



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM ARGILAS CALCINADAS PASSÍVEIS DE USO EM LC³

DANIELI, Sarah⁽¹⁾; SILVA, Micael Rubens Cardoso da⁽²⁾; MALACARNE, Camila Salvi⁽³⁾; MACIEL, Vinícius Gonçalves⁽⁴⁾; KIRCHHEIM, Ana Paula⁽⁵⁾

(1) Graduanda em Engenharia Civil, UFRGS - sarah.danielishd@gmail.com; (2) Graduando em Engenharia Civil, UFPA - micaelrubens@gmail.com; (3) Doutoranda em Engenharia Civil, PPGCI/NORIE, UFRGS - camila.smalacarne@gmail.com; (4) Pesquisador Pós-doutorado, DECIV, PPGCI/NORIE, UFRGS - vinicius.maciel@gmail.com; (5) Professora Doutora, DECIV, PPGCI/NORIE, UFRGS - anapaula.k@gmail.com

RESUMO

A procura por ligantes com características equivalentes ao cimento Portland justifica-se na intenção de reduzir o impacto ambiental causado pela indústria cimenteira. Neste contexto, o chamado cimento LC³ (*limestone calcined clay cement*) é considerado mais ecológico, pois prevê uma substituição de pelo menos 50% do clínquer - principal responsável pelas emissões de poluentes atmosféricos na produção do cimento Portland. Um dos materiais incorporados é a argila calcinada, que adquire propriedades pozolânicas diante de ativação térmica a uma temperatura inferior à da produção do clínquer. Neste estudo foram avaliadas duas argilas passíveis de utilização em LC³: uma natural oriunda de jazida e um resíduo da extração de carvão. O objetivo foi analisar o impacto ambiental quando considerada a diferença entre o resíduo e o material natural e seus processos de beneficiamento para uso em cimentos LC³. A metodologia utilizada foi a Avaliação de Ciclo de Vida, com ênfase no potencial de aquecimento global. Também foram avaliadas as propriedades químicas e pozolânicas, para identificar qual argila possui as propriedades mais interessantes para fins de utilização em LC³. Os resultados apontam menor impacto ambiental do resíduo, mas melhores propriedades da argila natural, ainda que o resíduo atenda aos requisitos mínimos normativos.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida, Argila Calcinada, Resíduo, LC³.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF CALCINED CLAYS AVAILABLE OF USE IN LC³

ABSTRACT

The search for binders with characteristics equivalent to Portland cement is justified in the intention of reducing the environmental impact caused by the cement industry. Therefore, the cement known as LC³ (*limestone calcined clay cement*) is considered greener, because it predicts a replacement of at least 50% of clinker, main responsible for atmospheric pollutants emissions in the Portland cement production. One of the incorporated materials is the calcined clay, which acquires pozzolanic properties after thermal activation at a lower temperature than the clinker production. In this study, two types of clays that could be used in LC³ were evaluated: one natural from a deposit and a residue from the extraction of coal. The purpose was to analyze the difference between residue and natural material and their benefit processes for use in LC³. The methodology used was the Life Cycle Assessment, with emphasis on global warming potential. It was also evaluated the chemical and pozzolanic properties, aiming to identify which clay has the most interesting properties for use in LC³. Results point to lower environmental impact of the residue but better characterization of the natural clay, although the residue meets the normative requirements.

Key-words: Clay waste, Calcined Clay, Cement, LC³



1. INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira tem enfrentado grandes desafios com relação à sua massiva emissão de poluentes atmosféricos e grande consumo de recursos naturais e energéticos, sendo considerada a terceira maior consumidora mundial de energia e responsável 5% de toda a emissão mundial em 2010⁽¹⁾. Tal situação tende a se agravar nos próximos anos em virtude da crescente utilização mundial de cimento⁽²⁾. Uma alternativa bastante eficiente para conter tais emissões é a substituição do clínquer por Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs) Entretanto, uma restrição a uma maior utilização desta alternativa é imposta pelo suprimento limitado de materiais a serem utilizados como adição⁽³⁾.

Apesar das adições no cimento Portland mais comuns no Brasil, como a escória de alto forno e a cinza volante, serem permitidas em grandes porcentagens pela NBR 16697⁽⁴⁾, Abrão⁽⁵⁾ mostra que suas disponibilidades não suprem a quantidade necessária e sua qualidade pode ser variável. No caso da cinza volante, que é a adição mais comum no sul do Brasil, a produção de energia termoelétrica a partir da queima do carvão não é considerada sustentável e vem sendo questionada em diversos países⁽⁶⁾. Por outro lado, o fíler calcário e as argilas possuem elevada disponibilidade se comparado à produção de cimento Portland, tanto a nível global⁽³⁾ quanto nacional⁽⁵⁾.

