

CAIO MOREIRA MIQUELINO ELETO TORRES

**INCORPORAÇÃO DE DREGS E GRITS DE FÁBRICAS DE POLPA CELULÓSICA
KRAFT AO CLÍNQUER PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016**

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

T693i
2016 Torres, Caio Moreira Miquelino Eleto, 1988-
Incorporação de *dregs* e *grits* de fábricas de polpa
celulósica kraf ao clínquer para a produção de cimento Portland /
Caio Moreira Miquelino Eleto Torres. – Viçosa, MG, 2016.
xii, 94f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Cláudio Mudadu Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.52-57.

1. Indústria de celulose. 2. Resíduos industriais. 3. Celulose
kraft. 4. Cimento . I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 634.986

CAIO MOREIRA MIQUELINO ELETO TORRES

INCORPORAÇÃO DE *DREGS* E *GRITS* DE FÁBRICAS DE POLPA CELULÓSICA
KRAFT AO CLÍNQUER PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 13 de julho de 2016



Prof^a Ana Augusta Passos Rezende



Prof. Leonardo Gonçalves Pedroti
(Coorientador)



Prof. Cláudio Mudadu Silva
(Orientador)

“Não é o que você juntou, e sim o que você espalhou que reflete como você viveu a sua vida.”

Autor desconhecido

“Se tiver o hábito de fazer as coisas com alegria, raramente encontrará situações difíceis.”

Robert Stephenson Smyth Baden Powell “BP”

A Deus, aos meus queridos pais, irmãos, familiares e amigos...

AGRADECIMENTOS

A DEUS, este Ser maravilhoso, que nos ilumina e dá força durante a caminhada.

Aos meus pais, Carlos Magno “Magoo” e Marina, pela inspiração e incentivo na busca do conhecimento.

Aos meus irmãos, Carlos e Camila, por serem magníficos, generosos, fraternos e felizes.

A Bruna pelo carinho, incentivo e paciência antes e durante o percurso.

A Tia Mariza, Tio Cesar, Fabiane e Tiago pelo apoio nas pesquisas, correções e elaboração dos ensaios.

Aos meus amigos irmãos que sempre estão me apoiando, Fernando, Matheus, Mauricio, Marco Aurélio, Ana P., Cassiano, Amanda, Marcelo e Brunin.

Ao Professor Claudio Mudadu Silva, pela oportunidade e generosidade na forma de agir e falar nas orientações profissionais, acadêmicas e pessoais.

Ao professor Leonardo Gonçalves Pedroti, pela acolhida, orientação e paciência em repassar informações e conhecimento, que foram essenciais para elaboração da pesquisa.

Aos Engenheiros Civis e amigos, Welington, Roseli, Gustavo, Felipe, João, Anderson Natália e Lorena, pela paciência, aprendizagem e crescimento profissional que me proporcionaram durante o pouco tempo no laboratório.

Aos colegas e amigos do LCP e LMC em geral, e em especial à Marcela, Jú, Nayara, Raffles, Rafael, Larissa, Raquel, Ismarley, Rogério, Alice, Erika, Samily, Bruno, Fernando, Luis, Carlinhos, Negão, Diego, Zé Carlos e Herly.

Aos alunos, funcionários do DEF, amigos da salinha da pós pela alegria em especial Sr. Paulo, Alexandre, Dilson, Beth, Cris, Breda, Crismeire, Eliane e Guilherme “peixe”.

Não menos importante a Marina Zanão pela amizade, companheirismo, conselhos e incentivo nos estudos diários.

Aos demais amigos, citados ou não, a dedicação de todos os servidores e estudantes do DEF e DEC;

À Bioforest, Fapemig e CNPq pelo apoio no suporte das pesquisas.

Ao escotismo que sempre norteou a minha vida, principalmente ao GEAMG 23º Baleia.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Processo de produção de polpa celulósica Kraft branqueada	4
3.1.1. Resíduos sólidos gerados no processo Kraft	6
3.1.1.1. Caracterização dos Dregs	7
3.1.1.2. Caracterização do Grits	8
3.1.2. Utilização atual dos dregs e grits.....	9
3.1.2.1. Resíduos sólidos aplicados no solo	10
3.1.2.2. Resíduos sólidos aplicados em estradas florestais.....	10
3.1.2.3. Resíduos sólidos aplicados em cerâmica.....	10
3.2. Processo de produção de clínquer.....	11
3.2.1. Produção de clínquer	14
3.2.1.1. Produção de clínquer com resíduos da indústria celulósica kraft.....	14
3.2.1.2. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental	15
3.2.1.3. Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar	15
3.2.1.4. Influencia do Blaine no cimento Portland	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1. Material.....	16
4.2. Metodologia	16
4.2.1. Caracterização dos materiais	18
4.2.1.1. Massa Específica	18
4.2.1.2. Área Específica no permeabilímetro de Blaine	18
4.2.1.3. Finura	19
4.2.1.4. Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X – EDX.....	19
4.2.1.5. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	20
4.2.1.6. Difratomia de Raios X – DRX	21
4.2.1.7. Atividade pozolânica.....	21
4.2.1.8. Análises termogravimétricas (TG/DTG).....	22
4.2.2. Ensaio referentes aos materiais cimentícios	22
4.2.2.1. Confeção dos corpos de prova.....	23

