

SUBMETIDO 07/12/2021

APROVADO 21/01/2022

PUBLICADO ON-LINE 07/02/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITOR ASSOCIADO
José Carlos Lima Júnior

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6547>

ARTIGO ORIGINAL

Pegada de carbono da sinterização do porcelanato e potencial de mitigação de mudanças climáticas associado à substituição energética

 Alexandre Magno Vieira Gonçalves de Brito ^[1]

 Eline de Araújo Andrade ^[2]

 Monica Carvalho ^{[3]*}

[1] alexandre_magno@hotmail.com
Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

[2] eline.andrade@cear.ufpb.br
[3] monica@cear.ufpb.br
Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

RESUMO: A fabricação de porcelanato demanda uma quantidade elevada de eletricidade para abastecer os maquinários e também uma grande quantidade de calor para a sinterização, que usualmente emprega gás natural. Este estudo quantifica as emissões de gases de efeito estufa, por meio da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida, para um forno a gás natural de uma indústria de cerâmica. O primeiro objetivo é fornecer o impacto ambiental associado ao processo de sinterização do porcelanato, que será expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (pegada de carbono). O segundo objetivo tem o intuito de verificar o potencial de mitigação das mudanças climáticas com a introdução de novas fontes energéticas para alimentar os fornos. O estudo de caso aqui apresentado incluiu duas formas de biomassa disponíveis localmente para substituição parcial do gás natural consumido no forno: resíduo de poda urbana e bagaço de cana-de-açúcar. Após coleta de dados *in situ*, construiu-se um inventário de fluxos de matéria e energia. O processo de sinterização emitiu 0,2187 kg CO₂-eq/kg de porcelanato, e 93% dessas emissões estão associadas ao consumo de gás natural. A substituição de 30% do gás natural por resíduos de poda urbana ou bagaço de cana-de-açúcar diminuiu as emissões em aproximadamente 25%. Verificou-se que há potencial para mitigação de mudanças climáticas associado à transição energética do combustível utilizado na sinterização.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; biomassa; emissões de gases de efeito estufa; ODS 12; revestimento cerâmico; sustentabilidade.

Carbon Footprint in sintering of porcelain tiles and the potential mitigation of climate change associated with energy transition

*Autor para correspondência.

ABSTRACT: *The manufacture of porcelain tiles (porcellanato) demands a high amount of electricity to power machinery as well as a high amount of heat for the sintering process, which usually employs natural gas. This study quantifies the greenhouse gas emissions from a natural gas kiln in a ceramic industry by using the Life Cycle Assessment methodology. The first objective is to measure the environmental impact associated with the sintering process of porcelain tiles, which will be expressed in kilograms carbon dioxide equivalents (carbon footprint). The second objective is to assess the potential of climate change mitigation following the introduction of new energy sources into the kilns. The case study presented here includes two types of biomass locally available for partial replacement of the natural gas used in the kiln: urban pruning residues and sugarcane bagasse. After collection of data in situ, an inventory of material and energy flows was created. The sintering process emitted 0.2187 kg CO₂-eq/kg of porcelain tile, and 93% of these emissions were associated with the consumption of natural gas. The replacement of 30% of the natural gas by urban pruning residues or sugarcane bagasse resulted in a decrease of approximately 25% of emissions. There is potential for mitigation of climate change associated with energy transition in the sintering process.*

Keywords: *biomass; ceramic tile; greenhouse gas emissions; life cycle assessment; SDG 12; sustainability.*

1 Introdução

A indústria brasileira é protagonista no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a terceira posição em produção e consumo, sendo a sexta em exportações (ANFACER, 2019). Reconhecendo também seu caráter intensivo de consumo de energia (EPE, 2018), o setor cerâmico é um ótimo candidato para análises energéticas e ambientais. A forte competição em um mercado globalizado resultou na busca pela máxima eficiência com o mínimo custo, minimizando o uso de matérias-primas não renováveis (água e energia) (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Do ponto de vista energético, as análises podem ser desenvolvidas com base nas leis da termodinâmica. Carvalho, Abrahão e Gondim (2006) sugeriram medidas de economia para uma indústria cerâmica, baseando-se em análises termodinâmicas, concluindo que havia infiltrações de ar frio em excesso (56,55%) na zona de combustão do forno cerâmico e que 62,12% do calor em trânsito era perdido por radiação e convecção. Carvalho e Silva (2018) desenvolveram uma análise baseada da segunda lei da termodinâmica, e a análise exergética revelou que a eficiência exergética era pouco mais de 0,5% (quase 99,5% da exergia da lenha estava sendo destruída).

Do ponto de vista ambiental, até recentemente, o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável eram vistos como problemas e fatores de risco, mas agora já são encarados como oportunidades para crescimento e melhoria de eficiência. As empresas que demonstram conhecer seus impactos ambientais, por meio de sua quantificação, e que se comprometem a reduzi-los já se colocam à frente de muitas concorrentes. Essa proposta de Quantificar-Reduzir-Evidenciar (CARVALHO; FREIRE; BRITO, 2016) já foi explorada anteriormente em uma indústria de cerâmica vermelha, por meio da aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (ABRAHÃO; CARVALHO, 2018). Mais recentemente, o foco dos estudos vem sendo as comparações ambientais, a exemplo de Gonçalves *et al.* (2021), que

compararam dois tipos de sistemas fotovoltaicos, e de Schultz e Carvalho (2022) e Fonseca e Carvalho (2022), que incluíram a variável de tempo de retorno das emissões embutidas para avaliar uma usina solar fotovoltaica e um aerogerador eólico, respectivamente, na Paraíba.

