

## **DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA CERÂMICA**

### **DEVELOPMENT OF AN INDEX TO EVALUATE THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF THE PRODUCTION PROCESS OF THE CERAMIC INDUSTRY**

#### **ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO DE OPERAÇÕES E LOGÍSTICA**

Leandro Divino Miranda de Oliveira, UFG, Brasil, leandro-miranda92@hotmail.com

Marcelo Giroto Rebelato, UNESP, Brasil, marcelo.giroto@unesp.br

Luciana Maria Saran, UNESP, Brasil, lm.saran@unesp.br

#### **Resumo**

A elaboração de ferramentas ambientais são necessárias para que se possam avaliar os aspectos ambientais do setor de cerâmica. Com isso, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um índice para avaliação de desempenho ambiental aplicável ao processo produtivo da indústria cerâmica. Os procedimentos metodológicos foram divididos em seis etapas: mapeamento das etapas produtivas do processo; identificação e estudo dos resíduos gerados; cálculos dos potenciais de impacto ambiental de cada resíduo para cada uma das categorias de impacto utilizando o método RECIPE; normalização dos potenciais de cada resíduo; ponderação relativa entre os potenciais calculados através do IAHP, e desenvolvimento do índice de avaliação de processos ambientais. Como resultado do teste, os resíduos e subprodutos que apresentaram maior ponderação relativa foram: gases oriundos da queima de cavacos, (30,850%), cinzas oriundas da queima dos cavacos de eucalipto, (30,483%), tambor de aço, (28,937%), totalizando 90,27%. O tambor de aço é o resíduo com a maior participação relativa na formação do índice, (66,699%). O Desenvolvimento do índice de avaliação de processos ambientais, (DIAPA) final calculado foi de 28,732%. Isto significa que 28,732% da massa ponderada de resíduos/subprodutos tem destinação ambientalmente correta.

**Palavras-chaves:** Cerâmica, Avaliação de desempenho ambiental, Gestão ambiental

#### **Abstract**

The development of environmental tools is necessary so that the environmental aspects of the ceramic sector can be evaluated. With that, the general objective of this work was to develop an index for the evaluation of environmental performance applicable to the productive process of the ceramic industry. The methodological procedures were divided into six stages: mapping of the productive stages of the process; identification and study of generated waste; calculations of the potential environmental impact of each waste for each of the impact categories using the RECIPE method; normalization of the potentials of each residue; relative weighting between the potentials calculated through the IAHP, and development of the environmental process assessment index. As a result of the test, the residues and by-products that presented the highest relative weight were: gases from the burning of chips, (30.850%), ash from the burning of eucalyptus chips, (30.483%), steel drum, (28.937%), totaling 90.27%. The steel drum is the residue with the highest relative participation in the formation of the index, (66.699%). The final calculated Development of Environmental Process Assessment Index (DIAPA) was 28.732%..

**Keywords:** Ceramics, Environmental performance assessment, Environmental management

## 1. INTRODUÇÃO

Quando se usa matéria-prima e insumos que são extraídos do meio ambiente na atividade industrial, há uma tendência de impacto e agressão à natureza, é o caso do setor cerâmico que possui como matéria prima principal a argila, e como insumo energético a lenha. Há impactos no meio físico, biótico e antrópico, devido a mineração e reflorestamento, e isso muda a vida das pessoas que desempenham as atividades na fabricação de produtos cerâmicos ou que moram perto de locais onde são explorados a matéria-prima. Além disso, resíduos também são gerados no decorrer do processo produtivo (Dias, Mauri, Pedro & Jair, 1999; Sánchez, 2008; Leite & Gonçalves-Fujaco, 2013).

De acordo com Barbieri (2016), os resíduos são gerados no decorrer da produção e consumo, onde os mesmos exigem recursos naturais que serão extraídos do meio ambiente. Esses resíduos quando não são reutilizados ou redirecionados corretamente no processo produtivo, são absorvidos pelo ar, pela água e ou pelo solo, podendo provocar impactos negativos ao meio ambiente.

As indústrias cerâmicas em seu processo produtivo geram altas quantidades de resíduos, e a sua destinação sistematicamente são destinadas aos aterros sanitários (El-Gamal, 2017). De acordo com o presidente do Sindicar (Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha), no ano de 2016, cerca de 30% das indústrias cerâmicas do Brasil apresentaram reduções em suas perdas no processo produtivo entre 5 a 10%, e as demais superaram os 15%. A quantidade de resíduos que são gerados variam de acordo com o método de produção, podendo ser peças com defeitos, ruptura na queima ou no transporte (Sales & Alferes Filho, 2014).

Vale ressaltar que os avanços das tecnologias nos processos industriais em conjunto com o aumento da consumação de recursos naturais e a propagação de substâncias tóxicas e de alta periculosidade, vem trazendo problemas para o meio ambiente e para a saúde humana (Song, Fisher & Cui, 2016; Zui, Jian-Ning & Liu, 2017).

Diante desse cenário torna-se fundamental a introdução de metas de produção que envolvam a qualidade ambiental, tornado inevitável a inserção de ferramentas para avaliar os aspectos ambientais do setor industrial cerâmico. No cenário atual, com a evolução tecnológica, aliada ao aperfeiçoamento dos processos industriais, os instrumentos introduziram novos mecanismos que coletam informações detalhadas sobre os aspectos ambientais como: Métodos de Avaliação Multicritério e Indicadores de desempenho ambiental (Hermann, Hernandez-Lloreda & Tomasello, 2007).

A avaliação de desempenho ambiental deve atender a natureza dos processos adotados, visto que, cada empresa gera e descarta grande quantidade de produtos químicos, gases, materiais em partículas, metais, compostos, solventes orgânicos, entre outros (Zeviani, Rodrigues & Rebelato, 2013). Os indicadores de desempenho ambiental devem analisar as peculiaridades dos produtos produzidos e as características dos processos utilizados.

Frente a todas essas questões, a avaliação de desempenho ambiental tem como finalidade ser um facilitador na tomada de decisão sobre desempenho ambiental, por meio de indicadores, coleta de dados, análise de dados, avaliação de informações sobre desempenho ambiental, revisões e aperfeiçoamentos dos processos (ABNT, 2015).

A Avaliação de desempenho ambiental (ADA), pode ser essencial na assessoria de uma empresa nas análises de sua gestão ambiental, corroborando na avaliação dos aspectos ambientais, definindo assuntos que possam ser tratados com relevância, sugerindo critérios e avaliando o desempenho ambiental da empresa de acordo com os critérios estabelecidos (Hariz & Bahmed, 2013).

A Avaliação Desempenho Ambiental - ADA, possibilita que empresas sejam capazes de comparar seus desempenhos ambientais que obtiveram no passado e que possuem no presente, comparando com seus objetivos e suas metas ambientais por meio de indicadores chave de desempenho, com fundamento em dados corretos e averiguáveis. Com isso, as organizações medem, avaliam e comunicam seus desempenhos aos seus *stakeholders* (ABNT, 2015).

Diante disto, o presente artigo pretende responder a seguinte problemática: como elaborar um índice para avaliação de desempenho ambiental para indústria cerâmica?

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um índice para avaliação do desempenho ambiental aplicável ao processo produtivo da indústria cerâmica. Os objetivos específicos consistem em identificar e analisar os resíduos e subprodutos gerados; identificar um mecanismo de avaliação lógica e racional que leve em conta o potencial de impacto ambiental relativo, a quantidade relativa de cada resíduo e subproduto gerado, a cobertura geográfica relativa e a avaliação categórica de adequação final de cada resíduo e subproduto originado pela empresa e testar e aplicar o índice proposto.

Existe uma preocupação com a quantidade e destinação dos resíduos originados pelas indústrias cerâmicas, posto que, se forem destinados de forma incorreta no meio ambiente pode ocasionar impactos ambientais significativos. Faz-se necessário a criação de índices para medir a avaliação de desempenho ambiental no setor cerâmico, pois, existem poucos estudos relacionados ao desempenho ambiental nesse setor.

O trabalho é relevante, haja vista, que coopera com a sustentabilidade no setor cerâmico, desenvolvendo um indicador eficaz para avaliação do desempenho ambiental. Medir e avaliar o desempenho ambiental pode levar a ações eficazes à redução do impacto ambiental das operações e melhorar a qualidade dos processos e impactos ambientais do setor da indústria cerâmica. Além disso, há uma necessidade mundial reconhecida por indivíduos, organizações e sociedades para encontrar modelos, métricas e ferramentas para medir e gerenciar o desempenho ambiental das empresas (Escrig-Olmedo, Munõz, Fernández-Izquierdo & Rivera-Lirio, 2017).

A utilização de indicadores de avaliação de desempenho ambiental são importantes nos quesitos do cumprimento da legislação ambiental e de estratégias organizacionais determinadas. Esses indicadores realizam a otimização de recursos para as dimensões dos problemas ambientais, bem como colaboram na busca de avanços para o desempenho ambiental e empresarial das organizações (Henri & Journeault, 2008). Delai e Takahashi (2008), complementam que ao realizar a mensuração da sustentabilidade através de índices e indicadores em uma organização é possível inseri-la no processo de tomada de decisão em todos os níveis organizacionais.