4.2.2.2.	Consistência normal	25
4.2.2.3.	Tempos de pega.....	25
4.2.2.4.	Expansibilidade Le Chatelier	26
4.2.2.5.	Resistência a compressão	26
4.2.2.6.	Módulo estático de elasticidade à compressão.....	27
4.2.3.	Análise Estatística	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1.	Caracterização dos Materiais	28
5.1.1.	Clínquer	28
5.1.1.1.	Caracterização do clínquer	28
5.1.1.2.	Composição química	29
5.1.1.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	29
5.1.1.4.	Composição mineralógica	31
5.1.2.	Dregs e Grits.....	32
5.1.2.1.	Caracterização dos dregs e grits	32
5.1.2.2.	Pozolanicidade dos dregs e grits	32
5.1.2.3.	Composição química dos dregs e grits	32
5.1.2.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	33
5.1.2.5.	Composição mineralógica	35
5.1.2.6.	Análise térmica.....	36
5.2.	Ensaio referentes aos materiais cimentícios.....	38
5.2.1.	Tempos de pega.....	38
5.2.2.	Expansibilidade Le Chatelier	39
5.2.3.	Evolução da resistência à compressão e média estatística	40
5.2.4.	Módulo estático de elasticidade à compressão.....	42
5.2.5.	Resistência à compressão com variação do Blaine	45
6.	CONCLUSÕES	51
7.	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A – PROPRIEDADES DO CLÍNQUER PORTLAND	58
	APÊNDICE B – PROPRIEDADES DOS DREGS E GRITS.....	61
	APÊNDICE C – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 2,5% DE DREGS.....	63
	APÊNDICE D – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 2,5% DE GRITS.....	65
	APÊNDICE E – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 5% DE DREGS.....	67
	APÊNDICE F – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 5% DE GRITS.....	69
	APÊNDICE G – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 7,5% DE DREGS	71
	APÊNDICE H – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 7,5% DE GRITS.....	73
	APÊNDICE I – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 10% DE DREGS.....	75

APÊNDICE J – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 10% DE GRITS	77
APÊNDICE K – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 15% DE DREGS	79
APÊNDICE L – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 15% DE GRITS.....	81
APÊNDICE M – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM SUBSTITUIÇÕES DE DREGS.....	83
APÊNDICE N – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO COM SUBSTITUIÇÕES DE DREGS	85
APÊNDICE O – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM SUBSTITUIÇÕES DE GRITS.....	87
APÊNDICE P – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO COM SUBSTITUIÇÕES DE GRITS	89
APÊNDICE Q – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM SUBSTITUIÇÕES DE 10% DREGS EM DIFERENTES ÁREAS.....	91
APÊNDICE R – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM SUBSTITUIÇÕES DE 10% GRITS EM DIFERENTES ÁREAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do processo de produção de celulose kraft branqueada.....	4
Figura 2. Fluxograma do ciclo de recuperação química do processo Kraft. Os resíduos sólidos do ciclo são marcados com um asterisco e estão em vermelho.....	6
Figura 3. Dregs.....	8
Figura 4. Grits	9
Figura 5. Fluxograma do processo para fabricação de cimento Portland.....	12
Figura 6. Fluxograma esquemático do plano experimental.....	16
Figura 7. Amostras in natura (a) clínquer; (b) dregs e (c) grits.....	17
Figura 8. Equipamentos para moagem (a) Moinho de bolas; (b) Pulverizador e (c) Graal e pistilo de porcelana.....	17
Figura 9. Amostras peneiradas (a) clínquer; (b) dregs e (c) grits.....	17
Figura 10. Materiais para o ensaio de área de permeabilidade de Blaine.	19
Figura 11. Micro EDX 1300 shimadzu.	20
Figura 12. Microscópio Eletrônico de Varredura (a) Quanta FEG 3D FEI e (b) Leo 1430VP.	21
Figura 13. Difratorômetro de raios-x Bruker D8-Discover Davinci.....	21
Figura 14. Ensaio de atividade pozolânica.	22
Figura 15. Argamassadeira, misturador mecânico.	25
Figura 16. Corpos de provas (a) Moldados e (b) Desmoldados e devidamente identificados.	25
Figura 17. Máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL600KN.....	26
Figura 18. Ensaio de módulo de elasticidade com clip gage.....	27
Figura 19. MEV e EDS com o clínquer em pó (a) imagem com magnificação de 1.000x. (b) imagem com magnificação de 2.000x. (c) gráfico de EDS com os teores dos elementos.....	30
Figura 20. DRX do clínquer.....	31
Figura 21. MEV e EDS com o dregs em pó (a) imagem com magnificação de 1.000x. (b) imagem com magnificação de 2.000x. (c) gráfico de EDS com os teores dos elementos.....	34
Figura 22. MEV e EDS com o grits em pó (a) imagem com magnificação de 1.000x. (b) imagem com magnificação de 2.000x. (c) gráfico de EDS com os teores dos elementos.....	35