Considerando a disponibilidade destes dois materiais, um grupo suíço-cubano investigou a possibilidade de produzir materiais pozolânicos usando argilas com baixo teor de caulinita e a produção de cimentos ternários compostos de clínquer, argila calcinada e calcário, com substituição do clínquer superior a 50%⁽⁷⁾. Este cimento, denominado de LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), tem como princípio uma reação sinérgica entre o calcário e a argila calcinada, uma vez que a presença de fontes extras de alumina do cimento, com a adição da argila calcinada, permite utilizar maiores quantidades de calcário reativo na mistura.

Acredita-se que, no cenário atual, o cimento LC³ seja uma boa alternativa para reduções nas emissões de GEE pela indústria cimenteira, já que apresenta potencial para rápida incorporação pelo mercado e uma vasta disponibilidade de matéria prima. Levando isso em consideração, pode-se pensar na produção cimentos mais amigáveis ambientalmente no contexto brasileiro com o uso de recursos e matérias-primas locais, visto que o modal transporte pode ser um aspecto muito impactante quando se avalia o ciclo de vida dos materiais envolvidos na produção de insumos.



O Rio Grande do Sul (RS) conta com expressivas reservas de argila⁽⁸⁾. Assim, neste estudo serão avaliados dois tipos de argilas gaúchas passíveis de serem utilizadas em LC³. Uma delas é uma argila natural (AN) disponível em abundância e predominantemente utilizada, ainda que em pequena escala, na indústria cerâmica de revestimentos (pisos e azulejos) e esmaltes. A outra é um resíduo (AR) resultante da extração de carvão mineral que está disponível em grande volume e não possui nenhuma finalidade atualmente. Sua camada sobreposta ao carvão mineral é retirada e armazenada em pilhas a céu aberto, comprometendo o ambiente e se tornando um passivo ambiental.

Dornelles et al.⁽⁹⁾ analisou estas mesmas argilas e verificou que ambas se apresentam como fonte de metacaulinita após serem ativadas termicamente e, também, que as argilas com maior teor de caulinita possuem maior reatividade pozolânica e maior índice de desempenho quando adicionadas à cimentos Portland. Malacarne⁽¹⁰⁾ também estudou essas argilas, utilizando-as para produção de cimentos LC³ na proporção de 30%. Seus estudos concluem que apesar de os cimentos com AN terem apresentado resistências mecânicas superiores, os com AR também atenderam às resistências especificadas pela NBR 16697⁽⁴⁾ para Cimentos Portland Pozolânicos (CP IV).

No entanto, estes materiais ainda carecem de estudos mais aprofundados para fornecer uma alternativa viável tecnologicamente para sua utilização em larga escala. Além de caracterizá-los e avaliá-los para uso em cimentos faz-se necessário avaliá-los quanto à sua viabilidade técnica e potencial de sustentabilidade. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia internacionalmente consagrada na avaliação ambiental de produtos e uma ferramenta de ampla aplicabilidade no setor da construção civil. Ela consiste na compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema, permitindo que se avalie seu desempenho ambiental.

O objetivo deste estudo, portanto, foi caracterizar as duas argilas citadas acerca de sua atividade pozolânica e o teor de caulinita, uma vez que tais fatores podem indicar o provável desempenho mecânico destes materiais quando incorporados em composições de LC³. Em seguida, conduzir uma ACV do berço-ao-portão para avaliar o desempenho ambiental das argilas quando beneficiados para uso em LC³. Foram considerados os processos de extração, transporte (em dois cenários distintos) e beneficiamento para uso em LC³ (calcinação, trituração e moagem), com ênfase na avaliação da categoria de impacto potencial de aquecimento global.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

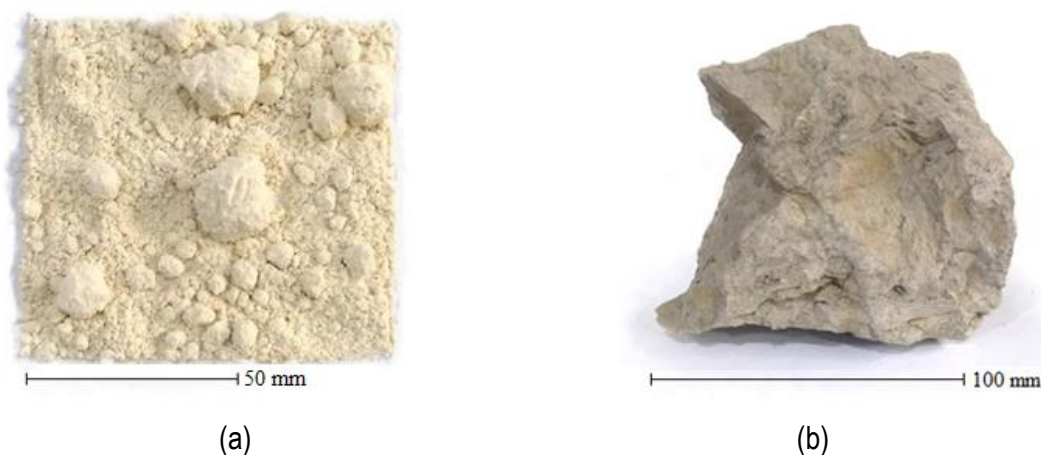
2.1 Processo de beneficiamento em escala laboratorial

Os processos laboratoriais descritos neste item serviram de base para analisar os processos de beneficiamento aos quais as argilas seriam supostamente submetidas em um contexto industrial, bem como para fonte de dados para o inventário da ACV.