O presente artigo colabora para as tomadas de decisões do setor cerâmico com o uso da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), no seu processo produtivo, através do índice que será criado nesse estudo. Através da aplicação da ADA será possível conhecer com mais propriedade cada etapa do processo produtivo de telhas e tijolos, com o propósito de indicar todos resíduos e subprodutos gerados no processo produtivo, mostrando seus impactos no meio ambiente, e também ao ser humano. Com esse índice a empresa poderá gerir seus processos de forma eficaz, levando em consideração o alinhamento com as políticas ambientais e a responsabilidade social.

Além disso, o estudo pode proporcionar um debate no meio acadêmico sobre a temática de avaliação de desempenho ambiental, promovendo estudos futuros em outros setores industriais, levando em conta que existem poucos estudos atuais nessa temática.

## **2 Referencial Teórico**

### **2.1 Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA)**

A ADA é um assunto que vem sendo tratado na área acadêmica e nas empresas já a algum tempo. As primeiras referências em relação a essa temática apareceram em 1969, onde o National Environmental Policy Act (NEPA) possibilitou nos Estados Unidos o uso de processos sistêmicos de avaliação ambiental (Campos, 2001).

A ABNT NBR 14031:2015 ressalta que as informações fornecidas pela Avaliação de desempenho ambiental permitem a melhoria contínua na gestão do meio ambiente nas empresas. Colaboram na identificação e avaliação dos seus aspectos ambientais; na implantação de metas e objetivos para um melhor desempenho ambiental; na identificação de oportunidades e tendências na questão ambiental e no cumprimento de questões legais relacionados aos aspectos ambientais da organização.

Hariz (2013) afirma que a ADA pode ajudar uma empresa a distinguir aspectos ambientais, definir quais desses aspectos serão tratados com prioridade, determinar critérios e fazer a avaliação do desempenho ambiental de acordo com esses critérios, e além disso fazer um planejamento com metas, objetivando sempre o a melhoria ambiental.

Contribuindo com essa ideia, o desempenho ambiental pode ser entendido como uma informação fornecida por um número de indicadores que permitem a comparação entre si, ou a partir de uma pesquisa conceitual, as formalidades legais nas áreas e setores de uma organização (Searcy; Karapetrovic & McCartney, 2005).

O desempenho ambiental é estabelecido com os resultados obtidos a partir controle dos aspectos ambientais de uma empresa mostrados por meio de indicadores. Estes indicadores podem ser relacionados com os objetivos ambientais da empresa, as metas, a política ambiental, dentre outros requisitos (Antonov & Sellito, 2011).

Os métodos e indicadores de ADA são instrumentos que delineiam, de forma complexa, alta quantidade de dados ambientais de uma organização. São aplicados para a explicação de dados absolutos de material e energia despendida contrastados à outros fatores de forma a aumentar o valor dos dados quantitativos, certificando a comparação entre as informações e entre o histórico analisado (Jasch, 2000; Perotto, Marchesi & Butelli, 2008).

A ADA permite demonstrar os pontos positivos e negativos dos resultados alcançados com as práticas ambientais implantadas na empresa, por meio de comparação com condições e requisitos preestabelecidos, bem como critérios para benchmarkings (Costa, Massard & Agarwal, 2010; Andrade, Sousa & Raupp, 2013; Rodrigues, Rebelato & Zeviani, 2015).

A ADA pode ser aplicada em qualquer tipo de empresa, independente do seu tamanho, da sua estrutura, de sua atividade econômica, ou de sua localidade, contudo os indicadores de desempenho ambiental precisarão ser avaliados periodicamente, por meio de pressão dos stakeholders ou questões de competitividade empresarial, ou ainda por via de determinação legal ou por questão da política ambiental da empresa (Cunha, 2010).

Na ADA, é imprescindível o levantamento dos dados de entrada e saída do processo de produção, sendo essa uma fase onde os resultados ou consequências negativas ao meio ambiente provocados por uma atividade ou produto ao longo do seu Ciclo de Vida são identificados e analisados, através de indicadores de desempenho (Moretti, 2011).

### **2.2 Métodos e Ferramentas para a Avaliação do Desempenho Ambiental**

Encontra-se na literatura especializada em desempenho ambiental vários métodos e ferramentas desenvolvidos com a finalidade de avaliar o desempenho ambiental das organizações. Dentre eles, está um dos pioneiros nessa área, a chamada metodologia energética (contábil), que foi sugerida por Odum (1996). Essa proposta é quantitativa e voltada para as empresas que avaliam os impactos ambientais vindos das operações produtivas, através de índices relacionados ao uso de recurso renovável e não renovável, ao serviço ambiental local, serviço econômico e a rentabilidade econômica do sistema analisado. Para tal, os aspectos fundamentais desse método são: os fatores sociais, a energia, os recursos naturais e o desperdício (Odum, 1996).

Veleva e Ellenbecker (2001) apresenta um método de Avaliação de desempenho ambiental em organizações com foco na produção e operação. Este método se baseia em seis aspectos de produção que compreendem vinte e dois indicadores de desempenho ambiental. Os aspectos definidos pelos autores são: energia e consumo de materiais, meio ambiente natural, justiça social e desenvolvimento comunitário, desempenho econômico, trabalhadores e produtos. A quantidade de indicadores por aspecto é variável e todos os indicadores mostram métrica na sua medição que avaliados de forma integrada estabelecem um indicador final.

Ainda em 2001, Li e Hui propuseram um método quantitativo para medir a avaliação de desempenho ambiental de processos produtivo baseado na Análise do Ciclo de Vida do Produto. Nesse caso, os aspectos fundamentais são: resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas. A mensuração nesse método se dá a partir de indicadores de impacto ao meio ambiente e à saúde humana.

Dias-Sardinha, Reijnders e Antunes (2002) usam como método para Avaliação de desempenho ambiental o Balanced Scorecard (BSC), que traz uma direção estratégica, baseando-se em quatro perspectivas: financeira, clientes, processos internos e aprendizagem e crescimento. Os autores afirmam que o BSC tradicional permite apontar o nível de desempenho social e o nível de desempenho ambiental que uma empresa deseja alcançar.

Al-Zwayalif (2017), usando-se desse mesmo método de BSC, propôs uma metodologia de mensuração de desempenho ambiental, observando a parte de estratégica organizacional, com um quatro indicadores, dezenove subitens com foco ambiental. As perspectivas são as seguintes: cliente, financeira, interna do processo e da aprendizagem e crescimento.

Rodrigues et. al. (2015) indicam uma metodologia qualitativa voltada para empresas disposta em nove aspectos: gestão organizacional, recursos humanos, produto, processo produtivo, instalações físicas, emissões, desenvolvimento social, desenvolvimento econômico e financeiro e mídia. Cada um desses aspectos, são constituídos por um grupo de indicadores, que foram julgados relevantes para a avaliação proposta, totalizando trinta e cinco indicadores. Logo após a observância e coleta de evidências de cada um dos indicadores, é possível classificá-los em uma escala de 0, 3,5, sendo 5 a pontuação dos indicadores quando as práticas estão em conformidade adequada. Por fim, têm-se uma soma que, transformada em porcentual, apresenta o indicador final de organização.

Já o método qualitativo apresentado por Zeviani et.al (2013), é constituído por quarenta e cinco indicadores, e também por nove aspectos, são eles: organizacional, recursos humanos, instalações físicas, meio ambiente de entorno, desenvolvimento social, desenvolvimento econômico, desenvolvimento financeiro, recursos naturais, produto e mídia. Cada um dos quarenta e cinco indicadores possui uma métrica própria e a aplicação da metodologia é por meio de um roteiro de caráter qualitativo.

Já com o foco voltado para a administração industrial, Reis e Sellitto (2015) propuseram um modelo fundamentado na ISO-14000, no Ecoblock e no julgamento por escala categórica. Esse método é constituído por cinco constructos, são eles: emissões atmosféricas, efluentes

líquidos, resíduos sólidos, recursos naturais e energéticos, e atendimento a legislação. Esses constructos precisam ser difundidos de acordo com o grau de relevância dado pelo grupo de foco. A seguir, os mesmos resultam em indicadores que são avaliados por esse grupo por meio de uma escala de 0 a 100%.

No mesmo raciocínio, Dubey, et. al. (2017) apresenta um modelo que objetiva analisar o impacto da cultura organizacional nas ações da alta administração industrial em relação a reestruturação do processo de produção objetivando um melhor desempenho ambiental. Nesse método são usados os seguintes aspectos: crenças da alta administração, participação da alta administração, fabricação reconfigurável, cultura organizacional e performance ambiental.

### **2.3 Indicadores de desempenho ambiental (IDA)**

Os indicadores devem ser usados de forma dinâmica ao planejamento estratégico da organização, permitindo controlar alguns processos, priorizando os processos listados como críticos, sinalizando o desenvolvimento dos objetivos ou padrão mínimo de desempenho determinado, orientando o processo de tomada de decisão e a atividade da equipe (Campos & Melo, 2008; Ventura, Reis & Takayanagui, 2010; Xavier & Matos, 2013).

Para tal, estes indicadores podem ser organizados no plano macro, como também considerando itens específicos de áreas organizacionais como: finanças, comercial, etc. O tema inerente à questão ambiental também precisa ser considerado (Blass, Gouvêa da Costa, Lima & Borges, 2017). A Agência Ambiental Europeia (EEA) determina indicador de desempenho ambiental como um valor visto e emblemático de um fenômeno de estudo (EEA, 1999).

