

DIAGNÓSTICO DA ADIÇÃO DE CINZA DE CARVÃO GASEIFICADO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM MATERIAL CERÂMICO

Cristiano Corrêa Ferreira

Gabryella Cerri Mendonça

Lia Maria Herzer Quintana

Flávio André Pavan

Paulo Fernando Marques Duarte Filho

Resumo: *Este trabalho investiga a utilização da cinza proveniente da gaseificação do carvão mineral em corpos de prova cerâmicos com o objetivo de estudar a influência da adição da cinza do carvão gaseificado na resistência mecânica de uma argila caulinita. Foram preparadas diferentes formulações de argila: cinza (0:0; 0:5; 0:10; 0:20 e 0:30%) utilizando a técnica de prensagem. Os corpos de prova foram, submetidos a secagem natural e artificial e queimados em mufla através de duas maneiras denominadas de queima e requeima. O ensaio de resistência mecânica a compressão seguiu a norma da M-CIENTEC C-027. Com base na análise de variância e aplicação do teste comparativo de médias ($p < 0,05$) o melhor resultado de resistência mecânica (7.44MPa) foi obtido com a formulação 5% em massa de adição de cinza de carvão gaseificado.*

Palavras-chave: argila in natura, cinza leve da gaseificação, resistência mecânica.

Abstract: *This work investigates the use of ash from coal gasification in ceramic specimens with the objective of studying the influence of the addition of ash from carbonated coal on the mechanical resistance of a kaolinite clay. Different clay formulations were prepared: gray (0: 0: 0: 5: 0: 10: 0: 20 and 0-30%) using the pressing technique. The specimens were submitted to natural and artificial drying and burned in a muffle through two so-called burning and reheating methods. The mechanical strength test followed the standard of M-CIENTEC C-027. Based on the analysis of variance and the application of the comparative test of means ($p < 0.05$), the best result of mechanical resistance (7.44MPa) was obtained with the formulation of 5% by mass of addition of coal ash.*

Keywords: clay in natura, light gray of gasification, mechanical resistance.

- 1 Doutor, Fundação Universidade Federal do Pampa.
- 2 Graduanda em Engenharia Química, Fundação Universidade Federal do Pampa.
- 3 Mestre, Centro Universitário da Região da Campanha
- 4 Doutor, Fundação Universidade Federal do Pampa
- 5 Doutor, Fundação Universidade Federal do Pampa

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Prado (2013) o setor de cerâmica estrutural é uma importante atividade e que tem como base a construção civil além de ter um significativo papel social, conforme a ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Da mesma forma, o setor de cerâmica vermelha representa 4,8% da construção civil com aproximadamente 6.903 empresas e olarias e com um faturamento anual de R\$ 18 bilhões, mostrando a sua relevância para a economia brasileira.

Vários autores recentemente desenvolvem pesquisas na busca de sustentabilidade e a diminuição do uso da matéria-prima principal (argila) na composição destes produtos, como por exemplo, o trabalho de Leite (2016) que utiliza resíduo de chamote e casca de ovo para a produção de materiais cerâmicos, Peterson (2016) usa resíduo a base de cinza proveniente da lenha de eucalipto, Souza *et al.* (2011) adiciona a cinza gerada do bagaço da cana-de-açúcar que é resultante da queima de bagaço em caldeiras e (Nunes *et al.*, 2017) a cinza de lã de ovinos.

No presente estudo é investigado o resíduo utilizado na gaseificação de carvão mineral que é um produto utilizado em abundância na região da campanha do Rio Grande do Sul e que de acordo com Belgiorno (2003) representa um processo de conversão térmica destinado a produção de um gás combustível ou um gás de síntese. Quando realizado via leito fluidizado, como ocorre nesta pesquisa, há a desvantagem de obter uma cinza contendo altos teores de carbono, sendo a cinza leve ou *char* um dos principais resíduos oriundos da gaseificação (Hernández 2016). Vissotto (2015) descreve ainda que estas cinzas são provenientes da oxidação

completa do combustível sólido e que a sua composição é apresentada na forma de óxidos como por exemplo: SiO_2 e FeO . Além disso, Dias *et al.* (2017) complementa que as cinzas leves ou volantes provenientes da gaseificação contém, em geral, granulometria entre 0,01 e 100 μm , são compostas heterogeneamente de silicatos, aluminossilicatos e outros óxidos metálicos além de carbono não convertido (*char*), que é arrastado junto às cinzas pelos gases produzidos.

