

Metodologia para otimização da granulometria de *grits* e *dregs* para uso como adição mineral

Methodology for optimizing the granulometry of *grits* and *dregs* for use as mineral additions

Yasmine Simões de Oliveira¹

Gabriel Alves Ferreira¹

Eliane Betânia Carvalho Costa²

Resumo

Em 2020, a indústria de polpa celulósica *kraft* produziu no Brasil aproximadamente 21 milhões de toneladas de celulose, mantendo o país como o segundo maior produtor mundial de celulose (IBÁ, 2021). Diante disso, há uma grande preocupação relacionada aos impactos ambientais acarretados pelo aumento no volume de geração desses resíduos e consequente destinação incorreta destes. Dentre os resíduos gerados no processo *Kraft*, destacam-se os *dregs* e *grits*, que devido à sua constituição predominantemente de carbonato de cálcio, apresentam potencial para utilização como a adição mineral em substituição parcial ao cimento Portland, para isto, se faz necessário que estes possuam partículas com diâmetros inferiores a 75 μm (ABNT NBR 16697:2018). O objetivo do presente estudo propõe desenvolver uma metodologia para obtenção de partículas de *grits* e *dregs* com diâmetro inferior a 75 μm , por meio do moinho de abrasão Los Angeles e do peneiramento. Para isto, a metodologia proposta abrange as etapas descritas a seguir: i) a determinação da umidade inicial; ii) secagem das amostras; iii) determinação da distribuição granulométrica por peneiramento; iv) moagem por meio do equipamento de abrasão Los Angeles e peneiramento; v) ensaios laboratoriais (análise de imagem dinâmica e análise granulométrica por difração a laser). Pode-se constatar que o método de moagem adotado na presente pesquisa possibilitou uma redução de 99,4% e 99,7% no diâmetro médio das partículas dos *dregs* e *grits*, respectivamente, comprovando-se a efetividade da metodologia empregada e dos tempos adotados para a redução do tamanho das partículas.

Palavras-chave: método de moagem, *dregs* e *grits*, cimento Portland.

Abstract

In 2020, the kraft cellulosic pulp industry produced approximately 21 million tons of pulp in Brazil, keeping the country as the world's second largest pulp producer (IBÁ, 2021). Therefore, there is a great concern related to the environmental impacts caused by the increase in the volume of generation of these wastes and consequent incorrect disposal of these. Among the residues generated in the Kraft process, the *dregs* and *grits* stand out, which due to their predominantly calcium carbonate constitution, have potential for use as the mineral addition in partial replacement to Portland cement, for this, it is necessary that they have particles with diameters less than 75 μm (ABNT NBR 16697:2018). The aim of this study proposes to develop a methodology for obtaining particles of *grits* and *dregs* with a diameter of less than 75 μm , through the Los Angeles abrasion mill and the sieving, for this, the proposed methodology covers the steps described below; i) the determination of initial humidity; (ii) drying of samples; iii) determination of the granulometric distribution by sieving; iv) grinding by means

¹ Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, yasmine.oliveira@ufu.br, gabrielalves@ufu.br

² Professora da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, elianeбетania@ufu.br

of Los Angeles abrasion and sieving equipment; v) laboratory tests (dynamic imaging analysis and particle size analysis by laser diffraction). It can be seen that the grinding method adopted in the present study allowed a reduction of 99.4% and 99.7% in the average diameter of dregs and grits particles, respectively, proving the effectiveness of the methodology employed and the times adopted to reduce particle size.

Keywords: grinding method, dregs and grits, Portland cement.

INTRODUÇÃO

Em 2020, a indústria brasileira produziu aproximadamente de 21 milhões de toneladas de celulose, mantendo o país como o segundo maior produtor mundial (IBÁ, 2021). Segundo Suzano (2021)¹, empresa brasileira de papel e celulose, somente a unidade Três Lagoas produziu um volume aproximado de 3,2 milhões de toneladas de celulose no ano de 2020, gerando 364 mil toneladas de resíduos, dos quais, 33 mil toneladas de *dregs* e *grits*. Com base nestes dados, estima-se que foram gerados 2,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo 218 mil toneladas de *dregs* e *grits*.