Os indicadores quantificam as informações, adicionando dados numéricos, essenciais para se ter um fenômeno confiável, de forma que possam ser usados para exemplificar e transmitir fatos complexos de maneira mais sucinta (Roca, Arca, Calo, & Zumalave, 2005; Herva, Franco, Fdez-Carrasco & Roca 2008).

Veleva e Ellenbecker (2001) determinam indicadores como variáveis constituídas que apresentam atributos e oferecem informações formidáveis sobre sistemas físicos, sociais ou econômicos, consentindo uma apreciação de relação causa-efeito. E Como benefício do uso no âmbito ambiental, além dos pontos já levantados, pode-se listar: o monitoramento dos processos; benchmark junto a própria empresa, concorrentes e mercado de modo geral; constatação de eficiência e novos projetos e eficácia das políticas empregadas (Puig, Wooldridge & Darbra, 2014).

Os indicadores de desempenho ambiental (IDA) medem o desempenho ambiental atual ou passado de uma empresa e o comparam com as metas estabelecidas pela gerência da mesma (Jasch, 2000). Um dos principais pontos fortes é o possível uso para benchmarking no setor. Já um dos principais pontos negativos dos IDA é que eles geralmente são coletados apenas para aspectos sobre os quais os dados estão prontamente disponíveis. Eles se diferenciam da Análise do Ciclo de Vida na medida em que não visam à abrangência, mas à representação das principais características de uma empresa (Jasch, 2000).

Os IDA servem como padrão para averiguar se as emissões estão conforme os padrões estabelecidos pela legislação, bem como se esses e outros aspectos produtivos correspondem às normas ambientais internas das organizações, instituídas por um plano de metas e objetivos. Os indicadores também são utilizados para os stakeholders acompanharem o desempenho organizacional (Guimarães, Teixeira, Cirani, & Santos, 2017).

Jasch (2000) complementa dizendo que os IDA são especialmente empregados para a definição de dados absolutos do sistema produtivo, aumentando o valor de dados quantitativos. Com isso,

o IDA tem os seguintes objetivos: comparar o desempenho ambiental a longo prazo; destacar potencial de otimização; buscar melhorias; identificar oportunidade de mercado e potenciais de redução de custos; avaliar o desempenho ambiental entre as organizações; criar relatórios ambientais e dar feedback e suporte técnico para as normas de gestão ambiental.

Perotto et. al. (2008) afirma que, os indicadores dão apoio as empresas na quantificação e na construção de relatórios de desempenho ambiental, de tal modo, é preciso unir um ou mais indicadores a cada aspecto ambiental. Os indicadores classificam e resumem os dados relacionados aos aspectos ambientais, passando para a empresa a real situação ambiental da mesma de acordo com o seu contexto, perante os seus objetivos e limites definidos.

Mendes; Bueno e Ometto (2015) ressaltam que os principais métodos de IDA foram criados em maior número na Europa. Alguns exemplos são: EDIP 97, Eco-indicator 99, EPS 2000, CML 2002, Impact 2002+, MEEuP, ReCiPe e EDIP 2003. Os métodos denominados LUCAS e TRACI são originários da América do norte, já o Método LIME tem origem do Japão. Os mais recentes são: USEtox e IMPACT World+, e foram criados por estudiosos do mundo todo, demonstrando um tentativa de globalizar a aplicação dos mesmos.

### 3 Procedimentos Metodológicos

Quanto ao escopo desta pesquisa duas ponderações devem ser levantadas. Em primeiro lugar, destacam-se as etapas industriais do processo produtivo de telhas e tijolos, excluindo-se as etapas de extração da argila das jazidas, e as etapas de expedição das telhas e tijolos (Figura 1). Com isso, para o cálculo do potencial de impacto deste setor de indústria cerâmica serão considerados os resíduos e os subprodutos gerados por suas operações produtivas.



Figura 1 - Definição dos limites do sistema  
Autores (2022)

Em segundo lugar, é importante explicar que neste estudo serão considerados os resíduos e subprodutos gerados no processo produtivo de cerâmica. Da mesma forma que o resíduo, um subproduto também é considerado poluente do meio ambiente, considerando-se que o material poluidor é uma substância ou resíduo que não acomoda em um sistema natural em caso de introdução em uma capacidade acima da quantidade de compressão do sistema natural.

De acordo com as ponderações exteriorizadas e os objetivos do artigo, o estudo pode ser classificado como sendo de natureza aplicada, com finalidade descritiva e com abordagem qualitativa e quantitativa. No estudo foram usadas técnicas como: entrevistas, observações, análise de documentos e elaboração de diagnóstico.

O método de pesquisa utilizado nesse artigo, foi composto por seis etapas. São elas:

## ETAPA 1 – Mapeamento das etapas produtivas do processo

Nesta etapa foram estudadas as operações unitárias de transformação da matéria-prima em telhas e tijolos, através de pesquisas bibliográficas. Por meio desses estudos foi possível caracterizar e mapear todo o processo produtivo descrevendo cada etapa do processo de produção de telhas e tijolos.

## ETAPA 2 – Identificação e estudo dos resíduos gerados

Nesta fase, foram reunidos os dados dos resíduos/subprodutos produzidos em cada operação de fabricação, determinando a origem e sua composição (Quadro 1). Em relação a composição foi realizado um estudo bibliográfico junto a base de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar.

Resíduo/ Subproduto	Origem	Composição
Restos de cerâmica (cacos)	Pré-seleção dos produtos	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> ), 64,79% Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 16,26% Óxido de ferro(III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 7,22% Óxido de magnésio (MgO), 2,38% Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O), 2,68% Óxido de cálcio (CaO), 0,4% Dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ), 0,91% Óxido de manganês(II) (MnO), 0,09%
Cinzas oriundas da queima dos cavacos de eucalipto	Queima dos cavacos de eucalipto	Magnésio (Mg), 2,9% Alumínio (Al), 8,1% Silício (Si), 2,1% Fósforo (P), 2,2% Enxofre (S), 1,7% Potássio (K), 6,7% Cloro (Cl), 2% Cálcio (Ca), 56% Titânio (Ti), 2,8% Manganês (Mn), 0,8% Ferro (Fe), 14,7%
Papelão	Paletização	Lignina (16,6%), celulose e hemiceluloses (20%); Carbono C, Hidrogênio H, Oxigênio O,



		Nitrogênio N, Enxofre S, Cinzas.
Óleo queimado/utilizado	Maromba, secador e prensagem	Composição elementar: Enxofre (S), Cálcio (Ca), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Fósforo (P), Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Silício (Si), Boro (B), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Molibdênio (Mo), Alumínio (Al), Estanho (Sn), cromo (Cr), bário (Ba), níquel (Ni), vanádio (V). Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos: naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, indeno(1,23-cd)pireno, benzo(g,h,i)perileno].
Plástico	Setor de resina	Resíduo composto por polipropileno (PP), 100%
Restos de argila (Rebarba)	Prensagem	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> ), 61% Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 22% Óxido de ferro(III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 3,6% Óxido de magnésio (MgO), 0,3% Óxido de cálcio (CaO), 0,3% Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O), 0,1% Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O), 0,9% Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ), 1,6%
Tambor de aço	Setor de resina	Resíduo composto por: aço inoxidável (ferro, Fe (74%); cromo, Cr (18%) e níquel, Ni (8%), compostos fenólicos e polímero/resina Epóxi.
Gases das chaminés do forno da cerâmica	Queima dos cavacos de eucalipto	Massa de N <sub>2</sub> - 62,5203% Massa de H <sub>2</sub> O - 12,3227% Massa de CO <sub>2</sub> - 25,0304%

		Massa de O <sub>2</sub> - 0,0000%
		Massa de SO <sub>2</sub> -0,0281%
		Massa de NO <sub>2</sub> -0,0985%

Quadro 1 - Origem e composição  
Autores (2022)

**ETAPA 3** – Cálculo dos potenciais de impacto ambiental de cada resíduo para cada uma das categorias de impacto utilizando o método RECIPE.

Nesta pesquisa, primeiramente foi escolhido um método que tivesse como nível de avaliação do impacto atribuído a caracterização *midpoint*, isto é, que utiliza indicadores específicos do processo produtivo, (envolvendo processos físicos, químicos e biológicos), antes de chegar ao ponto final da categoria (ABNT, 2009). Além disso, que o método utilizado fosse de abrangência de aplicação global, e que englobasse um maior número de categorias.

Diante dessas variáveis foi escolhido o método RECIPE para o desenvolvimento do índice para avaliação do desempenho ambiental aplicável ao processo produtivo do setor industrial de cerâmica. Esse método tem como objetivo principal transformar a longa lista de resultados do inventário do ciclo de vida em um número limitado de pontuações de indicadores.

As pontuações do indicador expressam a gravidade relativa de uma categoria de impacto ambiental. No RECIPE, determina-se indicadores em dois níveis: 18 indicadores de ponto médio e 3 indicadores de ponto final.