No processo de fabricação dos produtos cerâmicos com utilização de resíduos existe a etapa de queima que serve para endurecer o material cerâmico onde a mesma deve ser realizada de modo lento inicialmente para que as peças não sofram rachaduras ou trincas. A requeima, de acordo com Nastria (2016) é onde a cor da peça é obtida definitivamente, deve ser realizado de modo lento.

Já as propriedades mecânicas são importantes para avaliar a resistência dos produtos formulados, bem como, prever possíveis aplicações, como por exemplo, na área da construção civil. Neste sentido, autores como Illera (2016) destacam que estes testes podem variar dependendo do tipo de argila a ser usado e suas condições de pré-tratamento, além de que a temperatura e queima influencia diretamente nas propriedades.

Além das propriedades mecânicas, também, foi realizada uma análise estatística através de testes de hipóteses conforme Ignácio (2012). Como exemplo de pesquisas que fizeram uso de estatística, têm-se os trabalhos de Zanin (2013) que utilizou os testes de Dixon e teste t de student, sendo que o último usado para a verificação de valores estatisticamente iguais, além disso, Correa (2015) fez uso dessas análises para a verificação da capacidade do processo de secagem de uma indústria de cerâmica vermelha e como isso pode influenciar no controle de qualidade do produto.

Neste contexto, este trabalho se propõe a incorporar a cinza volante proveniente da gaseificação de carvão mineral e que é denominada de cinza leve em uma argila utilizada para fabricação de diferentes produtos

que são usados na construção civil, analisando o comportamento mecânico através de ferramentas estatísticas. Além disso, avaliou-se os efeitos da resistência a partir da queima e requeima.

2. METODOLOGIA

Inicialmente a argila foi coletada em uma olaria, localizada na cidade de Bagé, situada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Essa argila não foi submetida ao processo de sazonalidade, pois a indústria cerâmica local não tem o hábito de realizar esta atividade e, dessa forma, há uma maior quantidade de matéria orgânica na sua constituição, além disso a argila é considerada caulinita. A cinza proveniente da gaseificação do carvão mineral foi coletada no Laboratório de Energia e Carboquímica da Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé – Brasil. A composição química da argila e da cinza da gaseificação do carvão mineral com base na técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X é demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química da argila e cinza gaseificada.

Compostos	Argila (%)	Cinza leve gaseificada (%)
SiO ₂	57.54	51.48
Al ₂ O ₃	12.15	10.88
Fe ₂ O ₃	11.77	2.73
K ₂ O	2.67	1.41
MgO	1.12	0.38
CaO	1.11	1.60
TiO ₂	0.81	0.83
Na ₂ O	0.24	0.43
P ₂ O ₅	0.09	0.43
ZrO ₂	0.07	0.023
SO ₃	0.07	3.83
MnO	0.04	-
SrO	0.03	-
Rb ₂ O	0.03	-
ZnO	0.03	-
C	-	26.8

Fonte: (Lacer/UFRGS).

Na Tabela 1, percebe-se que a sílica (SiO₂) é um composto dominante na argila e na cinza gaseificada. A presença de óxido de

alumínio (Al_2O_3) e de óxido de ferro (Fe_2O_3) indicam que esta argila é caulinita, de acordo com o trabalho de Andrade (2010). A cinza leve contém alta porcentagem de carbono (C), como já esperado, por conta dele ser transportado juntamente com as cinzas pelo gaseificador.

Para a obtenção dos corpos de prova, a argila foi primeiramente moída, em um moinho de martelos e em seguida submetida a um conjunto de peneiras de até 100 mesh. A fração que não foi retida, foi quarteada e utilizada no experimento. A cinza volante foi apenas quarteada, pois sua granulometria se assemelhava a 100 mesh, não havendo a necessidade de moagem e peneiramento. Assim, a argila e a cinza foram misturadas e homogeneizadas, obtendo as formulações e nomenclatura das composições encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Formulações e Nomenclatura das composições.

