

ACV ATRAVÉS DA DAP : ESTUDO DE CASO DA CAL PRODUZIDA EM PORTUGAL PARA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSAS

LCA FROM EPD: Case of the Portuguese Lime for Mortars

Bruna Souza Silva, IPEleiria/ Portugal

2190222@my.ipleiria.pt

Chesman Lima Feitosa, IPEleiria/ Portugal

2190222@my.ipleiria.pt

Jonathan Souza, IPEleiria/ Portugal

2190318@my.ipleiria.pt

Lisiane Ilha Librelotto, Dr. UFSC/PósARQ

lisiane.librelotto@ufsc.br

Helena Bártolo, Ph. D. IPEleiria/ Portugal

helena.bartolo@ipleiria.pt

Resumo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia usada para avaliar os impactos ambientais na cadeia de produção de um produto ou serviço, desde seu nascimento ao túmulo. Uma de suas ferramentas é a DAP (Declaração Ambiental do Produto). Este artigo pesquisou o ciclo de vida da cal e a avaliação de seus impactos ambientais em Portugal, através dos dados obtidos na DAP do fabricante. O uso da cal hidráulica natural (NHL) vem sendo considerado como uma alternativa mais sustentável de material para a construção na composição de argamassas. Especificamente, tratou-se do estudo de caso em um tipo de argamassa que utiliza a cal hidráulica natural como aglomerante e a cortiça como agregado na produção de uma argamassa com proposição mais sustentável. Realizou-se a descrição do histórico do emprego da cal, a caracterização dos tipos existente e do ciclo de vida da cal até sua incorporação na argamassa com uso de cortiça. Dessa maneira identificou-se pontos críticos no processo considerando a geração de impactos ambientais, bem como possibilidades de melhorias nas etapas do ciclo de vida do produto. Para o presente artigo optou-se pela avaliação do ciclo de vida de Cal Hidráulica Natural (*Natural Hydraulic Lime* - NHL) utilizada em argamassa com agregados de cortiça e adições.

Palavras-chave: Ciclo de Vida, Cal hidráulica natural; Impacto Ambiental.

Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology used to assess the environmental impacts on the production chain of a product or service, from cradle to grave. One of tools is the Environmental Product Declaration (EPD). This article researched the life cycle of lime and the evaluation of its environmental impacts in Portugal, through data obtained from the manufacturer's DAP. The use of Natural Hydraulic Lime (NHL) has been considered as a more sustainable alternative material for construction in the composition of mortars. Specifically, this was a case study in a type of mortar that uses natural hydraulic lime as a binder and cork as an aggregate in the production of a mortar with more sustainable proposition. For this finality, we did a description of the history of the use of lime as a material, the characterisation of the types, the description of its life cycle until the incorporation in the mortar using cork. In this way, critical points were identified in the process, considering the generation of environmental impacts, as well as possibilities for improvements in the stages of the product's life cycle. For this article, we assessed the life cycle of Natural Hydraulic Lime (NHL) used in mortar with cork aggregates and additions.

Keywords: Life Cycle; Natural Hydraulic Lime; Environmental Impacts.

1. Introdução

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta capaz de identificar impactos ambientais e pode servir de base para a melhoria do desempenho de um produto ou serviço de maneira a verificar todas etapas do processo de produção, do nascimento ao túmulo. Para avaliação do ciclo de vida é necessário seguir algumas etapas, que podem ser divididas como: definição dos objetivos e escopo, inventário do ciclo, avaliação dos impactos do ciclo de vida e interpretação do ciclo de vida (NP EN ISO 14020: 2005; NP EN ISO 14021: 2008; NP ISO 14025: 2009). Ainda as DAPs (Declaração Ambiental de Produtos

Neste artigo o objeto da ACV é o processo de produção da cal, em Portugal, utilizada em argamassas ditas menos impactantes ambientalmente. A substituição do cimento pela cal tem sido destacada por muitos fabricantes que buscam reduzir os impactos ambientais de seus produtos. O comparativo dos dados deste estudo auxilia na confirmação ou refutação destes dados, assim como ilustra o uso das DAPs fornecidas pelos fabricantes como elementos para a tomada de decisão em projeto no momento da especificação dos materiais.

De acordo com Silva (2009), nos relatórios do Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD) e o Ministério de Minas e Energia (MME) no Brasil, bases para a proposição do Plano Duodecenal de Geologia (2010-2030) sobre Mineração e Transformação Mineral, a “indústria de calcinação está entre as maiores poluidoras do meio ambiente, desde a extração do calcário até a fase da produção de cal”. O relatório aponta como principais impactos a emissão de CO₂, o consumo de combustível e emissão de CO₂ incorporado a estes, a emissão de particulados, emissão de poluentes diversos, impactos à paisagem e à vegetação no local de extração, entre outros.

Em Portugal a produção de cal possui números relevantes, mas é menor do que a extração de recursos para a indústria do cimento (tabela 1).

Agregados	2014		variação 2014/13
	(ton.)	(10 ³ €)	valor (%)
Areias e Saibros	5.974.553	22.724	5,7
Pedra britada calcária	9.665.830	30.259	-6,9
Pedra britada siliciosa	16.866.814	69.872	-12,2
TOTAL	32.507.198	122.855	-8,0

Min. p/ cimento e cal	2014		variação 2014/13
	(ton.)	(10 ³ €)	valor (%)
Minerais para cimento	9.488.129	18.748	17,4
Minerais para cal	508.944	2.295	-8,4
TOTAL	9.997.073	21.044	13,9

Rochas ornamentais	2014		variação 2014/13
	(ton.)	(10 ³ €)	valor (%)
Mármore e calcários	820.586	92.098	-9,5
Granitos e r. similares	1.152.301	39.525	19,3
Pedra para calcetamento	708.779	17.879	-12,6
Pedra rústica	109.021	6.188	132,7
Ardósia e xistos	40.130	9.907	26,2
TOTAL	2.830.818	165.597	-0,1

Tabela 1: Produção de minerais por substância em Portugal. Dados de 2014. Fonte: DGEG (2015).

