

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE PETRÓLEO NO CONTEXTO DO DESIGN PARA SUSTENTABILIDADE

VALORIZATION OF PETROLEUM WASTE IN THE CONTEXT OF DESIGN FOR SUSTAINABILITY

 <https://doi.org/10.63330/sasciencesv6n2-119>

Submetido em: 30/07/2026 e Publicado em: 07/08/2026

SAS: e26345

Bruno Carlos Alves Pinheiro

Doutor

Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade Acadêmica de Ubá (UEMG/UBÁ)

E-mail: bruno.pinheiro@uemg.br

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/7716005942717002>

Davi Neiva Alves

Mestre

Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade Acadêmica de Ubá (UEMG/UBÁ)

E-mail: dneivaalves@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0576876310359026>

Resumo

A sustentabilidade é uma questão cada vez mais presente nas discussões sobre design. Diante da preocupação com a crescente geração de resíduos sólidos, diversos esforços tem sido realizados em busca de alternativas para reverter este cenário. O Design para Sustentabilidade alinhado como *Cradle to Cradle* (C2C) pode contribuir como parte da solução para a problemática dos resíduos sólidos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma alternativa de valorização do resíduo borra de petróleo encapsulada através da incorporação em massa cerâmica triaxial para obtenção de revestimento grês porcelanato. As matérias-primas utilizadas foram: caulim, feldspato sódico, quartzo e o resíduo borra de petróleo encapsulada. Foram preparadas massas cerâmicas por via seca com incorporações de 0, 1,25 e 2,5 % em peso de resíduo em substituição ao caulim. Corpos cerâmicos foram prensados sob 50 MPa, secos em estufa a 110 °C e sinterizados em 1240 °C usando ciclo de queima rápido. Foram determinadas as seguintes propriedades físico-mecânicas: absorção de água, tensão de ruptura à flexão e carga de ruptura. Os resultados mostraram que é possível a obtenção de revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelanato incorporados com até 2,5 % em peso de resíduo borra de petróleo encapsulada. Os resultados também mostraram que o Design para Sustentabilidade atrelado ao *Cradle to Cradle* pode atuar como agente colaborador do desenvolvimento sustentável.



Palavras-chave: Design; Resíduos Sólidos; Sustentabilidade.

Abstract

Sustainability has been present in discussions involving design. In view of the concern about the growing of solid waste, various efforts have been made to find alternatives to reverse this scenario. The Design for Sustainability associated with Cradle to Cradle (C2C) can contribute as part of the solution to the related to solid waste. In this context, the objective of this work was to develop an alternative of valorization of the encapsulated petroleum waste through its incorporation into ceramic past for manufacturing porcelain stoneware tiles. The raw materials used were: kaolin, sodium feldspar, quartz and encapsulated petroleum waste. Ceramic pastes containing 0, 1,25 and 2,5 wt % of waste as a partial replacement the kaolin were prepared by the dry process. The ceramic pieces were pressed under 50 MPa, dried at 110 °C and sintered at 1240 °C using a fast-firing cycle. The following physical-mechanical properties were measured: water absorption, flexural strength and load rupture. The results showed that it is possible to obtain porcelain stoneware tiles incorporating up to 2,5 wt % encapsulated petroleum waste. The results also showed that the Design for Sustainability associated with Cradle to Cradle can contribute as a collaborative agent of sustainable development.

Keywords: Design; Solid Waste; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A extração demasiada de recursos materiais naturais, a geração cada vez maior e a destinação, na maioria das vezes, incorreta de resíduos sólidos são alguns dos principais desafios da sustentabilidade, e a causa de muitos dos problemas socioambientais enfrentados pela sociedade moderna (Ribeiro, 2023). Diante disso, princípios para a sustentabilidade vem ganhando força na sociedade. Cada vez mais o homem contemporâneo vem assumindo as consequências de suas ações e se tornando crítico com relação ao seu papel na sociedade e no meio ambiente (Barauna *et al.* 2017).

Neste cenário, em particular no âmbito do design, é identificado um aumento das discussões que tratam da sustentabilidade. Ao longo dos últimos anos, com a exploração do design para sustentabilidade, vem-se objetivando o desenvolvimento de soluções que possam contribuir para a redução dos impactos ambientais negativos no ciclo de produção de novos produtos, serviços e ambientes (Witt; Silva; Albach, 2018)

Propor o desenvolvimento do design para sustentabilidade, é buscar capacitar o sistema produtivo de responder à procura de bem-estar social extraíndo bem menos recursos materiais naturais em relação aos níveis extraídos atualmente e, principalmente, reduzindo a geração, o descarte incorreto e o acúmulo de



resíduos sólidos (Witt; Silva; Albach, 2018). Projetos orientados pela sustentabilidade tratam os bens produzidos como parte de um conjunto complexo de interações e não de forma isolada (Mai; Mello; Palombini, 2025).

