

Utilização do Método de Aditividade para Formulações Cerâmicas: Aplicações e Restrições

Marcelo Dal Bó^{a,b*}, Fábio Melchiadés^b, Anselmo Ortega Boschi^b

^aPrograma de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PGMAT

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

CEP 88040-900, Florianópolis - SC, Brasil

^bLaboratório de Revestimentos Cerâmicos – LaRC - DEMa

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

CEP 13574-970, São Carlos - SP, Brasil

*e-mail: marcelodalbo@hotmail.com

Resumo: A otimização da formulação de massas cerâmicas é um passo fundamental para a obtenção das características desejadas no produto final. Para aprimorar a formulação existem várias técnicas utilizadas atualmente, todas com seus aspectos positivos e negativos, ficando a critério e responsabilidade do responsável escolher qual o melhor método a ser utilizado para cada caso. A formulação de massas cerâmicas pelo método de aditividade já é bem conhecida e aplicada em vários casos em que apresenta bons resultados. Neste trabalho será apresentado o método de aditividade para formulações cerâmicas, bem como suas aplicabilidades e restrições.

Palavras-chave: formulação, metodologia, aditividade, massa, matérias-primas.

1. Introdução

O método de aditividade, ou modelo aditivo linear é caracterizado por sua simplicidade, fácil execução, interpretação e disponibilidade para grande maioria dos pesquisadores.

Um modelo aditivo utiliza funções individuais de valores lineares¹ e, em vez de pesos dos critérios, adota coeficientes de valor, que indicam a importância relativa de cada critério. A função multicritério de valor correspondente tem a forma da Equação 1, neste caso modificada para a análise da variável retração linear de queima (RLq):

$$RLq = \sum_{i=1}^n RLq_i \cdot x_i \quad (1)$$

Onde:

- RLq = Retração Linear de Queima da Mistura (massa) (%)
- RLq_i = Retração Linear de Queima do componente i (%);
- x_i = Fração do componente na formulação (%).

Os critérios escolhidos devem apresentar unidades físicas mensuráveis, o que pode ser uma limitação do modelo, compensável, entretanto, pela sua simplicidade e possibilidades de redução da subjetividade no processo decisório; o pesquisador julga os valores apenas quando estima os valores dos coeficientes.

1.1. Aplicabilidades e restrições do método de aditividade

As aplicabilidades do método são extensas, largamente utilizada na área de engenharia para previsão (simulação) de resultados das mais diversas variáveis. No entanto, esta metodologia pode ser contestada pelo uso de uma função aditiva simples² e por combinar resultados de diversos impactos em um único número, conforme Hwang e Yoon (1981, p. 103)³:

Teoria, simulações computacionais e experiência, todas indicam que modelos aditivos simples fornecem aproximações extremamente precisas em relação a formas não-lineares muito mais complicadas, enquanto permanecem, de longe, mais fáceis de usar e entender.

Enquanto os modelos aditivos são criticados por serem simplistas e ingênuos⁴, seus defensores argumentam que sua simplicidade e facilidade de entendimento são justamente os seus pontos fortes^{4,5}.

Segundo Neufville e Stafford (1971, p. 205)⁶:

A hipótese de utilidades independentes pode ser fraca, mas parece ser compensada por um importante argumento [...] permite ao analista estimar a utilidade de uma forma relativamente fácil - ele pode lidar com os atributos um de cada vez.

Modelos aditivos são considerados mais transparentes e facilmente entendidos pelo pesquisador^{5,7} e, dentre todos os modelos este tem sido muito utilizado e analisado, daí seus pontos fortes e pontos fracos estarem bem documentados. Dessa forma, o usuário de modelos aditivos pode melhor se preparar para eventuais problemas⁴.

Como o método se baseia na ponderação de resultados de componentes individuais, o pesquisador deve conhecer bem com que matérias-primas está trabalhando e se existe interação entre elas. No caso da existência de grande interação ou reação entre as matérias-primas, de forma a gerar distintas reações em comparação às reações que ocorrem com as matérias primas isoladamente, o método de aditividade apresenta restrições.

