

Avaliação da Potencialidade do Uso de Resíduos Industriais Através de Ferramenta de Seleção de Materiais para Projeto de Produtos Cerâmicos

Antonio Augusto Morini^a, Kamila Almeida de Oliveira^a, Fabiano Raupp Pereira^a, Dachamir Hotza^{a*}

^a Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PGMAT, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

*e-mail: d.hotza@ufsc.br

Resumo

Este artigo visa avaliar um sistema para análise potencial de resíduos sólidos industriais, como matéria-prima alternativa a produtos cerâmicos, através do princípio de seleção sistêmica de materiais, por meio da utilização de ferramentas disponíveis no software CES Selector. A partir da análise da composição química, expressa em óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 e CaO) de 29 produtos cerâmicos distintos, distribuídos majoritariamente em duas classes distintas de processamento, cerâmica e/ou cimento, apresentados através de 7 tipos de tijolos, 7 cimentos e 12 concretos, complementados por mais 3 tipologias (terracota, revestimento cerâmico e porcelana), foi estabelecido um padrão de análise comparativa entre o resíduo a ser avaliado e os padrões desenvolvidos. A partir da literatura, foram selecionados e avaliados quatro resíduos, seis matérias-primas e duas formulações de produtos. Os resultados mostram que é possível, através da análise química do resíduo, direcioná-los para a fabricação de tijolos, cimentos ou concretos. Posteriormente foram desenvolvidos novos quadros de avaliação, considerando algumas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. No entanto, nessa etapa os resultados não são conclusivos, mostrando que essas propriedades só podem ser previstas após a definição do produto e de processos de fabricação.

Palavras-chave: seleção de materiais, produtos cerâmicos, resíduos industriais.

1. Introdução

O crescimento da população mundial e o consequente aumento da extração de recursos naturais tem aumentado a importância das atividades relacionadas à coleta e reciclagem de resíduos, dos quais os resíduos industriais têm parcela importante nesse contexto. Minimizar os impactos decorrentes da disposição desses resíduos no ambiente e reduzir os custos envolvidos nessa atividade têm sido um dos principais focos dos trabalhos desenvolvidos nessa área¹.

Nos últimos anos têm-se verificado a necessidade de se implantar políticas e legislações ambientais que não provoquem impactos sociais e econômicos negativos. A percepção da importância social na atividade econômica levou ao surgimento de uma nova dimensão no conceito de desenvolvimento sustentável, que assenta sobre três pilares ou eixos principais: crescimento econômico (eixo econômico), equilíbrio ecológico (eixo ambiental) e progresso (eixo social). Pode-se dizer que o reaproveitamento de materiais e a reciclagem são métodos impulsionadores da sustentabilidade, pois abrangem diversos aspectos técnicos, econômicos e sociais da relação homem-ambiente².

O desenvolvimento de estudos voltados à reciclagem e/ou sua reutilização na indústria cerâmica, representa uma alternativa capaz de contribuir para o uso de matérias-primas alternativas e diminuir os custos finais dos

setores industriais geradores e consumidores de resíduos, além de preservar o meio ambiente³.

A construção de mapas de propriedade permite ao projetista ou engenheiro a observação da situação de cada classe de materiais ou cada material dentro de uma classe no que diz respeito às suas características específicas confrontadas duas a duas, estabelecendo-se comparativos sequenciais na busca de definição da escolha dos materiais⁴.

Esse processo discrimina os materiais possíveis para o projeto, organizando-os de forma hierárquica e permitindo a escolha da melhor opção. A Figura 1 apresenta a estratégia de escolha do material, a partir do conjunto inicial de todos os materiais disponíveis ou existentes, passando por 4 etapas – tradução dos requisitos de projeto, triagem, priorização dos materiais, levantamento da documentação técnica dos selecionados, que levam à escolha final⁶.

Dentre os softwares disponíveis para seleção de materiais, destaca-se o *Cambridge Engineering Selector (CES Selector)*, desenvolvido por Ashby e sua equipe⁶, que disponibiliza um banco de dados com informações técnicas de cerca de 4000 materiais. Para cada material, estão disponíveis propriedades físicas, mecânicas, térmicas, elétricas, além de informações sobre seus possíveis processos de fabricação, incluindo produção mundial, valor de mercado, produção de CO_2 e energia incorporada.



Figura 1. Estratégia de escolha do material⁵.

O *CES Selector*, com base nos mapas de propriedades dos materiais, realiza o cruzamento de informações relacionadas aos materiais em um banco de dados com etapas progressivas de restrições, permitindo encontrar materiais que coincidem com os requisitos do projeto⁵.

Baseado nestas informações é possível gerar gráficos e mapas que facilitam a visualização dos dados. O software apresenta ainda um módulo de auditoria em eco sustentabilidade. Assim, se pode afirmar que essa é uma ferramenta que permite aplicar uma estratégia de desenvolvimento de projeto sequencial, eficiente e rápida na seleção de materiais, através da aplicação de características desejadas e restrições referentes ao projeto desenvolvido⁷.

O presente trabalho avalia a possibilidade de utilização do software CES-Selector como ferramenta de um sistema perceptivo para avaliar a potencialidade do uso de resíduos industriais como matéria prima alternativa para novos produtos cerâmicos.

2. Procedimento Metodológico

O conjunto de dados para materiais e propriedades, confere ao software CES-Selector uma ferramenta de seleção sistêmica de materiais, no desenvolvimento de produtos, permitindo combinar análises de processamento para as esferas técnicas (engenharia), econômicas e ambientais. Conjecturada na possibilidade de visualizar o potencial do resíduo, a partir desta seleção sistêmica, a metodologia desse trabalho foi fundamentada em quatro etapas principais: (i) selecionar e avaliar a composição química dos resíduos em estudo (ii) realizar simulações com o software com base na composição química dos materiais analisados (iii) selecionar e limitar materiais e/ou produtos obtidos com as simulações e (iv) estabelecer padrões de avaliação dos resíduos, como matéria-prima alternativa.