Os resíduos minerais *dregs* e *grits* são geralmente classificados como resíduos Classe II-A, sendo eles não perigosos e não inertes ABNT NBR 10004:2004. De acordo com Foelkel (2011), os *dregs* consistem em um material com coloração escura provenientes da clarificação do licor verde, resultado de uma queima incompleta do licor em uma caldeira para recuperação e precipitação dos produtos químicos, como Al, Mg, Mn, Fe, Co, P, Si, Ca. Os *grits* são gerados no processo de apagamento da cal, ou seja, da transformação do CaO para o Ca(OH)₂, consistindo principalmente de cal virgem excessivamente queimada (ou mesmo sinterizada) e de carbonatos e inertes não hidratados.

A composição típica desses resíduos é predominantemente de carbonato de cálcio (> 50%), sobretudo nos *grits*, podendo conter elementos como carbonato de sódio (Na₂CO₃), óxido de magnésio (MgO) e sulfitos metálicos (CASTRO *et al.* 2009; KINNARINEN *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2019).

Dada a sua constituição, uma das possibilidades de aplicação de tais resíduos é como adição mineral em substituição parcial do cimento. Atualmente, em virtude da necessidade de redução dos impactos ambientais ocasionados na produção de cimento, pesquisas têm sido desenvolvidas para determinar percentuais de adições alternativas na composição do cimento (SNIC, 2019; BENTZ; FERRARIS; SNYDER, 2013). Há uma variedade de materiais cimentícios suplementares como meio de otimizar a quantidade do uso do clínquer a partir de subprodutos industriais e tratamento térmico dos recursos naturais, porém algumas apresentam limitações em função da quantidade disponível (LOTHENBACH, SCRIVENER, HOOTON, 2011).

As adições minerais, finamente moídas, quando inseridas na matriz cimentícia podem desenvolver o efeito físico, químico ou ambos. O efeito físico consiste no preenchimento dos vazios deixados pelas partículas maiores, melhorando o empacotamento do sistema, sendo denominado efeito *filler*. Um dos requisitos físicos estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2018 para os diferentes tipos de cimento brasileiros é a finura, determinada pelo resíduo na peneira de 75 µm.

¹ Informação recebida por <rodrigolima.timenow@suzano.com.br> em: 13 out. 2021)

Portanto, para a aplicação dos *grits* e *dregs* como adição mineral em substituição ao cimento é imprescindível a otimização da granulometria das partículas. Desta forma, o presente estudo propõe desenvolver uma metodologia para redução do tamanho das partículas de *grits* e *dregs*, utilizando moinho de abrasão Los Angeles e peneiramento para obtenção de grãos inferiores a 75 μm . As características físicas dos *grits* e *dregs* serão comparados com as de um cimento Portland de alta resistência inicial.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiais

Os materiais utilizados foram o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV) e os resíduos *dregs* e *grits*. Estes foram obtidos por meio de doação da empresa Suzano S.A., unidade localizada na rodovia BR158, km 298 s/n na zona rural do município de Três Lagoas - MS.

Equipamentos

Para realização do processo de moagem, utilizou-se o equipamento de abrasão Los Angeles (Contenco modelo C-3021), em conformidade com a ABNT NBR 16974:2021, com velocidade aproximada de 30 rpm e 13 esferas de aço com aproximadamente 48 mm de diâmetro.

Métodos

Após chegada dos resíduos no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia Civil/UFU, foi determinado o teor de umidade inicial dos mesmos, por meio da secagem de amostras em estufa por 24h a uma temperatura de 100°C. Posteriormente, procedeu-se à realização do ensaio para obtenção da distribuição granulométrica destes. O ensaio foi realizado em conformidade com a ABNT NBR NM 248:2003 utilizando-se um agitador mecânico modelo VSM200 da ViaTest.