As melhorias podem ser implementadas com base na conservação e eficiência energética em todas as etapas produtivas do porcelanato. A ecologia industrial já mostrou que não se pode continuar realizando avaliações fragmentadas de impactos ambientais (RIBEIRO; GIANETI; ALMEIDA, 2003). A ACV propõe uma completa mudança de pensamento no desenvolvimento e fabricação de produtos (CONTARTESI; MELCHIADES; BOSCHI, 2019), estimulando as empresas a repensarem todo o ciclo de vida, sabendo que essas iniciativas são capazes de transformar o mercado e as relações de consumo da população, podendo reduzir ainda os impactos socioambientais.

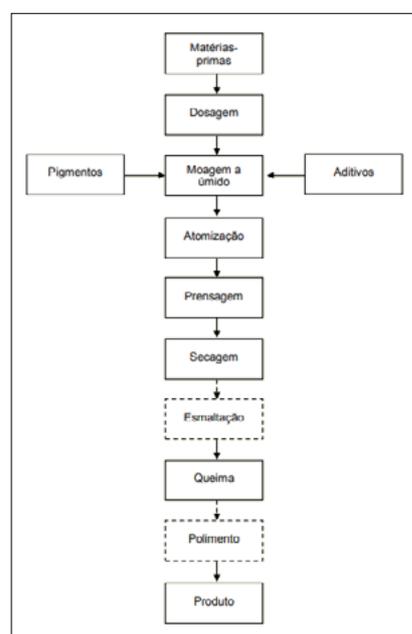
Confirmando a tendência da indústria de revestimentos em buscar reduzir seu consumo energético (produzir mais com menos), e aliando a isso a conscientização da sociedade e a legislação ambiental cada vez mais exigente, o objetivo deste estudo é aplicar a metodologia da ACV ao processo de sinterização do porcelanato. Primeiro constrói-se um inventário de fluxos de materiais e energia com coleta de dados *in situ*, com posterior quantificação das emissões, e em seguida verificam-se as reduções obtidas ao substituir parcialmente o gás natural consumido por resíduo de poda urbana e bagaço de cana-de-açúcar.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o referencial teórico, com fundamentos e conceitos necessários ao entendimento do estudo. A seção 3 apresenta o método da pesquisa, com o passo a passo da realização do estudo, seguida pela seção 4 com os resultados da pesquisa e algumas discussões. A seção 5 finaliza com algumas conclusões e considerações finais.

2 Referencial teórico

Entre os produtos da indústria cerâmica, o porcelanato é um tipo de revestimento que se diferencia e se destaca das cerâmicas comuns para revestimento pelas suas características técnicas e estéticas (CONSTANTINO; ROSA; CORREA, 2006). O processo produtivo do porcelanato é indicado na Figura 1.

Figura 1 ►
Fluxograma do processo de produção do porcelanato.
Fonte: Oliveira e Hotza (2015)



Uma das etapas do processo produtivo do porcelanato é a sinterização (queima), que é um processo térmico que ocorre em fornos, no qual o produto se transforma em um corpo íntegro e de maior resistência mecânica, sob ação da temperatura (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2018). A queima é a fase central do processo cerâmico (BARBOSA *et al.*, 2008). Os tradicionais fornos-túnel consumiam entre 600 kcal/kg e 700 kcal/kg de material produzido e foram progressivamente substituídos por modernos fornos a rolo que consomem entre 500 kcal/kg e 600 kcal/kg de material produzido, sendo que o setor cerâmico europeu tem como meta reduzir esse consumo para 350 kcal/kg a 400 kcal/kg de material produzido (ANFACER, 2019).

A ACV é atualmente a metodologia mais empregada no mundo para quantificar os potenciais impactos ambientais associados a um processo ou atividade e está normatizada pela Organização Internacional para Padronização (ISO, 2006a, 2006b). Do ponto de vista de diferencial competitivo, a ACV avalia o desempenho de produtos ou processos, atendendo às atuais demandas do mercado em termos de sustentabilidade. A importância da ACV na análise de produtos, com aplicações na construção civil, foi discutida por Santos *et al.* (2011), que ressaltaram que a preocupação ambiental é uma crescente demanda e que a ACV é capaz de atender aos diferentes requisitos que a postura ambiental exige.

A indústria cerâmica já foi o foco de ACVs, nas quais se puderam identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental em processo de produção de materiais cerâmicos (KULAY; HANSEN; SEO, 2010); já houve esforços para construir um inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da ACV (SOARES; PEREIRA, 2004). Quando Benveniste *et al.* (2012) aplicaram essa metodologia às placas cerâmicas, concluíram que é fundamental quantificar e conhecer a origem dos impactos ambientais para direcionar esforços para sua redução e assim melhorar a sustentabilidade do produto em comparação a outros produtos emergentes e materiais competitivos. Os resultados apresentados por Pereira (2004) permitiram desenvolver uma avaliação comparativa entre duas empresas, sugerindo inclusive algumas justificativas para as diferenças de desempenho ambiental no processo produtivo de pisos cerâmicos. Entre os processos produtivos estudados por Becker Junior *et al.* (2013), o maior impacto relativo encontrou-se principalmente nas etapas de extração e transporte da argila, devido ao elevado consumo de combustível.