Relacionado ao design para sustentabilidade, vale explorar o conceito *Cradle to Cradle* (C2C) ou do berço ao berço. De acordo com Ribeiro (2023), este conceito apresenta a necessidade de fechamento do ciclo de vida do produto. Particularmente, com relação aos resíduos sólidos, para se fechar o ciclo berço a berço é preciso eliminar o conceito de resíduos. Isso pode ser feito através da valorização dos mesmos, os quais podem ser considerados como nutrientes ou recursos para o ciclo produtivo original ou para outros ciclos produtivos. A teoria do berço ao berço busca reformular os sistemas produtivos em ciclos circulares de nutrientes ou recursos. Assim, os resíduos sólidos gerados podem ser reintegrados a novos ciclos produtivos (Barauna, *et al.* 2017). Segundo Santos, *et al.* (2025) o conceito C2C propõe um modelo de produção regenerativo, no qual os resíduos deixam de ser um problema. Pelo contrário, eles são transformados em recursos materiais para novos ciclos produtivos. Isso pode contribuir para a redução da extração demasiada de recursos naturais, para a redução do descarte acelerado e para a promoção de ciclo produtivo sustentável.

O setor petrolífero é um dos setores industriais que gera consideráveis quantidades de resíduos. O resíduo mais abundante é a borra oleosa ou borra de petróleo. Por ser um resíduo químico tóxico, ele não pode ser lançado diretamente no meio ambiente nem comercializado. Por apresentar capacidade abrasiva de aglomeração, ele é submetido a um tratamento de inertização por encapsulamento utilizando a argila bentonita. Após o encapsulamento, é originado um resíduo na forma de pó granular não inerte denominado borra de petróleo encapsulada, o qual apresenta uma massa final entre 10-20 vezes maior que o resíduo inicial (Queiroz, 2021).

Um dos setores industriais que vem atuando como importante aliado na valorização de resíduos sólidos é o setor cerâmico. Essa valorização pode-se dar por meio da incorporação dos resíduos sólidos em massas cerâmicas argilosas ou cimentícias, principalmente, em massas cerâmicas para a fabricação de produtos aplicados na construção civil. A indústria cerâmica pode valorizar seus próprios resíduos sólidos e também aqueles gerados por outros setores industriais (Almeida; Amado; Frade, 2021).

A indústria cerâmica é um setor que apresenta fortes potencialidades para valorização/incorporação de resíduos sólidos. Os fatores que contribuem para isso são: i) a indústria cerâmica consome grandes quantidades de recursos materiais naturais, especialmente, os produtos cerâmicos aplicados na construção civil; ii) os recursos materiais naturais cerâmicos apresentam larga variabilidade química e mineralógica; iii) o processamento cerâmico quase não sofre nenhuma alteração devido a presença dos resíduos; iv) as propriedades tecnológicas dos produtos não são sacrificadas pela incorporação dos resíduos sólidos; e v) a



matriz cerâmica argilosa ou cimentícia pode ser uma alternativa segura para inertizar os compostos poluentes presentes no resíduos (Pinheiro, *et al.* 2021).

Após análise do que foi apresentado sobre design para sustentabilidade, cuidado com o meio ambiente e setor cerâmico, este trabalho procurou responder o seguinte questionamento: É possível obter novos materiais/produtos cerâmicos considerando os princípios do design para sustentabilidade associados aos do berço a berço (*Cradle to Cradle – C2C*), de modo a valorizar o resíduo borra de petróleo encapsulada?

Diante deste questionamento, foi objetivo geral do presente trabalho desenvolver uma alternativa de valorização do resíduo borra de petróleo encapsulada através de sua incorporação em massa cerâmica triaxial para a obtenção de revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelanato.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Formular e preparar massas cerâmicas triaxiais incorporadas com o resíduo borra de petróleo encapsulada;
- Determinar as seguintes propriedades tecnológicas: absorção de água (AA), tensão de ruptura à flexão em 3 pontos (TRF3p) e carga de ruptura (CRF);
- Comparar os resultados das propriedades tecnológicas obtidos com requisitos da norma NBR ISO 13006 (ABNT, 2020).