Cada método, (ponto médio, ponto final), contém fatores de acordo com as três perspectivas culturais. Essas perspectivas representam um conjunto de opções em questões como tempo ou expectativas de que o gerenciamento adequado ou o desenvolvimento futuro da tecnologia possam evitar danos futuros. Individualista: curto prazo, otimismo de que a tecnologia pode evitar muitos problemas no futuro; Hierarquista: modelo de consenso, como frequentemente encontrado em modelos científicos, esse é geralmente considerado o modelo padrão e igualitário: longo prazo, baseado no pensamento de princípio da precaução.

Algumas das vantagens da estrutura RECIPE em relação a outras abordagens incluem: O conjunto mais amplo de categorias de impacto no ponto médio e sempre que possível, ele usa mecanismos de impacto com escopo global e ao contrário de outras abordagens (Eco-Indicador 99, Método EPS, LIME e Impact 2002+), ele não inclui impactos potenciais de extrações futuras na avaliação de impacto, mas assume que tais impactos foram incluídos na análise de inventário.

O RECIPE 2016 é uma melhoria em relação ao RECIPE 2008 e seus predecessores CML 2000 e Eco-indicador 99. O RECIPE2016 foi desenvolvido em colaboração entre o Instituto Nacional Holandês de Saúde Pública e Meio Ambiente (RIVM), Radboud University Nijmegen, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia e PRé (NATIONAL INSTITUTE FOR PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT MINISTRY OF HEALTH, WELFARE AND SPORT, 2018).

Nessa etapa do estudo será calculado cada potencial de impacto das categorias ambientais do RECIPE para cada resíduo do processo produtivo de telhas e tijolos. Os potenciais de impacto serão calculados usando o método RECIPE (2008), que define o potencial de impacto com a expressão:

$$I_{i,j} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{i,j} \cdot m$$

Onde:

- $I_{i,j}$  é o resultado do indicador (impact potential) para a intervenção (substância)  $i$  (para *midpoint*) na categoria  $j$
- $m$  é a magnitude (massa) da intervenção (por exemplo, a massa de CO<sub>2</sub> liberada no ar)
- $Q_{i,j}$  o fator de caracterização que conecta a intervenção (substância)  $i$  com a categoria de impacto  $j$

#### **ETAPA 4 – Normalização dos potenciais de cada resíduo**

Os potenciais de impacto são apresentados em unidades heterogêneas e retratam os impactos ambientais de uma forma que não satisfaz inteiramente aos problemas percebíveis ou a ameaças predominantes antes de se fazer a normalização. Nesse âmbito, a normalização proporciona uma posição de referência da pressão sobre o meio ambiente a cada categoria do impacto ambiental, (Sleeswijka et al., 2008; Unep/setac, 2011).

Na normalização é natural que os potenciais de impacto sejam contrastados com uma unidade comum para todas as categorias, ou seja, é o cálculo das magnitudes relativas para expor os resultados de um jeito adequado para a ponderação final e tomada de decisão. Em suma, é inserir as categorias de impacto numa mesma base para auxiliar na análise dos dados, visto que, no inventário as categorias possui suas unidades de cálculo específicas, e com a normalização é presumível assentar em uma referência comum, que no caso dessa pesquisa é pessoa/ano – p/a.

É importante destacar, que os valores da normalização são os cálculos dos resíduos e subprodutos da cerâmica a nível Brasil, para em seguida ser quantificado em um índice que será usado para avaliação do desempenho ambiental desse setor. Esta etapa utilizará o método RECIPE para a normalização.

#### **ETAPA 5 - Ponderação relativa entre os potenciais calculados**

O Método de Hierarquia Analítica (AHP), desenvolvido por Saaty (1991), é uma prestigiada ferramenta de tomada de decisão multicritério que tem sido usada em inúmeras aplicações e em vários campos: da economia, da política e da engenharia. De acordo com Chai et al. (2013), o método AHP permite atribuir um valor que representa o grau de preferência para uma dada alternativa a cada alternativa adicional. Esses valores podem ser usados para classificar e selecionar alternativas com base em uma estrutura hierárquica.

A ponderação consiste em pesos relativos conferidos a distintas categorias de impacto e consumo de recursos. A ponderação é determinada como a união de resultados já calculados previamente para atingir uma única medida total do impacto ambiental do sistema em estudo, e assim analisar e interpretar os dados. Isto é, são ponderados entre si os diferentes impactos tendo como resultado final um valor relativo das alternativas e categorias relacionadas para cálculo do impacto total do sistema em estudo, (Westkämper; Alting; Arndt, 2000; OLIVEIRA; Cristobal; Saizar, 2016).

A etapa de ponderação incide em multiplicar os fatores de ponderação pelo resultado da normalização, (etapa anterior), para cada uma das categorias de impacto. A ponderação é

comumente aplicada perante a forma de fatores de ponderação linear ou método de análise multivariada, isto é, neste estudo foi utilizado o IAHP (Improved Analytic Hierarchy Process) (Menoufi, 2011).

Neste estudo, para a etapa de ponderação dos potenciais, foi utilizado o método IAHP, ou em português (Análise Hierárquica de Processos Melhorada), que incide em uma variante do Método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) apresentado por Saaty em 1991.

O método AHP original requisita uma comparação em pares de diversas alternativas em correlação a cada um dos atributos e uma comparação por pares das próprias propriedades. O número e o tamanho das matrizes de comparação crescem ao passo que o número de alternativas e/ou atributos aumentam (Rao, 2013). Isso pode ser avaliado como um dos problemas principais da técnica de AHP, onde acontece um aumento quadrático no número de comparações, dependendo do número de alternativas (mais precisamente,  $[n \times (n-1) / 2]$ ) (Zhang, 2015).

O método IAHP foi escolhido por conseguir lidar com eficiência e com atributos objetivos. Uma matriz de comparação é estabelecida utilizando uma escala de importância relativa neste método (Zhang, 2015), que sugere uma forma sistemática de normalização dos valores dos atributos e a conversão dos valores subjetivos em valores objetivos (Rao, 2013).

O fator de ponderação para o impacto ambiental precisa demonstrar a gravidade do efeito potencialmente ocasionado pelo impacto e as possíveis decorrências deste efeito em relação aos outros efeitos ambientais deparados na normalização (Wenzel; Hauschild; Alting, 2000).

Para obter resultados de forma rápida e lidar com o ponto negativo do método AHP original, decidiu-se por usar o software MindDecider ([www.minddecider.com](http://www.minddecider.com)). Esse software oferece uma opção importante no estudo que é habilitar a atividade "auto resolver dependências" sendo que esta alternativa diminui a quantidade de perguntas com base nas aceções de correlação estabelecidos antes.

Roodchenko e Banin (2015), afirmam que, se o usuário adentrar nas seguintes proporções durante a comparação em pares:  $X < Y$  e  $Z > Y$ , a função "auto resolver dependências" faz uma presunção lógica de que  $X < Z$ . De maneira alternativa, quando for inserido:  $X < Y$  e  $Y = Z$ , a função "auto resolver dependências" formula que  $X < Z$ . Desse modo, dependendo de uma ordem de comparação, a função "auto resolver dependências" pode diminuir o número de solicitações até quase linear no caso mais adequado.

## **ETAPA 6 - Desenvolvimento do índice de avaliação de processos ambientais (DIAPA)**

O índice DIAPA é uma evolução de Rebelato et al. (2019), e foi desenvolvido de forma a ser diretamente proporcional a:

- a) O potencial de impacto ambiental relativo,  $(V(a) i)$ , de cada resíduo originado nos processos de produção, uma vez que a natureza entre eles são extremamente diversas;
- b) A quantidade relativa de cada resíduo gerado em um determinado período de tempo;
- c) A cobertura geográfica relativa, (dispersão espacial relativa), que cada resíduo pode cobrir, uma vez que cada um deles pode atingir diferentes graus de acordo com: a rota de disposição (ar, água ou solo); sua composição química; e sua condição física;
- d) A avaliação categórica da adequação final do descarte praticado pela empresa para cada resíduo.

A fórmula DIAPA é:

$$\sum_{i=1}^n \frac{V(a)_i \cdot A_i}{\sum_{j=1}^n V(a)_j \cdot A_j} \cdot K_i \cdot 100$$

Onde:

$n$  = número de resíduos / subprodutos;

$V(a)_i$  = valor (relativo) do impacto ambiental. É o valor relativo do potencial de impacto, calculado por meio do método RECIPE (2016), de cada resíduo/ subproduto  $i$ ;

$A_i$  = impacto relativo da dispersão geográfica de cada resíduo/ subproduto  $i$ .

$K_i$  = coeficiente de avaliação da destinação final de cada resíduo/ subproduto  $i$ .

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Contexto investigado

Para o teste do índice criado foram utilizados os dados de uma indústria cerâmica, onde foram realizadas visitas técnicas durante o ano de 2019 pelo pesquisador. Os dados dos resíduos e subprodutos foram coletados por meio de documentos que foram disponibilizados pela empresa, e pesquisa bibliográfica para a identificação da composição química dos materiais utilizados no processo. A empresa, objeto do teste foi fundada em 16 de janeiro de 1973, está instalada no município de Ituiutaba, interior do Estado de Minas Gerais, Brasil. Essa cidade fica aproximadamente 676 Km da capital Belo Horizonte.