(% em peso) das formulações	Nomenclatura das composições	
	Argila (A)	Cinza Gaseificada (CG)
0	A0	-
5	-	CG5
10	-	CG10
20	-	CG20
30	-	CG30

Fonte: Autores, 2018.

Em seguida foi adicionado 5% em peso (massa de umidade/ massa seca) em cada formulação, e separadas por sacos plásticos por 24 horas para ocorrer a homogeneização da massa argilosa. As formulações foram submetidas a conformação por prensagem de até 5 toneladas, em uma prensa hidráulica modelo Specac Atlas, sendo em seguida secos naturalmente em temperatura ambiente por 24 horas e artificialmente em uma estufa tipo mufla modelo Fanem Orion 515 a 110°C por 24 horas. Para avaliação desses parâmetros foram realizados testes de umidade de conformação e contração de secagem no período após moldagem, e em que foram secos naturalmente e na estufa de acordo com as especificações da CIENTEC C-20 e C-21 (1995). Para a maior confiabilidade dos

resultados obtidos foram realizados estudos em replicatas (n=30) para cada formulação estudada.

As equações 1 e 2 mostram os cálculos da umidade de conformação e contração de secagem das referidas amostras. Os resultados obtidos estão na Tabela 3.

$$U (\%) = \frac{P_0 - P_s}{P_0} \times 100 \quad (1)$$

Onde U é a umidade de conformação, P_0 massa úmida do corpo de prova após a conformação e P_s a massa do corpo de prova seco à 110 °C (M-Cientec, C-020, 1995).

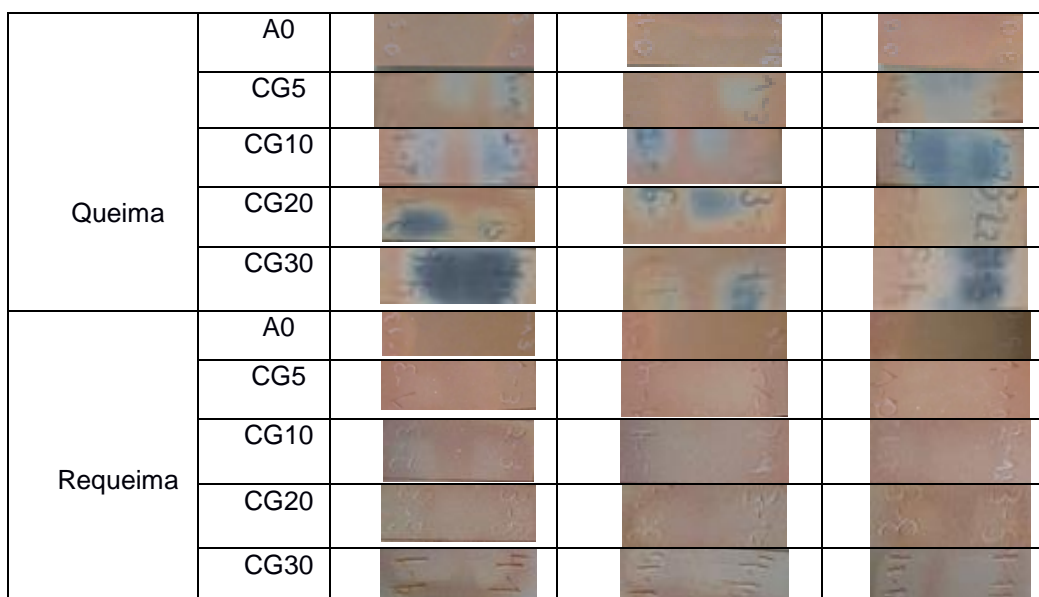
Na Equação 2, a seguir, encontra-se o cálculo da contração linear de secagem:

$$C_s (\%) = \frac{L_0 - L_s}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

Onde C_s é a contração linear de secagem, L_0 o comprimento inicial do corpo de prova após a conformação e L_s o comprimento do corpo de prova seco à 110 °C (M-Cientec, C-021, 1995).