Este trabalho justifica-se por contribuir na busca de uma alternativa atrativa para a valorização de um resíduo sólido não inerte gerado por um importante setor industrial (setor petrolífero). Além disso, contribui também para que este resíduo não seja entendido como um problema, mas que através do design para sustentabilidade alinhado ao conceito berço a berço (*Cradle to Cradle – C2C*), possa ser considerado como recurso material, reintegrando-se ao processo produtivo para a produção de novos produtos.

Posto isto, a estrutura deste trabalho além da introdução tem três seções. Na primeira são apresentados os materiais (matérias-primas) e os métodos utilizados. Na segunda seção são apresentados os resultados experimentais obtidos com a discussão dos mesmos. A terceira seção apresenta as conclusões. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para conduzir os procedimentos de teste laboratorial de um produto que possibilitasse a incorporação do resíduo borra de petróleo encapsulada em sua composição, foi iniciado o desenvolvimento de uma massa cerâmica triaxial, visando a obtenção de revestimentos cerâmicos para pisos classificados como grês porcelanato. Para isso, foram utilizados os seguintes materiais: caulim, feldspato sódico, quartzo e o resíduo borra de petróleo encapsulada (resíduo BPEC).



O caulim, o feldspato sódico e o quartzo são matérias-primas comerciais adquiridas junto a ARMIL Mineração do Nordeste Limitada, localizada no município de Parelhas – RN. Já o resíduo BPEC foi fornecido pela Petrobras. Ele é proveniente da extração de petróleo na Bacia de Campos, localizada no norte do estado do Rio de Janeiro.

O caulim, o feldspato sódico, o quartzo e o resíduo BPEC foram submetidos a um processo de moagem a seco em moinho de bolas por um período de 3 horas. Em seguida, todos os materiais foram secos em estufa de laboratório a 110 °C por um período de 24 horas. Logo após, eles foram peneirados em peneira 325 mesh (45 µm ABNT).

Neste trabalho foi usada uma composição triaxial composta por caulim, feldspato sódico e quartzo, para revestimento cerâmico grês porcelanato. A composição consistiu de 40 % em peso de caulim, 47,5 % em peso de feldspato sódico e 12,5 % em peso de quartzo. Esta composição foi considerada a massa cerâmica de referência e foi denominada de MR0. O resíduo BPEC foi incorporado a massa cerâmica MR0 em substituição parcial ao caulim nas proporções de 1,25 % em peso e 2,5 % em peso.

Em seguida, os materiais foram dosados por medida de massa conforme as proporções citadas anteriormente e submetidos a um processo de mistura/homogeneização e microgranulação. Neste trabalho as massas cerâmicas foram preparadas pelo processo via seca. A etapa de mistura/homogeneização foi realizada em moinho por aproximadamente 1 hora. A microgranulação foi realizada de maneira intensiva de fluxo contra corrente num misturador intensivo. A umidade utilizada foi de 14 % em peso de água. Logo após, as massas cerâmicas foram submetidas a um processo de agitação mecânica para classificação por peneiramento. Nesta etapa somente os grânulos com diâmetro médio contido no intervalo de 212 µm (65 mesh) a 412 µm (35 mesh) foram classificados. Em seguida, as massas cerâmicas foram encaminhadas para o controle final da umidade, o qual foi de cerca de 7 % (massa úmida/massa seca). Por fim, elas foram acondicionadas em sacos plásticos e colocadas em dessecador para garantir boa homogeneização da umidade. A Tabela 1 apresenta a composição das massas cerâmicas formuladas e preparadas.

Tabela 1 – Composição das massas cerâmicas formuladas e preparadas (% em peso)

Massas Cerâmicas	Caulim	Feldspato sódico	Quartzo	Resíduo BPEC
MR0	40	47,5	12,5	0
MR1,25	38,75	47,5	12,5	2,5
MR2,5	37,5	47,5	12,5	5

Fonte: Próprio autor (2026)

Corpos-de-prova retangulares com dimensões 115 mm x 2,54 mm x 7 mm, foram conformados por prensagem uniaxial com pressão de compactação de 50 MPa. Os corpos-de-prova conformados foram secos em estufa de laboratório A 110 °C por 24 horas. Após secagem, eles foram sinterizados em um forno de queima rápida com ciclo de queima de aproximadamente 60 minutos frio-a-frio. Eles foram sinterizados à



temperatura de 1240 °C. Em seguida, as seguintes propriedades tecnológicas foram determinadas: absorção de água (NBR ISO 10545-4 - ABNT, 2020), tensão de ruptura á flexão por 3 pontos e carga de ruptura (NBR ISO 10545-3 - ABNT, 2020). A Tabela 2 apresenta as equações utilizadas para o cálculo das propriedades tecnológicas.