A construção civil, por sua vez, utiliza muitos derivados do cimento, material considerado de maior impacto ambiental que a cal. Desta forma, a cal surge como um substituto para o cimento em argamassas e revestimentos, em que pese ainda os seus impactos ambientais.

Este artigo parte da pesquisa sobre o ciclo de vida da cal e a avaliação de seus impactos ambientais em Portugal, como uma alternativa mais sustentável de material para a construção na composição de argamassas. Especificamente, trata do estudo de caso em um tipo de argamassa que utiliza a cal hidráulica natural como aglomerante e a cortiça como agregado na produção de uma argamassa com proposição mais sustentável. Ao final, os resultados dos impactos ambientais para esta argamassa a base de cortiça serão comparados com outras argamassas que podem ser utilizadas à base cimento.

A Cal Hidráulica Natural (Natural Hydraulic Lime – NHL) é uma cal com propriedades hidráulicas, produzida pela queima de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos (incluindo giz) e redução a pó por extinção com ou sem moagem. Tem propriedades de fazer presa e endurecer quando misturada com água e por carbonatação com o dióxido de carbono (CO₂) do ar (carbonatação). As propriedades hidráulicas resultam exclusivamente da composição química especial da matéria-prima natural. São permitidos agentes de moagem até 0,1%. A Cal Hidráulica Natural não possui outras aditivismos.

Os principais constituintes da cal hidráulica natural (*Natural Hydraulic Lime* – NHL) são os silicatos bicálcicos (SiO₂.2CaO), os aluminatos de cálcio (AL₂O₃.CaO) que constituem os compostos principais que contribuem para a presa hidráulica da Cal Hidráulica Natural. Para além destes constituintes a Cal Hidráulica Natural tem na sua constituição hidróxido de cálcio disponível Ca(OH)₂, responsável pela presa aérea da mesma (carbonatação). Este último constituinte é componente obrigatoriamente controlado, segundo a norma portuguesa de produto, sendo que para o caso da Cal Hidráulica Natural este valor é no mínimo de 15% da constituição deste tipo de Cal, para o caso da Cal Hidráulica NHL 3,5, o valor mínimo é de 25% e para o caso da Cal Hidráulica Natural NHL 2, o valor mínimo é de 35% (NP EN 459 – 1: 2015; NP EN 459-2: 2011).

2. Revisão de literatura

As diversas fases de construção de uma habitação precisam respeitar o meio ambiente, resgatando questões como a extração de matéria-prima e seus impactos ambientais, a máxima e melhor utilização dos recursos materiais, a redução/eliminação dos desperdícios; as questões da qualidade do material (físico-químicas), conforto do usuário (isolamento térmico acústico, manutenção e substituição); e a busca de materiais de baixo custo financeiro. Também devem privilegiar o uso de recursos regionais para sua construção e prever a facilidade de manutenção, bem como assegurar o reuso ou descarte seguro de resíduos na construção como forma de reduzir o volume de entulho da própria indústria depositado em aterros ou ainda, oriundo de outras indústrias.

2.1 Histórico do Cal

Não se sabe ao certo quando a cal passou a ser utilizada pelo homem. Estima-se que num intervalo de 5000 a 12000 anos antes de Cristo. Presume-se que o descobrimento de seu uso tenha ocorrido posteriormente a descoberta do fogo. Utilizada na proteção de fogueiras, as pedras de calcário foram queimadas, originando o primeiro processo de calcinação. As chuvas provocaram a extinção da cal ao redor da fogueira. A cal extinta misturada aos materiais do solo circundantes deram origem as primeiras argamassas de cal. (LHOIST, 2020)

A partir de 7500 a.C. (antes de Cristo) há registros da obtenção do gesso a partir da cal e seu uso em revestimentos de edificações. Seguiram-se outros usos na curtição do couro, como fertilizante em lavouras, na estabilização de solos para construção, na composição de revestimentos pigmentados coloridos para afrescos, no tingimento de cabelos, na fabricação de sabão com adição de cinzas de madeira e no uso de elementos decorativos a base de gesso. Dos fornos tradicionais europeus às

tecnologias de fabricação moderno, o processo de produção da cal e suas aplicações vêm evoluindo. (LHOIST, 2020)

A Associação Brasileira de Produtores de Cal - ABPC assegura que a cal pode ser considerada o produto manufaturado mais antigo da humanidade. Há registros de seu uso desde 12.000 a.C. em usos domésticos e em grandes construções em todo o mundo.

Coelho et. al. (2009) trazem uma série de empregos da cal desde os tempos mais remotos: nas construções da atual Turquia no período de 12000 a.C. a 5000 a.C.; vestígios de solo estabilizado com cal nas Pirâmide de Shersi no Tibet (5000 a. C.); nas câmaras da Pirâmide de Quéops e nas juntas dos blocos de calcário e granito da Pirâmide de Quéfren no Egito; na ilha de Santorini a partir das cinzas de erupção de um vulcão; (300 a. C.); na China, nas construções da grande muralha e nas construções romanas, incluindo aplicações em geotecnia para secagem de terreno e em obras como o Coliseu, o Panteão ou o aquedutos Pont du Gard (no Sul de França).

Na África, em Marrocos, introduzido pela colonização Portuguesa, a centenas de anos utiliza-se um revestimento pigmentado a base de cal hidráulica denominado de *Tadelakt* (que significa esfregar em árabe). Com propriedades impermeabilizantes, e textura macia, o tadelakt foi utilizado em cisternas, banhos públicos e superfícies expostas às intempéries. (TADELAK, 2020)

Em Portugal, os usos industriais da cal servem a indústria siderúrgica, mineira, alimentícia, na metalurgia de não-ferrosos, na indústria química e de papel (FERREIRA, 2011).