3 Método da pesquisa

Uma indústria cerâmica localizada na Paraíba foi selecionada para o estudo de caso aqui apresentado. O primeiro passo da pesquisa foi o de elaborar um balanço de massa e energia para o forno utilizado na sinterização do porcelanato, com base nas respostas de um questionário aplicado com o gerente da linha de produção.

A partir do inventário de fluxos materiais e de energia, para o caso base do gás natural (*Business As Usual*), utilizou-se uma base de dados para seleção dos processos representativos e construiu-se o inventário de ciclo de vida para a sinterização. Após selecionar e aplicar um método de avaliação de impacto ambiental ao inventário, obtém-se os resultados para o caso base.

Após a identificação dos recursos renováveis disponíveis na região, realizam-se as análises de sensibilidade para verificar qual a variação nos resultados obtidos quando se incorporam diferentes recursos energéticos.

3.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é uma metodologia já consolidada internacionalmente para a quantificação de impactos ambientais (GUINEE, 2002). No Brasil, as normas ISO foram traduzidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em suas normas NBR 14040 (ABNT, 2014a) e NBR 14044 (ABNT, 2014b), que definem quatro componentes básicos para a realização de uma ACV: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto; e interpretação. A ACV pode englobar desde a construção do processo, em que são detalhados os materiais e os resíduos, passando pela etapa de montagem, que inclui toda operação, transporte e energia, até chegar à análise do ciclo de vida de fato, que junta o tratamento do resíduo à montagem, possibilitando determinar e avaliar as causas dos impactos ambientais associadas ao processo em estudo (HINZ; VALENTINA; FRANCO, 2006).

Uma ótima aplicação da ACV é na construção civil, devido ao elevado consumo de matéria-prima e energia. Com a ACV é possível analisar os danos ambientais causados em cada etapa do processo (SILVA *et al.*, 2023), permitindo aos empresários investirem em medidas mitigatórias nas etapas mais críticas.

Neste trabalho, a ACV foi desenvolvida para um processo produtivo do forno de uma indústria cerâmica, localizada na cidade de João Pessoa, com a utilização do software SimaPro (2022) versão 8.0.3. A base de dados utilizada foi a Ecoinvent (2018).

O método de avaliação de impacto ambiental escolhido foi o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013), que é um dos mais utilizados para a análise de impactos ambientais, pois caracteriza as diferentes fontes de emissões de gases que podem gerar aumento no aquecimento global. Considera-se que o potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*) tem a função de estimar a relação do aquecimento global com as emissões na atmosfera de um quilograma de algum gás de efeito estufa comparado com um quilograma de dióxido de carbono (IPCC, 2013). O método considera três horizontes temporais das emissões na atmosfera: 20, 100 e 500 anos. Neste trabalho o horizonte de 100 anos foi aplicado, já que ele permite a verificação de efeitos cumulativos (DINATO, 2013; IPCC, 2013).

A quantificação de gases de efeito estufa deste trabalho foca as emissões operacionais associadas à sinterização e, portanto, não inclui considerações sobre a manufatura do forno (materiais constituintes) e sua vida útil.

3.2 O processo de sinterização do porcelanato

A obtenção de dados foi realizada por meio da aplicação de um questionário, respondido pelo gerente de produtos da indústria. O formato do porcelanato produzido é tamanho comercial (50 cm × 50 cm).

A produção mensal de porcelanato no forno específico é de 254.000 m², mas 1,6% é descartada devido a falhas de produção (e.g., quebras ou rachaduras). Com a retirada das perdas calcula-se uma produção mensal de 250.000 m² de porcelanato (1 m² = 19,5 kg na saída do forno). Neste artigo, considera-se que as perdas (peças rachadas e quebradas) não possuem valor comercial, sendo utilizadas para o nivelamento de terrenos, e, portanto, todo o impacto ambiental é alocado para o produto útil.

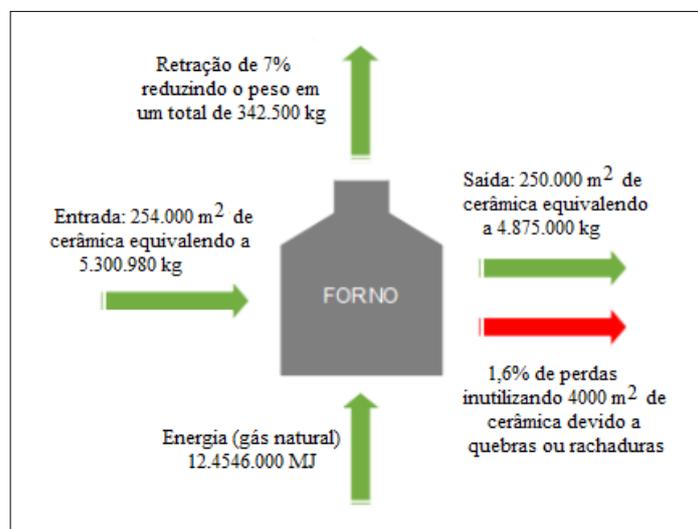
O peso total de cerâmicas obtidas é 4.875.000,00 kg/mês. O forno sob análise opera com gás natural e utiliza por mês 360.000 m³ (considerando-se 4,6 MJ/m³). Os fluxos de

matéria e energia envolvidos na produção do forno estão dispostos na Figura 2. A unidade funcional, à qual todos os fluxos de matéria e energia estão relacionados, é a produção mensal de porcelanato (250.000 m² de cerâmica).