Tabela 2 – Equações para cálculo das propriedades tecnológicas	
Propriedades Tecnológicas	Equações
Absorção de Água	$AA = ((Mu - Ms)/Ms)*100$ Mu = Massa úmida Ms = Massa seca
Carga de Ruptura	$CR = (F*L)/b$ F = Força de ruptura L = Distância entre os cutelos de apoio b = largura do corpo-de-prova
Tensão de Ruptura	$TRF3p = (3PL)/(2bd^2)$ P = Carga aplicada d = Espessura dos corpos-de-prova

Fonte: Próprio autor (2026)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após a realização de testes laboratoriais e a discussão dos mesmos. Inicialmente, é discutido a opção em se trabalhar com a indústria cerâmica, com o resíduo borra de petróleo encapsulada (resíduo BPEC) e com o revestimento cerâmico grês porcelanato. Logo após, são apresentados os resultados das propriedades tecnológicas e uma discussão relacionada aos materiais obtidos e a aplicação destes no desenvolvimento de produtos cerâmicos. Feito isto, é apresentado uma discussão sobre a influência do resíduo BPEC nas propriedades determinadas. Em seguida, é apresentado uma discussão acerca da contribuição deste trabalho à sociedade, à teoria e à técnica e a sua relevância para o design.

Neste trabalho entende que o design para sustentabilidade através do *Cradle to Cradle* (C2C) é uma abordagem sistêmica e sustentável de design. Neste sistema é sugerido que se pense em gestão ou redução de resíduos, onde produtos possam ser criados de forma inteligente. Resíduos são fonte de energia e nutrientes ou recursos. O C2C se inspira em métodos naturais, onde o resíduo de uma espécie é o alimento de outra, e a soma fornece energia (Da Silva, *et al.* 2015). Neste sentido, através do C2C pode-se buscar reintegrar os resíduos sólidos em ciclos produtivos, de forma que os resíduos sejam nutrientes ou recursos para a fabricação de novos produtos. Isso pode contribuir para a redução do impacto ambiental negativo relacionado aos resíduos sólidos, valorizando-os como importantes recursos materiais para a produção de novos produtos (Russo; Schuch, 2020).



Diante desta valorização, optou-se pela indústria cerâmica pelo fato dela estar sendo considerada uma alternativa atrativa para a valorização de resíduos sólidos. A indústria cerâmica tem sido um exemplo de viabilidade de valorização por meio da incorporação de resíduos sólidos em massas cerâmicas, principalmente, massas cerâmicas para a fabricação de produtos utilizados na construção civil (Almeida, *et al.* 2018). De acordo com Almeida, Amado e Frade (2021), a indústria cerâmica apresenta fortes potencialidades para a valorização/incorporação de resíduos sólidos. Ela pode valorizar seus próprios resíduos sólidos quanto aqueles gerados por outros setores industriais. Corroborando com isso, Lima (2023) aponta que a indústria cerâmica vem contribuindo para a valorização de diversos tipos de resíduos sólidos. Ela vem fazendo um grande esforço para a promoção da sustentabilidade por meio da pesquisa e agregação de valor aos seus produtos pela incorporação de resíduos sólidos em seus processos produtivos.

Lima (2023) cita trabalhos realizados entre 2004 e 2023, nos quais diversos tipos de resíduos sólidos provenientes de vários setores foram incorporados em massas cerâmicas para a fabricação de produtos que podem ser aplicados na construção civil. Os resíduos estudados foram oriundos da agroindústria, da própria indústria cerâmica, do poder público, da indústria madeireira, da indústria metalúrgica e da construção civil. Os produtos estudados foram: cerâmicas para revestimentos, argamassa, bloco de vedação, bloco estrutural, porcelana, tijolo tradicional, tijolo ecológico de solo-cimento, entre outros. Isso é importante, pois mostra a versatilidade e o potencial da indústria cerâmica para a valorização/incorporação de resíduos sólidos.

Diante disso, vale mencionar que a valorização de resíduos sólidos pela incorporação dos mesmos em massas cerâmicas pode ser viabilizada pela substituição de um ou mais recursos materiais naturais da massa pelo resíduo, sem causar mudanças significativas no processo produtivo, reproduzindo e mantendo as propriedades tecnológicas dos produtos. Assim, pode-se contribuir para a redução da extração de recursos materiais naturais, para a redução da geração e do acúmulo de resíduos sólidos, potencializando o design para sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável.