2.3 A Cal

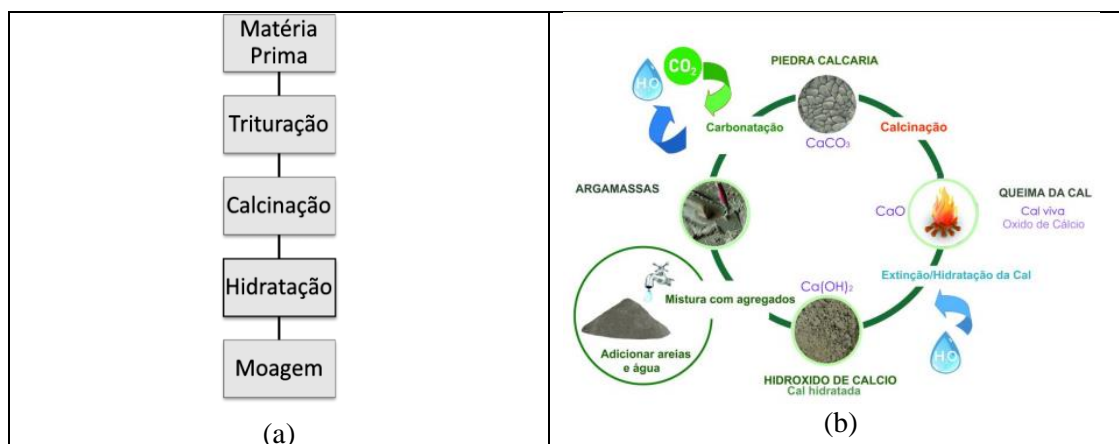
A cal é um ligante mineral que se divide em duas categorias: cal aérea e cal hidráulica. A cal aérea seca e endurece lentamente por ação da absorção do dióxido de carbono do ar, obtendo ao longo do tempo mais resistência. O endurecimento (fazer presa) da argamassa de cal aérea não é possível dentro de água. Já a cal hidráulica, de acordo com TADELAKT (2020) pode

“endurecer (fazer presa) tanto ao ar como dentro de água. A cal hidráulica endurece devido ao processo de hidratação que acontece quando é misturada com água. A pedra artificial formada como resultado deste processo é durável mesmo em contato com água. Adicionalmente, depois de seca, o processo de presa complementa-se através da fixação de CO₂. A cal hidráulica pode classificar-se em artificial e em natural. A cal hidráulica artificial é produzida através da mistura de vários materiais (cimento, diferentes polímeros, argilas, margas, etc).” (TADELAKT, 2020).

Os cales podem ser obtidos mediante dois processos: calcinação ou carbonatação. Na calcinação, o calcário e o dolomito passam pelo processo que consiste na transformação do carbonato de cálcio em óxido por efeito do condicionamento das rochas ao calor. No caso do calcário, a calcinação ocorre em fornos, em uma faixa de temperatura de 900 a 1.000°C. A reação química da calcinação resulta na produção de cal (CaO) e dióxido de carbono liberado em forma gasosa (CO₂), resultando em uma redução de massa de 44% do CaCO₃ original, conforme a seguinte reação química: $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

O fluxograma do processo produtivo para a calcinação é apresentado de forma resumida na Figura 2a. A figura 2b mostra o processo de obtenção para os diferentes tipos de cal.

Figura 2 a – Etapa do processo de produção da cal. Fonte: Adaptado de BAJAY, 2010; b - O ciclo da cal. Fonte: TADELAKT (2020).



A cal hidráulica natural é produzida a partir de pedras calcárias contendo impurezas argilosas e sílicas. São cozidas (com temperatura inferior a 1250 °C), extintas e depois moídas até o pó. A cal hidráulica natural é classificada de acordo com a sua resistência à compressão como: NHL 2, NHL 3.5 e NHL 5. (NP EN 459 – 1: 2015;)

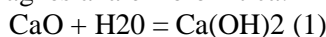
A composição química e mineralógica dos calcários e dolomitos são determinantes quanto à viabilidade de seu uso no processo de calcinação e na qualidade da cal obtida destes. A composição da cal, por sua vez, depende da composição da rocha utilizada e da qualidade da queima, e irá definir como esta será empregada e comercializada.

De acordo com Pereira (2009) o termo mais empregado na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para a designação do produto resultante da calcinação e composto em sua maior parte por óxido de cálcio e/ou óxido de magnésio, é cal virgem. Sua classificação, conforme a autora, se dá conforme o óxido predominante:

- Cal Virgem Cálcica (Com óxido de cálcio entre 100% e 90% do óxido total presente);
 - Cal Virgem Magnésiana (Com teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90% e 65% do óxido total presente);
 - Cal Virgem Dolomítica (Com óxido de cálcio entre 65% e 58% do óxido total presente).
- (Pereira, 2009, p. 179)

Dentre estas, a Cal Virgem Cálcica é a que tem maior valor agregado e de maior comercialização, em função do seu uso nas indústrias de açúcar, celulose e na siderurgia – consumo de 45 a 70 quilos de cal para cada tonelada de aço nos fornos LD (Sampaio, 2008).

O produto conhecido como cal hidratada é obtido pela reação da cal virgem com água, conforme reação química descrita a seguir, e é denominado também de acordo com a cal virgem que lhe dá origem, em: Cal Hidratada Cálcica, Magnésiana e Dolomítica.



(1) Representação química da cal hidratada.

2.2 Impactos

Silva (2009) aponta que o impacto ambiental relativo à emissões de CO₂ no processo de formação da cal virgem é correspondente a 770 kg de CO₂/t pela decomposição do calcário. O consumo de combustíveis no processo de fabricação, considerando aquele de menor potencial de efeito estufa - o gás natural, acrescenta ao somatório de emissão de GEE (Gases do Efeito Estufa) mais 241 kg de CO₂/t de cal virgem produzida. Além do dióxido de carbono, a produção de cal pode causar a emissão de diversos gases poluentes (como os óxidos de enxofre e de nitrogênio) e grande quantidade de material particulado na atmosfera. O material particulado é em grande parte oriundo de perdas da própria cal e calcário no processo em todas as suas fases: extração, transporte,

descarregamento, moagem, ensacament. Além da poluição atmosférica, pode ainda causar problemas respiratórios (SOUZA, 2012).

A etapa de mineração de calcário tem grande potencial de degradação ambiental, pela intensiva alteração do local da jazida, com risco de causar prejuízos á biodiversidade e à manutenção e qualidade dos recursos hídricos locais (figura 3) Além disto, Silva (2009) enfatiza que os depósitos de calcário podem ocorrer na formação de grandes cavernas que representam um patrimônio espeleológico e arqueológico importante e de valor a ser preservado. A figura 3 ilustra uma jazida de extração da cal em Portugal.