A AN foi inicialmente homogeneizada, quarteada e seca em estufa a 100 °C para eliminar a água livre, até apresentar constância de massa. Na sequência as aglomerações (Figura 1a) foram desfeitas com almofariz e pistilo até que toda argila passasse em uma peneira com abertura de 0,6 mm (30 mesh), procedimento adotado para proporcionar uma calcinação uniforme ao material⁽¹¹⁾.

A AR foi recebida na forma de blocos com dimensões de até 120 mm (Figura 1b). Para reduzir o tamanho das partículas, o material foi processado até que passasse em uma peneira com 0,6 mm de abertura (30 mesh) em um britador de mandíbula com abertura fixa em três milímetros. Posteriormente foi homogeneizado, quarteado e seco em estufa a 100 °C.

Figura 1: (a) argila *in natura*, (b) argilito *in natura*.



Posteriormente os materiais foram submetidos à ativação térmica com o intuito de torná-los reativos. A temperatura de calcinação adotada foi baseada na bibliografia e nos resultados do ensaio de termogravimetria (TGA), que indicam que a perda de massa das argilas se encerra em torno dos 700°C. A partir desse resultado foi escolhida a temperatura de 750 °C. A margem superior de 50 °C foi adotada para garantir uma completa transformação da caulinita, já que a quantidade de material utilizada no ensaio de TGA é de 10 mg enquanto na mufla são calcinados 600 gramas por vez.



A calcinação foi feita em uma mufla estática Sanchis, modelo DTT, com volume interno de 0,12m³ e temperatura máxima de 1200 °C. As argilas foram dispostas sobre tijolo refratário em uma pilha de pequena altura para garantir uma calcinação homogênea. A taxa de aquecimento foi fixada em 10 °C/min e o patamar na temperatura máxima foi de 60 min. Ao fim do ciclo foi imposto ao material um choque térmico com intuito de preservar a amorficidade gerada durante a calcinação.

Após os materiais foram moídos para ajuste da finura, a fim de se obter um d₉₀ menor ou igual a 25, com um moinho de bolas Servitech, modelo CT-242, com jarro de porcelana com capacidade de 1000 ml e rotação de 380 rpm. Foram utilizados em média 280 ml de material por moagem e carga moedora de 273 esferas de alumina com diâmetro de 15±5 mm. O tempo de moagem considerado adequado após testes foi de 10 minutos para a AN e 40 minutos para a AR.

2.2 Técnicas de caracterização das argilas

As análises química e mineralógica do material foram realizadas através dos ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), com as argilas *in natura* e termogravimetria (TGA), com o material *in natura* e após a calcinação. O teor de caulinita nas argilas e a temperatura adequada para calcinação puderam ser estimados através da TGA. A FRX foi feita no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios-X por comprimento de onda Shimadzu, XRF 1800, entre o número de onda de 400 a 4000 cm⁻¹. As TGAs foram conduzidas em um equipamento Shimadzu DTG-60H, no Laboratório de Catálise e Materiais (LABCAT) do Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia (UFBA). A atmosfera utilizada foi fluxo de nitrogênio a uma taxa de 50 ml/min. A quantidade de material ensaiada foi 10 mg, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Em cada ensaio a amostra foi mantida a 35 °C por uma hora para garantir sua secagem, sendo depois aquecida até 1000 °C.

Para avaliar o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) dos materiais após a calcinação utilizou-se o Método Chapelle modificado, orientado pela NBR 15895⁽¹²⁾. Esse método é uma técnica direta de avaliação da reatividade de um material através da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado quando 1 g de material é colocado em suspensão aquosa com óxido de cálcio (CaO) e submetido a um banho térmico a temperatura de 90 ± 5 °C pelo período de 16 ± 1 hora.