É possível dizer que através do *Cradle to Cradle* (C2C), o valor uma vez criado (produto produzido), os resíduos sólidos gerados podem retornar para um novo ciclo de produção. Assim, neste trabalho buscou-se reintegrar no ciclo produtivo da indústria cerâmica um resíduo sólido gerado no setor petrolífero. Este resíduo é chamado de borra de petróleo encapsulada (resíduo BPEC).

Conforme visto anteriormente, a borra de petróleo encapsulada é um resíduo que se apresenta na forma de um pó granular e contém óleo cru na sua composição. Com isso, ela é considerada um resíduo não inerte. Isso significa que este resíduo pode apresentar propriedades biodegradáveis, combustíveis, solúveis em água, podendo gerar odores, líquidos percolados ou emissões gasosas, poluindo o solo, rios e atmosfera se descartado incorretamente. Diante disso, é necessário desenvolver um produto que possa ao mesmo tempo valorizar este resíduo e inertizar os seus compostos poluentes. Assim, optou-se pelo desenvolvimento de massas cerâmicas triaxiais visando a obtenção de revestimentos cerâmicos para pisos



classificados como grês porcelanato, utilizando a rota de fabricação por via seca (moagem a seco). Nesse ponto, vale destacar que a opção em se trabalhar com o resíduo BPEC se dá pelo fato dele ser um resíduo não inerte, portanto, precisa ser inertizado, e também pelo óleo cru contido nele. Esse óleo pode contribuir para as etapas de granulação, prensagem a seco e compactação das massas cerâmicas. Isso é uma contribuição significativa por parte do resíduo, pois são etapas muito importantes durante o processamento do produto grês porcelanato.

Os revestimentos cerâmicos, também denominados de placas cerâmicas, são produtos utilizados na construção civil para revestir paredes, pisos, bancadas, entre outros ambientes externos e internos. Além disso, podem ser usados mais especificamente, podendo ser utilizados em superfícies frias, uso industrial com exposição a ambientes ou produtos químicos agressivos, locais de alto tráfego, atrito entre outros. Estes produtos têm ganhado destaque no Brasil nos últimos anos devido à versatilidade, *design* e estética (Da Silva, *et al.* 2015).

Os revestimentos cerâmicos são produtos compostos por matéria-prima argilosa (argila) e outras matérias-primas inorgânicas. Podem ser conformados por extrusão, prensagem, ou, por outros processos. Após conformação, os revestimentos são secos e sinterizados, podendo ter acabamento esmaltado ou não (NBR ISO 13006, ABNT 2020).

O método de conformação é um dos parâmetros de classificação dos revestimentos cerâmicos. De acordo com o método de conformação os revestimentos ou placas cerâmicas podem ser classificadas em: i) método A – placas extrudadas; ii) método B – placas prensadas a seco; e iii) outros – método C (NBR ISO 13006, ABNT 2020).

Outro parâmetro de classificação dos revestimentos cerâmicos é o grupo de absorção de água (AA) (NBR ISO 13006, ABNT 2020). Primeiramente, são três os grupos de absorção de água: Grupo I – baixa absorção de água; Grupo II – média absorção de água; e Grupo III – alta absorção de água. Os grupos são divididos em subgrupos da seguinte forma: i) Grupo I é dividido em: subgrupo Ia ($AA \leq 0,5 \%$) e subgrupo Ib ($0,5 \% < AA \leq 3,0$); ii) Grupo II é dividido em: subgrupo IIa ($3 \% < AA \leq 6 \%$) e subgrupo IIb ($6 \% < AA \leq 10 \%$); e iii) Grupo III são as placas com alta absorção de água ($AA > 10 \%$). A Tabela 3 apresenta a relação entre os valores de absorção de água, os grupos e os subgrupos.

Para complementar o que foi apresentado logo acima, também é importante apresentar a relação entre o nível (porcentagem) de absorção de água quanto a tipologia do produto. Essa relação é apresentada na Tabela 4 (Da Silva, *et al.* 2015).

Pode ser observado que os tipos de revestimentos cerâmicos são: porcelanato ou grês porcelanato, grês, semi-grês, semi-poroso e poroso. O grês porcelanato e o grês são tipologias com baixa absorção de água. O semi-grês e o semi-poroso são tipologias com absorção de água média. Já o poroso é uma tipologia com alta absorção de água.