Figura 3: Local de extração de calcário. Fonte: Ferreira (2011).

No Brasil, a instalação das primeiras “caieiras” estão registradas no ano de 1549, para a fabricação de cal virgem a partir de conchas marinhas, com uso no revestimento e pintura das construções na cidade de Salvador da Bahia, capital do país à época. Até a década de 1930, a fabricação de cal no Brasil continuou voltada para obras de construção civil, usinas de açúcar e álcool, tratamento de águas potáveis e para a produção de couro. (ABPC, 1990). Em Portugal, o a produção da cal é histórica e pode-se encontrar vestígios de sua produção ainda enquanto constituinte do Império Romano (Figura 4).



Figura 4: (a) Fábrica moderna de produção da cal, (b) Vestígios de fornos romanos de produção da cal, região da Beleizão – Complexo arqueológico de Magra - Beja/Portugal. Fonte: FERREIRA (2011); MAGRA (2020).

De acordo com Silva (2009), a indústria da cal no Brasil conta atualmente com mais de mil fornos em funcionamento, totalizando no ano 2008 uma produção de cerca de 7,3 milhões de toneladas – correspondente a 3% do mercado mundial - um faturamento de mais de US\$ 2 bilhões e empregava mais de 10 mil pessoas.

Mundialmente, em 2008, a China liderava o ranking da produção mundial de cal, com uma participação de quase 80%, sendo também a principal consumidora, conforme apresentado na Tabela 2.

No que se refere a toxicidade, a cal hidráulica é classificada como irritante para a pele e vias respiratórias e pode implicar o risco de lesões oculares graves, em função de sua acidez. Quando em contato direto com os olhos ou a pele podem ocorrer sintomas como ardor ou pele seca.

Tabela 2- Produção Mundial de Cal (1000t).

País	2006	Participação (%)	2007	Participação (%)	2008	Participação (%)
China	160.000	78	170.000	79	175.000	80
EUA	21.000	10	20.200	9	19.800	9
Japão	8.900	4	8.900	4	9.000	4
Rússia	8.200	4	8.500	4	8.000	4
Brasil	7.060	3	7.400	3	7.300	3
Total	205.160	100	215.000	100	218.800	100

Fonte: U.S Geological Survey apud Silva(2009)

3. Procedimentos metodológicos

3.1 Definição do Objetivo e do Âmbito

Este estudo foi realizado com o objetivo de analisar os consumos, globais e específicos, necessários para o processo produtivo, assim como os impactos ambientais para a produção da Cal Hidráulica Natural, produzida em Portugal, por um fornecedor específico. Foram utilizados como base deste estudo os dados da Declaração Ambiental do Produto (DAP) do fabricante, fornecidos diretamente aos pesquisadores através de entrevista com profissional da empresa. A DAP que tem como objetivo a demonstração, perante terceiros, das características técnicas e, especialmente, as ambientais da cal hidráulica, podendo servir como uma ferramenta de marketing. (SECIL, 2019) A DAP considera os impactos do berço ao portão. Os dados do fabricante foram comparados com outros dados de inventário do ciclo de vida para NHL.

Foi considerada a extração e processamento das matérias-primas, o transporte até à fábrica, o processo produtivo de fabrico e o transporte do produto acabado (cenários) e o fim de vida (cenários). A unidade declarada considerada foi 1 quilograma (1 kg) de cal hidráulica produzida e transportada até ao cliente.

3.2 Descrição das Etapas de Ciclo de Vida

- Cal Hidráulica (HL5)

A cal hidráulica é um ligante constituído por cal e outros materiais como o cimento, escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, filler calcário e outros materiais adequados. Tem a propriedade de fazer presa e endurecer quando misturada com água. O dióxido de carbono do ar contribui para o processo de endurecimento.

- Cal Hidráulica Natural (NHL 2; NHL 3,5; NHL 5)

A cal hidráulica natural é uma cal com propriedades hidráulicas produzida pela queima de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos e redução a pó por extinção com ou sem moagem. Tem a propriedade de fazer presa e endurecer quando misturada com água e por reação com o dióxido de carbono do ar (carbonatação - CO₂) do ar. As propriedades hidráulicas resultam exclusivamente

da composição química especial da matéria-prima natural. São permitidos agentes de moagem até 0,1%. A cal hidráulica natural não tem quaisquer outros aditivos.

Os principais constituintes da Cal Hidráulica Natural são os silicatos bicálcicos ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$), os aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) que constituem os compostos principais que contribuem para a presa hidráulica da Cal Hidráulica Natural, para além destes constituintes a Cal Hidráulica Natural tem na sua constituição hidróxido de cálcio disponível $\text{Ca}(\text{OH})_2$, responsável pela presa aérea da mesma (carbonatação). Este último constituinte é componente obrigatoriamente controlado, segundo a norma de produto, sendo que para o caso da Cal Hidráulica Natural este valor é no mínimo de 15% da constituição deste tipo de Cal, para o caso da Cal Hidráulica NHL 3,5 o valor mínimo é de 25% e para o caso da Cal Hidráulica Natural NHL 2 o valor mínimo é de 35%.

As propriedades hidráulicas resultam exclusivamente da composição química especial da matéria-prima natural. São permitidos agentes de moagem até 0,1%. A cal hidráulica natural não contém quaisquer outros aditivos.

3.3 Impactos avaliados

Os impactos considerados no estudo foram:

i) Consumo de recursos abióticos; ii) Aquecimento global; iii) Depleção da camada de Ozono; iv) Toxicidade humana; v) Ecotoxicidade aquática; vi) Ecotoxicidade marinha; vii) Ecotoxicidade terrestre; viii) Oxidação fotoquímica; ix) Acidificação; x) Eutrofização, e xi) Energia primária fóssil.

4. Resultados

4.1 Ciclo de Vida da Cal

A) Extração - a extração do calcário e da marga ocorre em pedreiras. O calcário é extraído numa pedreira situada na Carreirancha - Alqueidão da Serra, Portugal.. O desmonte é executado com recurso a explosivos. A Marga é extraída numa pedreira situada na Maceira. O desmonte é executado em máquina de extração (escavadora), alimentada a gasóleo.