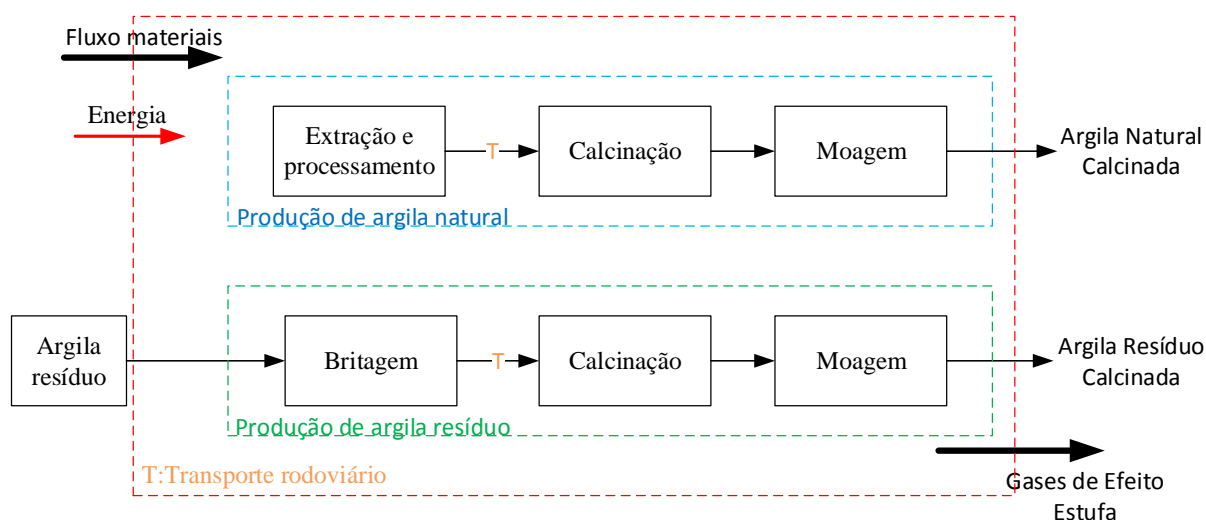


2.3 Avaliação do Ciclo de Vida

2.3.1 Definição do objetivo e escopo

A ACV foi conduzida com objetivo de comparar o desempenho ambiental da produção das argilas para fins de utilização em LC³. A metodologia foi empregada para avaliar a produção dos sistemas do "berço ao portão" da fábrica, ou seja, da extração das matérias primas até a produção das argilas calcinadas. A unidade funcional (UF) utilizada é a produção de 1 kg de argila calcinada. As fronteiras do sistema estão descritas na Figura 2. Processos e fluxos elementares associados à obtenção da AR foram negligenciados, já que o referido material é um resíduo da geração de energia em usinas termelétricas e não possui valor comercial até o momento.

Figura 2: Fronteiras do sistema de produção dos cimentos LC³.



O método de caracterização de impactos IPPC 2013 v.1.03 – 100 anos foi empregado para avaliar a categoria de impacto potencial de aquecimento global. A modelagem foi realizada no software Simapro versão Faculty v.9 utilizando a base de dados da Ecoinvent v.3.0. Dados primários foram obtidos a partir de experimentos em laboratório e dados secundários disponíveis na literatura foram empregados para construção dos Inventários de Ciclo de Vida (ICVs).

A matriz energética brasileira disponível na base de dados Ecoinvent foi considerada para todos os processos de obtenção e beneficiamento da AN e para o estágio de calcinação das argilas. Para o transporte foi considerado um caminhão com capacidade de 10 a 20 toneladas equipado com motor EURO 3.



2.3.2 Construção do Inventário do Ciclo de Vida

Os métodos de beneficiamento utilizados em escala laboratorial foram adaptados para a escala industrial a partir de considerações e dados disponíveis na literatura. Para a etapa de britagem da AR e moagem de ambas as argilas foram considerados processos semelhantes empregados no beneficiamento de calcário e reportados por Ecoinvent⁽¹³⁾. Assim, foi utilizado um consumo de energia elétrica de $5,1 \times 10^4$ kWh/kg de argila para trituração e $8,98 \times 10^{-2}$ MJ/kg de argila para moagem.

A energia para calcinação foi calculada considerando o método reportado por Pillai et al.⁽¹⁴⁾. Segundo o autor, a energia necessária para calcinação de argilas é de 2,6 MJ/kg de argila e a energia elétrica para o forno rotativo é 0,04 kWh/kg de argila. Cabe salientar que as argilas encontravam-se em estado úmido quando foram transportadas até o local de beneficiamento. A umidade de ambas as argilas foi determinada em laboratório utilizando uma estufa a 100°C e aproximadamente 800 gramas de amostra. A AN apresentou 17,67% de umidade e a AR apenas 2,26%. Considerou-se para efeitos de consumo de energia para calcinação as argilas secas, negligenciando-se a energia demandada para evaporação da água, uma vez que o forno trabalha a temperaturas muito superiores à necessária para perda da umidade. No entanto, os fluxos mássicos relacionados a esta etapa foram considerados. Os resultados das TGAs das argilas foram empregados para estimar seu teor de desidroxilação, sendo tal dado utilizado na determinação das perdas no processo de calcinação. Logo, foi considerada uma perda de massa de 12,89% para AN e 6,58% para AR. As emissões da combustão do coque de petróleo foram calculadas a partir BEN⁽¹⁵⁾, considerando um poder calorífico inferior de 8390 kcal/kg do material.