Tabela 3 – Relação entre os valores de absorção de água, seus grupos e subgrupos

Tipologia dos produtos	Absorção de Água (AA - %)
Ia	$0 < AA \leq 0,5$
Ib	$0,5 < AA \leq 3,0$
IIa	$3,0 < AA \leq 6,0$
IIb	$6,0 < AA \leq 10,0$
III	$AA > 10,0$

Fonte: Adaptado de NBR ISO 13006 (ABNT, 2020)

Tabela 4 – Absorção de água em tipos diferentes de revestimentos cerâmicos

Tipologia dos produtos	Absorção de Água (AA - %)
Porcelanato	$0 < AA \leq 0,5$
Grês	$0,5 < AA \leq 3,0$
Semi-grês	$3,0 < AA \leq 6,0$
Semi-poroso	$6,0 < AA \leq 10,0$
Poroso	$AA > 10,0$

Fonte: Adaptado de da Silva, *et al.* (2015)

Dentro das tipologias apresentadas na Tabela 4 pode-se destacar o grês porcelanato. Ele é um revestimento cerâmico impermeável, totalmente vitrificado (absorção de água abaixo de 0,5 %), esmaltado ou não, cuja peça sinterizada é branca ou colorida por meio de pigmentos na composição inicial (colorida artificialmente). É produzido a partir de uma massa triaxial, sendo composta por caulim, feldspato e quartzo (Pessanha, *et al.* 2019).

Um produto típico de grês porcelanato é composto por uma fase vítrea como matriz, na qual fases cristalinas como o quartzo e cristais de mulita se encontram dispersos. A fase vítrea constitui a maior parte do corpo cerâmico (40 % - 75 %). O quartzo é a maior fase cristalina (10 % - 30 %). Já a mulita é encontrada em baixas quantidades devido ao ciclo de queima rápido empregado na manufatura do grês porcelanato (4 % - 10 %). Além disso, a microestrutura também pode apresentar feldspato não fundido e poros (Júnior, *et al.* 2023).

Dentre as propriedades do grês porcelanato, a absorção de água é uma das mais importantes. Ela avalia o nível de porosidade aberta do corpo cerâmico. É uma propriedade matriz que influencia outras propriedades, como a resistência mecânica, resistência ao manchamento e carga de ruptura. Além disso, é uma das propriedades que define a qualidade (classificação) dos revestimentos cerâmicos, determinando também a aplicabilidade dos mesmos. Por exemplo, a qualificação grês porcelanato está relacionada a sua baixa absorção de água ($AA \leq 0,5$ %), apresentando porosidade inferior à de outras tipologias de revestimentos (Pessanha, *et al.* 2019).

Com base no que foi colocado sobre o grês porcelanato, optou-se pelo desenvolvimento deste produto pelos seguintes fatores; i) o grês porcelanato é a tipologia de revestimento cerâmico de maior destaque e maior qualidade. Isso garante a valorização do resíduo BPEC como recurso material nobre; e ii) o grês porcelanato apresenta quantidade considerável de matriz vítrea (fase vítrea), a qual pode ser uma



alternativa para a inertização do resíduo BPEC. Maior quantidade de fase vítrea indica maior probabilidade de se inertizar o resíduo.

A seguir, na Tabela 5, são apresentados os valores médios de absorção de água, tensão de ruptura à flexão e carga de ruptura dos corpos-de-prova sinterizados em 1240 °C.

Os resultados mostram que as massas cerâmicas estudadas tiveram absorção de água inferior a 0,5 %. Os valores atingidos foram de 0,08 % a 0,39 %. Esses valores se enquadram na faixa de baixa absorção de água ($AA \leq 0,5\%$). Estes resultados são importantes, uma vez que indicam claramente a possibilidade de fabricação de revestimentos cerâmicos de baixa absorção de água, classificados como grês porcelanato, incorporados com o resíduo BPEC.

Tabela 5 – Resultados obtidos a partir das equações

Massas Cerâmicas	Absorção de Água (AA - %)	Tensão de Ruptura à Flexão (TRF3p – MPa)	Carga de Ruptura (CR – N)
MR0	$0,08 \pm 0,04$	$52,40 \pm 2,93$	$1195,51 \pm 69,25$
MR1,25	$0,39 \pm 0,23$	$40,58 \pm 2,63$	$1114,98 \pm 57,42$
MR2,5	$0,35 \pm 0,15$	$39,40 \pm 2,66$	$1051,62 \pm 73,08$

Fonte: Próprio autor (2026)