B) Transporte de matérias-primas - o transporte das matérias-primas é efetuado por via rodoviária com recurso a camião de 48 toneladas no caso da marga e camião de 26 toneladas no caso do calcário, sendo o percurso de 3,6 km e 20,5 km respetivamente.

C) Produção

- **Britagem** - O calcário e a marga, provenientes da pedreira, são armazenados em parque e posteriormente transportados com pá mecânica, para a tremonha de esteira rotativa que alimenta o britador de maxilas.

A montante do britador de maxilas existe um crivo de separação de argilas, que permite a separação da fração argilosa da marga e calcário e o seu envio para o exterior da fábrica.

O britador de maxilas tem uma capacidade de produção de 70 t/h, efetuando a britagem dos agregados de modo a obter-se uma granulometria do produto britado entre os 10 e os 80 mm.

A jusante do britador, existe uma outra crivagem que separa os agregados britados com uma granulometria aproximadamente inferior a 20 mm. Esta fração, designada por sarrisca, é reutilizada na moagem, sendo o excesso reenviado para a pedreira.

A marga e o calcário britados, com granulometria superior a 20 mm e inferior a 80 mm, são transportados, por tela transportadora, para as tulas de marga e de calcário, com capacidades de 300 t e 250 t respetivamente. Quantidades determinadas de cada um destes agregados, cuja mistura é

designada por pedra crua, são doseadas com coque de petróleo e posteriormente enviadas para os fornos de calcinação, onde são cozidas.

Toda a zona de descarga e britagem é despoeirada por um filtro de mangas com uma capacidade de 5 000 m³/h e uma eficiência de 80%.

- Fornos de cozimento - O cozimento é realizado em seis fornos verticais estáticos, com 10 m de altura e 3 m de diâmetro, datados de 1921.

Cada forno tem uma chaminé com 27 m de altura, de extração natural. No entanto, estas chaminés de extração natural estão desativadas, em virtude de ter sido instalado, em Fevereiro de 2003, um filtro de despoeiramento e uma única chaminé, com 30 m de altura, comum aos seis fornos. O processo de cozimento é descontínuo, funcionando por ciclos.

No início de cada ciclo de cozimento, o forno é carregado com 8.000 kg de pedra crua misturada com coque de petróleo, através das caídas de alimentação.

A pedra crua (marga e calcário) destinada aos fornos é doseada através de um sistema de doseamento automático, constituído por balanças de pesagem contínua, e transportada até uma tremonha de alimentação de um elevador de alcatruzes.

Simultaneamente, o coque de petróleo é doseado noutra sistema de doseamento automático, constituído por balanças de pesagem contínua e é enviado para a tremonha de alimentação do elevador de alcatruzes, onde se mistura com a pedra crua.

A mistura de pedra crua e coque de petróleo é transportada pelo elevador de alcatruzes e, posteriormente, distribuída, por tela transportadora, aos diferentes fornos. Após carregamento, o ventilador de insuflação é ligado, fornecendo, desta forma, o ar necessário para a combustão do coque de petróleo, com um cozimento da pedra crua realizado a cerca de 900 °C.

O final do ciclo de cozimento é determinado quando os gases de escape atingem os 300 °C, valor lido nas sondas de temperaturas, colocadas em cada uma das chaminés dos fornos, no ponto de ligação à conduta da chaminé comum. O ventilador de insuflação é desligado, procedendo-se, de imediato, ao arreamento da carga, de forma a permitir o início de um novo ciclo de cozimento.

Os ciclos de cozimento nos seis fornos estão desfasados.

No arreamento, abrem-se as grelhas de comando hidráulico, procedendo-se ao enchimento de vagonas que, depois, são transportadas por um carrinho elétrico até ao elevador de alcatruzes que alimenta o britador dos fornos. São retiradas normalmente 5 vagonas por cada ciclo de cozimento.

A capacidade produtiva dos seis fornos é de 14 t/h, e a potência térmica instalada é de 1 MW.

Antes de dar entrada nas tulas de armazenagem, a pedra cozida passa por um moinho de martelos que lhe reduz a granulometria para cerca de 40 mm.

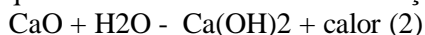
Os diversos tipos de pedra cozida são armazenados em tulas e transportados posteriormente por telas transportadoras para os silos da moagem. A capacidade de armazenagem de pedra cozida nas três tulas é de cerca de 6 000 t.

A zona dos fornos está munida com sistema de despoeiramento baseado em Filtros de Mangas, com uma eficiência de 98%: constituído por 12 módulos de filtragem, cada módulo consiste em 78 mangas de filtragem, alinhadas em 6 filas com 13 mangas cada e por uma chaminé de exaustão com 30 m de altura e 1,5 m de diâmetro comum aos 6 fornos verticais existentes. Existe ainda, na baixa dos fornos (zona do arreamento) um filtro de despoeiramento com a capacidade de 10 000 m³/h e eficiência de 80%.

- Moagem - A moagem das matérias-primas da cal hidráulica é efetuada, numa primeira fase (pré-moagem), num moinho de martelos, com uma capacidade produtiva de 25 t/h e, numa segunda fase, num moinho de bolas, com uma capacidade produtiva de 14 t/h.

O ciclo de moagem inicia-se com o enchimento do silo de pedra cozida. Na base deste silo, existe um doseador volumétrico de prato rotativo que alimenta o hidratador. Este equipamento permite

dosear e homogeneizar, em condições adequadas, a pedra cozida e a quantidade de água estequiometricamente necessária à reação de hidratação:



(2)Esquema químico da cal após cozimento

Este hidratador tem uma capacidade horária de processar até 16 t de pedra cozida com um máximo de 3 m³ de água.

A pedra hidratada é encaminhada através de um elevador de alcatruzes para o silo de pedra hidratada. No caso das cais hidráulicas naturais (NHL 2; NHL 3,5 e NHL 5) não é realizada nenhuma adição e a pedra hidratada é encaminhada para o moinho de martelos, seguido do silo de mistura e finalmente moinho de bolas.