2. Justificativa

Várias características finais dos produtos cerâmicos estão aliadas a formulação inicial da massa. Características relevantes como a retração linear de queima (RLq), absorção de água (ABS) e o coeficiente de dilatação térmica linear são variáveis que devem ser controladas e entendidas para que o processo no todo tenha estabilidade. O método de aditividade proporciona a visualização de uma simulação realizada com a variação dos percentuais de todas as matérias-primas disponíveis, sendo que esta simulação pode ser feita com o auxílio de um software de fácil sintaxe como o “Microsoft Excel”.

Variáveis como a absorção de água, a retração linear de queima, bem como a estabilidade dimensional na faixa de queima do produto podem ser simulados com este método, proporcionando ao pesquisador a visualização de um resultado prévio e rápido de várias características importantes ao processo.

3. Objetivos

Em geral o trabalho possui como objetivos:

- Apresentar o método de aditividade para a formulação de massas cerâmicas;
- Identificar as suas possibilidades de aplicação, citando onde este método pode ser empregado com bons resultados;
- Evidenciar as restrições do método de aditividade, esclarecendo quais as suas limitações para o desenvolvimento de formulações de massas.

4. Materiais e Metodologia

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Argilas da região Centro-Oeste do Brasil;
- Feldspatos das regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil;
- Filitos da região Centro-Oeste do Brasil;
- Caulins das regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil;
- Quartzo da região Centro-Oeste do Brasil;
- Talco da Região Centro-Oeste do Brasil;
- Siltito da região Centro-Oeste do Brasil;

A metodologia aplicada iniciou-se com a caracterização de todas as matérias-primas de acordo com as variáveis selecionadas para realização da simulação. Assim, caso seja interessante estudar a retração linear de queima e a absorção de água da massa após a sinterização, efetuou-se a caracterização destas variáveis para todas as matérias-primas disponíveis em várias temperaturas de sinterização.

Para a caracterização das matérias-primas, foram coletadas amostras das mesmas, efetuando-se previamente o quarteamento. O tempo de moagem foi modificado para manter o resíduo entre 5,0 a 6,0% em peneira ABNT #325 (abertura de 45 μm). Realizou-se a conformação de corpos de prova de dimensões 6,0 \times 2,0 cm^2 em uma prensa hidráulica, mantendo-se fixa a pressão de compactação em 250 kgf.cm^{-2} , com umidade do pó compreendida entre 7,0 e 8,0%.

Para a sinterização dos corpos de provas das matérias-primas utilizou-se forno de queima rápida INTI FQ-1300, com velocidade

de aquecimento de 70 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e 3 minutos de patamar na máxima temperatura do ciclo de queima.

A retração linear de queima foi mensurada com o auxílio de um paquímetro e a absorção de água de acordo com o procedimento descrito pela Norma NBR 13818⁸, anexo B.

Para a análise dos coeficientes de dilatação térmica linear, os testes foram realizados com engobes cerâmicos, também conformados de forma a obter densidades entre 1840 a 1860 g.L^{-1} . Os corpos de prova em questão foram produzidos por colagem em molde poroso, com 1 cm de espessura e largura por 5 cm de comprimento. As sinterizações foram realizadas à temperatura máxima de 1080 $^{\circ}\text{C}$.

A partir dos resultados obtidos individualmente com as matérias-primas, elaborou-se uma tabela de resultados. Como no presente trabalho estudaram-se as variáveis retração linear de queima e absorção de água, a Tabela 1 ilustra os resultados de retração linear de queima de algumas matérias-primas.

A partir destes dados, pôde-se construir uma curva de gresificação para cada matéria-prima estudada, como na Figura 1.

Com a caracterização efetuada, tem-se a possibilidade de simular como seria a retração linear de queima e a absorção de água de uma massa cerâmica elaborada com as matérias-primas estudadas, para isso elaborou-se uma planilha eletrônica, sendo que para o presente trabalho utilizou-se o Microsoft Excel, do Microsoft Office Professional Plus 2010. Na Tabela 2 ilustra-se como funciona o método da aditivagem em uma planilha eletrônica.

5. Resultados Experimentais

Os resultados do método de aditivagem se baseiam em simular o comportamento da curva de gresificação de uma formulação de massa, sem necessitar realizar todos os testes em laboratório, somente utilizando a planilha elaborada com a caracterização das variáveis de interesse, neste caso, a retração linear de queima (RLq), absorção de água (ABS) e o coeficiente de dilatação térmica linear.