Pode ser observado também na Tabela 5, que o resíduo BPEC influencia a absorção de água dos corpos-de-prova. A absorção de água aumenta com a incorporação do resíduo BPEC. Este aumento pode estar relacionado com o aumento de porosidade, principalmente, de porosidade aberta. Este fato mostra a importância de se controlar o nível de porosidade durante o desenvolvimento destes novos produtos. Essa importância se dá pelo papel da absorção de água em revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelanato. Como dito anteriormente, a absorção de água é uma propriedade matriz que influencia outras propriedades, tais como aquelas relacionadas ao comportamento mecânico dos corpo-de-prova. A porosidade exerce efeito negativo sobre o comportamento mecânico e, consequentemente, na integridade estrutural dos revestimentos cerâmicos. Este efeito negativo pode estar associado aos seguintes fatores: i) os poros reduzem a área de seção transversal na qual a carga ou tensão é aplicada. Isso significa menor quantidade de material para resistir a essa tensão; e ii) os poros atuam como concentradores de tensão. Eles são defeitos que amplificam, aumentando a tensão que atua sobre a estrutura.

A determinação da tensão de ruptura à flexão e da carga de ruptura possibilita a obtenção de informações importantes sobre o comportamento mecânico do produto quando submetido a esforços específicos. No caso do grês porcelanato, estes esforços podem acontecer no manuseio, no armazenamento, no transporte e, principalmente, na sua aplicação.

A tensão de ruptura à flexão mínima requerida para revestimento cerâmico do tipo grês porcelanato é de 35 MPa (valor médio), ou seja, $TRF3p \geq 35$ MPa. Já a carga de ruptura mínima (valor médio) para



placas cerâmicas de grês porcelanato com espessura inferior a 7,5 mm deve ser de 700 N ($CR \geq 700$ N) (NBR ISO 13006, ABNT 2020). Lembrando que os corpos-de-prova obtidos neste estudo tiveram espessura de aproximadamente 7,0 mm. Por meio dos resultados apresentados na Tabela 5 é possível notar que as massas cerâmicas apresentaram valores de tensão de ruptura à flexão e de carga de ruptura bem superiores aos valores mínimos requeridos por norma. Sendo assim, as massas cerâmicas estudadas atingiram as especificações para revestimento do tipo grês porcelanato.

Com relação à influência do resíduo BPEC na tensão de ruptura à flexão e na carga de ruptura, é possível verificar que ambas diminuem à medida em que se aumenta a incorporação de resíduo na massa cerâmica. Estes resultados estão em acordo com os resultados de absorção de água, mostrando que a porosidade foi um dos principais fatores que contribuíram para a redução destas duas propriedades mecânicas. Além disso, mostra também a influência direta da absorção de água em tais propriedades.

A partir dos resultados obtidos pode ser observado que o comportamento das massas cerâmicas em todas as etapas de produção dos corpos-de-prova – moagem a seco, mistura/homogeneização, granulação, prensagem/compactação, secagem e sinterização (queima), mostrou-se satisfatório com a possibilidade de aplicação em revestimentos cerâmicos.

As comparações entre os requisitos da norma NBR ISO 13006 (ABNT, 2020) e os resultados laboratoriais obtidos, confirmaram que as todas as massas cerâmicas desenvolvidas se constituíram em materiais que podem ser aplicados na fabricação de produtos classificados como revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelanato (Grupo BIa). Sendo assim, é fundamental destacar que a incorporação de adequada quantidade de resíduo BPEC (até 2,5 % em peso) pode possibilitar a obtenção de grês porcelanato com excelentes propriedades tecnológicas. O desenvolvimento destes novos produtos foi de grande significado, uma vez que valorizou o resíduo BPEC, estendendo seu uso para a indústria cerâmica. Somado a isso, o desenvolvimento destes novos produtos mostra que o design para sustentabilidade por meio do C2C pode contribuir para que resíduos sólidos, como o resíduo BPEC, sejam entendidos como recursos materiais e não como lixo ou problema.

4 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho foi possível desenvolver produtos cerâmicos para revestimentos de pisos que podem ser utilizados na construção civil que ao mesmo tempo representa uma alternativa para a valorização do resíduo do setor petrolífero denominado borra de petróleo encapsulada (resíduo BPEC).

A partir dos dos resultados experimentais obtidos pode-se concluir que a incorporação de até 2,5 % de resíduo BPEC em massa cerâmica triaxial proporcionou resultados satisfatórios para a produção de revestimentos cerâmicos por via seca com boas propriedades técnicas classificados como grês porcelanato – Grupo BIa.