Fundamentado em pesquisas bibliográficas, quatro resíduos sólidos industriais foram selecionados, a saber: escória de alto forno, lama de anodização de alumínio (Lama-A), lama de filtração/clarificação de água potável (Lama-FA), lama de filtração/clarificação de água potável - rica em cálcio (Lama-FA**). Somado aos resíduos foram avaliadas seis matérias-primas naturais, cinco distintos tipos de argilas (carbonática, gresificável, plásticas, caulínicas

e feldspática) e calcita mineral. Completando o grupo, foram incluídos dois produtos clínquer, CR1 e CR2.

Após a seleção dos materiais, identificou-se o potencial destes através da composição química. A partir desta foram simulados no software diferentes composições com ao menos dois dos óxidos avaliados. Através do levantamento realizado pelas simulações foram selecionados três óxidos: alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e cálcio (CaO), sendo que estes eram majoritários na composição dos resíduos estudados.

Baseada na composição ternária dos óxidos, novas simulações foram realizadas, possibilitando a seleção de 29 materiais, dentre os 326 materiais cerâmicos disponibilizados no banco de dados do CES-Selector. Esses estão distribuídos em duas classes distintas de processamento, cerâmica e/ou cimento, apresentados através de 7 tipos de tijolos, 7 cimentos e 12 concretos, completados por mais 3 tipologias (terracota, revestimento cerâmico e porcelana).

Como passo seguinte, foram estabelecidos gráficos com os materiais selecionados, um com o teor de alumina e outro com o teor de sílica (percentuais em massa). Completando os dados iniciais, foram elaboradas três tabelas com os teores de alumina, sílica e cálcio. Nessa etapa foi possível constatar que cada grupo possui percentuais distintos desses composto químicos, por exemplo: o grupo “tijolos” possui alumina de 35% a 78%, enquanto o grupo “cimento” possui alto teor de cálcio e o grupo “concreto” alto teor de silício.

A partir desses resultados, elaborou-se uma tabela de padrões de alumina, sílica e cálcio para cada grupo e gráficos de bolhas com as variáveis sílica vs. cálcio e sílica vs. alumina.

Para avaliar a consistência dos padrões obtidos, introduziu-se no software através de um novo registro, os quatro resíduos e as seis matérias-primas conforme referências da literatura, com seus respectivos percentuais de alumina, sílica e cálcio. A avaliação consiste em comparar os percentuais dos três compostos de cada resíduo com os padrões desenvolvidos e apontar se sua utilização é apropriada ou não para algum dos produtos cerâmicos selecionados.

A criação de um novo registro possibilita além da composição, a adição das propriedades físicas, químicas, mecânicas, térmicas, elétricas, ópticas e ecológicas.

Entretanto para tal é necessário estabelecer as mensurações de tais propriedades, sejam através da avaliação de um novo produto composto pelo resíduo, ou por meio de referências de trabalhos de valorização para o resíduo em estudo.

Desse modo, a última etapa foi caracterizada pela avaliação das propriedades de dois produtos, clínquer CR1 e CR3 – também apresentado na literatura, formuladas com a utilização de dois dos resíduos estudados (Lama A e Lama FA**). Comparando as composições químicas dos materiais com suas respectivas propriedades mecânicas, físicas, térmicas, elétricas e outras, a partir das ferramentas disponibilizadas pelo software. Foram selecionadas inicialmente várias relações de propriedades dos materiais em função de sua composição. Em seguida foram selecionados os seguintes gráficos de bolhas: alumina vs. dureza, (alumina + sílica) vs. tenacidade, (alumina + sílica) vs. condutividade térmica. Essa etapa teve como objetivo verificar a relação entre as quantidades de alumina ou sílica ou (alumina + sílica) com as propriedades selecionadas.

Com os trabalhos concluídos fez-se a análise dos resultados, utilizando o software CES-Selector como sistema perceptivo de potencialidade do uso de resíduos industriais como matéria prima de novos produtos cerâmicos.

3. Resultados e Discussão

Os resultados descritos na Tabela 1 e apresentados nas Figuras 2a e 2b, caracterizam as primeiras evidências do agrupamento utilizado no estudo. Os produtos, tijolos, cimentos e concretos, obtidos nas simulações e através do levantamento dos 29 materiais selecionados do banco de dados do CES-Selector caracterizaram uma tendência, revelada pelos óxidos alumina (a) e sílica (b) presentes nos resíduos.

Na etapa seguinte, fez-se o levantamento do percentual em massa de Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO , Fe_2O_3 presentes em cada um dos materiais selecionados, como também apresentado na Tabela 1. Além dos óxidos mencionados na etapa anterior, os óxidos de ferro e de magnésio foram incluídos por apresentarem percentuais significativos em

Tabela 1. Composição química típica de tijolos, cimentos e concretos, além de terracota, porcelana e revestimentos cerâmicos⁸.

