≤ 1 mm		> 20%	
Fissuras de largura > 1 mm e ≤ 5 mm		≤ 20%	
Fracturação		≤ 5%	
Nível 3 <i>Degradação moderada</i>	Anomalias visuais ou de degradação da superfície	Colonização biológica	> 30%
		Vegetação parasitária	
		Eflorescências	
		Deficiências de planeza	> 50%
	Anomalias em juntas	Degradação do material das juntas	> 30%
		Perda de material - junta aberta	> 10%
	Anomalias na fixação ao suporte	Lascagem do elemento pétreo na zona dos bordos	> 20%
		Lacuna parcial do elemento pétreo	≤ 10%
		Descolagem	
	Anomalias de perda de integridade	Degradação do material ^(*) > 10% e ≤ 30% da espessura da placa	> 20%
		Degradação do material ^(*) > 30% da espessura da placa	≤ 20%
		Fissuras de largura > 1 mm e ≤ 5 mm	> 20%
Fissuras de largura ≥ 5 mm		≤ 20%	
Fracturação		> 5% e ≤ 10%	
Nível 4 <i>Degradação generalizada</i>	Anomalias na fixação ao suporte	Descolagem	> 10%
	Anomalias de perda de integridade	Degradação do material ^(*) > 30% da espessura da placa	> 20%
		Fissuras de largura > 5 mm	> 10%
	Fracturação		

^(*) - Por degradação do material entendem-se todas as anomalias que envolvem a diminuição volumétrica do material pétreo

Tabela 2 - Informação relativa ao ajuste do modelo

Modelo	Critérios do ajuste do modelo			Teste do rácio da verosimilhança		
	AIC	BIC	-2 Log verosimilhança	Qui-quadrado ^a	Graus de liberdade (gl)	Significância ^b
Modelo apenas com a constante	200,554	206,437	196,554			
Final	74,997	86,764	66,997	129,556	2	0,000

AIC - critérios de informação de Akaike;

BIC - critério Bayesiano de Schwarz;

-2 Log verosimilhança - (-2 vezes o logaritmo da verosimilhança);

^a. A estatística de teste Qui-quadrado (G^2) serve para testar a significância do modelo de regressão; G^2 é uma medida do incremento da qualidade do modelo nulo por adição de variáveis independentes [26];

^b. A significância testa a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira (despreza-se a hipótese nula sempre que o valor dado na tabela seja superior ao nível de significância admitido). A hipótese nula no caso do teste do rácio de verosimilhanças indica que o modelo não é estatisticamente significativo, por sua vez, no teste de ajuste do modelo, a hipótese nula indica que o modelo ajusta-se aos dados.

Tabela 3 - Estimação dos parâmetros do modelo

Níveis de degradação ^a	B	Erro-padrão	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% Intervalo de confiança para Exp(B)	
							Limite inferior	Limite superior
É de nível 1	Constante	24,331	5,907	16,968	1	0,000		
	Idade	-0,427	0,102	17,458	1	0,000	0,652	0,534 0,797
É de nível 2	Constante	19,125	5,824	10,783	1	0,001		
	Idade	-0,321	0,100	10,342	1	0,001	0,725	0,596 0,882

a. A categoria de referência é: É de nível 3.

Tabela 7 - Estimativa dos parâmetros do modelo assumindo a humidade como variável explicativa

Níveis de degradação	Coeficientes de regressão (B)	Erro-padrão	Teste de Wald ^c	Graus de liberdade (gl)	Significância ^e	Exp(B)	95% Intervalo de confiança para Exp(B)	
							Limite inferior	Limite superior
É de nível 1	Constante	26,836	7,065	14,427	1	0,000		
	Idade	-0,446	0,116	14,801	1	0,000	0,640	0,510 0,804
	[Humidade=Alta]	-3,791	1,473	6,626	1	0,010	0,023	0,001 0,405
	[Humidade=Baixa]	0 ^b	.	.	0	.	.	.
É de nível 2	Constante	20,874	6,930	9,072	1	0,003		
	Idade	-0,326	0,112	8,420	1	0,004	0,722	0,579 0,900
	[Humidade=Alta]	-2,602	1,172	4,927	1	0,026	0,074	0,007 0,737
	[Humidade=Baixa]	0 ^b	.	.	0	.	.	.

a. A categoria de referência é: É de nível 3;

b. Este parâmetro foi transformado em zero por ser redundante;

c. O teste de Wald serve para averiguar a significância dos coeficientes do modelo. Se para uma dada variável explicativa o teste de Wald for significativo, então pode concluir-se que os parâmetros associados a estas variáveis não são zero, podendo assim ser incluídas no modelo [38];

d. Os graus de liberdade estão relacionados com os dados disponíveis para o cálculo estatístico;

e. A significância testa a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira (despreza-se a hipótese nula sempre que o valor dado na tabela seja superior ao nível de significância admitido). A hipótese nula no caso do teste do rácio de verosimilhanças indica que o modelo não é estatisticamente significativo, por sua vez, no teste de ajuste do modelo, a hipótese nula indica que o modelo ajusta-se aos dados.