Posteriormente foram queimados, 15 corpos de prova por formulação, ou seja, 75 para queima e 75 para a requeima, na temperatura de 800°C em um forno elétrico Sanchis, sendo o patamar de queima utilizado primeiramente foi de 100°C por hora e quando chegou na temperatura de queima desejada permaneceu por 3 horas. No entanto alguns corpos de prova apresentaram defeitos similares a coração negro (Figura 1) na região delimitada pelo item “queima”. Com o propósito de solucionar ou amenizar este problema detectado, metade dos corpos de prova, de cada formulação, (15) dessa primeira queima foram submetidos novamente a uma requeima. Porém, desta vez, diminuiu-se o patamar para a 80°C por hora até completar o ciclo na temperatura de 800°C quando permaneceram por mais 3 horas (Figura 1) na região definida como item “requeima”.

Figura 1 – Corpos de prova cerâmicos após a primeira queima e requeima.



Fonte: Os autores, 2018.

Após estas etapas foi realizado o teste de resistência mecânica (máquina universal EMIC), localizada no laboratório de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Pampa conforme os padrões da norma M-CIENTEC C-027 (1995). Em relação a este teste, inicialmente foram medidos a altura e a largura dos corpos de prova; após o corpo de prova foi colocado sobre os apoios com uma distância de 5 cm; o ensaio iniciou com a aplicação de uma força de 5 KN e terminou quando o corpo de prova foi rompido. Os resultados encontrados na resistência mecânica foram submetidos a análise de variância a fim de se verificar se as diferentes formulações testadas afetaram significativamente ($p < 0,05$) nos parâmetros dos índices de resistência e absorção. Logo após, aplicou-se o teste de comparações de médias Dunnett, com o intuito de verificar se as médias obtidas nas diferentes formulações são estatisticamente diferentes da formulação controle (A0).

3. RESULTADOS E DICUSSÃO

Para avaliação dos parâmetros obtidos na secagem foram realizados os ensaios de umidade de conformação e contração de

secagem para os materiais investigados. Os resultados destes ensaios com suas respectivas médias e desvio padrão são demonstrados na Tabela 3.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3 pode-se observar que a umidade de conformação e contração de secagem são dependentes da formulação utilizada.

Nesta tabela observa-se que o maior valor médio de umidade de conformação encontrado foi para a formulação CG10 (4.74%) e a menor foi para a A0 (2.66%) o que demonstra que as formulações com resíduo retêm maior percentual de umidade quando comparadas com a argila A0.

Os maiores índices médios de contração de secagem encontrados foram para as formulações CG20 (1.05%) e CG10 (1.01%) respectivamente o que ratifica os índices mais elevados de umidade de conformação encontrados nessas amostras.

O maior desvio padrão obtido foi o da formulação CG10 (3.10) para a umidade de conformação quando comparada aos demais corpos de prova. Este comportamento pode ser explicado considerando a heterogeneidade da composição química da cinza de carvão obtido durante o processo de obtenção.

Tabela 3 – Resultado obtido no teste de umidade de conformação e contração de secagem

Composição	Umidade de conformação	Contração de Secagem
	Média %	Média %
A0	2.66±0,20	0.63±0.19
CG5	3.47±0.94	0.79±0.23
CG10	4.74±3.10	1.01±0.39
CG20	4.48±0.73	1.05±0.17
CG30	4.41±0.43	0.36±0.08

Fonte: Os autores, 2018.

Através da análise de variância verificou-se que as diferentes formulações influenciaram significativamente ($p < 0,05$) nos parâmetros de resistência mecânica dos corpos de prova. A Tabela 4 apresenta os resultados médios de resistência mecânica e absorção de água obtidos a partir da média de 5 corpos de prova para cada formulação.

Tabela 4 – Valores médios da resistência mecânica da variância dos corpos de prova submetidos a queima e requeima.