Figura 2 ▶

Fluxos de massa e energia envolvidos na produção mensal de porcelanato.

Fonte: elaborada pelos autores



A Tabela 1 indica os fluxos de matéria e energia envolvidos nesta etapa de processamento térmico realizada no forno.

Tabela 1 ▶

Recursos utilizados na produção mensal de porcelanato.

Fonte: dados da pesquisa

Recurso	Quantidade mensal
Sienito	2.915.539,0 kg
Argila	1.696.313,6 kg
Talco	477.088,2 kg
Caulim	212.039,2 kg
Gás natural	12.456.000,0 MJ

3.3 Substituição energética: bagaço de cana-de-açúcar e resíduo de poda urbana

Uma análise de sensibilidade vai substituir, parcialmente, o gás natural consumido no forno por um combustível com teor de carbono mais baixo, que esteja disponível localmente. Selecionou-se o bagaço de cana-de-açúcar, devido ao estudo de Delgado *et al.* (2018), que menciona que a Paraíba conta com oito usinas de cana-de-açúcar que se estendem por 26 municípios ao longo da linha da costa, todos localizados na proximidade de João Pessoa.

Os resíduos da poda urbana também são uma fonte interessante de biomassa e provêm da remoção de galhos, frutos, inflorescências ou folhagens com a finalidade de promover o desenvolvimento adequado da planta (ARAÚJO *et al.*, 2018). Analisando esse tipo de resíduo, percebe-se que a quantidade mensal dessa biomassa é elevada: no município de

João Pessoa, entre 2008 e 2014, o total de resíduos de poda acumulados foi de 127 mil toneladas, com o destino final sendo o aterro sanitário metropolitano (EMLUR, 2014).

Portanto, esta subseção baseia-se nos trabalhos de Araújo *et al.* (2018) e Delgado *et al.* (2018) para verificar a possibilidade de utilização de resíduos de poda urbana e de bagaço de cana-de-açúcar, respectivamente, em substituição parcial ao gás natural queimado no forno cerâmico.

O trabalho de Araújo *et al.* (2018) quantificou os resíduos de poda urbana para a cidade de João Pessoa e desenvolveu quatro ACVs para cenários diferentes de descarte final (aterro sanitário simples, aterro sanitário com aproveitamento do gás metano, aproveitamento para geração de energia elétrica e aproveitamento para geração de calor). Delgado *et al.* (2018) estudaram o custo médio de produção e o modelo de negócio para a utilização de biomassa em caldeiras de um sistema de poligeração de um hospital do nordeste brasileiro. Na Tabela 2 são mostradas as quantidades de resíduos de poda urbana recolhidos na cidade de João Pessoa.

Tabela 2 ▼
Resíduos de poda urbana recolhidos na cidade de João Pessoa.
Fonte: Emlur (2014)

Mês	Toneladas de resíduos de poda recolhidos no município de João Pessoa						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Janeiro	1.255,56	1.473,01	1.805,89	1.906,77	2.031,56	2.114,18	2.237,49
Fevereiro	2.177,18	1.924,14	1.969,09	2.176,14	1.962,18	2.524,62	2.602,81
Março	1.945,56	1.879,07	1.511,25	2.080,05	1.749,47	2.112,47	2.143,31
Abril	2.280,44	2.035,20	2.105,18	2.097,52	2.183,37	2.116,00	2.483,16
Mai	2.567,13	2.136,88	2.353,82	1.998,29	2.005,39	2.323,00	2.798,81
Junho	2.729,39	2.289,57	2.191,43	2.358,93	2.202,99	2.740,92	3.277,56
Julho	2.607,27	1.917,58	2.036,73	1.974,13	2.249,66	2.372,17	2.553,85
Agosto	2.772,30	2.326,51	2.136,05	2.115,47	2.561,55	2.520,27	2.776,18
Setembro	2.543,95	2.278,13	2.028,35	2.017,70	2.524,96	2.642,58	2.486,23
Outubro	2.158,03	1.912,95	2.024,34	2.085,65	2.132,52	2.332,45	2.383,90
Novembro	2.036,00	1.837,83	1.981,49	2.042,77	2.390,96	2.376,96	2.579,62
Dezembro	1.992,23	1.736,38	2.051,40	2.071,31	2.249,19	2.534,85	1.700,95
Total	27.065,04	23.747,25	24.195,02	24.924,73	26.243,80	28.710,47	30.023,87

A média dos valores da Tabela 2 foi de 2.201,31 t/mês. Observa-se que, de abril a setembro, a coleta de resíduos de poda urbana é mais intensa, com uma variação de quase 30% entre junho (mês de média mais alta) e janeiro (média mais baixa). Considerando-se uma taxa de aproveitamento de 80% dos resíduos de poda (excluindo folhagens), obtém-se 1.761 t/mês disponíveis para potencial incineração.