A empresa possui uma área construída de cerca de cinco mil metros quadrados de uma área total de doze mil metros quadrado, dividido em área de produção e escritório administrativo, possui um quadro funcional 37 empregados entre setor produtivo e administrativo da empresa. As visitas se deram no ano de 2019, e contou com a presença do gerente responsável pela empresa. Essas visitas aconteceram a partir da observação do local estudado e reunindo informações documentais da indústria, entrevistas para obter todas as informações do ciclo produtivo, com seus respectivos resíduos e subprodutos, bem como as quantidades geradas e a disposição no meio ambiente.

### 4.2 Dados dos resíduos/subprodutos da indústria

Nesta fase da pesquisa estão reunidos os dados dos resíduos/subprodutos produzidos em cada operação de fabricação, determinando a quantidade anual de cada resíduo/subproduto e sua destinação (Quadro 2). Vale ressaltar que a quantidade anual de cada resíduo e sua destinação foi informada pela empresa visitada para o teste.

Resíduo/ Subproduto	Quantidade anual	Destinação
Restos de cerâmica (cacos)	58.585 kg	Prefeitura e Proprietários Rurais (aplicação em trechos de estradas esburacadas)
Cinzas oriundas da queima dos cavacos de eucalipto	2.070 kg	Prefeitura e Proprietários rurais (aplicação em trechos de estradas esburacadas)
Papelão	1.200 kg	Vai com as telhas no palete, e volta para a empresa para reutilização. Quando não se dá para utilizá-lo mais é destinado a reciclagem.

Óleo queimado/utilizado	576 L	Usado para lubrificar a Vagoneta de telhas e tijolos. A vagoneta é um equipamento utilizado no transporte de tijolos, que facilita a locomoção e agiliza o processo de transporte. Esse equipamento sempre deve ser lubrificado.
Plástico	720 kg	Sem fim predestinado / usado na própria empresa e após isso destinado a reciclagem
Restos de argila (Rebarba)	10.800.000 t	Reutilizados novamente no processo de produção
Tambor de aço	624 kg	Sem fim predestinado / usado na própria empresa e após isso destinado a reciclagem
Gases das chaminés do forno da cerâmica	3553000 Kg	Liberado no ar pelas chaminés

Quadro 2 - Quantidade anual e destinação  
Autores (2022)

### 4.3 Cálculo dos potenciais de impacto

A próxima etapa foi a realização do cálculo de cada potencial de impacto das categorias ambientais do RECIPE para cada resíduo do processo produtivo da indústria cerâmica, (Tabela 2). Para o cálculo dos potenciais foi utilizado o método RECIPE, sendo considerado as seguintes categorias: mudança climática, material particulado, acidificação da terra, eutrofização marinha, eutrofização da água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade da água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre e formação de ozônio fotoquímico.

Vale evidenciar a importância da etapa anterior para procedência do cálculo dos potenciais, sendo que de posse dos dados, (quantidades de resíduos e subprodutos da empresa, composição química e massa anual), foi possível identificar a quantidade de cada substância presente no total dos resíduos e subprodutos.

**Tabela 1.** Cálculos dos potenciais ambientais para cada categoria

<b>Resíduos/Subprodutos</b>	Mudança climática kg CO2 eq	Acidificação da terra kg SO2 eq	Eutrofização da água doce kg P eq	Eutrofização marinha kg N eq	Toxicidade humana kg 1,4-DB eq	Formação de ozônio fotoquímico kg NMVOC	Material particulado kg PM10 eq	Ecotoxicidade terrestre kg 1,4-DB eq	Ecotoxicidade da água doce kg 1,4-DB eq	Ecotoxicidade marinha kg 1,4-DB eq
Restos de cerâmicas (cacos)	0	0	0	0	7,49E+01	0	0	4,78E-01	4,78E-01	2,29E-03
Cinzas oriundas da queima dos cavacos de eucalipto	0	0	4,55E+01	0	7,07E+03			3,22E+02	1,23E+01	1,19E+02
Restos de argila	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Papelão	0	4.416	0	3,60E+03	0	0	0	0	0	0
Plástico	0	0	0	0	0	0	0			
Óleo queimado/utilizado	0	4,6	3,40E-01	0	3,65E+00	0	0	5,38E+00	4,70E-01	1,00E-01
Tambor de aço	0	0	0	0	6,10E+01	0	0	5,46E+02	2,67E+02	1,53E+02
Gases oriundos da queima de cavacos	0	1,09E+04	0	7,37E+02	0	1,89E+04	5,24E+03	0	0	0

Fonte: Autores (2022)

#### 4.4 Normalização

O cálculo da normalização foi realizado com base na computação dos potenciais conforme demonstrado na Tabela 1, dividido pelo fator de normalização, conforme apresentado na Tabela 2, em que cada categoria tem uma equivalência estabelecida pelo método RECIPE para que tenha uma única referência, de forma a facilitar a próxima etapa que é a ponderação.

<b>Categoria de impacto ambiental</b>	<b>Fator de normalização</b>	<b>Unidade/ Dimensão</b>
Mudança climática	kg CO <sub>2</sub> eq/p/ano	6,89E+03
Acidificação da terra	kg SO <sub>2</sub> eq/p/ano	3,82E+01
Eutrofização da água doce	kg P eq/p/ano	2,90E-01
Eutrofização marinha	kg N eq/p/ano	7,34E+00
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq/p/ano	3,26E+02
Formação de ozônio fotoquímico	kg NMVOC/p/ano	5,67E+01
Material particulado	kg PM <sub>10</sub> eq/p/ano	1,41E+01
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq/p/ano	5,93E+00
Ecotoxicidade da água doce	kg 1,4-DB eq/p/ano	4,30E+00
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq/p/ano	2,46E+00

Tabela 2 - Fator de normalização utilizados, RECIPE (2016)

Vale apontar que após os cálculos, os valores se encontram em uma única dimensão/unidade. Na normalização é comum que os potenciais de impacto sejam comparados com uma unidade comum para todas as categorias, isto é, o cálculo das magnitudes relativas para apresentar os resultados em uma forma adequada para a ponderação final. O resultado da normalização pode ser observado na Tabela 3.



Resíduos/Subprodutos	Mudança climática	Acidificação da terra	Eutrofização da água doce	Eutrofização marinha	Toxicidade humana	Formação de ozônio fotoquímico	Material particulado	Ecotoxicidade de terrestre	Ecotoxicidade da água doce	Ecotoxicidade marinha
Restos de cerâmicas (cacos)	0	0	0	0	2,30E-01	0	0	8,06E-02	1,11E-01	9,29E-04
Cinzas oriundas da queima dos cavacos de eucalipto	0	0	1,57E+02	0	2,17E+01			5,43E+01	2,86E+00	4,84E+01
Restos de argila	0	0	0	0		0	0			
Papelão	0		0	4,90E+02	0	0	0			
Plástico	0	0	0	0	0	0	0			
Óleo queimado/utilizado	0	0		0	1,12E-02	0	0	9,07E-01	1,09E-01	4,07E-02
Tambor de aço	0	0	0	0	1,87E-01	0	0	9,20E+01	6,20E+01	6,23E+01
Gases oriundos da queima de cavacos	0	2,84E+02	0	1,00E+02	0	3,33E+02	3,71E+02	0	0	0

Tabela 3 - Potenciais normalizados, Autores (2022)

#### 4.5 Ponderação

De posse dos dados anteriores, nessa fase foi aplicado o método IAHP (Análise Hierárquica de Processos Melhorada), com o uso do software Mind Decider, propiciando o cálculo do peso relativo  $Va(i)$  (tabela 4).

O método IAHP trabalha com objetivo, critério e alternativa, sendo considerado como objetivo os impactos dos resíduos/subprodutos na produção de telhas e tijolos. Como critérios foram considerados as categorias: mudanças climáticas, material particulado, acidificação da terra, eutrofização marinha, eutrofização da água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade da água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre e formação de ozônio fotoquímico. Já como alternativas foram considerados os oito resíduos/subprodutos da empresa em estudo: restos de cerâmica (cacos), cinzas oriundas da queima dos cavacos de eucaliptos, restos de argila, papelão, plásticos, óleo queimado/utilizado, tambores de aço e gases oriundos da queima dos cavacos.

Nesta etapa se faz uma comparação paritária, de dois a dois, utilizando o próprio potencial, por meio do software Mind Decider, fez-se a análise de dois resíduos para uma mesma categoria. Nessa análise é possível ter um potencial calculado, como pode ser visto na Figura 2.