Figura 23. DRX do dregs e grits.	36
Figura 24. Curvas TG/DTG do dregs com fluxo de ar sintético (50 mL min ⁻¹) e razão de aquecimento 10°C min ⁻¹	37
Figura 25. Curvas TG/DTG do grits com fluxo de ar sintético (50 mL min ⁻¹) e razão de aquecimento 10°C min ⁻¹	37
Figura 26. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados coma as porcentagens de: (a) Dregs e (b) Grits...	40
Figura 27. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos dregs e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos dregs.....	41
Figura 28. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos grits e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos grits.	42
Figura 29. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade: (a) Dregs. e (b) Grits	43
Figura 30. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos dregs e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos dregs.....	44
Figura 31. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos grits e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos grits.	45
Figura 32. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com as porcentagens de 0 e 10% de: (a) Dregs e (b) Grits.	46
Figura 33. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão com porcentagens de substituição de 0 e 10%) dos dregs: (a) com área específica do clínquer de 246m ² /kg; (b) com área específica do clínquer de 369m ² /kg e (c) com área específica do clínquer de 441m ² /kg.....	48
Figura 34. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão com porcentagens de substituição de 0 e 10% dos grits: (a) com área específica do clínquer de 246m ² /kg; (b) com área específica do clínquer de 369m ² /kg e (c) com área específica do clínquer de 441m ² /kg.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resíduos sólidos do processo Kraft branqueada de uma indústria de celulose e papel.	7
Tabela 2. Características químicas dos dregs (peso seco).	8
Tabela 3. Características químicas dos grits (peso seco).	9
Tabela 4. Composição química típica do clínquer.	11
Tabela 5. Teores dos compostos do cimento Portland	12
Tabela 6. Resumo das exigências químicas, físicas e mecânicas dos cimentos Portland	13
Tabela 7. Abreviaturas dos óxidos e compostos típicos do cimento Portland.	14
Tabela 8. Composição química típica do cimento Portland.	14
Tabela 9. Dosagem de materiais para o clínquer experimental.	23
Tabela 10. Proporção de materiais utilizados para confecção de corpos de prova.	24
Tabela 11. Caracterização do clínquer.	28
Tabela 12. Composição química do clínquer, em (%).	29
Tabela 13. Caracterização dos dregs e grits.	32
Tabela 14. Composição química por EDX dos dregs e grits (%).	33
Tabela 15. Resultados dos ensaios de massa, área específica e finura.	38
Tabela 16. Resultados do ensaio de tempos de pega.	39
Tabela 17. Resultados do ensaio de expansibilidade le chatelier.	39

RESUMO

TORRES, C. M. M. E., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho, 2016. **Incorporação de dregs e grits de fábricas de polpa celulósica kraft ao clínquer para a produção de cimento Portland.** Orientador: Cláudio Mudadu Silva. orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti

Durante os últimos anos, a indústria de polpa celulósica kraft no Brasil vêm se expandindo. Alinhado a esse crescimento industrial, há uma preocupação com o aumento da geração e a forma de disposição final dos seus resíduos sólidos. Estes devem ser tratados adequadamente e, quando não reaproveitados, dispostos em local ambientalmente apropriado. Os resíduos gerados no processo kraft são, em sua grande maioria, classificados como resíduos Classe II-A de acordo com a NBR 10.004, ou seja, não perigosos e não inertes. O objetivo desta pesquisa foi estudar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos sólidos alcalinos denominados dregs e grits, que são normalmente encaminhados a aterros industriais, ao clínquer em diferentes proporções como matéria-prima na indústria de cimento. A metodologia inserida inclui as seguintes etapas: i) caracterização física e química dos resíduos e do clínquer; ii) preparação de amostras utilizando diferentes misturas de substituições (0; 2,5; 5; 7,5; 10 e 15 %) de dregs e grits in natura no clínquer; e iii) ensaios laboratoriais (expansibilidade Le Chatelier, tempos de pega, determinação da pasta de consistência normal, resistência a compressão e módulo estático de elasticidade). Os resultados mostraram que as adições dos resíduos até 10% foram satisfatórias, por estarem dentro dos limites estabelecidos nas normas.