A Tabela 3 ilustra a simulação da composição 1 frente ao seu comportamento experimental, caracterizado em laboratório.

A Figura 2 mostra as curvas de gresificação simuladas com o método de aditivagem e o resultado experimental.

Tabela 1. Resultados da retração linear de queima de cada matéria-prima.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	1050	1100	1140	1170	1200	1225
Matéria-prima	Retração Linear de Queima (%)					
Areia feldspática I		-0.4	1.4	5.6	12.0	11.3
Areia feldspática 101	-0.8	0.0	2.2	8.0	9.2	10.2
Argila 9	3.6	4.0	6.0	8.2	9.0	9.4
Argila 9/A	0.4	0.6	1.2	1.6	1.0	2.2
Caulim PR	2.0	2.4	3.0	4.2	5.0	5.4
Filito A	-1.4	4.0	8.0	10.2	14.8	14.2
Filito C		8.8	13.2	14.4	12.0	5.0
Filito P1	2.0	4.6	8.8	12.0	16.0	13.4

Tabela 2. Exemplo de elaboração da planilha pelo método de aditivagem.

Matérias-primas	Composição (%)	Temperatura	
		1100 $^{\circ}\text{C}$	1200 $^{\circ}\text{C}$
Argila 9	% Argila 9	% Argila 9 \times Retração a 1100 $^{\circ}\text{C}$	% Argila 9 \times Retração a 1200 $^{\circ}\text{C}$
Caulim PR	% Caulim PR	% Caulim PR \times Retração a 1100 $^{\circ}\text{C}$	% Caulim PR \times Retração a 1200 $^{\circ}\text{C}$
Filito P1	% Filito P1	% Filito P1 \times Retração a 1100 $^{\circ}\text{C}$	% Filito P1 \times Retração a 1200 $^{\circ}\text{C}$
Quartzito	% Quartzito	% Quartzito \times Retração a 1100 $^{\circ}\text{C}$	% Quartzito \times Retração a 1200 $^{\circ}\text{C}$
Siltito E	% Siltito E	% Siltito \times Retração a 1100 $^{\circ}\text{C}$	% Siltito \times Retração a 1200 $^{\circ}\text{C}$
Simulação Composição 1		Soma das retrações a 1100 $^{\circ}\text{C}$	Soma das retrações a 1200 $^{\circ}\text{C}$

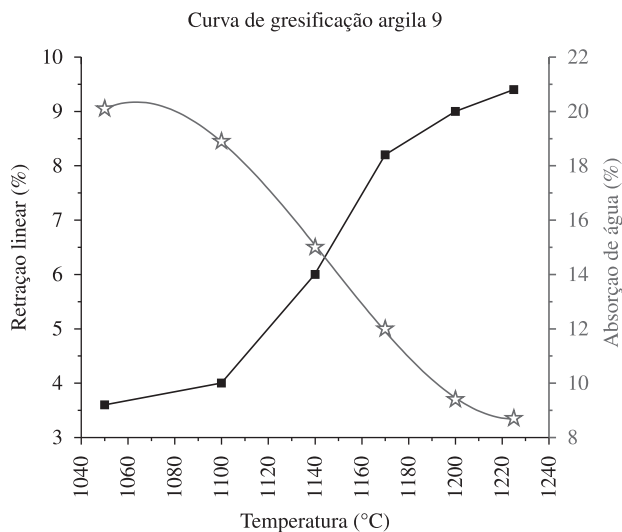


Figura 1. Ilustração da curva de gresificação de uma das argilas estudadas.