Inicialmente, foi realizada a tentativa de moagem utilizando-se 27 esferas e 3 kg de material, retirando-se amostras a cada trinta minutos até o limite de três horas de moagem. As amostras eram peneiradas para acompanhamento da eficiência do método de moagem ao longo do tempo determinada pela quantidade de material passante na peneira de 75 μm . Porém, constatou-se a baixa eficiência da moagem com tais valores, pois somente 9% do material moído apresentou partículas com dimensões inferiores a 75 μm . Sendo assim, foi feita a alteração da quantidade de esferas e massa de material, 13 e 5 kg de material para cada ciclo de moagem, respectivamente.

Em concomitância com esta etapa, foram retiradas amostras dos materiais em cada tempo de moagem pré-estabelecido para ensaio de análise de imagem dinâmica. Para esse, foi utilizado o equipamento Camsizer P4 localizado no Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER/UFU), obtendo-se como resultados a esfericidade e o fator de forma das partículas para cada tempo analisado. A esfericidade é obtida a partir de uma relação entre a área e o perímetro das partículas; e o fator de forma é a razão entre o comprimento e a largura das partículas.

Após definição do tempo de moagem, foi realizado o peneiramento das partículas utilizando peneira de malha igual a 75 μm . Após moagem das partículas, foi feita a homogeneização e o ensaio de análise granulométrica por difração a laser no equipamento Malvern Mastersizer 2000, localizado no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI/UFU). Por meio deste, foi possível obter as curvas granulométricas do cimento, *dregs* e *grits*, bem como parâmetros físicos essenciais para a

utilização destes resíduos em substituição ao cimento Portland, sendo eles os diâmetros D10, D50 e D90, além da área superficial específica.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 são apresentados os resíduos *dregs* e *grits in natura*. O teor de umidade inicial foi de 66,2% e 5,3% para os *dregs* e *grits*, respectivamente.

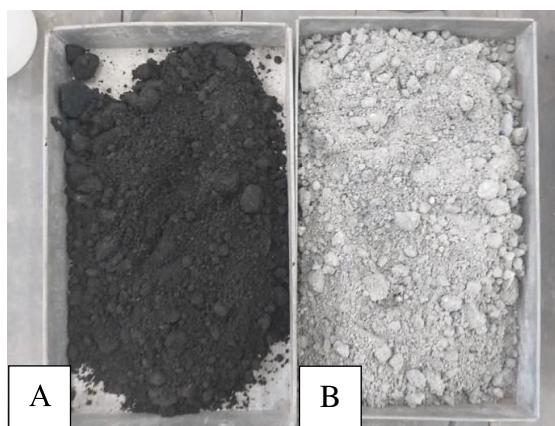


Figura 1- Resíduos *dregs* (A) e *grits* (B) *in natura*
Fonte: Os autores (2021)

Na Figura 2 apresentam-se as curvas de distribuição granulométrica dos resíduos *in natura*, bem como os parâmetros D10, D50 e D90 para ambos materiais.

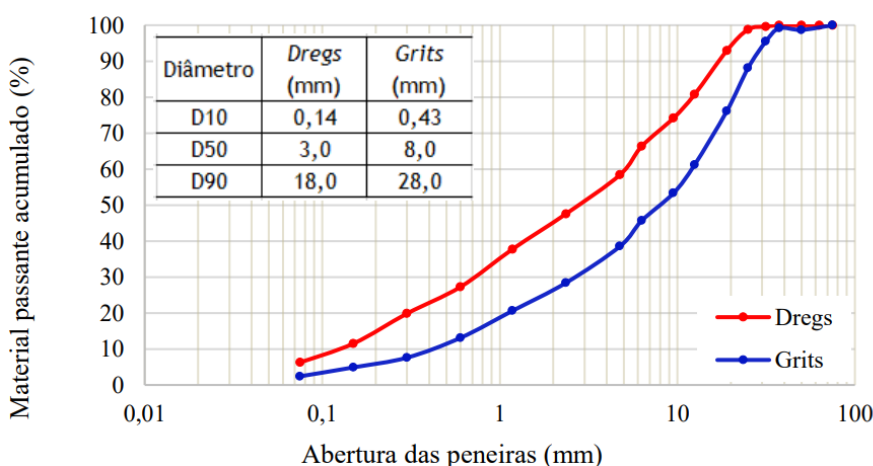


Figura 2 - Distribuição granulométrica dos resíduos *dregs* e *grits*.
Fonte: Os autores (2021)