ABSTRACT

TORRES, C. M. M. E., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016. **Dregs and grits incorporation from kraft pulp mills clinker for Portland cement production.** Advisor: Cláudio Mudadu Silva. Co-Advisor: Leonardo Gonçalves Pedroti.

In recent years, kraft pulp mills have been expanding in Brazil. In line with this industrial growth, there has been a concern about the increase in waste generation and disposal. This waste must be properly treated and, when reuse is not possible, it must be disposed in an environmentally sound manner. Pulp mill wastes are classified as non-hazardous and non-inert according to the Brazilian NBR 10.004. The objective of this research was to study the technical feasibility of the incorporation of alkaline waste called dregs and grits, to clinker in different proportions as raw material in the cement industry. The research was carried out in the following steps: i) characterization of wastes and clinker; ii) preparation of samples using different proportions (0, 2.5, 5, 7.5, 10 and 15%), of dregs and grits; iii) laboratory testing (determination of soundness by the Le Chatelier method, determination of setting times, determination of water content of the paste with normal consistency, determination of compressive strength and static modulus of elasticity). The results showed that the additions of dregs and grits to the clinker up to 10% were feasible according to the Portland cement Brazilian standards.

1. INTRODUÇÃO

Fábricas de polpa celulósica kraft branqueada têm se expandido rapidamente dentro do setor florestal brasileiro. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016), o Brasil ocupa o 4º lugar entre os produtores mundiais de polpa celulósica, com 17,37 milhões de toneladas produzidas, ultrapassado somente pelos EUA, China e Canadá. A perspectiva é de que, em 2017, a produção ultrapasse os 19 milhões de toneladas e o Brasil passe a ocupar a 3ª posição no ranking mundial.

Alinhado a esse crescimento industrial, há um aumento na geração de resíduos sólidos. Os resíduos gerados nesse tipo de indústria devem ser tratados adequadamente e, quando não reaproveitados, devem ser dispostos em um local ambientalmente apropriado. Os resíduos do processo de produção da polpa celulósica kraft se originam nas estações de tratamento de água e efluentes, no pátio de madeiras, no ciclo de recuperação química do licor, na caldeira de biomassa, entre outros. Os resíduos em sua grande maioria são classificados como resíduos Classe II-A de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), ou seja, não perigosos e não inertes.

Dentre os principais resíduos sólidos do processo de polpação kraft, no processo de caustificação e calcinação são gerados os dregs e os grits, respectivamente. Os dregs são provenientes da clarificação do licor verde sendo considerados como impurezas oriundas principalmente do carbono, hidróxidos e sulfetos de metais, tendo um pH em torno de 11. Sua geração é expressiva podendo alcançar valores de 15 kg.tsa^{-1} de polpa produzida. Os grits são originados no apagamento da cal sendo classificada como uma cal não reagida (não calcinada) que são sedimentadas no fundo do apagador e removidos através de um raspador ou parafuso de Arquimedes. Sua geração de aproximadamente 5 kg.tsa^{-1} de polpa produzida. Ambos são denominados resíduos alcalinos e sua disposição final tem sido normalmente aterros industriais (BIERMANN, 1993; GAVRILESCU, 2004; KRIGSTIN e SAIN, 2006 e WOLFF, 2008).

O reaproveitamento desses resíduos como matéria prima para outros fins é uma opção atrativa, para a sua destinação. Estudos tem sido realizados para aplicação direta ao solo, para correção do pH, produção de cerâmica e pavimentação de estradas (SOUZA e CARDOSO, 2008; MACHADO et al., 2006).

As características físico-químicas dos dregs e dos grits indicam um potencial para a produção de cimento, uma vez que contém uma alta proporção de carbonato de cálcio. O

processo produtivo da fabricação de cimento consome relativamente altos volumes de matérias-primas naturais. Para fabricação do cimento são empregados materiais calcários, argilosos e gesso. Dentre os vários processos de fabricação do cimento o mais comum é denominado Portland que consiste em moer as matérias-primas, misturá-las nas proporções adequadas e queimar essa mistura em um forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450°C. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão desenvolvendo pelotas de nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sinterizado, denominado clínquer (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ISAIA, 2010).

Considerando a recente abordagem da Ecologia Industrial onde se busca encontrar soluções integradas entre várias tipologias industriais, ou seja, aproveitamento de materiais em que numa tipologia geradora tem sido considerado resíduo, mas que em outra indústria o mesmo material pode ser considerado matéria prima, o presente estudo tem por objetivo avaliar a viabilidade técnica do uso de dregs e grits na fabricação de cimento Portland.