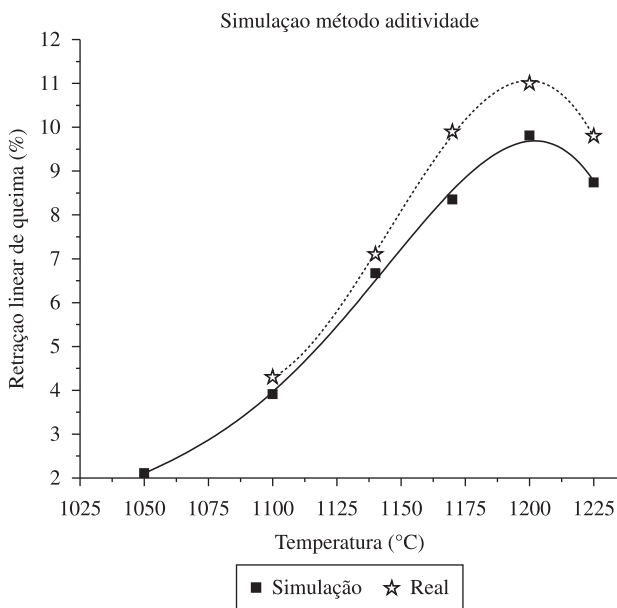


Figura 2. Comparativo entre a curva de gresificação simulada e experimental.

De acordo com a Figura 2, o método da aditividade simula bem a retração linear da massa cerâmica, apesar de algumas divergências com relação aos resultados experimentais em temperaturas mais altas. As restrições da utilização deste método estão discutidas a seguir.

O método é válido para uma simulação rápida e comparativa entre diversas formulações diferentes, avaliando rapidamente variáveis importantes como a retração linear de queima, absorção de água, coeficiente de dilatação térmica linear e custo das formulações.

A mesma metodologia também pôde ser aplicada para simular a estabilidade dimensional da formulação da massa em uma determinada faixa de temperatura. A Figura 3 ilustra algumas simulações realizadas com massa de porcelanato frente à formulação atual (P16).

De acordo com a Figura 3, nota-se que as formulações P14, P15 e P16 apresentam uma temperatura ótima de sinterização na faixa de 1200 °C, ideais para porcelanatos. A formulação P16 e P15 apresentam menor estabilidade dimensional se considerarmos a faixa de temperatura de 1200 ± 15 °C, já a formulação P14 possui uma estabilidade dimensional muito boa entre 1200 e 1225 °C, apresentando uma variação de retração linear de apenas 0,1%,

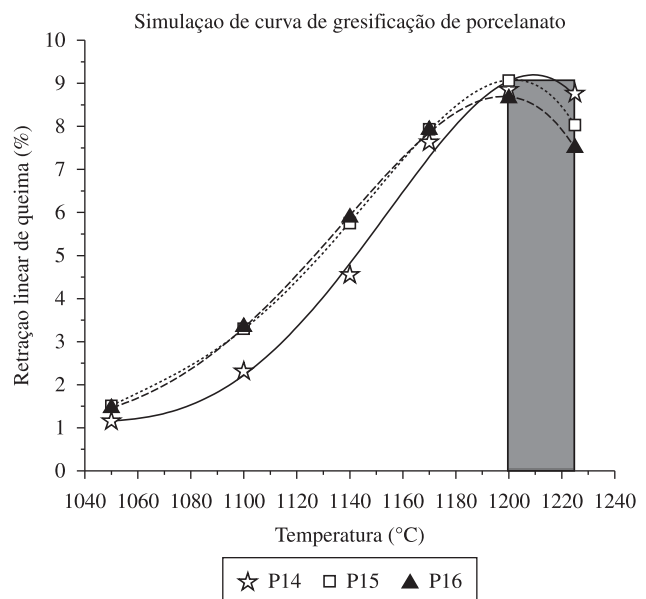


Figura 3. Retração linear de queima vs. temperatura obtida experimentalmente e simulada pelo método da aditividade.

Tabela 3. Simulação realizada com o método de aditividade e o resultado real da retração linear de queima para uma dada composição.

Matérias-primas	Composição 1 (%)	Temperatura (°C)					
		1050	1100	1140	1170	1200	1225
Argila 9	20%	0.72	0.80	1.20	1.64	1.80	1.88
Argila 9/A	6%	0.02	0.04	0.07	0.10	0.06	0.13
Caulim PR	5%	0.10	0.12	0.15	0.21	0.25	0.27
Filito P1	47%	0.94	2.16	4.14	5.64	7.52	6.30
Caco piso	2%	0.00	0.09	0.14	0.20	0.22	0.20
Chamote	2%	-	-	-	-	-	-
Silicato sódio	1%	-	-	-	-	-	-
Quartzito	3%	-0.03	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
Siltito 9	3%	0.25	0.30	0.31	0.09	-0.03	-0.03
Siltito E	7%	0.11	0.39	0.63	0.42	-0.07	-0.07
Talco PL	4%	0.00	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07
Simulação da RLq Composição 1		2.11	3.91	6.67	8.35	9.81	8.74
RLq Real Composição 1			4.30	7.10	9.90	11.00	9.80

Tabela 4. Ilustração da simulação com o método de aditividade para a previsão do coeficiente de dilatação térmica linear de engobes cerâmicos.