| Produto | Composição em óxidos (% em massa) | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------|-----------|--------|---------|----------|
| | Al_2O_3 | SiO_2 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | Outros |
| Tijolo de fachada | 58-78 | 23-33 | 1-3 | ----- | ----- | 1-3 |
| Tijolo de engenharia | 58-78 | 23-33 | 1-3 | ----- | ----- | 1-3 |
| Tijolo comum, dureza 2.0.3 | 40-70 | 30-52 | 1-3 | ----- | ----- | 1-3 |
| Tijolo comum, dureza 2.2.5 | 50 | 28,1 | 3,25 | ----- | ----- | 18,7 |
| Tijolo de baixa densidade, 0,75 | 38 | 50 | ----- | ----- | ----- | 12 |
| Tijolo de baixa densidade, 0,80 | 35 | 55 | ----- | ----- | ----- | 10 |
| Tijolo de baixa densidade, 0,55 | 37 | 44,5 | 0,55 | 7,75 | 7,75 | 2,45 |
| Cimento Portland comum | 3-6 | 20-22 | 3-3,5 | 64-66 | 2-2,5 | 4 |
| Cimento Portland com escória de alto-forno | 4-12 | 25-32 | 1-3 | 50-60 | 0-8 | 4 |
| Cimento Portland de endurecimento rápido | 4-5,5 | 21-22 | 2,3-3,5 | 64-65 | 2,5-3,2 | 3-4 |
| Cimento de alta alumina | 70-73 | 0-1,3 | 0-0,3 | 25-28 | ----- | 0-2,4 |
| Cimento Portland de baixo calor | 4-5 | 23-25 | 4-6 | 61-63 | 1-2 | 2-4 |
| Cimento Portland resistente a sulfatos | 4,5-6 | 20,3-23 | 3-4 | 62-66 | 1-3 | 2,2-6 |
| Cimento super fosfato | 3-4 | 22-25 | 3-5 | 63-65 | 1,5-2,5 | 1,9-4,1 |
| Concreto de cimento pozolânico | 0,56 | 82,4 | 0,43 | 7,91 | 7,89 | 0,84 |
| Concreto de cimento de alta alumina | 9,43 | 79 | 0,02 | 3,49 | 7,89 | 0,14 |
| Concreto de cimento super fosfato | 0,45 | 82 | 0,52 | 8,46 | 7,89 | 0,69 |
| Concreto de cimento Portland comum | 0,59 | 81,7 | 0,43 | 8,55 | 7,9 | 0,82 |
| Concreto com alto volume de cinzas volantes | 1,96 | 87,5 | 0,65 | 4,62 | 4,82 | 0,42 |
| Concreto de pó reativo | 1,18 | 64,7 | 0,84 | 17 | 6,96 | 8,65 |
| Concreto aerado | 0,81 | 75,2 | 0,58 | 11,6 | 10,7 | 1,13 |
| Concreto de alta densidade | 0,36 | 38,2 | 0,26 | 5,17 | 4,61 | 51 |
| Concreto de isolamento leve | 0,81 | 75,2 | 0,58 | 11,6 | 10,7 | 1,13 |
| Concreto estrutural leve | 0,81 | 75,2 | 0,58 | 11,6 | 10,7 | 1,13 |
| Concreto condutor | 0,59 | 55,4 | 0,43 | 8,55 | 7,9 | 26,63 |
| Concreto de alto desempenho | 0,94 | 77,9 | 0,68 | 13,6 | 5,65 | 1,3 |
| Terracota | 63 | 36,7 | 0,27 | ----- | 0,016 | 0,014 |
| Porcelana | 24-27 | 66-70 | 0,5-2 | 0-0,15 | 0,1-0,2 | 3,55-6,5 |
| Piso Cerâmico | 63 | 36,7 | 0,77 | ----- | 0,016 | 0,027 |