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura que abordam o uso de dregs e grits na produção de clínquer (CASTRO et al., 2009) e o uso desses resíduos como agregado do concreto (SEYYEDALIPOUR et al., 2014). Não se encontrou na literatura atual qualquer estudo técnico científico que permita concluir a viabilidade de se adotar as porcentagens adequadas de dregs e/ou grits como matéria prima na fabricação de cimento Portland.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho objetivou estudar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos sólidos alcalinos denominados dregs e grits, gerados no setor de recuperação do licor das fábricas de polpa celulósica kraft, como matéria prima na substituição parcial do clínquer para a produção de cimento Portland.

Os objetivos específicos foram:

- Caracterização química do clínquer e dos dregs e grits;
- Verificação dos principais parâmetros de qualidade do cimento Portland,
- Determinação das porcentagens de mistura aceitáveis na incorporação de dregs e de grits ao clínquer para a produção de cimento Portland.
- Avaliação da influência do grau de moagem do clínquer na qualidade do cimento Portland, após incorporação de 10% de dregs e grits.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Processo de produção de polpa celulósica Kraft branqueada

A produção de polpa celulósica é definida por diversos processos químicos como soda, kraft, sulfito e por processos mecânicos. No Brasil, há uma maior produção de polpa celulósica química, tendo como principal processo o Kraft (IBÁ, 2016). Este tipo de processo tem como objetivo a separação das fibras de celulose e hemicelulose dos demais componentes constituintes da estrutura da madeira, em particular a remoção da lignina e extrativos (BRITT, 1965; COLODETTE e GOMES, 2015).

A produção de polpa celulósica kraft baseia-se no cozimento da madeira com uma solução aquosa constituída de hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na₂S), que através do efeito de pressão e temperaturas entre 160 e 180°C levam à despolimerização, à separação das fibras e dissolução das moléculas de lignina (MORAIS, 2007; GOMIDE, 1979; COLODETTE e GOMES, 2015). A polpa produzida passa por um processo de lavagem e depuração e segue para o setor de branqueamento. O licor proveniente da lavagem da polpa segue para o denominado processo de recuperação do Licor Negro. A Figura 1 mostra um fluxograma esquemático do processo.

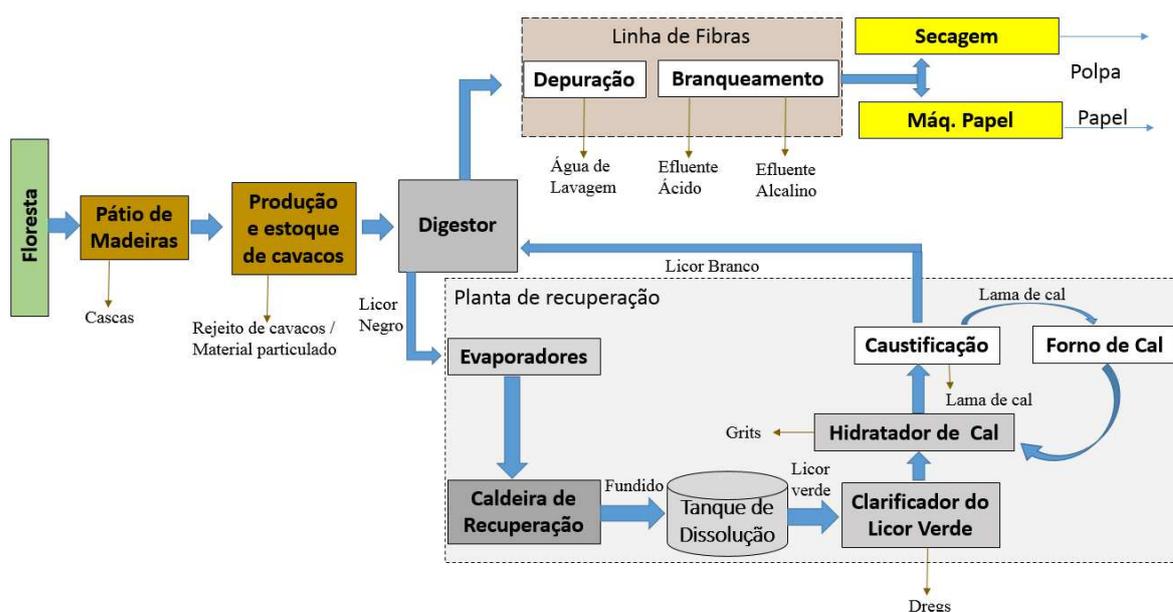


Figura 1. Fluxograma do processo de produção de celulose kraft branqueada.

Fonte: Adaptado do MATA, 2016.

A principal característica do processo kraft corresponde à eficiente recuperação dos reagentes utilizados, que retornam ao digestor com uma perda máxima de 5% (GOMIDE,1979; COLODETTE e GOMES, 2015). O ciclo de recuperação química se inicia na lavagem da polpa, onde ocorre a remoção de materiais orgânicos e inorgânicos dissolvidos no licor preto e misturados com a polpa, ao final do cozimento da madeira, com a mínima quantidade de água limpa ou recirculada do processo.