Ambos resíduos apresentam curvas granulométricas bem graduadas, segundo critério de coeficiente de não uniformidade (CNU) sugerido por Pinto (2006). Os *dregs* apresentam um maior teor de finos (diâmetro inferior a 75 μm) 6% se comparado aos *grits*, com apenas 2%. Os *dregs* também apresentaram os diâmetros D10, D50 e D90 inferiores aos dos *grits*, conforme apresentado na Figura 2.

A eficiência da moagem ao longo do tempo está apresentada na Figura 3. Em comparação com os resíduos *in natura*, nota-se que houve um aumento da quantidade de partículas inferiores a 75 μm , sendo de 53% e 69% para os *dregs* e *grits*, respectivamente.

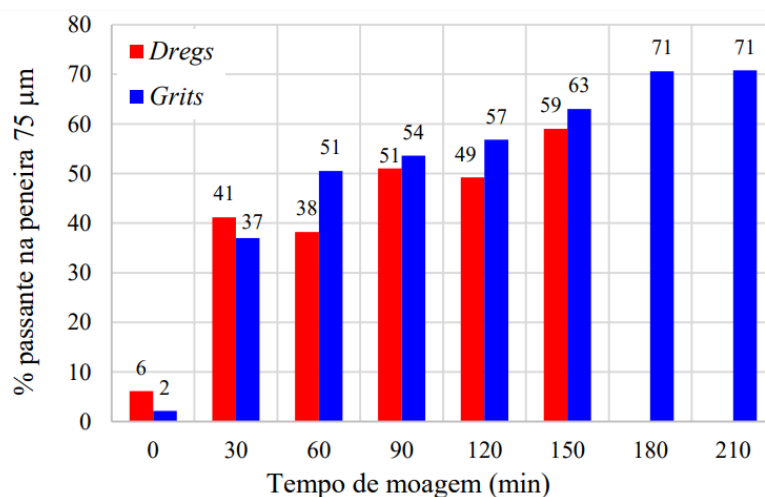


Figura 3 - Eficiência da moagem dos resíduos ao longo do tempo.
Fonte: Os autores (2021)

Para a definição do tempo de moagem ideal para ambos os resíduos, levou-se em consideração a eficiência atingida em cada tempo, bem como o dispêndio energético para a realização da moagem. Baseando-se em tais critérios, foram adotados os tempos de moagem igual a 180 minutos para os *grits* e 150 minutos para os *dregs*. Justifica-se a ausência dos dados relacionados aos *dregs* para os tempos de 180 e 210 minutos, pelo aparecimento do efeito de aglomeração das partículas com a presença de “placas”, implicando na diminuição da efetividade de cominuição das partículas.

Na Tabela 1 estão apresentados a esfericidade e o fator de forma partículas em função do tempo de moagem. Nesta, também se apresenta a classificação das partículas obtida pela correlação entre o fator de forma obtido e os parâmetros da ABNT NBR7389-1:2009 baseada em Powers (1953).

Tabela 1- Parâmetros físicos obtidos para os resíduos *dregs* e *grits*

Material	Tempo de moagem (min.)	Esfericidad e média	Fator de forma médio	Classificação das partículas segundo Powers (1956)
<i>Dregs</i>	0	0,788	0,746	Muito arredondada
	30	0,597	0,628	Arredondado
	60	0,640	0,636	Arredondado
	90	0,638	0,633	Arredondado
	120	0,660	0,641	Arredondado
	150	0,635	0,639	Arredondado
	180	0,650	0,651	Arredondado
<i>Grits</i>	0	0,738	0,704	Muito arredondada
	30	0,573	0,601	Arredondado
	60	0,557	0,596	Arredondado
	90	0,595	0,610	Arredondado
	120	0,611	0,616	Arredondado
	150	0,617	0,625	Arredondado
	180	0,651	0,651	Arredondado