Inicialmente, para efeito de análise dos processos o transporte foi negligenciado e, portanto, uma análise considerando o fluxo de transporte igual a zero foi realizada. Posteriormente foi avaliada a influência do transporte considerando dois cenários distintos. Foram previstas as distâncias entre o local de coleta das argilas e as possíveis localizações das plantas de processamento (Tabela 1). Assim, o cenário A contemplou o melhor cenário, onde a distância entre o local de coleta das argilas e a planta são o menor possível e o Cenário B é o pior cenário, onde há a maior necessidade de deslocamento.

Tabela 1: Distância entre o local de origem das argilas e as possíveis plantas de calcinação

Argilas	Possível localização da planta	
	Cenário A	Cenário B
Argila natural (AN)	147 km	293 km



2.3.2 Considerações e Limitações do estudo

Devido às particularidades inerentes a produção de argilas calcinadas alguns dados não estavam disponíveis ou ainda não estão consolidados. Assim, a seguir são apresentadas algumas considerações e limitações consideradas neste estudo:

- Extração da argila natural: foi utilizado um processo disponível por Ecoinvent v3 e adaptado os fluxos energéticos para a matriz energética brasileira;
- Alocação e impacto positivo da AR: foi assumido que a AR obtida como resíduo do processo de mineração de carvão para geração de energia em termoeletrica possui impacto igual a zero. Portanto, não foram realizadas alocação, uma vez que, o referido resíduo não possui valor de mercado. Também não foi considerado nenhum tipo de benefício (impacto positivo) de sua utilização;
- Energia de calcinação: o fator de consumo de energia para calcinação foi considerada como igual para ambas as argilas e obtida a partir de Pillai et al.⁽¹⁴⁾; no entanto, cabe mencionar que o autor estimou a energia a partir da técnica de calorimetria diferencial de varredura para uma amostra de argila com conteúdo de caulinita diferente das empregadas neste estudo;
- Processo de britagem e moagem: as perdas de massa relacionadas ao processo de moagem e britagem foram negligenciadas.
- Energia do forno rotativo, britagem e moagem: foram considerados dados secundários para a demanda de energia por essas fontes e o tipo de combustível utilizado a partir de Ecoinvent⁽¹³⁾.
- Pré-secagem: para efeitos de ICV foi considerado um fluxo de pré-secagem das argilas antes da calcinação. Nesta etapa a água presente nas argilas é evaporada. Portanto, não foi considerado um processo específico para esta etapa, assumindo-se que a evaporação da água pode ser realizada em com uma menor demanda de energia quando comparado à etapa de calcinação. Por outro lado, a perda de massa deste processo foi considerada e determinada a partir do programa experimental.



3. RESULTADOS

3.1 Caracterização das argilas

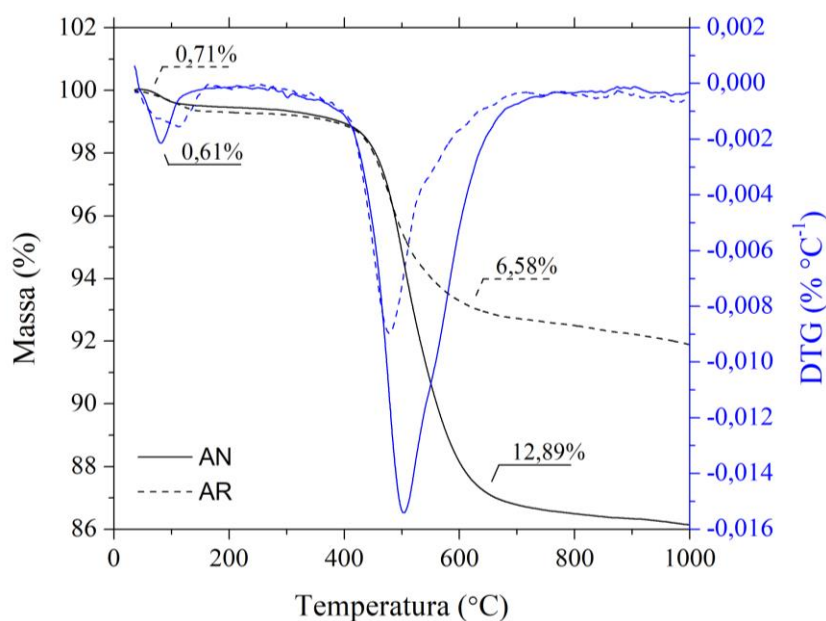
A Tabela 2 apresenta a composição de óxidos da AN e da AR *in natura*. Percebe-se que a AN apresenta uma concentração predominante dos óxidos de silício e alumínio, já a AR contém também outros óxidos em maior quantidade. Uma maior presença de caulinita na AN pode ser verificada por sua razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mais próxima de 1. Também é possível analisar que a perda ao fogo (PF) na AN é mais próxima a 14%, que indica um maior teor de caulinita, uma vez que essa é a massa percentual perdida pela caulinita no processo de desidroxilação.