Por meio dos resultados experimentais obtidos é possível concluir também que os produtos desenvolvidos (revestimentos grês porcelatano) exemplificam a aplicação dos materiais obtidos (massas cerâmicas contendo o resíduo BPEC). Além disso, a incorporação do resíduo BPEC em massas cerâmicas pode ser vista como uma opção para o gerenciamento deste resíduo sólido, no qual através do design para sustentabilidade atrelado ao *Cradle to Cradle* (C2C) atua como agente colaborador do desenvolvimento sustentável e inovação.

Com relação a contribuição à sociedade, além da utilidade industrial do resíduo BPEC, pode-se obter alguns benefícios ambientais e econômicos com a sua valorização/incorporação. A substituição parcial do caulim, o qual é um recurso material natural pelo resíduo BPEC, além de contribuir para a redução da extração de recursos naturais e para a redução da geração de resíduos sólidos, também pode contribuir para a redução do custo final do produto.

A contribuição técnico-científica pode estar associada a importância de se estudar a interação, em alta temperatura, entre os componentes do resíduo com os demais componentes da massa cerâmica. Isso permite entender a influência do resíduo BPEC nas propriedades tecnológicas dos novos produtos desenvolvidos.

Para o design, a relevância do estudo pode estar relacionada com o desenvolvimento, por meio do design para sustentabilidade, de massas cerâmicas que promoveram a valorização de um resíduo sólido do setor petrolífero. Através das propriedades técnicas determinadas foi possível considerar a possibilidade de aplicá-las na fabricação de revestimentos cerâmicos com excelentes propriedades técnicas classificados como grês porcelanato.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Marisa et al. A economia circular na indústria cerâmica. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE AMBIENTE EM LÍNGUA PORTUGUESA, XX Encontro REALP e XI CNA., 2018, Aveiro. **Anais** [...]. Aveiro: UA, 2018.
- ALMEIDA, M.; AMADO, A.; FRADE, P. Recursos alternativos para a indústria cerâmica – estratégia de sustentabilidade. **Técnica**, Coimbra, 10, p. 16-19, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13006**: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 59 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-3**: Placas cerâmicas – Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-4**: Placas cerâmicas – Parte 3: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 9 p.



BARAUNA, Debora et al. Design para a sustentabilidade na economia de materiais: uso de Resíduos no Desenvolvimento de Produtos. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 113-122, 2017.

DA SILVA, Marinilda Nunes Pereira et al. Revestimentos cerâmicos e suas aplicabilidades. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, Maceió, v. 2, n. 3, p. 87-97, 2015.

JUNIOR, Agenor De Noni et al. Microstructure-oriented porcelain stoneware tile composition design. **Ceramics International**, v. 49, n. 14, p. 24558-24565, 2023.

LIMA, R. R. F. A aplicação de resíduos no desenvolvimento de produtos sustentáveis na indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, n. 1, p. 01-10, 2023.

MAI, T.; MELLO, C. I.; PALOMBINI, F. L. Design e economia circular: uma análise bibliométrica. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 13., 2025, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2025.

PESSANHA, Geanni Barbosa da Silveira e Silva et al. Estudo das propriedades técnicas de revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelânico. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharias**, Campos dos Goytacazes, v. 9, n. 26, p. 55-66, 2019.

PINHEIRO, Bruno Carlos Alves et al. Reaproveitamento de resíduos industriais: transformando problema em educação ambiental e inovação. **Revista Mediação**, Ubá, Ano V, n. 12, p. 26-35, jan/jul, 2021

QUEIROZ, Larissa Farias. **Incorporação de borra oleosa na produção de materiais de construção – adoquim cerâmico**. 2021. 50 f. Monografia (Trabaho de conclusão de curso em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, 2021.

RIBEIRO, Flávio de Miranda. De lixo a recurso: a visão dos resíduos sólidos na economia circular. **Revista Eletrônica Leopoldianum**, Santos, v. 49, n. 137, p. 13-13, 2023.

RUSSO, Gustavo D.; SCHUCH, Dalva Sofia. DESIGN DE ESTRUTURAS VERDES: TEEDs (Tratamento Ecológico de Efluentes Domésticos) do ciclo técnico ao ciclo biológico. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 8, 2020, Palhoça. **Anais [...]**. Palhoça: UNISUL, 2020.

SANTOS, Antônio. N. S. et al. Resíduos sólidos e design sustentável – uma análise da reciclagem na “economia circular” à luz da agenda 2030. **Revista Aracê**. São José dos Pinhais, v. 7, n. 2, p. 7365-7391, 2025.

WITT, M. R.; SILVA, S. P.; ALBACH, D. M. Destinação planejada de resíduos cerâmicos no contexto do design para sustentabilidade. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 6., 2018, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2018.