Fonte: Os autores (2021)

De modo geral, houve redução na esfericidade e no fator de forma das partículas de ambos resíduos, com pequenas oscilações ao longo do tempo. Isso ocorre principalmente pela fratura das partículas que ocorre durante a moagem com o equipamento de abrasão Los Angeles. O mecanismo de impacto no qual as partículas são submetidas geram partículas menores, porém com mais arestas e, conseqüentemente, menor esfericidade, apresentando formas diferenciadas. Na Figura 4 apresenta-se uma representação esquemática da fragmentação das partículas pelo mecanismo de impacto.



Figura 4 - Representação da fragmentação de partícula com mecanismo de fratura por impacto
Fonte: Kelly e Spottswood (1982) apud Nunes (2012)

Segundo Powers (1953) em função do formato das partículas, elas podem ser classificadas em partículas muito angulares, angulares, sub angulares, subarredondadas, arredondadas ou muito arredondadas. Para os tempos estabelecidos de moagem, os *dregs* e *grits* apresentaram formato arredondado o que, de acordo com Selig e Rober (1987), faz com que o material apresente menor índice de vazios.

Os resíduos *grits* e *dregs* após o processo de beneficiamento são apresentados na Figura 5.



Figura 5 - Resíduos *grits* (A) e *dregs* (B) após o processo de moagem
Fonte: Os autores (2021)

Na Figura 6 apresenta-se a distribuição de frequência dos diâmetros das partículas dos resíduos *dregs* e *grits*, obtidos por meio do ensaio de difração a laser. Os parâmetros físicos como D10, D50, D90, área superficial específica e a porcentagem de partículas com diâmetros inferiores a 75 μm são apresentados na Tabela 2.

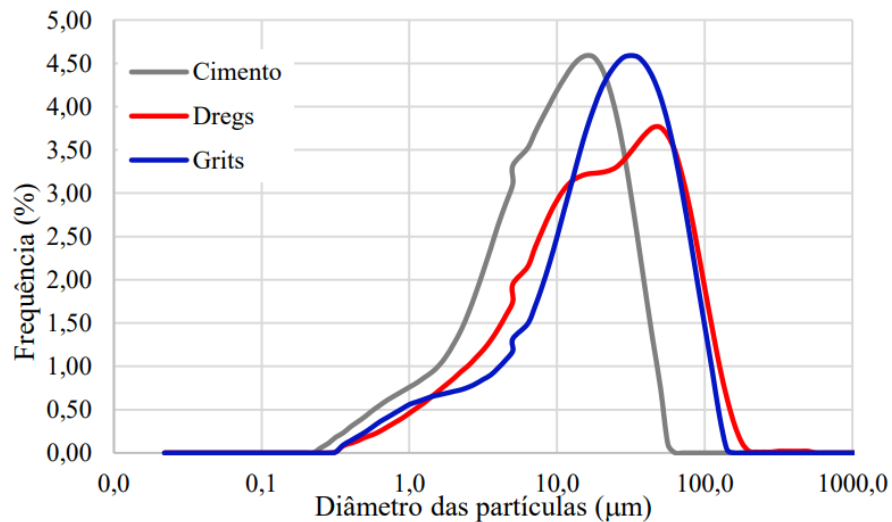


Figura 6 - Distribuição granulométrica por difração a laser para os *dregs* e *grits*
 Fonte: Os autores (2021)

Tabela 2 - Parâmetros obtidos por granulometria a laser

Material	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Área superficial específica (m ² /g)	Partículas com diâmetro inferior à 75µm (%)
Cimento	1,8	9,5	27,7	1,5	99,98
<i>Dregs</i>	2,9	19,5	73,1	0,9	89,24
<i>Grits</i>	3,0	21,7	64,0	0,9	92,67

Fonte: Os autores (2021)

Observa-se que o cimento apresenta maior finura que os resíduos, a área superficial foi 1,66 vezes superior aos dos resíduos e as partículas possuem diâmetro médio igual 9,5 µm. Ambos resíduos apresentaram mesmo valor de área superficial específica e pode-se verificar que 90% das partículas dos *grits* e *dregs* apresentaram diâmetros inferiores a 75 µm (D90), conforme requisito da ABNT NBR 16697:2018a. Isso mostra a efetividade do processo de moagem adotado para os *grits* e *dregs*. A não totalidade das partículas com diâmetros inferiores a 75 µm, se deve à existência de imperfeições nas malhas das peneiras utilizadas.