Considerando-se o poder calorífico inferior (PCI) igual a 12,98 MJ/kg de resíduo de poda, densidade 390 kg/m³, então se obtém, considerando um equipamento de

queima com rendimento de 85%, 1,41 MWh/m³ (DELGADO *et al.*, 2018). A máxima quantidade de calor que pode ser obtida por meio da queima de resíduos de poda urbana é de 19.429.642 MJ por mês.

Segundo Delgado *et al.* (2018), o PCI do bagaço de cana-de-açúcar é 8,92 MJ/kg de bagaço, densidade 130 kg/m³, obtendo-se 0,32 MWh/m³ (rendimento do forno 85%). Uma usina de cana-de-açúcar como a Agroval, por exemplo, possui um valor excedente de bagaço acumulado durante uma safra igual a 18.500 t (equivalente a 1.541 t/mês) (CARVALHO *et al.*, 2019). A máxima quantidade de calor que pode ser obtida por meio da queima de bagaço de cana-de-açúcar é de 11.683.862 MJ por mês, considerando-se somente o bagaço excedente de uma usina (CARVALHO *et al.*, 2019).

As simulações foram realizadas então com dois tipos de biomassa: bagaço de cana-de-açúcar e poda de arborização urbana. Sabendo que a produção da indústria de cerâmicas é sempre em valores elevados, introduzem-se as biomassas, em três intensidades, com 10%, 20% e 30% (Tabela 3).

Tabela 3 ▶

Mix energético proposto para o processo de sinterização do porcelanato.

Fonte: dados da pesquisa

Combustível	Porcentagem introduzida no mix	Mix energético resultante (MJ)	
		Gás natural	Combustível renovável
Bagaço de cana-de-açúcar	10%	11.210.400	1.245.600
	20%	9.964.800	2.491.200
	30%	8.719.200	3.736.800
Resíduos de poda urbana	10%	11.210.400	1.245.600
	20%	9.964.800	2.491.200
	30%	8.719.200	3.736.800

4 Resultados da pesquisa e discussões

A utilização da ACV em programas de avaliação ambiental é relevante para: os consumidores, que podem optar por esse parâmetro no momento da escolha de determinado produto; as empresas e fabricantes, que podem comparar diferentes processos e produtos e escolher os que promovem melhoria ambiental e econômica; e o governo, que pode incentivar a utilização de práticas sustentáveis ou definir prioridades legais (FREIRE *et al.*, 2016).

Após coletar todas as informações *in loco*, construir os inventários e obter os resultados, as avaliações do impacto ambiental foram realizadas para um mês representativo de produção de cerâmica, expressando-o em kg CO₂-eq/kg cerâmica e kg CO₂-eq/m² cerâmica. Assim, as comparações com outros trabalhos existentes na literatura científica podem ser facilmente analisadas.

Observa-se pela Tabela 4 que a maior contribuição aos impactos ambientais se origina da energia utilizada para suprir o forno. Em seguida, os maiores poluentes são decorrentes da matéria-prima para produzir o porcelanato, sendo eles a extração de caulim, argila, sienito e o talco, respectivamente.

Tabela 4 ▶

Impactos ambientais associados ao consumo mensal de recursos.

Fonte: dados da pesquisa

Recurso	Emissões (kg CO ₂ -eq)
Sienito	8.775
Argila	9.750
Talco	1.462
Caulim	51.675
Gás natural	994.500
Total mensal	1.066.162

Tabela 5 ▼

Emissões de gases de efeito estufa associadas a diferentes mixes energéticos para o forno cerâmico.

Fonte: dados da pesquisa

O impacto ambiental mensal da produção de porcelanato foi de 0,2187 kg CO₂-eq/kg cerâmica ou 4,2646 kg CO₂-eq/m² cerâmica. Como a comercialização da cerâmica para revestimento é realizada por área, acredita-se que a expressão do impacto por m² de porcelanato facilita ao consumidor uma melhor visão da poluição envolvida no revestimento de uma área específica.

A Tabela 5 aponta os resultados obtidos para as ACVs realizadas para cada porcentagem de introdução de bagaço de cana-de-açúcar ou resíduo de poda urbana no mix energético do forno.

Combustível	Porcentagem introduzida no mix do forno	Emissões (kg CO ₂ -eq/mês)	Redução nas emissões (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	10%	976.390	8,5
	20%	885.520	17,0
	30%	795.720	25,4
Resíduos de poda urbana	10%	974.050	8,7
	20%	880.880	17,4
	30%	789.720	26,0
Caso base	100% gás natural	1.067.220	-

Realizadas as análises, os resultados são bem claros representando a redução dos gases poluentes com a utilização de bagaço de cana e poda urbana, em todas as proporções testadas, como uma fonte de auxílio para alimentação de um forno em uma indústria de porcelanato. Utilizando 30% de biomassa, seja bagaço da cana-de-açúcar ou resíduo de poda de arborização urbana, a redução em emissões de CO₂-eq representa respostas expressivas, mitigando em torno de 26% das emissões. Além dos resultados positivos, outro fator importante é que a obtenção da matéria-prima das biomassas é de fácil acesso, já que esse material, se não fosse utilizado em benefício da energia renovável, seria descartado no Aterro Metropolitano de João Pessoa (pelo menos no caso dos resíduos de poda urbana).