O licor preto fraco (proveniente da lavagem da polpa) é submetido à evaporação, para elevação do teor de sólidos de cerca 15% para 70-80% (dependendo da eficiência do processo), transformando-se em licor preto forte. Este é enviado para a caldeira de recuperação, onde a matéria orgânica concentrada (lignina, extrativos, etc.) é queimada, produzindo vapor e a gera energia elétrica para o processo.

O material inorgânico “smelt” gerado no fundo da caldeira segue para um tanque onde é resfriado com adição de licor branco fraco ou em água, sendo então denominado licor verde. O licor verde possui componentes indesejáveis, chamados de dregs, que são provenientes da combustão incompleta do licor, e devem ser eliminados através de um processo de decantação e filtração (GUERRA, 2007; SILVA e MORAIS, 2013; BAJPAI, 2015).

Na etapa seguinte – caustificação – o licor verde clarificado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{S}$), livre dos dregs, reage com cal hidratada – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando licor branco ($2\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$) e lama de cal (CaCO_3). A cal que não reage sedimenta-se e é removido do sistema, sendo esse resíduo sólido denominado grits.

A lama de cal, após lavagem, é enviada para o forno de cal onde será recuperada e o licor branco é enviado para clarificação e em seguida estocado para ser usado no processo de polpação novamente. A Figura 2 mostra esquematicamente o setor de recuperação do licor (MARTINS et al., 2007; BAJPAI, 2015).

forno de cal está em manutenção) (GUERRA, 2007; SILVA e MORAIS, 2013; BAJPAI, 2015).

Os principais resíduos sólidos alcalinos do processo de recuperação de licor da indústria de polpa celulósica kraft branqueada estão apresentados na Tabela 1, sendo identificados em cada etapa do processo e demonstrando aproximadamente a quantidade em kg.tsa⁻¹.

Tabela 1. Resíduos sólidos do processo Kraft branqueada de uma indústria de celulose e papel.

FONTE	TIPOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS	kg.tsa ⁻¹ (A)	kg.tsa ⁻¹ (B)	kg.tsa ⁻¹ (C)
Clarificador do Licor Verde	Dregs	10 – 30	31,1	10 – 20
Planta de Caustificação	Grits	15 – 40	8,9	10 – 20
Manutenção do forno	Lama de Cal	5 – 10	3,8	10 – 20

Fonte: Adaptado da A – (GAVRILESCU, 2004); B – (CENIBRA, 2009); e C – (IPPC, 2013).

Cada fábrica trata e dispõe os seus resíduos alcalinos de forma variada. Apesar da grande quantidade de resíduos gerada, não existe um procedimento totalmente viável para o reaproveitamento dos mesmos (KRIGSTIN e SAIN, 2006; MONTE et al, 2009; ABUBAKR et al., 1995).

3.1.1.1. Caracterização dos Dregs

Os dregs são materiais insolúveis que advêm da lavagem do clarificador do licor verde (Na₂CO₃, Na₂S). São pequenas partículas sólidas de cor escura, Figura 3, tendo em sua composição: cal de reposição, sulfato de cálcio, silicatos e aluminatos, corrosão dos digestores, evaporadores e tubulações e partículas de combustão incompleta. Constituem em um material com teores de composto de carbono, silício, ferro, alumínio, magnésio, manganês, cálcio, cloretos e sulfetos (MATIAS, 2012; MODOLO, 2006; SENAI-CETCEP, 2013).

Os dregs devem ser removidos do processo com o pH controlado, pois suas características são prejudiciais para a viabilidade do ciclo de recuperação química do sistema. Eles devem ser filtrados para a recuperação dos reagentes para o processo (GREEN e HOUGH, 1992).



Figura 3. Dregs.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Algumas características físico-químicas dos dregs são apresentadas Tabela 2 (CABRAL et al., 2008; ALMEIDA et al., 2007 e BRANCO, 2011).

Tabela 2. Características químicas dos dregs (peso seco).

Características	Dregs		
	(A)	(B)	(C)
pH	--	12,8	--
Carbonato de Cálcio Equivalente (%)	80	--	--
Nitrogênio (N) (%)	0,01	--	0,01
Fósforo (P) (%)	0,16	--	--
Potássio (K) (%)	0,31	0,12	0,64
Cálcio (Ca) (%)	25	35,41	23
Magnésio (Mg) (%)	3,54	0,92	1,30
Sódio (Na) (%)	7,08	1,02	6,70
Alumínio (Al) (%)	0,25	--	--
Ferro (Fe) (%)	0,41	0,30	--

Fonte: Adaptado de A – (CABRAL et al., 2008); B – (ALMEIDA et al., 2007); C – (BRANCO, 2011).