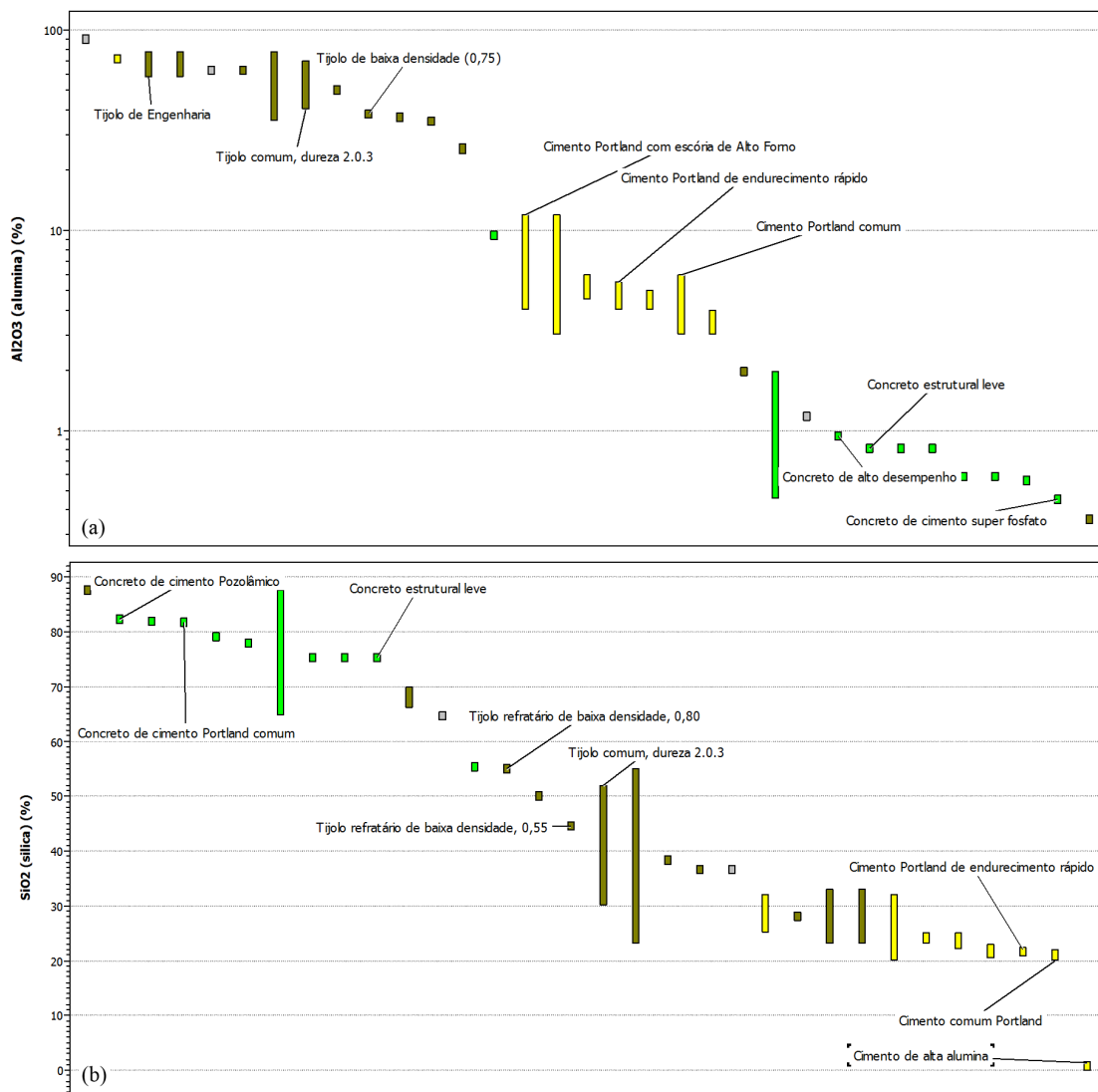


Figura 2. Materiais selecionados como produtos cerâmicos em função de percentual em massa de: (a) alumina; (b) sílica.

determinados produtos, como por exemplo o óxido de magnésio nos concretos e o óxido de ferro nos cimentos.

Na próxima etapa, foi definido um padrão de variação percentual dos três óxidos mais frequentes nos materiais selecionados de cada um dos três grupos (Al₂O₃, SiO₂ e CaO). Os padrões criados estão apresentados na Tabela 2.

Na etapa seguinte, foram elaborados gráficos de bolhas (Figuras 3a e 3b), considerando os parâmetros SiO₂ vs. CaO (a) e Al₂O₃ vs. SiO₂ (b) de cada um dos três grupos. O gráfico da relação Al₂O₃ vs. CaO, não mostrado, apresentou a mesma tendência de agrupamento.

A validade dos gráficos elaborados foi verificada a partir da comparação de alguns resíduos industriais, cujos dados foram obtidos da literatura, com os padrões criados a partir do CES-Selector e definidos na etapa anterior. A avaliação consistiu em comparar os percentuais de alumina, sílica e cálcio de cada resíduo e matéria-prima

Tabela 2. Padrões de composição química em óxidos para os três grupos avaliados.

| Produto | Composição em óxidos (% em massa) | | |
|----------|-----------------------------------|------------------|---------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO |
| Tijolo | 35-78 | 23-55 | — |
| Cimento | 3-12 | 20-32 | 50-66 |
| Concreto | 0,45-1,96 | 64,7-87,5 | 4,62-17 |

com os padrões desenvolvidos e apontar se sua utilização é apropriada ou não para algum dos produtos pertencente a um dos três grupos. Também foi possível indicar qual dos componentes químicos deve ser adicionado para alcançar um resultado satisfatório. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Por fim, foram comparadas as composições químicas dos materiais e produtos (Tabelas 3 e 4) com suas respectivas

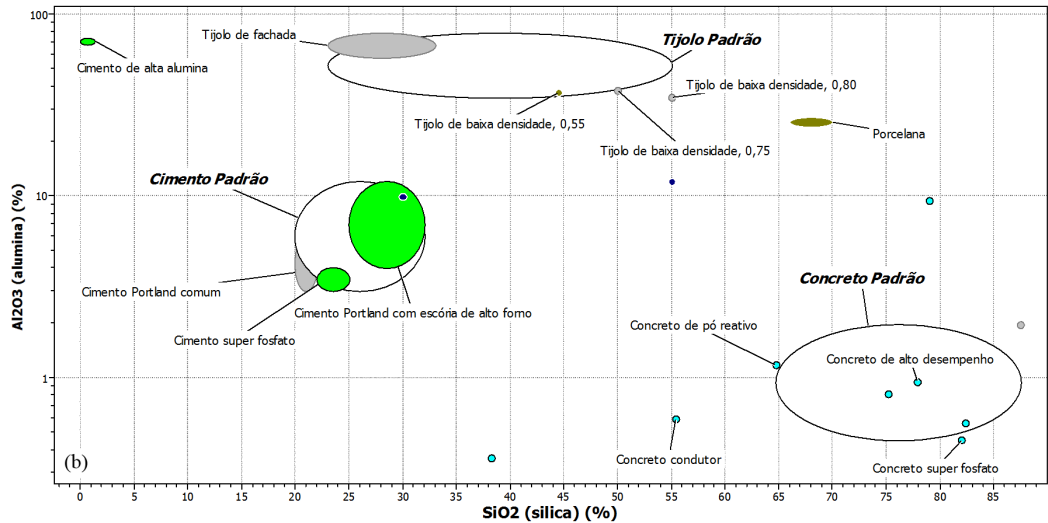
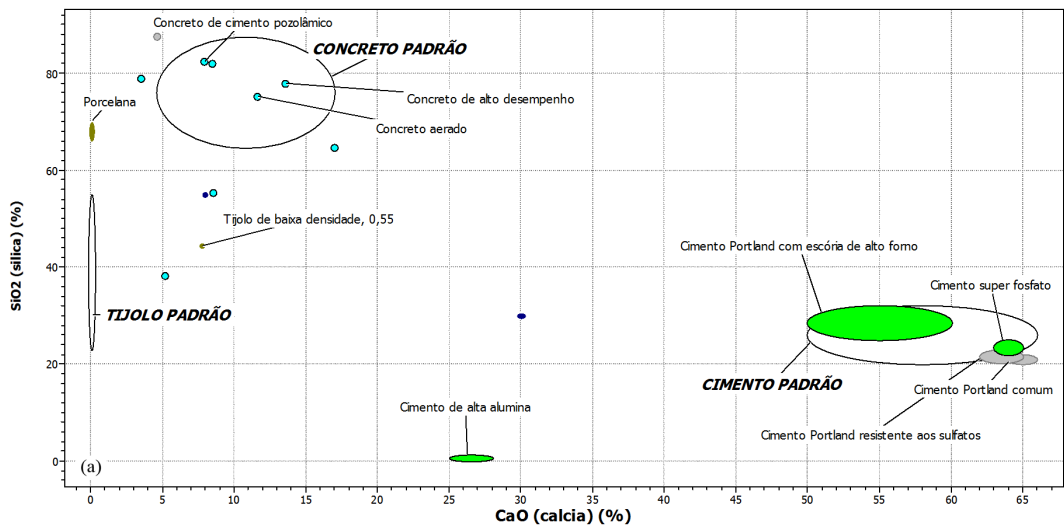