Destaca-se que a análise ambiental aqui realizada concentrou-se nas emissões operacionais da sinterização do porcelanato e não inclui emissões fixas (associadas ao equipamento). Ainda que se utilize o mesmo forno (que é adaptável para a queima de biomassa), a utilização de biomassa altera a vida útil do equipamento e, portanto, influencia levemente na parcela de emissões fixas (devidas ao equipamento). Porém, segundo Teplická *et al.* (2020) e Balaman (2019), a influência é bem maior em análises econômicas.

No Brasil, o estudo de Kulay, Hansen e Seo (2010) aplicou a ACV a uma indústria de porcelanato, concluindo que os impactos ambientais mais significativos se localizavam nas categorias de potencial de aquecimento global e toxicidade humana, associados ao consumo de gás natural e transporte das matérias-primas. Sugeriu-se a redução de perdas de material e a substituição do combustível para fontes mais limpas como algumas das alternativas para redução de emissões ambientais (KULAY; HANSEN; SEO, 2010). As opções de biomassa como alternativas para a substituição de gás natural são muitas, sendo ela, ainda, uma energia renovável e apresentando um custo mais baixo. É uma alternativa que as empresas devem considerar, ficando a critério da indústria escolher o tipo de biomassa que se adapte melhor a sua região.

Conforme mencionado por Melo, Silvestre e Carvalho (2019) e Grilo *et al.* (2018), a utilização de fontes renováveis é uma das maneiras de reduzir a emissão de gases de efeito estufa. O uso mais intenso de recursos renováveis também auxilia na redução dos impactos ambientais locais, regionais e globais. O futuro da cerâmica de revestimento está invariavelmente ligado: i) à redução de energia na sua produção; ii) ao reaproveitamento dos rejeitos; e iii) à utilização de resíduos provenientes de setores não necessariamente relacionados à cerâmica (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

O trabalho apresentado neste artigo foi realizado com o intuito de conscientização para as empresas de construção civil, as quais comercializarão seus produtos com seus clientes. Esses consumidores também compreenderão o impacto de uma parcela de suas compras no meio ambiente. Face ao aumento da poluição nos mais diversos setores da indústria, faz-se necessária a adoção de ações mitigatórias para reduzir a elevada quantidade de emissões de gases poluentes na hora de fabricação desses produtos.

A relevância da utilização da ACV é evidenciar as emissões de gases de efeito estufa associadas a um processo. A partir da utilização de etiquetas ou rótulos ecológicos, o cliente saberá quanto estará poluindo ao comprar determinada quantidade de cerâmica. As buscas por melhores resultados têm obrigado empresas a adequarem seus processos produtivos com foco na otimização dos custos atrelada a uma melhor gestão ambiental.

A ideia é produzir a mesma quantidade de cerâmica com menos insumos, o que levaria a empresa a um melhor resultado financeiro e econômico (FREIRE *et al.*, 2016). Uma melhor gestão ambiental agrega valor para a empresa além dos ganhos financeiros diretos das vendas normais, pois, com uma imagem positiva no mercado, é possível encontrar novos nichos de consumidores que se propõem a pagar mais por um produto ambientalmente correto. A agregação de valor para a empresa também se observa por meio da contratação de financiamentos com taxas de juros mais baixas, em função da adesão aos programas governamentais voltados à eficiência energética e ao desenvolvimento sustentável.

O investimento em fontes de energia renovável em indústrias de cerâmicas é uma ótima escolha desde uma perspectiva ambiental. Do ponto de vista ambiental, isso já foi demonstrado por Barbosa *et al.* (2022) em uma indústria têxtil, e por Garcia *et al.* (2021) para um edifício universitário. Focando a indústria cerâmica, pode-se substituir o gás natural queimado nos fornos ou, ao manter o gás natural,

empregar a estratégia da produção combinada de energia por meio da cogeração. A utilização de biomassa é viável tanto para o bagaço da cana-de-açúcar como para o resíduo de poda de arborização urbana, no caso de estudo aqui desenvolvido. Ambas são de fácil obtenção e podem ser usadas em campanha de marketing das empresas, atraindo a atenção de novos consumidores.

Como mencionado por Ros-Dosdá *et al.* (2018), a indústria de revestimentos cerâmicos da União Europeia já demonstra preocupações com as emissões de carbono, principalmente por causa dos limites estabelecidos pelas diretivas e políticas relativas a mudanças climáticas e sustentabilidade energética. A quantificação das emissões é o primeiro passo para sua posterior redução. Mesmo que as metas de redução de emissões ainda não sejam uma realidade brasileira, o Brasil deve acompanhar o mercado mundial e suas exigências, sob pena de ficar de fora. A aplicação de análises ambientais pode ser usada como ferramenta de gerenciamento (*benchmarking* ambiental) – essa ferramenta é utilizada nos EUA desde os anos 1980 (FERRARI *et al.*, 2019). Assim, a competitividade da indústria cerâmica pode ser estimulada à medida que o desempenho da empresa melhora.