3.1.1.2. Caracterização do Grits

Os grits são materiais insolúveis que através a hidratação da cal virgem (CaO) ou cal do forno de cal para Ca(OH)_2 são gerados e retirados do sistema através de sistema de “rosca de Arquimedes”. As caracterizações dos grits indicam se constituir de um material rico em cálcio (MACHADO et al. (2003, 2006); PEREIRA et al. (2005); SOUZA E CARDOSO (2008). Possui uma aparência de areia, pedregulho, calcário (CaCO_3) e outras impurezas conforme mostra a, Figura 4. Pode possuir, também, quantidades de CaO, Ca(OH)_2 e Na_2CO_3 (MACHADO et al., 2007). A perda ao fogo elevada e o alto teor de CaO (óxido de cálcio) confirmam a constituição carbonática do resíduo (SOUZA e CARDOSO, 2008). O pH menor que 12 dos grits também deve ser controlado para sua destinação correta (GREEN e HOUGH, 1992).



Figura 4. Grits

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Algumas características físico-químicas dos grits são apresentadas na Tabela 3 (CABRAL et al. 2008; MARTINS et al., 2007; e ZAMBRANO et al., 2010).

Tabela 3. Características químicas dos grits (peso seco).

Características	Grits		
	(A)	(B)	(C)
pH	12,6	--	12,73
Carbonato de Cálcio Equivalente (%) (CCE)	85,00	--	--
Nitrogênio (N) (%)	0,01	--	--
Fósforo (P) (%)	0,17	0,47	0,30
Potássio (K) (%)	0,08	0,43	0,11
Cálcio (Ca) (%)	41,72	34,62	30,00
Magnésio (Mg) (%)	0,36	0,92	0,33
Sódio (Na) (%)	1,04	6,44	0,92
Alumínio (Al) (%)	0,17	1,72	0,26
Ferro (Fe) (%)	0,22	1,03	0,11

Fonte: Adaptado de A – (CABRAL et al. 2008); B – (MARTINS et al., 2007); e C – (ZAMBRANO et al., 2010).

3.1.2. Utilização atual dos dregs e grits

A grande maioria das fabricas de polpa celulósica Kraft direciona os dregs e grits para seus aterros industriais. Existem estudos realizados para o reaproveitamento desses resíduos como matéria prima para outros fins, que apresentam opções atrativas para o seu gerenciamento (GUERRINI, 2003; ALMEIDA et al, 2007; ZAMBRANO et al., 2010; WOLFF, 2008; PEREIRA, 2005; MACHADO et al., 2006 e 2003). Dentre estas opções pode-se citar:

- aplicação no solo para fins de correção de pH;
- pavimentação das estradas;
- produção de cimento, cerâmica e tijolos.

3.1.2.1. Resíduos sólidos aplicados no solo

A incorporação dos dregs e grits no solo tem se tornado, no Brasil, em uma das opções principais para a destinação final de resíduos. As suas características químicas apresentam potencial uso como corretivos de pH do solo. No entanto, esta capacidade é variável com o tipo de solo e inerente às suas características específicas, assim como às condições climáticas do ambiente onde estão inseridos. Também, deve-se atentar ao fato de causarem riscos de poluição ambiental, e alterar os atributos físico-químicos do solo (TEIXEIRA, 2003).

O uso de resíduos alcalinos dregs e grits em áreas agrícolas pode favorecer o desenvolvimento das culturas. A utilização dos mesmos deve ser controlada e mesclada com o uso de outros fertilizantes, para que não ocorra impactos ambientais e alteração na qualidade do solo. São necessários estudos mais aprofundados e específicos para cada tipo de localidade (ALMEIDA et al., 2007; ZAMBRANO et al., 2010).

3.1.2.2. Resíduos sólidos aplicados em estradas florestais

De acordo com MACHADO (2003), os grits têm potencial para estabilização de solos de pavimentos de estradas florestais. A utilização dos grits para a pavimentação de estradas florestais, como geomateriais através da técnica de estabilização química de solos é uma alternativa de grande potencial. Entretanto, a adição indiscriminada do mesmo no solo pode causar poluição das águas subterrâneas pela infiltração e percolação de líquidos contaminados (MACHADO et al., 2006 e 2003; PEREIRA, 2005).

3.1.2.3. Resíduos sólidos aplicados em cerâmica

Segundo a WOLFF (2008), o lodo primário do sistema primário do tratamento de efluentes juntamente com o uso dos dregs, grits e da lama de cal da fábrica de celulose e papel kraft tem potencial de serem utilizados na confecção de blocos de cerâmica vermelha. Tais materiais podem auxiliar na formação de fases cristalinas responsáveis pela maior

resistência mecânica à flexão do material cerâmico. Entretanto, os ensaios quantitativos e a análise estatística dos dados não demonstraram tal viabilidade.