Processo	Ensaio	Formulações				
		A0	CG5	CG10	CG20	CG30
Queima	RM (MPa)	5.38±1.05	7.44±1.16	4.86*±0.53	3.82±0.52	2.44±0.30
Requeima	RM (MPa)	5.74±1.37	6.00±1.37	4.66*±1.70	3.94*±1.21	2.90±0.76

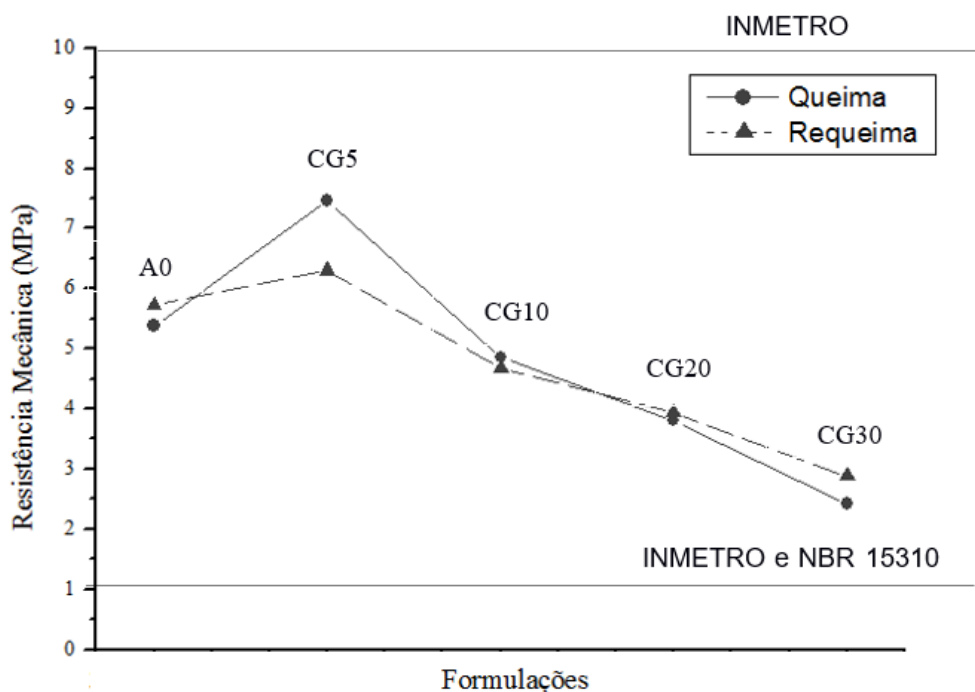
*Diferem da amostra controle (A0). Fonte: Os autores, 2018.

De acordo com a Tabela 4 os valores das médias com asterisco diferem da amostra controle, as demais indicam a não existência de diferença significativa entre o tratamento testemunha e os demais obtido pelo teste de Dunnett. Notou-se que a resistência mecânica das formulações CG5, CG20 e CG30 que foram submetidas apenas, a queima, se mostraram estatisticamente diferentes da formulação A0. Isto se deve ao fato de que as peças não chegaram a queimar de forma homogênea no forno o que significou em diferenças significativas de resistência dentro de uma mesma formulação, além disso, essas formulações apresentaram maiores valores de umidade de contração quando comparadas com a formulação A0. Já quando os corpos de prova foram submetidos a requeima apenas a formulação CG30 se mostrou estatisticamente diferente da formulação A0 o que comprova a maior eficiência da requeima.

Dessa forma, percebe-se que o teste de Dunnett foi uma análise estatística eficiente para comparar os valores de resistência mecânica, mostrando que os diferentes percentuais de cinzas proveniente da gaseificação do carvão mineral adicionadas aos corpos de prova cerâmicos influenciaram na resistência dos mesmos.

A Figura 2 mostra o gráfico dos resultados do teste de resistência mecânica dos corpos de prova que sofreram queima e requeima a partir dos dados apresentados na Tabela 5.

Figura 2 – Resultado da resistência mecânica.



Fonte: Autores, 2018.