5 Considerações finais

Este trabalho quantificou as emissões de gases de efeito estufa, por meio da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), para um processo térmico realizado numa indústria cerâmica (sinterização).

As emissões de gases de efeito estufa associadas ao processo de sinterização do porcelanato totalizaram 4,2646 kg CO₂-eq/m² de porcelanato, e observou-se que 93% dessas emissões estão associadas ao consumo de gás natural (combustível fóssil).

Para verificar o potencial de mitigação de mudanças climáticas associado à substituição de combustível fóssil por um recurso renovável, foram escolhidos dois tipos de biomassa. Essa escolha foi representativa para a região em que se localiza a indústria: bagaço da cana-de-açúcar e resíduo de poda de arborização urbana. Utilizando a biomassa como fonte de energia renovável para suprir parcialmente a energia que é utilizada para alimentar o forno, houve uma redução relevante no impacto ambiental, de aproximadamente 25%, quando 30% do gás natural foi substituído por biomassa.

Trabalhos futuros incluem a aplicação da ACV para a linha de produção completa e a ampliação dos recursos renováveis empregados. O desenvolvimento de análises econômicas também é importante, para buscar as alternativas energéticas com menos impactos ambientais e que também reduzam custos.

Financiamento

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa 309452/2021-0.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**. Gestão ambiental. Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Versão corrigida, 2014a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**. Gestão ambiental. Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Versão corrigida, 2014b.
- ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M. Environmental impacts of the red ceramics industry in Northeast Brazil. **International Journal of Emerging Research in Management and Technology**, v. 6, n. 8, p. 310-317, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.23956/ijermt.v6i8.158>.
- ANFACER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Portfólio Anfacer 2019**. Disponível em: <https://www.ceramicsofbrazil.com/setor-ceramico/portfolio-anfacer>. Acesso em: jan. 2022.
- ARAÚJO, Y. R. V.; GÓIS, M. L.; COELHO JUNIOR, L. M.; CARVALHO, M. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 2, p. 1863-1868, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0613-y>.
- BALAMAN, S. Y. **Decision-making for biomass-based production chains: The basic concepts and methodologies**. London: Academic Press, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00910-2>.
- BARBOSA, D. S.; SILVA, J. E.; MACHADO, R. A. F.; HOTZA, D. Controle e automação na indústria cerâmica: estudo de caso na fabricação de porcelanato no Brasil. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 4, p. 23-30, 2008. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/587657367f8c9d6e028b4743>. Acesso em: fev. 2022.
- BARBOSA, R. R.; SCHULTZ, H. S.; GARCIA, L. C.; MARTINS, D. D.; CARVALHO, M. Economic and greenhouse gas assessments for two hot water industrial systems: solar vs. natural gas. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, 100365, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100365>.
- BECKER JUNIOR, A. M.; RODRÍGUEZ, A. L.; MÄHLMANN, C. M.; LOPEZ, D. A. R. Estudo para análise de ciclo de vida de produtos cerâmicos. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 3, n. 2, p. 122-133, 2013. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/jovenspesquisadores/article/view/4091>. Acesso em: fev. 2022.
- BENVENISTE, G.; GAZULLA, C.; FULLANA, P.; CELADES, I.; ROS, T.; MOLINER, R.; ZAERA, V.; GODES, B. Análise do ciclo de vida setorial de placas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 1, p. 7-13, 2012. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876574a7f8c9d6e028b47b8>. Acesso em: fev. 2022.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10. ed. New York: John Wiley & Sons, 2018.

CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R.; GONDIM, R. R. Medidas de economia para um forno Hoffman de uma indústria de cerâmica vermelha: estudo de caso. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 1, p. 33-36, 2006. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657287f8c9d6e028b46eb>. Acesso em: fev. 2022.

CARVALHO, M.; FREIRE, R. S.; BRITO, A. M. V. G. Promotion of sustainability by quantifying and reducing the carbon footprint: new practices for organizations. *In*: GRAMMELIS, P. (ed.). **Energy, transportation and global warming**. Cham: Springer, 2016. p. 61-72. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30127-3_6.

CARVALHO, M.; SILVA, J. A. M. Second law assessment of a Hoffmann kiln for the red ceramics industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 11, 525, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1444-6>.

CARVALHO, M.; SILVA SEGUNDO, V. B.; MEDEIROS, M. G.; SANTOS, N. A.; COELHO JUNIOR, L. M. Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry. **International Journal of Global Warming**, v. 17, n. 3, p. 235-251, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1504/IJGW.2019.098495>.

CONSTANTINO, A. O.; ROSA, S. E. S.; CORREA, A. R. **Panorama do setor de revestimentos cerâmicos**. Rio de Janeiro: BNDES, 2006. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15303>. Acesso em: fev. 2022.

CONTARTESI, F.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): uma ferramenta para a redução do impacto ambiental dos revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 2, p. 30-44, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.011>.

DELGADO, D. B. M.; CARVALHO, M.; COELHO JUNIOR, L. M.; CHACARTEGUI, R. Analysis of biomass-fired boilers in a polygeneration system for a hospital. **Frontiers in Management Research**, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22606/fmr.2018.21001>.

DINATO, R. M. **Sistematização dos métodos de contabilização de emissões de gases de efeito estufa sob a ótica do ciclo de vida**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2013.tde-22102014-120953>.