No que se refere à HL 5, na tela transportadora que liga o silo de pedra hidratada ao moinho de martelos é adicionada sarrisca em quantidade predeterminada. Posteriormente segue o circuito das NHLs.

No moinho de bolas, obtém-se a granulometria final da cal hidráulica. A jusante do moinho de bolas, um separador ciclônico separa os grossos, retornando-os ao moinho. Um filtro de mangas faz a aspiração dos finos do moinho, filtrando-os e enviando-os para o transportador de arrasto, onde se junta com o material fino proveniente do separador ciclônico, com destino aos silos de cal hidráulica.

- **Ensacamento, Paletização e Plastificação** - A cal hidráulica pode ser expedida em sacos de papel de 25 kg ou a granel, diretamente carregada em caminhões-cisterna. O transporte da cal hidráulica até à ensacadora é efetuado por transportadores de arrasto e elevador de alcatruzes.

A ensacadora rotativa tem uma capacidade de enchimento de 1350 sacos por hora, ou seja, 54 t/h, e tem quatro bocas de enchimento.

- **Expedição** - A expedição de cal hidráulica é efetuada pelo carregamento direto a granel para caminhão cisterna ou por carregamento de pallets plastificadas ou não.

D) Distribuição /transporte de produto

Para a etapa de transporte de produto foram estudados 3 cenários com base nos mercados de cal hidráulica fornecidos pela empresa, nomeadamente:

Cenário T1 - distribuição para Londres foi considerado um cenário de transporte por via marítima com recurso a um cargueiro transoceânico, considerando as alternativas de - Porto de Lisboa - Porto de Londres: 1079 milhas náuticas, ou Porto de Fig. Foz - Porto de Londres: 1006 milhas náuticas, ao que acresce 100 km de transporte para acesso ao porto marítimo;

Cenário T2 - distribuição para Londres foi considerado um cenário de transporte por via rodoviária com recurso camiões de classe Euro 4 de 16-32 toneladas num percurso de distribuição de 2200 km;

Cenário T3 - distribuição por via rodoviária em território nacional, num raio de 300 km, com recurso a camiões de classe Euro 4 de 16-32 toneladas de classe Euro 4 de 32 t;

E) Fim de vida de produto

Neste âmbito e uma vez que não se dispõem de dados atualizados do fim de vida de cal hidráulica, nem existem nas bases de dados, optou-se por um cenário meramente indicativo de usar os dados do fim de vida de argamassas.

Na Tabela 3 e na Tabela 4 são apresentadas, respetivamente as quantidades (inventário) de entradas (inputs) e saídas (outputs) consideradas na produção da cal hidráulica por unidade declarada (1 quilograma).

Entradas de material		Unidades	Quantidade por Unidade Declarada (1 kg)						
			Cal Hidráulica Natural NHL3,5 (ano 2012)	Cal Hidráulica Natural NHL5 (ano 2012)	Cal Hidráulica Total SECIL (ano 2012)	Cal Hidráulica Natural NHL3,5 (ano 2013)	Cal Hidráulica Natural NHL5 (ano 2013)	Cal Hidráulica Total SECIL (ano 2013)	
Inputs	Recursos naturais e outros	Pedra Crua (Marga)	kg	6,71E-01	7,37E-01	8,24E-01	6,46E-01	1,00E+00	7,61E-01
		Pedra Crua (Calcário)	kg	5,49E-01	5,22E-01	5,84E-01	6,89E-01	3,25E-01	3,76E-01
		Outro: Óleos lubrificantes	litro	1,50E-05	1,46E-05		3,93E-05	3,98E-05	
		Outro: Massas lubrificantes	kg	1,33E-06	1,65E-06		5,99E-07	8,35E-07	
		Outro: Filtros de mangas	Unidades	6,46E-05	1,54E-04		2,95E-04	4,33E-04	
		Outro: Acetileno	kg	1,33E-06	1,37E-06		1,50E-06	1,48E-06	
		Outro: Oxigênio	kg	1,46E-05	1,46E-05		7,86E-06	7,80E-06	
		Outro: Reagentes de laboratório	kg	3,98E-06	4,01E-06		5,05E-06	5,05E-06	
		Outro: Paletes	kg	1,05E-02	1,03E-02		1,06E-02	8,03E-03	
		Outro: Sacos de Papel	kg	4,61E-03	4,52E-03		4,65E-03	3,52E-03	
	Outro: Plástico extensível	kg	7,15E-04	2,64E-04		7,21E-04	3,02E-04		
	Outro: Sacos Big-Bags	t	6,24E-05	6,10E-05		9,65E-05	9,82E-05		
	Energia	Electricidade	kWh	5,68E-02	4,85E-02	9,50E-02	4,40E-02	4,68E-02	7,66E-02
		Coque de petróleo	kg	6,68E-02	6,23E-02	8,07E-02	7,93E-02	6,43E-02	5,63E-02
		Gasóleo	MJ	2,15E+00	2,01E+00	2,60E+00	2,55E+00	2,07E+00	1,81E+00
	Consumo de água	Água superficial da pedra	m ³	9,00E-05	7,00E-05	1,18E-04	9,00E-05	7,00E-05	3,04E-05
		Água rede pública	m ³			6,44E-05			4,93E-05
	Água Total		m ³			1,83E-04			7,97E-05
	Transporte matérias-primas até fábrica	Pedra Crua (marga): Camião - Euro 4, >32t	tkm	2,42E-03	2,65E-03	2,97E-03	2,33E-03	3,61E-03	2,74E-03
		Pedra Crua (calcário): Camião - Euro 3, 16-32t	tkm	1,13E-02	1,07E-02	1,21E-02	1,41E-02	6,65E-03	7,70E-03
Transporte dentro da fábrica	Empilhadores	tkm							
	Pá carregadora	tkm							
	Caterpillar	tkm							

Tabela 3: Entradas por unidade declarada (1 quilograma). Fonte: SECIL (2019).