Tabela 2: Composição química das argilas (% em peso), obtida por fluorescência de raios-X.

Argila	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	CaO	SO ₃	MgO	ZrO ₂	PF
AN	45,70	38,20	0,65	0,39	0,13	0,31	-	-	-	14,62
AR	55,73	23,59	4,14	2,08	1,13	1,09	0,59	0,24	0,02	11,39

Na Figura 3 são apresentados os resultados de TGA e DTG da AN e da AR *in natura* em linha cheia e linha tracejada, respectivamente.

Figura 3: Curvas de TGA/DTG da AN *in natura* (linha cheia) e da AR *in natura* (linha pontilhada).



Há um pico de perda de massa nas curvas *in natura* no início do ensaio até aproximadamente 200 °C, atribuído à liberação da água adsorvida na superfície do material⁽¹⁶⁾. Já o maior pico de perda



de massa é decorrente da desidroxilação. O teor de caulinita do material *in natura*, estimado conforme metodologia de Avet *et al.*⁽¹⁷⁾, é de 92,35% para a AN e de 47,11% para o AR. Estudos⁽¹⁷⁾ demonstram uma correlação entre o conteúdo de caulinita da argila utilizada como adição em cimentos LC³ e a resistência à compressão de argamassas produzidas com estes cimentos.

O valor de IAP para a AN calcinada foi de 1168 mg Ca(OH)₂/g pozolana enquanto para a AR calcinada foi de apenas 45% desse valor: 527 mg Ca(OH)₂/g pozolana. Logo, há uma maior atividade pozolânica na AN, apesar de que ambas apresentam o mínimo especificado na literatura para se enquadrarem como materiais pozolânicos, de 436 mg Ca(OH)₂/g pozolana⁽¹⁸⁾.

Diante do apresentado, espera-se uma maior resistência mecânica de cimentos produzidos com AN em relação à AR, uma vez que esta apresenta maior teor de caulinita e atividade pozolânica. Tal fato é coerente com a literatura, uma vez os estudos⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ realizados com estas argilas demonstraram resistências superiores nas composições com AN. Entretanto, apesar de a AR ter um menor IAP, o teor ainda é superior ao mínimo esperado e suas resistências também se enquadram no previsto pelas normas, ainda que inferiores às composições com a AN⁽¹⁰⁾.

3.2 Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida

Os resultados da construção do ICV são apresentados na Tabela 3 para UF de 1 kg de argila calcinada. Observa-se que as argilas apresentam diferenças significativas em seus inventários. Considerando as perdas de água no processo de pré-secagem e de calcinação foi necessária uma quantidade inicial de material de aproximadamente 1,39 kg para a AN e 1,09 kg para a AR. Tal diferença se dá especialmente pelo maior teor de umidade e de caulinita da AN em comparação a AR. Assim, essa massa adicional tem influência sobre o transporte dos materiais e para a indústria, que estaria produzindo menos material a partir de uma mesma quantidade inicial.

Tabela 3: Inventário do Ciclo de Vida das Argilas Calcinadas (unidade funcional: 1kg de argila calcinada)

Processo	Descrição	AN	AR
Obtenção	Argila (kg)	1,39	1,09
	Caminhão Euro 3 (Cenário A) (tkm)	0,20	0,01
Transporte	Caminhão Euro 3 (Cenário B) (tkm)	0,41	0,46
	Argila (kg)	1,39	1,09
Calcinação	Entrada		
	Coque de petróleo (kg)	0,08	0,08
	Energia elétrica (kwh)	0,03	0,04
Saída	Água evaporada – pré-secagem (kg)	0,24	0,03