CONCLUSÕES

O método de moagem adotado na presente pesquisa possibilitou uma redução de 99,4% e 99,7% no diâmetro médio das partículas dos *dregs* e *grits*, respectivamente, comprovando-se a efetividade dos tempos adotados para a redução do tamanho das partículas. O diâmetro médio das partículas, após a moagem, dos *grits* e *dregs* foi de 19,5 µm e 21,7 µm.

A esfericidade e o fator de forma das partículas sofreram pequenas alterações ao longo do tempo. De acordo com os critérios de classificação, essas apresentam formato arredondado, o que possibilita a melhoria no empacotamento das partículas, e consequente, diminuição da porosidade dos materiais.

No que tange à aplicação dos mesmos como adição mineral para produção de matrizes cimentícias, o método de moagem foi eficiente para adequar as características físicas dos resíduos *grits* e *dregs*. Porém, são necessários ensaios químicos para avaliação dos efeitos destes na hidratação, trabalhabilidade, propriedades físicas, bem como análises microestruturais e de durabilidade para uso destes em substituição parcial ao cimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Suzano S.A, em especial à unidade Três Lagoas-MS pela doação dos resíduos *dregs* e *grits*, ao laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER/UFU) pela realização da análise dinâmica de imagem e ao Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI/UFU) pela realização da análise granulométrica por difração a laser.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7389-1: Agregados — Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 1: Agregado miúdo. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16974: Agregado graúdo — Ensaio de abrasão Los Angeles. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Guia ABTCP – Fornecedores e Fabricantes: 2019/2020. São Paulo, 2020. Disponível em: http://www.guiacomprascelulosepapel.org.br/publicador/edicoes_impresas/15.pdf. Acesso em: 17 out 2021.

BENTZ, D. P.; FERRARIS, C. F.; SNYDER, K. A. “Best practices guide for high-volume fly ash concretes: assuring properties and performance”, NIST Technical Note 1812, (2013).

CASTRO, Fernando; VILARINHO, Candida; TRANCOSO, Delfim; FERREIRA, Paula; NUNES, Fernando; MIRAGAIA, Augusto. Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production. International Journal of Materials Engineering Innovation, v. 1, n. 1, p. 74, 2009. DOI: 10.1504/IJMATEI.2009.024028.

FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto. Parte 05: Resíduos Minerais. ABTCP, 2011. Disponível em: <file:///C:/Users/Windows%2010/Desktop/ARTIGO%20-%20SPEC%202021/PT25_ResiduosMinerais.pdf> . Acesso em: 18 de out de 2021.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Cenários IBÁ: - Estatísticas da Indústria Brasileira de Árvores -1º trimestre de 2021, 2021. Disponível em: https://iba.org/datafiles/publicacoes/cenarios/66cenarios_2.pdf. Acesso em: 13 out. 2021.

KINNARINEN, T. et al. Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 953–964, 2016.

LOTHENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R.D.. Supplementary cementitious materials. *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1244-1256, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

NUNES, Andréia de Lourdes. Modelagem e simulação do circuito de moagem da Votorantim Metais Zinco Morro Agudo. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019, 64 p.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POWERS, M. C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, v. Vol. 23, 1953. PII: D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D. DOI: 10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D

SANTOS, V. R.; CABRELON, M. D.; TRICHÊS, E. S.; QUINTEIRO, E. Green liquor dregs and slaker grits residues characterization of a pulp and paper mill for future application on ceramic products. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, 2019.

SELIG, Ernest T.; RONER, Carl J. Effects of Particle Characteristics on behavior of Granular Material. *TRANSPORTATION R*