Saídas de material		Unidades	Quantidade por Unidade Declarada (1 kg)						
			Cal Hidráulica Natural NHL3,5 (ano 2012)	Cal Hidráulica Natural NHL5 (ano 2012)	Cal Hidráulica Total SECIL (ano 2012)	Cal Hidráulica Natural NHL3,5 (ano 2013)	Cal Hidráulica Natural NHL5 (ano 2013)	Cal Hidráulica Total SECIL (ano 2013)	
Outputs	Resíduos	13 02 05	kg	7,08E-05	7,07E-05	1,15E-05	1,62E-04	1,61E-04	2,08E-05
		14 06 03	kg	3,98E-05	4,01E-05	5,18E-06	2,69E-05	2,69E-05	3,46E-06
		15 01 03	kg	1,72E-04	1,72E-04	2,29E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
		15 01 06	kg	1,87E-04	1,87E-04	2,49E-04	2,41E-04	2,41E-04	3,22E-04
		15 02 03	kg	4,87E-05	4,86E-05	6,09E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
		19 12 04	kg	3,11E-04	3,10E-04	3,18E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
		CO2 (COQUE)	kg	2,15E-01	2,00E-01	2,59E-01	2,55E-01	2,06E-01	1,81E-01
		CO2 (GASÓLEO)	kg	6,04E-04	5,09E-04	6,14E-04	5,84E-04	6,23E-04	5,47E-04
		CO	kg	6,35E-03		1,46E-02	6,35E-03		3,28E-02
		NOx	kg	1,90E-04		6,10E-04	1,90E-04		1,12E-03
	SO2	kg	1,13E-03		1,73E-03	1,13E-03		4,90E-03	
	COT	kg	1,01E-03		1,10E-04	1,01E-03		2,41E-03	
	PTS	kg	2,12E-05		1,07E-05	2,12E-05		1,15E-04	
	Cloretos	kg	6,15E-06		4,10E-05	6,15E-06		1,41E-03	
	Efluentes Gasosos	Fluoretos	kg	2,19E-07		2,48E-07	2,19E-07		5,98E-07
		H2S	kg	1,34E-05		8,26E-06	1,34E-05		1,20E-04
		Cádmio	kg	3,25E-08		3,85E-08	3,25E-08		4,33E-08
		Mercurio	kg	8,01E-09		1,51E-08	8,01E-09		3,41E-08
		Arsênio	kg	1,04E-08		9,90E-09	1,04E-08		4,04E-08
		Níquel	kg	1,41E-08		2,01E-07	1,41E-08		4,33E-08
Chumbo		kg	3,70E-09		2,01E-07	3,70E-09		4,93E-08	
Crômio		kg	5,42E-09		9,91E-08	5,42E-09		2,75E-08	
Cobre		kg	1,13E-08		6,88E-08	1,13E-08		9,86E-08	
Transporte resíduos		tkm							
Transporte produto final	tkm								

Tabela 4: Saídas por unidade declarada (1 quilograma). Fonte: SECIL (2019).

4.2 Impactos

Os resultados para os impactos considerados no estudo foram:

- Consumo de recursos abióticos - Para 1kg de recurso extraído e 1m³ de combustível fóssil: a produção de eletricidade (33%) é a maior contribuinte, seguindo-se a extração do calcário (27%), a produção de coque de petróleo calcário (19%) e os transportes (17%);
- Aquecimento global - A combustão na instalação é o maior contribuinte (92%), segue-se a produção de coque de petróleo (6 %) e a eletricidade (5%). O parâmetro mais significativo é o CO2 associado às etapas de combustão e com muito menos significado o metano;

- iii) Depleção da camada de Ozono - A produção de coque de petróleo é o maior contribuinte (92%), segue-se a eletricidade (3%) e a extração de calcário (3%);
- iv) Toxicidade humana - A produção de coque de petróleo é o maior contribuinte (51%), segue-se a eletricidade (28%), a extração de calcário (13%) e a combustão na instalação (5%).
- v) Ecotoxicidade aquática - A produção de coque de petróleo é o maior contribuinte (47%), segue-se a eletricidade (37%) e a extração de calcário (12%);
- vi) Ecotoxicidade marinha - A produção de eletricidade é o maior contribuinte (46%), segue-se a produção de coque de petróleo (32%), e a combustão na instalação (14%);
- vii) Ecotoxicidade terrestre - A produção de eletricidade é o maior contribuinte (48%), segue-se a produção de coque de petróleo (36%), e a extração de calcário (15%);
- viii) Oxidação fotoquímica - A combustão na instalação (84%) é o maior contribuinte, segue-se produção de coque de petróleo (11%) e a eletricidade (4%); O monóxido de carbono é o principal contribuinte para esta categoria, seguindo-se o dióxido de enxofre e os compostos orgânicos voláteis;
- ix) Acidificação - A combustão na instalação é o principal contribuinte (63%) seguindo-se a produção de coque de petróleo e (22%) a eletricidade (10%); O dióxido de enxofre é o principal contribuinte, seguindo-se os óxidos de azoto.
- x) Eutrofização - A produção de coque de petróleo é o maior contribuinte (49%), segue-se a produção de eletricidade (20%) e a combustão na fábrica (16%) e a extração de calcário (8%); Os óxidos de azoto são o principal contribuinte, seguindo-se fosfato e CQO.
- xi) Energia primária fóssil - A produção de coque de petróleo é o maior contribuinte (88%), segue-se a eletricidade (8,5%) e a extração de calcário (2%).

5. Conclusões

Este artigo teve como finalidade avaliar os impactos ambientais associados às diversas etapas do ciclo de vida da cal hidráulica natural (NHL) no que se refere a diversas categorias de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida deste produto. Da mesma forma, procurou evidenciar o uso da DAP como uma importante ferramenta de seleção e especificação de materiais para os projetistas.

A etapa com o maior impacto corresponde a etapa de produto para a maioria dos impactos, sendo que a abordagem do berço ao portão corresponde a mais de 60% dos impactos ao longo de todo o ciclo de vida para todas as categorias, exceto ADP - depleção abiótica de recursos (não fósseis).

Dentro da etapa de produção no processo unitário com maiores impactos é a cozimento da pedra, por consumir energia, nomeadamente coque de petróleo.