Figura 3. Relação composicional típica para produtos cerâmicos: (a) sílica em função de cálcia; (b) alumina em função de sílica.

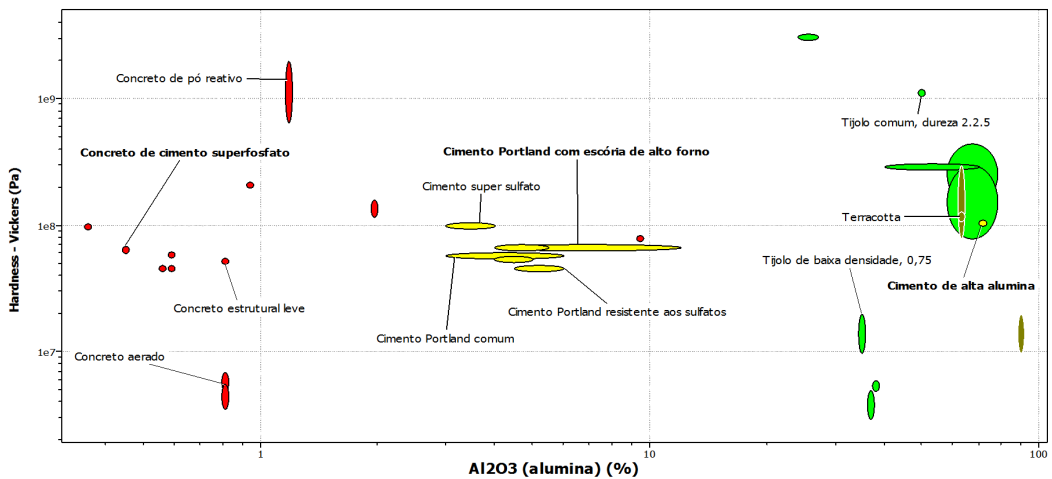


Figura 4. Dureza (Vickers) em função do teor de alumina.

Tabela 3. Resíduos industriais e matérias-primas naturais com sua respectiva composição química, possível utilização e ação de correção.

| Resíduo Industrial e Matéria-prima | Referência | Composição em óxidos (% em massa) | | | Utilização (mais eventual ação corretiva) |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------|-------|--|
| | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO | |
| Argila Carbonática | Oliveira, 2000 | 12 | 55 | 8 | Fora do padrão |
| Argila Gresificável | Oliveira, 2000 | 15 | 60 | 1 | Fora do padrão |
| Argila Plástica | Oliveira, 2000 | 22 | 55 | 0,1 | Tijolo (+ Al ₂ O ₃) |
| Argila Caulinítica | Oliveira, 2000 | 25 | 50 | 0,1 | Tijolo |
| Areia Feldspática | Oliveira, 2000 | 9 | 80 | 1 | Fora do padrão |
| Calcita | Oliveira, 2000 | 1 | 2 | 46 | Cimento (+SiO ₂) |
| Escória de Alto Forno (MG) | Moreira, 2006 | 3-18 | 20-40 | 12-30 | Cimento (+ CaO) |
| Lama FA | Raupp-Pereira, 2014 | 10,91 | 12,64 | 34,35 | Cimento (+ SiO ₂ + CaO) |
| Lama FA ** | Raupp- Pereira, 2014 | 8,76 | 5,34 | 51,95 | Cimento (+ SiO ₂) |
| Lama A | Raupp-Pereira, 2014 | 89,92 | 1,8 | 4,31 | Tijolo de alta alumina |

Tabela 4. Composições químicas dos produtos - clínquer CR1 e CR3.

| Formulações (clínquer) | Referência | Composição em óxidos (% em massa) | | | Utilização (mais eventual ação corretiva) |
|------------------------|---------------------|-----------------------------------|------------------|-------|---|
| | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO | |
| CR 1 | Raupp-Pereira, 2014 | 6,9 | 19,3 | 35,27 | Cimento (+ CaO) |
| CR 3 | Raupp-Pereira, 2014 | 8,46 | 1,96 | 43 | Cimento (+SiO ₂ + CaO) |

propriedades mecânicas, físicas, térmicas, elétricas e outras, a partir das ferramentas disponibilizadas pelo software. Para fins demonstrativos, foram selecionadas três relações de propriedades em função da composição (Figuras 4, 5 e 6).