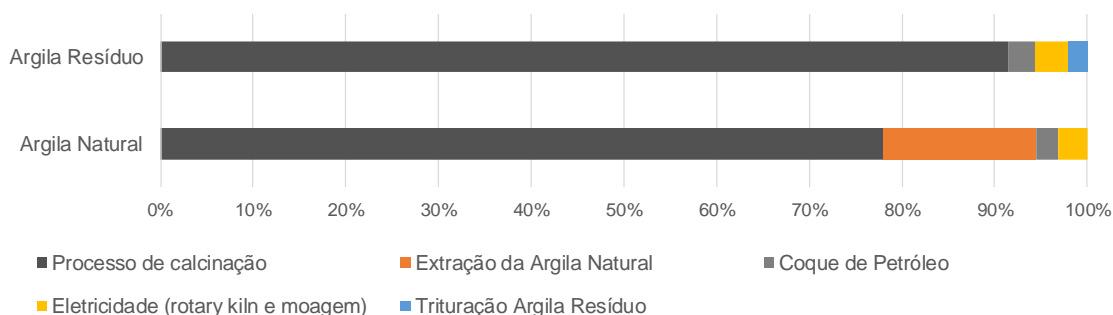


	Vapor água (processo de calcinação) (kg)	0,15	0,07
	CO ₂ (coque de petróleo) (kg)	$2,9 \times 10^{-1}$	$2,710^{-1}$
	Metano (coque de petróleo) (kg)	$2,98 \times 10^{-5}$	$2,78 \times 10^{-5}$
	Óxido Nitroso (coque de petróleo) (kg)	$1,8 \times 10^{-6}$	$1,67 \times 10^{-6}$
	Argila calcinada (kg)	1	1
Trituração	Energia (MJ)	-	$8,98 \times 10^{-2}$
Moagem	Energia elétrica (kwh)	$5,10 \times 10^{-4}$	$5,10 \times 10^{-4}$
Produto Final	Argila calcinada moída (kg)	1	1

AN: Argila Natural; AR: Argila Resíduo.

A Figura 5 apresenta uma análise da contribuição porcentual de cada um dos processos na emissão de CO₂, sem considerar nesta etapa o transporte das argilas do local de coleta até a planta de calcinação.

Figura 5: Contribuição percentual de cada processo no total de CO₂ gerado, desconsiderando o transporte das argilas do local de obtenção até a planta de calcinação.



A AN apresenta potencial de impacto para aquecimento global de 374 g de CO₂ eq./ kg de AN, superior 25% à AR que apresentou resultado de 298 g CO₂ eq./ kg de AR. Tal diferença se deve principalmente ao fato de que a AN necessita ser extraída, o que contribui com 16% das emissões do seu ciclo de vida, enquanto tal contribuição é nula para a AR, uma vez que ela é um subproduto da extração de carvão.

O beneficiamento da AR conta com uma etapa adicional de trituração que a AN não possui, sendo que tal processo apresentou uma contribuição de 2% em seu ciclo de vida. Acredita-se que essa etapa de beneficiamento acarretaria em um maior impacto relativo aos demais processos caso fosse avaliada a categoria de consumo de energia elétrica, não avaliada neste estudo que abordou somente a emissão de CO₂.

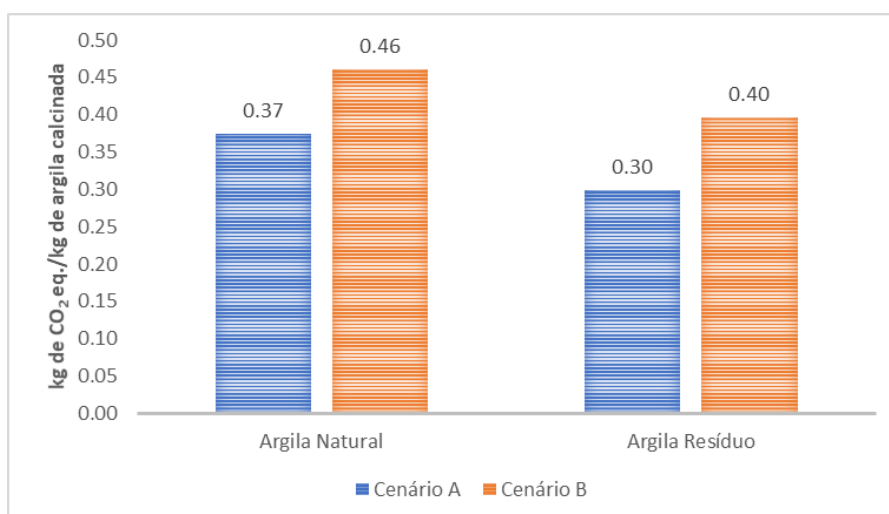
A energia elétrica consumida para os processos do forno rotativo e moagem das argilas são responsáveis juntos por 4% das emissões do ciclo de vida da AR e 3% da AN.



O processo de calcinação apresentou significativa contribuição neste estudo para as duas argilas avaliadas. A calcinação da AN apresenta impacto 6,4% superior à da AR. Tal diferença está relacionada ao fluxo de massa, uma vez que são necessárias maiores quantidades de AN para produzir 1 kg desta argila calcinada. É imprescindível avaliar esta etapa do processo quando se fala em produção de cimentos LC³, uma vez que a calcinação das argilas é o diferencial no seu processo produtivo em relação aos cimentos convencionais. No caso dos cimentos Portland com escórias ou cinza volante, tais adições geralmente não passam por nenhum processo de beneficiamento, além de na maioria das vezes serem resíduos de outros processos produtivos.

A Figura 6 apresenta os resultados da ACV considerando os dois cenários de transporte adotados. Percebe-se que a AN possui maiores emissões em ambos os cenários e que a AR apresenta menores impactos mesmo ao considerar maiores distâncias.