A fase de uso tem um contributo benéfico (negativo) para a categoria de impactos correspondente às alterações climáticas, uma vez que a cal quando aplicada em obra fixa o dióxido de carbono, ou seja é previsível uma absorção de CO₂ durante o processo de endurecimento da Cal Hidráulica Natural, através de uma reação de carbonatação.

O cenário de transporte por via marítima apresenta os menores impactos das diversas categorias quando comparados com os 2 restantes cenários, exceto para a eutrofização que se apresenta menor no caso do transporte nacional a 300 km;

Foram ainda estudadas um conjunto de medidas com potencial de melhoria de impactos, nomeadamente associadas ao tipo de combustível e ao mix elétrico nacional, na etapa do berço ao portão tendo-se concluído que:

- O carvão mineral piora a grande maioria das categorias de impacto ambiental, enquanto que o carvão vegetal melhora a maioria das categorias de impacto ambiental face à situação de referência exceto a depleção abiótica (aumenta cerca de 330%) e o aquecimento global (aumenta 8%);

- A opção de reconversão total para biomassa (100%) assume-se como a mais eficaz na redução da maioria das categorias de impacto ambiental em estudo.
- O cenário da reconversão total para o gás natural assume também um papel relevante uma vez que para a grande maioria das categorias de impacto se assume com a segunda redução mais significativa, apesar de ser necessário um estudo de viabilidade técnica e econômica mais profunda para a sua reconversão.
- A opção mista de 50% de biomassa e 50% de coque assume-se também como viável do ponto de vista ambiental com reduções significativas que vão desde os 7% (depleção de recursos abióticos não fósseis) até aos 77% para a oxidação fotoquímica;
- O cenário de redução do teor de enxofre do coque de petróleo de cerca de 6% para 4,5% acarreta reduções menos significativas, destacando-se cerca de 12% na acidificação;

Este artigo poderá fundamentar posteriormente estudos e instrumentos deste cariz, como por exemplo as declarações ambientais de produto (DAP) ou a pegada ambiental dos produtos (PAP) ou pegada ambiental das organizações (PAO). A cadeia produtiva do bambu no Brasil precisa de promoção, disseminação e incentivos que passem por políticas governamentais, inovação em pesquisas para desenvolver novos usos, equipamentos adequados, tecnologias para tratamento que não comprometam a saúde ou a qualidade dos ambientes onde o material, oficinas e atividades para disseminar as melhores técnicas para o material, formas de conexão entre fornecedores e usuários, métodos de comprovação de qualidade e disseminação no mercado da construção civil.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, José; SEQUEIRA, Cristina; COSTA, Marta. ENSINAMENTOS A RETIRAR DO PASSADO HISTÓRICO DAS ARGAMASSAS. Disponível em: <<http://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/Paper%2051.pdf>>. Acesso em: 04/01/2020.

BAJAY, Sérgio Valdir. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: relatório setorial: cal e gesso. Brasília: Cni, 2010. 42 p. Disponível em: <<http://www.cni.org.br>>. Acesso em: 03 abr. 2020.

COELHO, A., RAMOS, C. (2010). Aplicação da análise de ciclo de vida na avaliação ambiental dos produtos: esquemas de reconhecimento existentes. Congress of Innovation on Sustainable Construction CINCOs'10, Curia, Portugal, pp. 11-21.

COELHO, Ana Zulmira; TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. A cal na Construção. 2009.

DGEG. Direção Geral de Energia e Geologia. Informação estatística. Dezembro de 2015. Disponível em: <<file:///C:/Users/lisia/OneDrive/Documents/bibliografias%20sustentabilidade/materiais/cal%20em%20portugal.pdf>>. Acesso: Janeiro de 2020.

FERREIRA, M. H. Estudo de Impacto Ambiental. Projeto Microlime. Lisboa, 2011. Disponível em: <http://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA2490/EIA_9072011_MICROLIME.pdf>, Acesso: 2020.

Lhoist..Disponível em: <https://www.lhoist.com/pt_br/cal-ao-longo-da-hist%C3%B3ria>. Acesso: 2020.

MAGRA. Sítio Arqueológico. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=pUHwDazqOn4>>. Acesso: Janeiro de 2020.

NP EN ISO 14020: 2005 — Rótulos e declarações ambientais – Princípios gerais. Instituto Português da Qualidade (IPQ).



NP EN ISO 14021: 2008 — Rótulos e declarações ambientais – Auto declarações ambientais. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

NP ISO 14025: 2009 — Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais Tipo III – Princípios e procedimentos. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

NP EN 459-1. 2015. Cal de construção - Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Lisboa : Instituto Português da Qualidade, 2015.

NP EN 459-2. 2011. Cal de Construção. Parte2: Métodos de ensaio. Lisboa : Instituto Português da Qualidade, 2011.

PASSO, GUIA PASSO A. TADELAKT. Disponível em: <http://media.voog.com/0000/0037/2776/files/tadelakt_portuguese.pdf>. Acesso em : Janeiro de 2020.

TORAGL, F.P., JALALI, S. (2010). A Sustentabilidade dos Materiais de Construção. Edição: TecMinho, Guimarães.

SECIL. SECIL TEK, Maceira. Disponível em: <www.seciltek.com>. Acesso em: 19/12/2019.

SILVA, José Otávio da. **PRODUTO RT 38: PERFIL DO CALCÁRIOO.** Brasília: MME / J. Mendo Consultoria, 2009. 56 p. Projeto ESTAL - Projeto de Assistência Técnica ao Setor Energético. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P27_RT38_Perfil_do_Calcxrio.pdf>. Acesso em: 2020.

SILVA, José Otávio da. **PRODUTO RT 72: PERFIL DA CAL.** Brasília: MME / J. Mendo Consultoria, 2009. 39 p. Projeto ESTAL - Projeto de Assistência Técnica ao Setor Energético. Disponível: em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_transformacao_mineral_no_brasil/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf>. Acesso em: 2020.

SOUZA, Cristiana Carneiro de et al. Avaliação da sustentabilidade de uma empresa de mineração e calcinação no centro oeste de Minas Gerais: estudo de caso. Orientadora: Lisiane Ilha Librelotto. Mestrado profissional. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. UFSC. 2012.