<b>RESÍDUOS/ SUBPRODUTOS</b>	<b><math>V(a)i</math> (%)</b>
Gases oriundos da queima de cavacos	30,850
Cinzas oriundas da queima de cavacos	30,483
Tambor de aço	28,937
Papelão	9,434
Óleo utilizado/ Óleo queimado	0,194
Restos de cerâmica (Cacos)	0,102
Restos de argila (rebarba)	0
Plástico	0
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Tabela 4 - Peso relativo dos potenciais ambientais para cada resíduo e subproduto, Autores (2022)

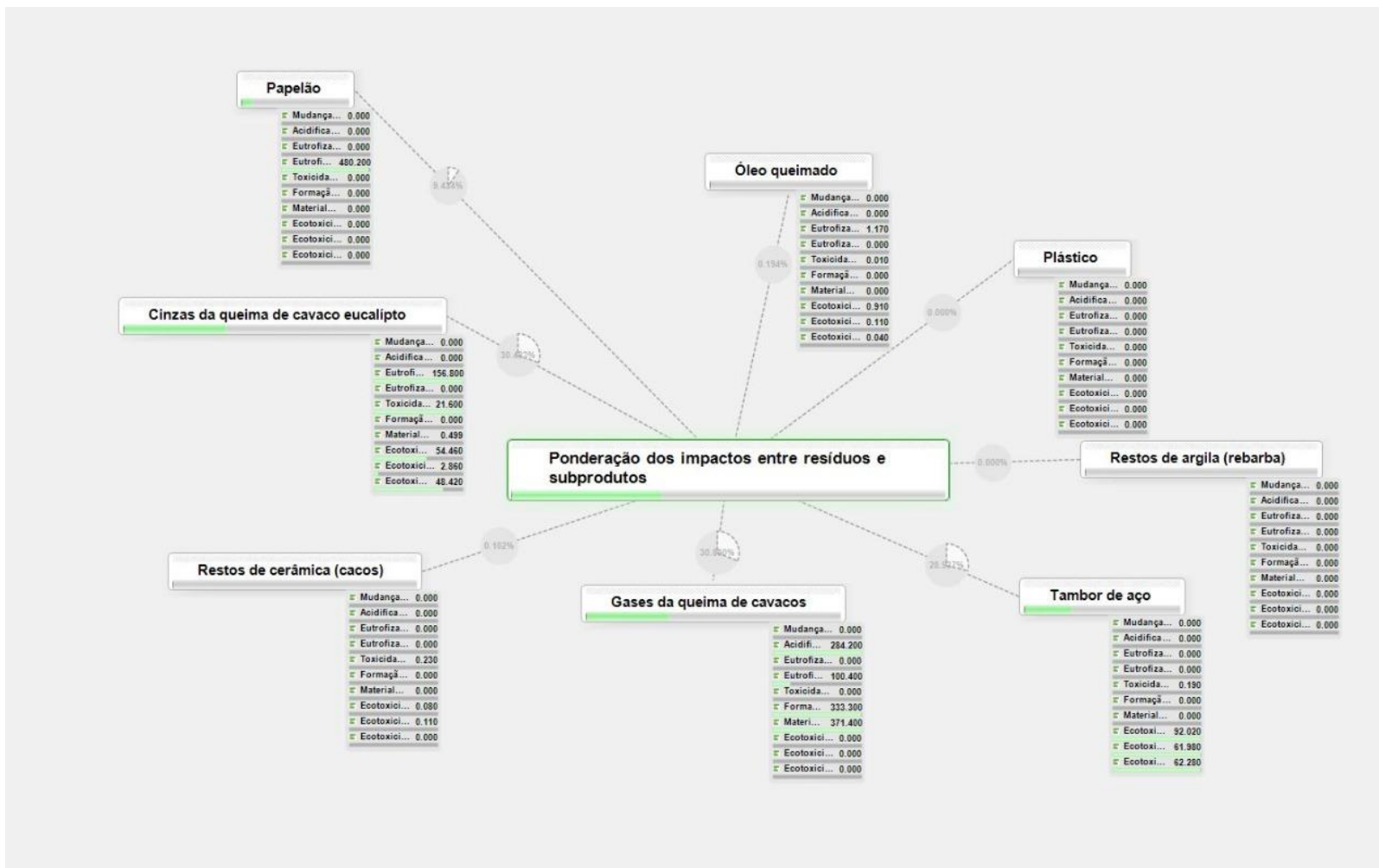


Figura 2 - Ponderação dos impactos entre resíduos e subprodutos, Mind Decider (2022)

#### 4.6 Cálculo do índice para Avaliação do Desempenho Ambiental da indústria cerâmica

A abrangência relativa da emissão  $x=i$  (Tabela 5), foi definida de acordo com a Figura 3, onde foi colocado o número correspondente à categoria mais afetada em cada resíduo e subproduto.

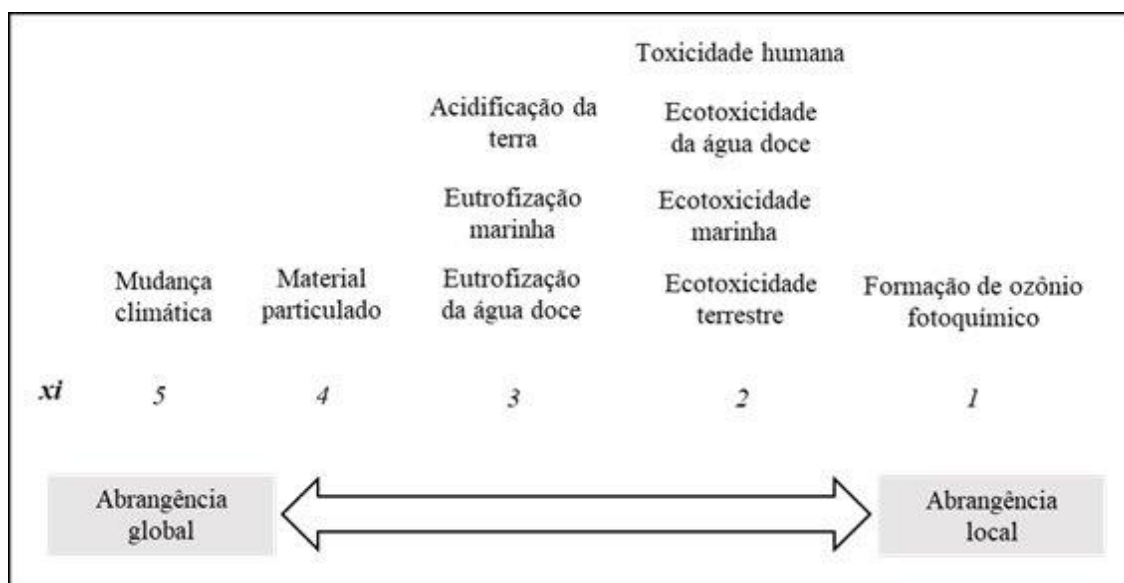


Figura 3 - Abrangência global e Abrangência Local, RECIPE (2016)

Em relação a avaliação categórica foi definido  $k=0$ , o que significa que o resíduo e subproduto não tem uma destinação correta ou  $k=1$ , que indica possuir uma destinação ambiental correta. A partir do cálculo da variável  $V(a)_i$ , foi possível calcular o DIAPA, (Tabela 6). Como se vê por meio da Tabela 5, o resíduo com o maior peso relativo  $Va(i)$  calculado foram os gases oriundos da queima de cavacos (30,850%). A queima dos cavacos de eucaliptos da indústria cerâmica produz os gases  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $SO_2$  e  $NO_2$ . O  $CO_2$  foi desconsiderado porque o eucalipto é uma fonte renovável, portanto absorve da atmosfera o  $CO_2$  que está sendo queimado.

Trata-se de um resíduo com alto potencial de impacto ambiental nas seguintes categorias ambientais: mudança climática, acidificação da terra, eutrofização marinha, formação de ozônio fotoquímico e material particulado. Estima-se que a indústria cerâmica em estudo gerou cerca de 11.999.600 Kg de  $N_2$ , 2.365.100 Kg de  $H_2O$ , 5.400 Kg de  $SO_2$  e 18.900 Kg de  $NO_2$  por meio da queima dos cavacos de eucaliptos no último ano. A participação relativa dos gases oriundos da queima de cavacos na composição do DIAPA calculado para a empresa estudada foi zero. Ou seja, esse resíduo impactou negativamente na formação do DIAPA. Isto porque o DIAPA é um índice que avalia a adequabilidade ambiental ponderada da destinação e, neste caso, o  $k_i$  atribuído a este resíduo foi  $k=0$ , pois, a indústria cerâmica libera os gases diretamente no ambiente. Esta prática foi considerada ambientalmente inadequada, mesmo que legalmente lícita.

As cinzas oriundas da queima de cavacos foi o subproduto com o segundo maior peso relativo  $Va(i)$  calculado (30,483%). As cinzas apresentam um amplo espectro de elementos químicos potencialmente perigosos: Mg, Al, Si, P, S, K, Cl, Ca, Ti, Mn e Fe. É um subproduto com alto potencial em termos de: eutrofização da água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha. As cinzas receberam uma avaliação negativa em termos da adequabilidade final de sua destinação, pois, são destinados pela indústria cerâmica à prefeitura e proprietários rurais, onde os mesmos reaproveitam esse subproduto colocando-as em estradas esburacadas, desta forma considerou-se  $k=0$ . Portanto, as cinzas impactaram negativamente no DIAPA final calculado.

O terceiro resíduo com o maior peso relativo  $Va(i)$  foi o tambor de aço com 28,937%. Esse resíduo é composto por aço inoxidável, possuindo também em sua composição Fe, Cr e Ni, tem impacto nas seguintes categorias: toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade da água doce e ecotoxicidade marinha. A destinação desse resíduo é a reutilização do mesmo na própria empresa, e após isso é redirecionado a coleta seletiva de reciclagem da cidade, por isso,  $k=1$ . Sua participação percentual no DIAPA final calculado corresponde a 66,69%.