Os resultados encontrados podem ser divididos em dois grupos distintos. O primeiro considera a quantidade percentual dos compostos químicos presentes nos resíduos selecionados e sua possibilidade de utilização como tijolos, cimentos ou concretos. O segundo verifica se é possível perceber alguma relação entre o percentual de sílica e alumina presente nos resíduos e sua influência nas propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas dos produtos a serem elaborados.

Em relação à composição química, os resultados encontrados demonstram que existe uma relação direta entre o teor de óxido de sílica, alumina e cálcia presentes nos resíduos com seu enquadramento nos grupos tijolos, cimentos ou concretos. Assim, por exemplo:

- A escória de alto forno contém de 3 a 18% de alumina, o que impossibilita seu uso como concreto, que permite apenas de 0,45 a 1,96% de alumina. A presença de 12 a 30% de cálcia descarta seu uso como tijolo, que não permite a presença desse composto químico. Portanto, a escória de alto forno só pode ser utilizada como cimento. Entretanto, deve-se adicionar CaO em quantidade suficiente para atingir os valores mínimos desse composto químico no cimento (Figuras 7a e 7b).

- Por sua vez, matérias-primas, como a argila carbonática, não se enquadram diretamente em nenhum desses três produtos: 12% de alumina a desabilita para seu uso como concreto; devido aos 8% de cálcia, não pode ser utilizada como tijolo; por ter 55% de sílica, não se enquadra nos cimentos. Dessa forma, a utilização direta da argila carbonática como um desses três produtos não é possível. Portanto, requer-se que seja misturada com outros resíduos ou componentes que levem os percentuais desses compostos químicos a níveis dentro dos valores aceitáveis para cimento ou concreto, uma vez que o tijolo não aceita cálcia, que deveria ser totalmente eliminado da matéria prima resultante.

Com a utilização do CES-Selector é possível inserir os resíduos em seu banco de dados e facilmente visualizá-lo no conjunto de materiais e produtos disponibilizados e identificar quais deles tem os compostos químicos mais apropriados para a destinação do resíduo. A Figura 7a mostra que a escória de alto forno se encaixa perfeitamente no padrão dos cimentos, quando avaliada com os percentuais de alumina e sílica, e o cimento Portland de escória de alto-forno se aproxima obviamente dessa composição. No entanto, pela Figura 7b é possível perceber a necessidade de se aumentar a quantidade de cálcia na escória para deixá-la apropriada para o uso como esse tipo de cimento.

Também é possível excluir alguns materiais, como por exemplo, o cimento de alta alumina, que não pode ser

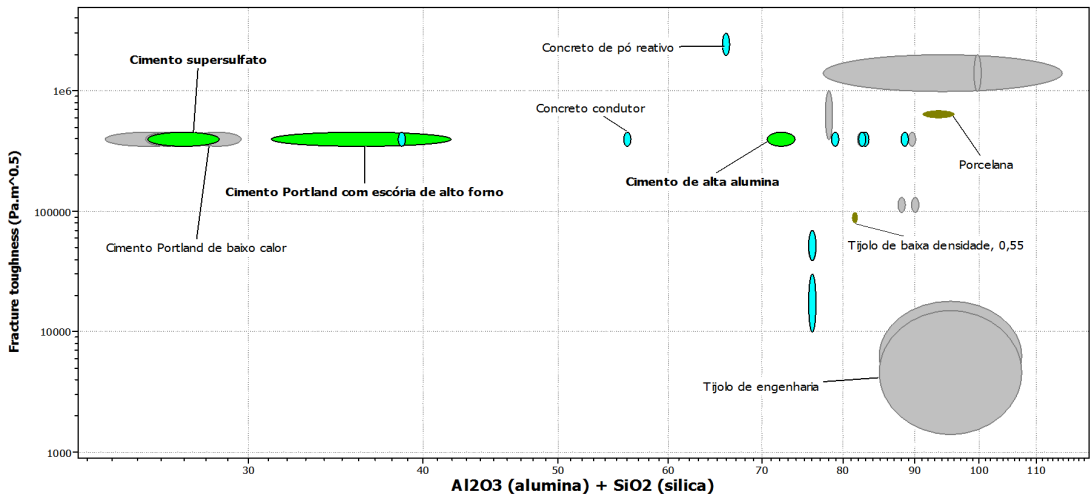


Figura 5. Percentual de (alumina + sílica) vs. tenacidade.

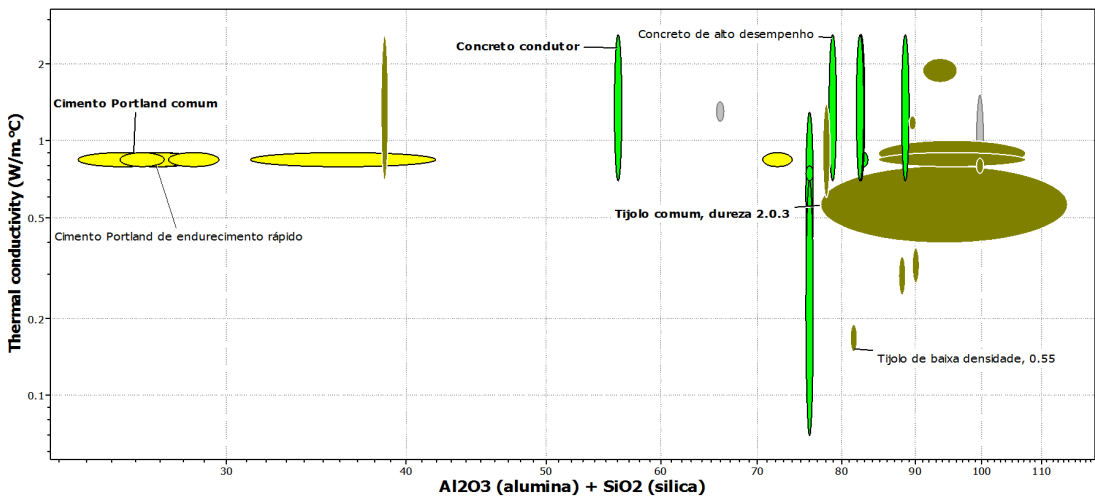


Figura 6. Percentual de (alumina + sílica) vs. condutividade térmica.

produzido com esse resíduo devido a não possuir em sua composição o silício nos teores encontrados na escória de alto forno avaliada.