ECOINVENT. **ecoinvent Database**. 2018. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database>. Acesso em: jan. 2022.

EMLUR – AUTARQUIA ESPECIAL MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA DE JOÃO PESSOA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS: Diagnóstico**. João Pessoa: EMLUR, 2014. Disponível em: <http://antigo.joaopessoa.pb.gov.br/secretarias/emlur/plano-municipal-de-residuos-solidos>. Acesso em: jan. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: Segmento Cerâmica**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/PRODUTO%206_Vpublicacao.pdf. Acesso em: jan. 2022.

FERRARI, A. M.; VOLPI, L.; PINI, M.; SILLIGARDI, C.; GARCIA-MUIÑA, F. E.; SETTEMBRE-BLUNDO, D. Building a sustainability benchmarking framework of ceramic tiles based on Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). **Resources**, v. 8, n. 1, p. 11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources8010011>.

FONSECA, L. F. S.; CARVALHO, M. Greenhouse gas and energy payback times for a wind turbine installed in the Brazilian Northeast. **Frontiers in Sustainability**, v. 3, p. 160, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1060130>.

FREIRE, R. S.; CARVALHO, M.; CARMONA, C. U. M.; BRITO, A. M. V. G. Perspectives on the implementation of climate change public policies in Brazil. In: GRAMMELIS, P. (ed.). **Energy, transportation and global warming**. Cham: Springer, 2016. p. 13-20. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-30127-3_2.

GARCIA, L. C.; MARTINS, D. D.; BARBOSA, R. R.; CARVALHO, M. Greenhouse gas emissions associated with two air-conditioning systems for a university building. **Environmental Challenges**, v. 5, 100371, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100371>.

GONÇALVES, G. L.; SILVA, L. P.; SANTOS, P. R. A.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Comparação ambiental entre sistema fotovoltaico convencional e semitransparente. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 53, p. 103-111, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2020v1n53p103-111>.

GRILO, M. M. S.; FORTES, A. F. C.; SOUZA, R. P. G.; SILVA, J. A. M.; CARVALHO, M. Carbon footprints for the supply of electricity to a heat pump: solar energy vs. electric grid. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 2, 023701, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4997306>.

GUINEE, J. B. **Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

HINZ, R. T. P.; VALENTINA, L. V. D; FRANCO, A. C. Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela Avaliação do Ciclo de Vida. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 2, n. 2, p. 91-98, 2006. Disponível em: http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos_tecnologicos/article/view/6078. Acesso em: set. 2023.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol**. Genebra: IPCC, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/index.html>. Acesso em: set. 2023.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040:2006**. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Genebra: ISO, 2006a.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044:2006**. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. Genebra: ISO, 2006b.

KULAY, L.; HANSEN, A. P.; SEO, E. S. M. Identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental em processo de produção de materiais cerâmicos via aplicação da técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV). **Revista Produção Online**, v. 10, n. 4, p. 912-936, 2010. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v10i4.526>.

MELO F. M.; SILVESTRE, A.; CARVALHO, M. Carbon footprints associated with electricity generation from biomass syngas and diesel. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, v. 18, n. 7, p. 1391-1398, 2019. Disponível em: <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/issues/vol18/vol18no7.htm>. Acesso em: set. 2023.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/187929>. Acesso em: set. 2023.

PEREIRA, S. W. **Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos**: aplicação de avaliação do ciclo de vida. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87886>. Acesso em: set. 2023.

RIBEIRO, C. M.; GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. Avaliação do ciclo de vida (ACV): uma ferramenta importante da ecologia industrial. **Revista de Graduação da Engenharia Química**, ano 11, n. 12, p. 13-23, 2003. Disponível em: <http://www.hottopos.com/regeq12/art4.htmv>. Acesso em: fev. 2022.

ROS-DOSDÁ, T.; FULLANA-I-PALMER, P.; MEZQUITA, A.; MASONI, P.; MONFORT, E. How can the European ceramic tile industry meet the EU's low-carbon targets? A life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 554-564, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.176>.

SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLI, R. A. G.; HORI, C. Y.; JULIOTI, P. S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **Revista GEPROS (Gestão da Produção, Operações e Sistemas)**, ano 6, n. 2, p. 57-73, 2011. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/882>. Acesso em: fev. 2022.

SCHULTZ, H. S.; CARVALHO, M. Design, Greenhouse Emissions, and Environmental Payback of a Photovoltaic Solar Energy System. **Energies**, v. 15, n. 16, 6098, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15166098>.

SILVA, M. R. C.; GONÇALVES, K. S.; MARTINS, D. D.; GOMES, K. C.; CARVALHO, M. Greenhouse gas emissions associated with traditional and alternative concretes. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 60, n. 2, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6262>.

SIMAPRO. **SimaPro LCA software**. 2022. Disponível em: <http://www.simapro.nl>. Acesso em: jan. 2022.

SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 83-94, 2004. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3541>. Acesso em: fev. 2022.

TEPLICKÁ, K.; KOVÁČ, M.; SKVAREKOVÁ, E.; SENOVÁ, A. Economic life cycle of biomass equipment and its renovation. **TEM Journal: Technology, Education, Management, Informatics**, v. 9, n. 4, p. 1419-1425, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18421/TEM94-13>.