O quarto resíduo com o maior peso relativo  $Va(i)$  calculado foi o papelão (9,434%). O papelão é um resíduo muito rico em lignina, celulose e hemicelulose, C, H, O, N e S. Além disso, tem impacto em termos de eutrofização marinha. Para a empresa estudada, o  $ki$  atribuído ao papelão foi 1, pois, foi um resíduo destinado de forma “adequada” pela empresa, uma vez que mesmo é reutilizado na empresa e posteriormente é destinado à coleta seletiva de reciclagem. Este resíduo participa em 32,61% no DIAPA.

O óleo utilizado/queimado aparece em quinto lugar em termos de peso relativo  $Va(i)=0,194\%$ . O óleo utilizado/queimado é composto por S, Ca, Zn, Pb, P, Fe, Mg, Na, Si, B, Mn, Cu, Mo, Al, Sn, Cr, Ba, Ni, V e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. As categorias de impacto observadas foram: toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade da água doce e ecotoxicidade marinha. A destinação final é considerada adequada e, portanto,  $k=1$ . A sua participação percentual no DIAPA final calculado foi de 0,447%.

O sexto subproduto com o maior peso relativo  $Va(i)$  calculado foram os restos de cerâmicas, (cacos), com 0,102%. Os restos de cerâmica são ricos em  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$  e  $MnO$ , e impacta nas seguintes categorias: toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade da água doce e ecotoxicidade marinha. A empresa gera cerca de 58.585 kg de restos de cerâmica, (cacos), por ano. Cem por cento desse subproduto é destinado à prefeitura e proprietários rurais, onde são reutilizados nas estradas de terra da zona rural do município. Isso é considerado correto e utilizado em muitas cidades que possuem problemas em estradas rurais esburacadas, portanto  $k=1$ , esse subproduto participa moderadamente em 0,235% no DIAPA final calculado para a empresa.

Em sétimo lugar em termos de peso relativo  $Va(i)$  calculado aparece os restos de argila, (rebarba), com influência de zero por cento, (0%). Dessa forma, esse resíduo não contribuiu na formação do DIAPA. Os restos de argila, (rebarba), não teve impacto em nenhuma categoria. A atribuição de  $ki$ , que é o índice categórico que expressa a adequabilidade da destinação do resíduo/subproduto, no caso dos restos de argila, comumente denominada rebarba, foi  $k=1$ . Isto porque, no estudo realizado, os restos de argila têm como destino final a reutilização, ou seja, é um resíduo importante para a empresa, pois, manuseando-o de forma adequada é possível seu reaproveitamento no processo produtivo.

Também com zero por cento (0%), em termos de peso relativo  $Va(i)$  calculado aparece o plástico. Esse resíduo é composto exclusivamente por polipropileno, (PP), e não impacta em nenhuma das categorias analisadas. Ele é reutilizado na própria empresa e, após isso é destinado a coleta seletiva de reciclagem do município, portanto,  $k=1$ . A sua contribuição para o DIAPA é zero por cento, (0%).

Finalmente, observa-se o DIAPA final calculado de 28,732% para a empresa do teste. Isto significa que 28,732% da massa ponderada de resíduos/subprodutos tem destinação ambientalmente correta.

Resíduos/Subprodutos	Ponderação relativa $V(a)i$	Abrangência relativa da emissão = $xi$	$Ki$ – Avaliação categórica	DIAPA (%)	Contribuição para o DIAPA (%)
Gases oriundos da queima de cavacos	30,85000	5	0	0,00000	0,000000000

Cinzas oriundas da queima de cavacos de eucalipto	30,48300	2	0	0,00000	0,000000000
Tambor de aço	28,93700	2	1	19,16459	66,699704960
Papelão	9,43400	3	1	9,37202	32,618015858
Óleo utilizado/ queimado	0,19400	2	1	0,12848	0,447169463
Restos de cerâmica (Cacos)	0,10200	2	1	0,06755	0,235109718
Restos de argila (Rebarba)	0,00000	1	1	0,00000	0,000000000
Plástico	0,00000	1	1	0,00000	0,000000000
TOTAL	100	21		28,73265	100,00000

Tabela 5- Resultados de  $V(a)$ ,  $A_i$ ,  $K_i$ , DIAPA, e percentual de participação no DIAPA geral para a empresa do teste, Autores (2022)

## 5 Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um índice para avaliação do desempenho ambiental aplicável ao processo produtivo da indústria cerâmica. Para alcançar tal finalidade, o índice desenvolvido para avaliação do desempenho ambiental demonstra, em valor percentual, a adequação da destinação dos resíduos e subprodutos gerados nas atividades de fabricação da indústria cerâmica. Esse método possibilita ao setor cerâmico levar em consideração que quanto mais as empresas agregar esforços na gestão ambiental, maior é a sua eficiência da adequação ambiental nas destinações dadas aos resíduos e subprodutos gerados nos seus processos de produção.

O índice proposto está relacionado a: ponderação relativa  $V(a)$ ; ao impacto relativo da dispersão geográfica de cada resíduo/subproduto ( $A_i$ ), a abrangência relativa da emissão =  $x_i$  e ao coeficiente de avaliação da destinação final de cada resíduo/subproduto =  $K_i$ . O uso do índice proposto permite: avaliar o impacto ambiental em relação a sua destinação, o monitoramento do desempenho ambiental através do teste e aplicação desse índice e quantos por cento da massa ponderada dos resíduos/subprodutos está ambientalmente correta. O teste do DIAPA permitiu verificar que seis resíduos e subprodutos gerados pela empresa tem destinação adequada, são eles: tambor de aço, papelão, óleo queimado/utilizado, restos de cerâmica (cacos), restos de argila (rebarba), e plástico.

Já os resíduos/subprodutos cuja destinação é considerada inadequada estão os gases oriundos da queima de cavacos, que teve zero contribuição relativa para o total do índice e as cinzas oriundas da queima de cavacos de eucalipto que também teve zero contribuição para o DIAPA. Com isso, a empresa onde foi aplicado o teste obteve um índice de 28,732%, o que significa que 28,732% dos resíduos e subprodutos possuem destinação considerada ambientalmente adequada. Esse índice é considerado baixo, e isto se deve principalmente ao resíduo gases oriundos da queima de cavacos e o subproduto cinzas oriundas da queima de cavacos de eucaliptos que possui sua destinação inadequada.

Em relação ao gases oriundos da queima de cavacos, gases como:  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $SO_2$  e  $NO_2$ , são simplesmente lançados na atmosfera, e muitos desses gases são poluentes atmosféricos causadores do efeito estufa. A emissão de gases poluentes faz com que a composição química da atmosfera seja alterada, modificando dessa forma a temperatura média do planeta, causando desequilíbrio do efeito estufa e do aquecimento global.

Outro subproduto que é responsável pelo baixo índice do teste são as cinzas oriundas da queima de cavacos, que são reaproveitadas pela prefeitura e proprietários rurais destinando-as para o

aproveitamento em estradas esburacadas. Portanto, essas cinzas são inseridas no meio ambiente, sendo que contém elementos químicos considerados perigosos, como por exemplo o manganês, que se inalado e ingerido pelo organismo humano em grandes quantidades podem provocar efeitos diversos no sistema neurológico e respiratório.

Dentre as contribuições deste trabalho, está o levantamento das etapas de todo o processo produtivo de telhas e tijolos, bem como seus resíduos e subprodutos gerados. Além disso, foi possível a criação de um índice de desempenho ambiental aplicável ao processo produtivo da indústria cerâmica. Este índice pode ser utilizado tanto na empresa do teste como em qualquer outra indústria do setor cerâmico. O índice mostrou ser uma ferramenta adequada para a avaliação do desempenho ambiental do setor cerâmico, sua aplicação poderá fazer com que as indústrias desse segmento revejam suas formas de gerir, propiciando uma atenção maior ao meio ambiente, uma política de preservação ambiental bem gerida pelas empresas do setor propiciará que essas empresas melhorem sua imagem perante seus clientes.

### 5.1 Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros

Verifica-se como limitação nesse estudo a existência de uma informalidade das indústrias em relação aos dados de seu processo produtivo e dos seus resíduos e subprodutos. Dessa forma, vê-se uma oportunidade para futuras pesquisas nessa área do conhecimento e para a participação de especialistas brasileiros que possam auxiliar e assessorar essas empresas a ter um banco de dados estruturado e representativo sobre seus resíduos e subprodutos, destinação, processo produtivo e quantidade anual de cada resíduo e subproduto. Uma empresa dispondo esses dados conseqüentemente facilita a aplicação do índice de desempenho ambiental.

Dada a relevância do tema e a carência de estudos que abordem essa temática, a avaliação do desempenho ambiental do processo produtivo da indústria cerâmica, pode ser ampliada para posteriores estudos abrangendo desde os processos preliminares (extração da argila), até a expedição final dos produtos (telhas e tijolos), levando em consideração toda a cadeia produtiva. Outra sugestão é o desenvolvimento de índices ambientais para outros setores industriais. Por fim, é indispensável adicionar efetivamente a aplicação do índice ADA nas organizações do setor cerâmico, de forma a orientar as empresas a gerir os riscos oriundos de suas atividades, propiciando o uso mais racional dos recursos naturais, desenvolvendo métodos mais sustentáveis na preservação e conservação do meio ambiente.