Na sequência, procurou-se identificar alguma relação entre as propriedades mecânicas, físicas, elétricas e térmicas dos materiais selecionados com seus respectivos percentuais de sílica e alumina. Esse procedimento foi desenvolvido tanto de forma individual como de forma combinada, a fim de se constituírem padrões semelhantes aos conseguidos na primeira etapa. Caso esse objetivo fosse alcançado, seria possível pré-determinar essas propriedades quando os resíduos fossem utilizados como matéria prima de novos produtos.

Entretanto, o padrão desejado não foi encontrado, e os resultados não mostraram uma tendência ou correlação. Assim, a análise das propriedades requeridas para a utilização dos resíduos selecionados através apenas da

composição química torna-se insuficiente. Outros fatores são fundamentais, tais como características de projeto e processos de fabricação, além de parâmetros que só poderão ser identificados quando os resíduos forem processados e eventuais corpos de prova testados. Os resultados apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 dão suporte a essa análise:

- Na Figura 4, ao se avaliar a relação da percentagem de alumina com a dureza dos materiais, observa-se que vários produtos dos diferentes grupos têm dureza semelhante para diferentes percentuais de alumina. Por exemplo, para valores aproximados e retirados do gráfico, têm-se para dureza Vickers por volta de 70 MPa, o concreto super sulfato com 0,2% de alumina, o cimento Portland de escória de alto-forno com valores variáveis de 5 a 11% e o cimento de alta alumina com 90% de alumina.

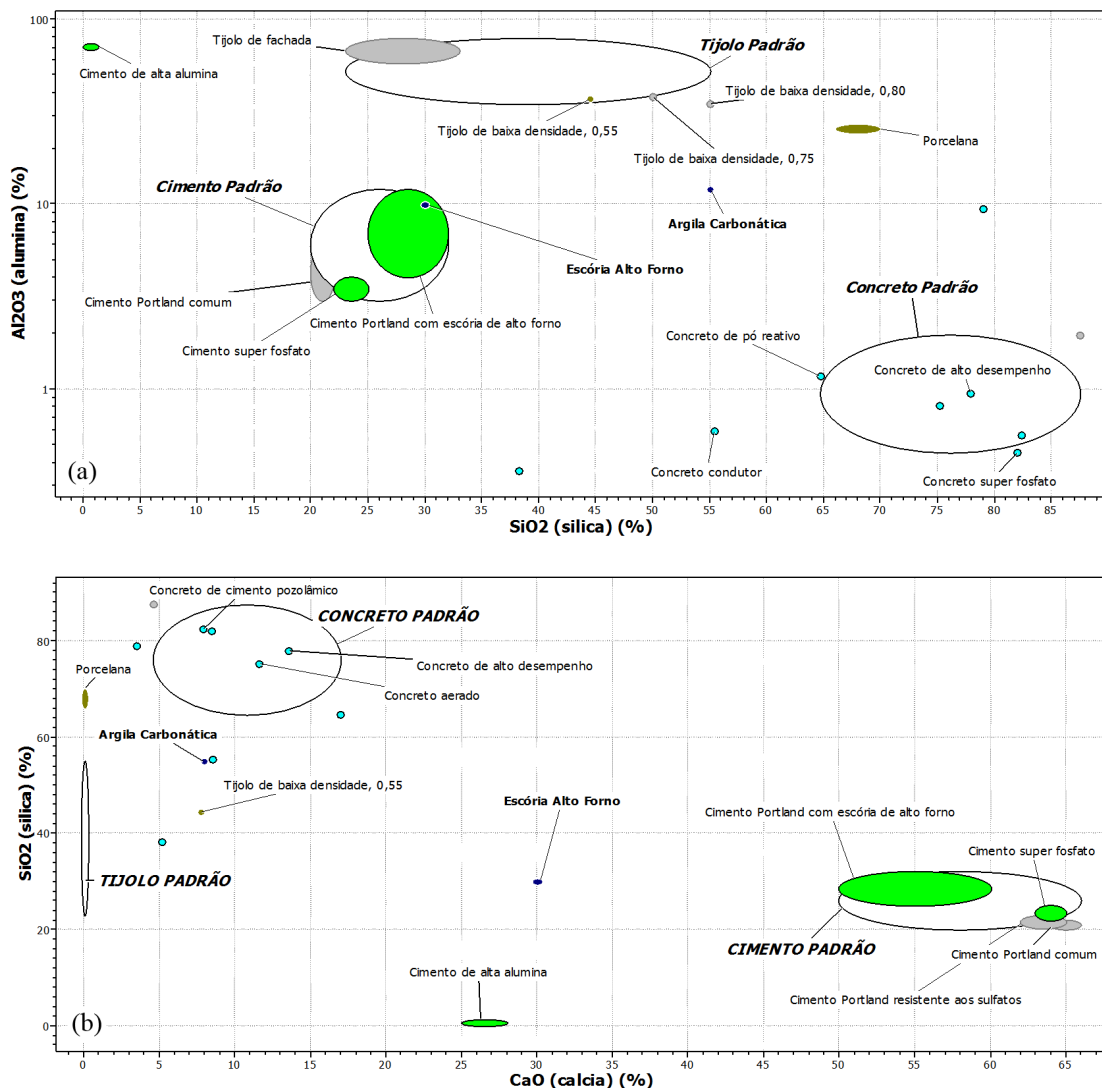


Figura 7. Visualização da escória de alto forno e seu enquadramento no grupo cimento, considerando seus percentuais de (a) alumina e sílica; (b) sílica e cálcia.