Matéria-prima	Dilatação ($\times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Composição DBF (%)	Simulação	Composição DBR (%)	Simulação
Alumina	59			10.0	5.90
Argila	37	17.0	6.29	30.0	11.10
Feldspato	43	43.0	18.49	15.0	6.45
Frita A	63	12.0	7.56		
Frita B	54	19.0	10.26	26.0	14.04
Frita C	74	3.0	2.22		
Quartzo	134			13	17.42
Zirconita	36	6.0	2.16	6.0	2.16
Simulação dilatação térmica ($\times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)			47.0		57.1
Coef. dilatação térmica real ($\times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)			53.1		58.4

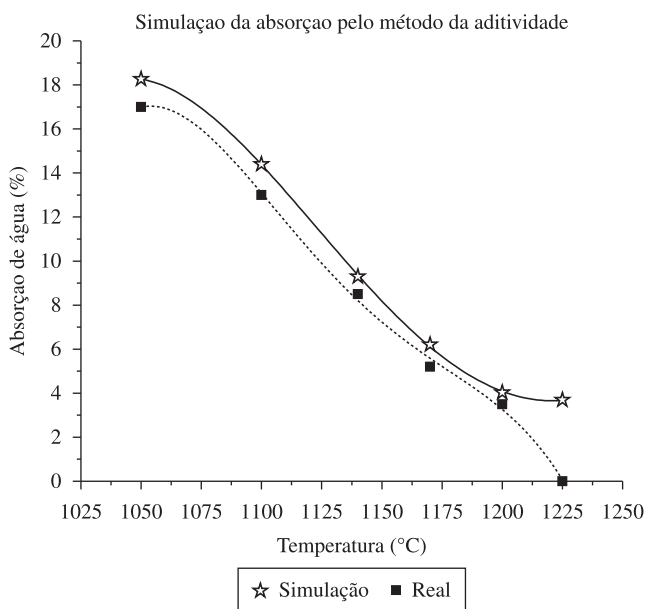


Figura 4. Absorção de água vs. temperatura obtida experimentalmente e simulada pelo método da aditividade.

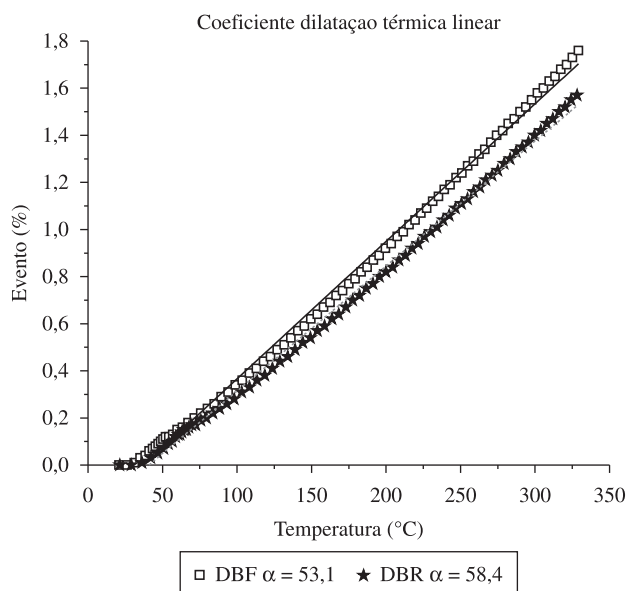


Figura 5. Ilustração do coeficiente de dilatação térmica linear das amostras simuladas com o método da aditividade.

enquanto as formulações P15 e P16 apresentam uma variação na mesma faixa de temperatura de aproximadamente 1,0%.

A mesma metodologia aplicou-se para analisar a absorção de água de uma formulação, a Figura 4 ilustra a simulação e a absorção de água da formulação frente à temperatura de queima, determinada experimentalmente.