Figura 6: Emissões de CO₂ quando levado em consideração o transporte; i) cenário A: menor distância entre o local da argila e da planta de calcinação; ii) cenário B: maior distância entre o local da argila e a planta de calcinação. (UF: 1kg de argila calcinada)



Fazendo uma comparação com o cimento convencional, sabe-se que o Brasil emitia 564 kg CO₂ /t cimento em 2014⁽¹⁹⁾ e que a nível mundial esta emissão é ainda maior. Além disso, a emissão na produção do clínquer é ainda maior do que a da produção do cimento, uma vez que ele é o principal responsável pelas emissões dentro do processo produtivo. Portanto, pode-se afirmar, de acordo com este estudo, que a redução do teor do clínquer e consequente incorporação de argilas nos cimentos LC³ são capazes de reduzir as emissões, uma vez que a segunda emite menos CO₂.



4. CONCLUSÕES

Neste trabalho é realizada uma avaliação preliminar, a partir de resultados laboratoriais e dados secundários, da viabilidade técnica e ambiental da calcinação de argilas com potencial uso em cimentos LC³.

Em geral, o maior teor de caulinita presente na argila natural (AN) apresenta possíveis ganhos no desempenho mecânico, porém também tem influência sobre os fluxos mássicos dos processos analisados demandando maior quantidade de argila extraída por kg de argila calcinada. Todos os resultados obtidos na etapa de caracterização das argilas indicam que se espera uma maior resistência mecânica de cimentos produzidos com AN em relação à com AR, em função de seu maior teor de caulinita. Por outro lado, os resultados da ACV indicam que a AR emite menos CO₂ em todos os cenários de transporte considerados. Tal fato se deve especialmente à inexistência de extração e menor teor de água nesta argila, o que propicia um maior rendimento tanto no transporte bem como dentro do processo produtivo.

A calcinação das argilas é a etapa mais crítica do processo em termos de emissão de CO₂. Entretanto, sabe-se que o uso de argila calcinada como adição permite uma redução do teor de clínquer e uma maior incorporação de fíler calcário, como comprovado em estudos anteriores.

Portanto, é possível afirmar que a AR apresenta menor impacto ambiental, porém, menor desempenho mecânico quando comparada a argila natural, ainda que atenda aos requisitos mínimos normativos. Em virtude de tais particularidades, é imprescindível avaliar em futuros estudos o desempenho mecânico e o ciclo de vida da substituição parcial do clínquer pelas argilas calcinadas.



5. REFERÊNCIAS

1. FISCHEDICK, M.; ROY, J; ABDEL-AZIZ, A.; ACQUAYE, A.; ALLWOOD, J. M.; CERON, J. P.; GENG, Y.; KHESHGI, H.; LANZA, A.; PERCZYK, D.; PRICE, L.; SANTALLA, E.; SHEINBAUM, C.; TANAKA, K. Industry. In: EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX, J. C. (eds.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
2. IEA; CSI. **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 2018. 66 f.
3. SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry**. Paris: United Nations Environment Programme, 2016. 65 p.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
5. ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: Disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
6. PATYK, A. Thermoelectrics: impacts on the environment and sustainability. **Jounal of Electronic Materials**, vol. 39, n. 9, p. 2023-2018, 2010.
7. HERNANDEZ, J. F. M.; SCRIVENER, K. Development and Introduction of a Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement in Cuba. In: Scrivener K., Favier A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, vol 10. Dordrecht: Springer, 2015.
8. LARROYD, F. **Geologia e Caracterização Tecnológica Dos Principais Depósitos de Caolim Do Estado Do Rio Grande Do Sul: Ênfase a Utilização Na Indústria Do Papel**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
9. DORNELLES, A. M.; SILVA, F. T. da; SOUZA, F. de; RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P. **Caracterização de argilas gaúchas com potencial de aplicação para produção de ligantes alternativos**. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018.
10. MALACARNE, C. S. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos ternários com baixo teor de clínquer (LC3) a partir de calcários e fontes cauliniticas do Rio Grande do Sul**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
11. LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.
13. KELLENBERGER D., ALTHAUS, H. –J., JUNGBLUTH, N., KÜNNIGER, T., LEHMANN, M., THALMANN P. **Life Cycle Inventories of Building Products**. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. 2007.



14. PILLAI, R. G., GETTU, R., SANTHANAM, M., RENGARAJU, S., DHANDAPANI, Y., RATHNARAJAN, S., BASAVARAJ, A. S. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 118, p. 111-119, 2019.
15. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro. 292 p.
16. SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEEN, J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, n. 1, p. 211-278, 2012.
17. AVET, F.; SNELLINGS, R.; DIAZ, A. A.; HAHN, M. B.; SCRIVENER, K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 1–11, 2016.
18. GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
19. SNIC. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, 2019. 64 f.