A partir da análise da Figura 2 pode-se perceber que todas as formulações estão dentro do padrão recomendado pelas normas do INMETRO/ Brasil, que define que para blocos de vedação a resistência mecânica deve estar compreendida entre 1 a 10 MPa, já para telhas a NBR 15310 (2009) estabelece que a resistência mecânica tenha um valor acima de 1 MPa. A análise do gráfico mostra que para os corpos de prova que sofreram uma única queima, a formulação CG5 apresentou a maior resistência mecânica 7.44 MPA, e a CG30 a menor 2.44 MPA, podendo afirmar que a adição de 5% de cinza proveniente da gaseificação do carvão mineral foi a melhor formulação diante da análise da resistência mecânica. Já na requeima o maior valor médio de resistência mecânica obtido foi de 6.28 MPA também para a formulação CG5 e o menor foi de 2.90 MPA para a formulação CG30.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se assim que a adição de cinza proveniente da gaseificação pode ser adicionada na argila para a fabricação de cerâmica vermelha, a partir do teste de resistência mecânica, pois todas as formulações se enquadram dentro dos limites estabelecidos pelo INMETRO para blocos cerâmicos e pela NBR 15310 (2009) para telhas.

Deve-se considerar também que quanto mais cinza proveniente da gaseificação foi adicionada na argila, menor foi a resistência mecânica dos corpos cerâmicos, além de que a formulação CG5 foi a que apresentou os maiores índices de resistência quando comparado a formulação A0. A formulação CG5 obtida através da requeima foi a que apresentou o melhor desempenho em relação as análises mecânicas.

5. REFERÊNCIAS

Prado, US do, and José Carlos Bressiani. "Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década." *Cerâmica Industrial. São Paulo* 18.1 (2013): 07-11.

Disponível em: <https://www.anicer.com.br/>. Acesso em 23 de agosto de 2018.

Leite, Flaviane HG, Thiago F. Almeida, and José Nilson F. Holanda. "CARACTERIZAÇÃO DE CHAMOTE E CASCA DE OVO PARA PRODUÇÃO DE MATERIAL CERÂMICO."

Souza, A. E., et al. "Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials." *Journal of Environmental Management* 92.10 (2011): 2774-2780.

Nunes, Francine Machado, et al. "Evaluation of Physical Parameters of a Clay with the Incorporation of Industrial Ash Waste by Means of Variance Analysis." *Materials Science Forum*. Vol. 881. Trans Tech Publications, 2017.

Belgiorno, V., et al. "Energy from gasification of solid wastes." *Waste management* 23.1 (2003): 1-15.

Hernández, Juan J., Magín Lapuerta, and Esperanza Monedero. "Characterisation of residual char from biomass gasification: effect of the gasifier operating conditions." *Journal of Cleaner Production* 138 (2016): 83-93.

Visotto, João Paulo, et al. "Gaseificação de serragem de pinus em leito fluidizado." *Revista Ciência e Tecnologia* 18.32 (2015).

Dias, Yan Resing, et al. "CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA DAS CINZAS VOLANTES, COPRODUTO DA GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO MINERAL DE CANDIOTA-RS." *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão* 8.2 (2017).

Nastria, Suelen et al. Influência da Temperatura de Requeima e Tempo de Hidratação sobre a Expansão por Umidade de Revestimentos Cerâmicos.

Illera, Leonardo Cely; Illera, Claudia Vanessa Cely; Contreras, Keila Anteliz. Evaluación de las características tecnológicas de una arcilla al adicionarle materiales de construcción para fabricar productos estructurales sin ejecutar el proceso de sinterizado. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, v. 26, n. 2, p. 5-20, 2016.

Ignácio, Sergio Aparecido. "Importância da estatística para o processo de conhecimento e tomada de decisão." *Revista Paranaense de Desenvolvimento-RPD* 118 (2012): 175-192.

Zanin, T. L., W. Klitzke, and L. F. L. Luz Jr. "Study of the influence of the addition of mineral coal ash on the properties of red ceramics." *Cerâmica* 59.350 (2013): 231-234.

Correa, T.P.A.; Vasconcelos, A. M. Análise da Capacidade do Processo de Secagem em uma Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, (2015), v. 20, p. 05.

M. CIENTEC 1/C-021, Out. 1976 – ARGILAS: Determinação da Retração Linear de Secagem; 1p.

M. CIENTEC 1/C-025 - Setembro 1976 – MATERIAIS CERÂMICOS: Determinações do Módulo de Ruptura, 1p.

M. CIENTEC 1/C-028 – Outubro 1976 – ARGILAS: Determinação da Perda ao Fogo, 1p.

Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/tijolo.asp>, acessado em 12 de agosto de 2017. ABNT NBR 15310: 2009.