Nota-se claramente que até a temperatura de aproximadamente 1200 °C, o modelo de aditividade teve bom comportamento, mas acima de 1200 °C obteve-se distorção entre os resultados experimentais e simulados. Isso pode ser explicado pelo fato de que o método de aditividade desconsidera as prováveis interações entre as matérias-primas da massa durante a sinterização, que podem potencializar a formação de fases líquidas ou gerar cristalizações que não são previstas através do modelo de aditividade.

Na Tabela 4 apresenta-se a simulação realizada para a previsão do coeficiente de dilatação térmica linear de dois engobes cerâmicos.

A Figura 5 ilustra o coeficiente de dilatação térmica linear obtido elaborando-se a formulação simulada anteriormente.

A Tabela 4 mostra que o método da aditividade pode ser uma ferramenta auxiliar para a simulação do coeficiente de dilatação térmica linear de formulações cerâmicas, neste caso aplicado para o desenvolvimento de formulações de engobes.

6. Considerações Finais

O método de aditividade possui suas vantagens e desvantagens para o desenvolvimento de formulações cerâmicas. Cita-se como vantagens:

- O método de aditividade apresentou-se como uma ferramenta simples e acessível, podendo ser aplicado no desenvolvimento de formulações cerâmicas;
- O método apresentou bons resultados quando utilizado para o desenvolvimento de massas cerâmicas de composições de baixa complexidade, onde o grau de interação entre os componentes é reduzido. No entanto, nas massas cerâmicas onde temos misturas entre feldspatos, carbonatos e talco, bem como entre argilas e carbonatos são de difícil previsão por este método em função da interação entre as matérias-primas durante a queima;
- Trata-se de um excelente método para o desenvolvimento de formulações para massas de revestimentos cerâmicos produzidos por via seca, onde em geral as formulações são constituídas exclusivamente por misturas de argilas. A previsibilidade dos resultados de formulações neste tipo de massa ainda é favorecida pela utilização de ciclos de queima rápidos e de temperaturas de queima reduzidas;
- O método pôde ser aplicado também para a previsão de coeficientes dilatométricos de esmaltes e engobes cerâmicos, com excelentes previsões frente aos resultados experimentais.

Como restrições do método de aditivação, pode-se citar:

- O método de aditivação apresentou distorções na simulação da retração linear de queima e absorção de água a elevadas temperaturas, isso pode ser decorrente de reações químicas (eutéticos) entre as matérias primas, fato que o método aditivo desconsidera;
- Apesar do método da aditividade apresentar aplicabilidade em formulações de materiais cerâmicos, pode-se concluir que a gama de aplicações não é tão vasta, cabendo ao usuário decidir se o método é bem aplicável para o seu projeto ou não, em vista das considerações acima apresentadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos colaboradores Crisolino dos Santos, Fabrine Borges de Oliveira, Mauro Lúcio Fernandes, Edson da Silveira e Rubens Moretti pelo auxílio nas pesquisas e a CAPES pelo auxílio financeiro.

Referências

1. FANDER, G.; SPRONK, J. (ed.). **Multiplecriteria Decision Methods and Applications**. Berlin: Ed. Springer-Verlag, 1985.
2. MASSAM, B. H. Multicriteria Decision Making Techniques in Planning. **Planning Progress in Planning**, v. 30, p. 1-83, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0305-9006\(88\)90012-8](http://dx.doi.org/10.1016/0305-9006(88)90012-8)
3. HWANG, C.; YOON, K. **Multipleattribute Decision Making: Methods and Applications**. Berlin: Ed. Springer-Verlag, 1981.
4. BANA e COSTA, C.A. (Eds.). **Readings in Multiplecriteria Decision Aid**. Berlin: Ed. Springer-Verlag, 1990.
5. BELTON, V. A Comparison of the Analytic Hierarchy Process and a Simple Multiattribute Value Function. **EJOR**, v. 26, p. 7-21, 1986. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90155-4](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(86)90155-4)
6. NEUFVILLE, R.; STAFFORD, J. H. **Systems Analysis for Engineers and Managers**. New York: Ed. McGraw-Hill, 1971.
7. BELTON, V. The Use of a Simple Multiplecriteria Model to Assist in Selection from a Shortlist. **JORS**, v. 36, n. 4, p. 265-274, 1985.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 13818**: Placas cerâmicas para revestimento, especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.