### Referências

- Andrade, C. S.; Sousa, C. A. & Raupp, F. (2013, outubro). Modelo de Avaliação de Desempenho Ambiental. In *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Salvador-BA*
- Antonov, P. & Sellitto, M. A. (2011). Avaliação de Desempenho Ambiental: estudo de caso na indústria papelreira. *Revista Produção Online*, 11, 1059-1081.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). Normas da Série ISO 14000. ABNT NBR ISO 14031. Rio de Janeiro – RJ. Recuperado de <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasghislaine/abnt-nbr-iso-14031.pdf>
- Barbieri, J. C. (2016). *Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. São Paulo: Saraiva.
- Blass, A. P.; Gouvêa da Costa, S.E.; Lima, E.P. & Borges, L.A. (2017). Measuring environmental performance in hospitals: A practical approach. *Journal of Cleaner Production*, 142, 279-289.
- C. JASCH. (2000). Environmental performance assessment and indicators. *Journal of Cleaner Production*, 8, 79 – 88.

- Campos, L. M. S. (2001). SGADA - Sistema de Gestão e avaliação de desempenho ambiental: uma proposta de implementação. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.
- Campos, L. M. S. & Melo, D. A. (2008). Indicadores de desempenho dos sistemas de gestão ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. *Produção*, 18, 540-555.
- Chai, Cs, Koh, Jhl, & Tsai, C.-C. (2013). A review of Technological Pedagogical Content Knowledge. *Education Technology and Society*, 16 (2), 31–51.
- Costa, I.; Massard, G. & Agarwal, A. (2010). Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. *Journal of Cleaner Production*, 18, 815-822.
- Cunha, J. M. O. L. (2010). Avaliação do Desempenho Ambiental de uma Cadeia de Abastecimento – Estudo de Caso de uma Indústria do Sector Automóvel. (Dissertação de Mestrado). Universidade Aveiro. Aveiro, Portugal.
- Delai, I. & Takahashi, S. (2008). Uma proposta de modelo de referência para mensuração da sustentabilidade corporativa. *RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental*, 2, 19-40.
- Dias, M. D. C. O., Mauri, C.B. P., Pedro, L. F. D. & Jair F. V. (1999). *Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos ambientais atividades produtivas*, Fortaleza –CE, Banco do Nordeste.
- Dias-Sardinha, I. & Reijnders, L. (2002). Environmental Performance Evaluation and Sustainability Performance Evaluation of Organizations: an Evolutionary Framework. *Eco-management and auditing*, 8 (2), 71-79.
- Dubey, R.; Gunasekaran; Angappa; Petri; Papadopoulos; Thanos; Childe, S. & Sahay, B. (2017). Explaining the impact of reconfigurable manufacturing systems on environmental performance: The role of top management and organization culture. *Journal of Cleaner Production*, 141, 56-66.
- El-Gamal, S.M.A., El-Hosiny, F.I., Amin, M.S. & Disse, D.G. (2017). “Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes”, *Construction and Building Materials*, 154, 1062–1078.
- Escrig-Olmedo, E., Munõz, M.J., Fernández-Izquierdo, M.A. & Rivera-Lirio, J.M. (2017). Measuring Corporate Environmental Performance: A Methodology for Sustainable Development. *Business Strategy and the Environment*, 26 (02), 142-162.
- Guimarães, C. E.; Teixeira, C.E.; Cirani, C.B.S. & Santos, M.A. (2017). Avaliação do Desempenho Ambiental do Aproveitamento do Biogás em Fecularias de Mandioca no Estado do Paraná. *Desenvolvimento em questão*, 39, 171-202.
- Hariz, S.; Bahmed, L. (2013). "Assessment of environmental management system performance in the Algerian companies certified ISO 14001", *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 24, 228-243.
- Henri, J.-F. & Journeault, M. (2008). Environmental Performance Indicators: An Empirical Study of Canadian Manufacturing Firms. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 165-176.
- Hermann, E.; Call, J.; Hernandez-Lloreda, M.V.; Hare, B. & Tomasello M. (2007). Humans have evolved specialized skills of social cognition: the cultural intelligence hypothesis. *Science*, 317(5843), 1360–1366.
- Herva, M., Franco, A., Fdez-Carrasco, & Roca, E. (2008). The ecological footprint of production processes as indicator of sustainability. *Ingeniería Química*, 460, 180-186.
- Leite, M. G & Gonçalves-Fujaco, M.A. (2013) “A atividade de beneficiamento de quartzitos na cidade de Ouro Preto-Brasil: características gerais e principais impactos ambientais”, *Economia, Sociedad y Territorio*, XIII (41), 227-243.
- Li, C. P. & Hui, I. K. (2001). Environmental Impact Evaluation Model for Industrial Process. *Environmental Management*, 27, 729-737.



- Mendes, N. C.; Bueno, C. & Ometto, A. R. (2015). Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida revisão dos principais métodos. *Produção*, 26 (1), 160-175.
- Menoufi, K.A.I. (2011). Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art. (Trabalho de conclusão de curso). University of Lleida Polytechnic School, Lérida, Espanha.
- Moretti, T. V. (2011). Método de avaliação da estrutura de inventários de ciclo de vida: análise para casos brasileiros. (Dissertação de Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná.
- National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport. (2018) LCIA: the RECIPE model. Recuperado de <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/RECIPE>
- Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting. Emergy and environmental decision making*. Nova York, Nova York: Wiley.
- Olivera, A., Cristobal, S. Y. & Saizar, C. (2016). Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social: una herramienta para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones. *INNOTEC Gestión*, 7, 20-27.
- Perotto, E.; Marchesi, R.; Canziani, R. & Butelli, P. (2008). Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 16, 517-530.
- Puig, M.; Wooldridge, C. & Darbra, R. M. (2014). Identification and selection of Environmental Performance Indicators for sustainable port development. *Marine Pollution Bulletin*, 81, 124-130.
- Rao, J. R.; Chandrababu, N.K.; Muralidharan, C.; Balachandran Unni Nair; Rao, P.G. & Ramasami, T. (2003). Recouping the wastewater: a way forward for cleaner leather processing. *Journal of Cleaner Production*, 11, 591-599.
- Reis, J. A. & Sellitto, M. A. (2015). Avaliação de desempenho ambiental de um fabricante de máquinas. *Revista Eletrônica de Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19, 1589-1599.
- Roca, E.; Arca, J.C.; Calo, J. & Zumalave, J.A. (2005). Indicators and systems of environmental monitoring. *Environmental Information Systems*, 95-116.
- Rodrigues, A. M.; Rebelato, M. G. & Zeviani, C. H. (2015). Methodological benchmark for environmental performance evaluation in metalworking companies. *Business and Management Review*. 285-299.
- Saaty, T.L. (1991). Método de Análise Hierárquica. Rio de Janeiro, RJ: Makron.
- Sales, A.T.C. & Alferes Filho, R. dos S. (2014). Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto, *Ambiente Construído*, 14, (1), 113-125.
- Sánchez, L. E. (2008). *Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos*. São Paulo: SP: Oficina de Textos.
- Searcy, C.; Karapetrovic, S. & McCartney, D. (2005). Designing sustainable development indicators: analysis for a case utility. *Measuring Business Excellence*, 9, 33-41.
- Sleeswijka, A. W. & Oers, L.F.O. (2008). Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of The Total Environment*, 390, 227 – 240.
- Song, M. L.; Fisher, R. W. J. L. & Cui, L. B. (2016). Environmental performance evaluation with big data: theories and methods. *Annals of Operations Research*, 270, 459-47.
- Unep/Setac. (2011). Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products. UNEP/SETAC.
- Veleva, V. & Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, 9, 519-549.

- Ventura, K. S.; Reis, L. F. R. & Takayanagui, A. M. M. (2010). Evaluation of waste management services. *Environmental Sanitary Engineering*, 15, 167-176.
- Wenzel, H.; Hauschild, M. & Alting, L. (2000). *Environmental Assessment of Products: Methodology, tools and case studies in product development*. Londres: Reino Unido: Kluwer Academic Publishers,
- Westkämper, E.; Alting & Arndt. (2000). Life Cycle Management and Assessment: Approaches and Visions Towards Sustainable Manufacturing (keynote paper). *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49, 501-526.
- Xavier, L. H. & Matos, R. M. B. (2013). Indicadores de desempenho ambiental corporativo. In: Adissi, P. J.; Pinheiro, F. A.; Cardoso, R. S. *Gestão Ambiental de Unidades Produtivas*. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier.
- Zanghelini, G. M.; Cherubini, E. & Soares, S. R. (2018). How Multicriteria Decision Analysis (MCDA) is assisting Life Cycle Assessment (LCA) in interpreting results. *Journal of Cleaner Production*, 172, 609-622.
- Zeviani, C. H.; Rodrigues, A. M. & Rebelato, M. G. (2013). Levantamento da produção científica brasileira em gestão ambiental empresarial em periódicos da área de administração entre 2007 e 2012. In: Anais do X Congresso Online de Administração, São Paulo, SP.
- Zhang, M. (2015). Application and Research of Improved AHP Model in Employment of College Student. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, 9, 1212-1217.
- Zui-Cha D., Jian-Ning Y. & Liu Y. (2017). An Inverse Problem Arisen in the Zero-Coupon 38 Bond Pricing. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11(3), 1278-1288.