- A Figura 5, referente à relação da soma dos percentuais de sílica e alumina com a tenacidade do material, mostra que mesmo componentes de um mesmo grupo não possuem uma relação direta. Analisando-se o gráfico, é possível verificar que para um valor de tenacidade de 0,6 MPa√m, o cimento super fosfato possui entre 24 e 28% de sílica + alumina, o cimento Portland de escória de alto-forno possui entre 32 e 42% de sílica + alumina, e o cimento de alta alumina possui por volta de 72% de alumina + sílica.
- A Figura 6, que mostra a relação da soma dos percentuais de sílica + alumina com a condutividade térmica. Nesse caso, para uma condutividade térmica de 0,8 W/m°C, o cimento Portland comum possui entre 24 e 26% de sílica + alumina, um tipo

de concreto condutor possui por volta de 56% de sílica + alumina, e o tijolo comum de dureza 2,03 tem entre 80 e 100% de sílica + alumina.

As outras relações entre as propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas, não apresentadas, também apontam que a falta de relação persiste em todas as propriedades avaliadas. Não há indícios de que as demais propriedades dos materiais disponibilizadas no CES-Selector e não avaliadas neste trabalho, obterão resultados diversos dos aqui apresentados.

4. Conclusão

A reciclagem de resíduos industriais requer conhecimentos multidisciplinares que abrangem as áreas de engenharia, ciências sociais e técnicas de planejamento, onde a Ciência e Engenharia de Materiais tem papel relevante. De fato, os

materiais desempenham um papel crucial na problemática de relações entre tecnologia, economia e ambiente, pois sua correta utilização requer conhecimentos que englobam todo o ciclo de vida dos materiais. Relevante se faz desenvolver ferramentas que possibilitem maior eficácia na destinação correta dos resíduos industriais, de forma a diminuir seus custos iniciais de testes e ensaios necessários para a caracterização dos resíduos. A ferramenta avaliada nesse trabalho permitiu fomentar uma estratégia de seleção de materiais rápida e eficaz no projeto de produtos.

O resultado da validação de uma ferramenta para avaliar a potencialidade de resíduos industriais mostra que foi possível utilizar o software como um primeiro passo na definição da utilização do resíduo industrial como matéria prima para a elaboração de novos grupos. Ressalte-se que a análise neste trabalho se restringiu aos grupos de produtos: tijolos, cimentos e concretos, e mais três tipologias (revestimento cerâmico, terracota e porcelana).

É possível definir, após a análise química do resíduo, para qual grupo ele pode ser direcionado e qual material/produto, dentre os pertencentes ao grupo, têm características mais próximas que o resíduo pode alcançar. Por exemplo, a escória de alto forno com percentuais aproximados de 10% de alumina, 30% de cálcia e 30% de sílica pode ser utilizada como matéria prima para cimento. Como o cimento Portland de alto forno é o mais apropriado para esse resíduo, através de sua ficha de dados é possível prever quais as propriedades técnicas que esse resíduo terá após ser processado e utilizado como matéria prima desse tipo de cimento. Entretanto, não é possível prever as propriedades mecânicas, físicas, térmicas, elétricas e outras apenas com a análise química, uma vez que essas dependem do processamento do resíduo e definição do produto na qual o resíduo será transformado.

Por fim, é relevante lembrar que não foram avaliados outros softwares, não foram utilizados outros bancos de dados e tampouco utilizadas metodologias ou ferramentas externas ao software. A única informação inicial obtida dos resíduos avaliados foi sua composição química, obtida a partir de publicações na literatura. Além disso, os dados da composição química ficaram restritos aos óxidos de alumínio, silício e cálcio.

Portanto, o CES-Selector pode ser uma ferramenta útil na percepção do potencial de uso de resíduos, uma vez que pode indicar a melhor utilização destes materiais de forma a permitir ao projetista/pesquisador uma escolha apropriada de fonte alternativa mineral. Entretanto, torna-se importante ressaltar que a eficácia desta esta ferramenta está relacionada tanto à habilidade do operador do software, quanto ao conhecimento de materiais do projetista/pesquisador.

Referências

1. LUCAS, D.; BENATTI, C.T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em agronegócios e meio ambiente**. v. 1, n. 3, p. 405-418, set/dez, 2008.
2. RAUPP-PEREIRA, F. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias**, 2006, 134 f. Tese (Doutorado em ciência e engenharia dos materiais) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.
3. CASAGRANDE, M. C. et al. Reaproveitamento de resíduos industriais. Processamento e aplicação no setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 1/2, 34-42, 2008.
4. SILVA, E. S. A. **Um sistema informacional e perceptivo de seleção de materiais com enfoque no design de calçados**, 2005, 53 f. Dissertação (Mestrado profissionalizante em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
5. ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. New York, Elsevier, 2005.
6. MOREIRA, C. C. Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos. Disponível em <http://www.solocap.com.br/trabalhotecnico002.pdf>. Acesso em 12/12/2015.
7. SCHELESKI, S. Seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas. **Design & Tecnologia – PGDESIGN - UFRGS**. n.9, p. 29-41, 2015.
8. GRANTA DESIGN. Disponível em <<http://www.grantadesign.com/education/edupack/>>. Acesso em 19/01/2016.
9. MODESTO, C. et al. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 4, 14-18, 2003.
10. OLIVEIRA, A. P. N. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 6, 37-47, 2000.