3.2. Processo de produção de clínquer

De acordo com a definição da ASTM C 150, clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetros de material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias-primas, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, filito, quartzito e magnetita, de composição pré-determinada são aquecidas em altas temperatura. Seus principais compostos estão dispostos na Tabela 4. O cimento Portland é o cimento mais usado em todo mundo. Trata-se de um cimento hidráulico de alta resistência produzido pela moagem de clínqueres com adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Tabela 4. Composição química típica do clínquer.

Óxido	Abreviação	Teor (%)
CaO	C	18 – 66
SiO ₂	S	11 – 53
Al ₂ O ₃	A	05 – 50
Fe ₂ O ₃	F	04 – 14

Fonte: Adaptado de ITAMBÉ, 2010.

Conforme NEVILLE (1997), a fabricação do cimento Portland baseia-se na mistura de materiais que promovem reações químicas e possuem finura controlada, especialmente, calcários, gesso, argila e óxido de ferro. O processo para fabricação do cimento Portland resumidamente apresentada na Figura 5, inicia-se na extração de rocha calcária das jazidas. São trituradas por um processo de britagem, para que possa obter proporções adequadas de mistura com as matérias-primas e logo moê-los para a formação de farinha crua. Essa mistura é queimada em um forno rotativo, que consiste de um cilindro de aço inclinado revestido com tijolos refratários, onde podem ser atingidas temperaturas de 1450 a 1550 °C, ocorrendo, assim, reações químicas. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão, através da clinquerização, desenvolvendo pelotas, conhecidas como clínquer, sendo considerado como o principal etapa do processo. Após formação do clínquer, este é resfriado e moído, até um pó fino, geralmente menor que 75 µm (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

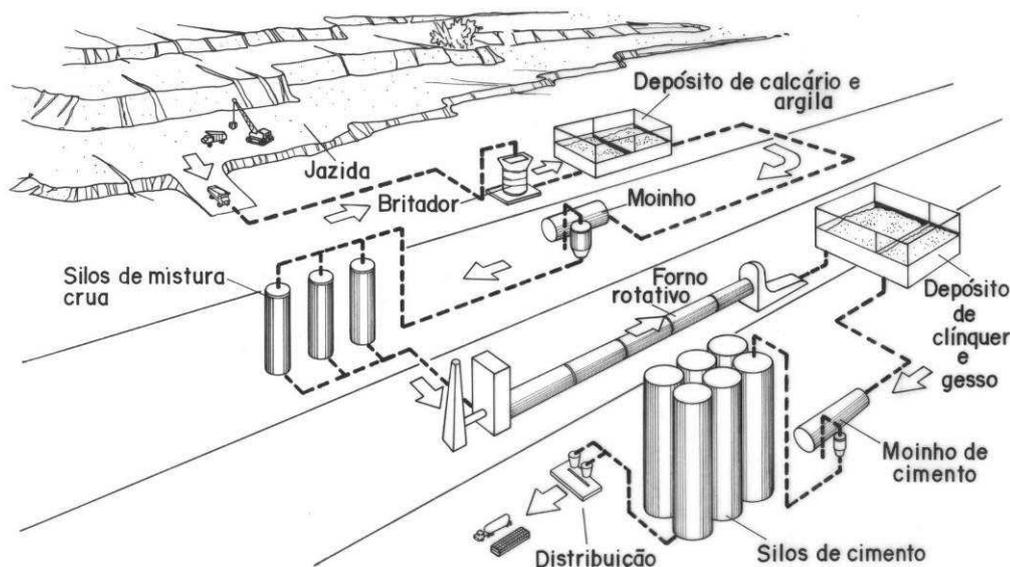


Figura 5. Fluxograma do processo para fabricação de cimento Portland.

Fonte: Adaptado de LAFARGE, 2015.

Após estas etapas, são acrescentados diferentes quantidades de sulfato de cálcio ao aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual resulta no cimento Portland. Pode-se adicionar com a proporção de clínquer Portland, durante a moagem, também, adições, tais como materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

A classificação do cimento Portland é feita de acordo com a sua composição química e o seu grau de moagem. Dessa forma, no mercado brasileiro, existem vários tipos de cimento Portland, sendo os principais comercializados os tipos CPII, CPIII e CPV. O CPI não é comercializado e o CPIV é muito pouco usado.

A composição para identificação de cada tipo de cimento deve estar compreendida entre os limites fixados na Tabela 5:

Tabela 5. Teores dos compostos do cimento Portland

Especificação	Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
			Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
NBR 5.732	CP I	25 / 32 / 40	100		0	
	CP I-S	25 / 32 / 40	99 – 95		1 – 5	
	CP II-E	25 / 32 / 40	94 – 56	6 – 34	---	0 – 10
NBR 11.578	CP II-Z	25 / 32 / 40	94 – 76	---	6 – 14	0 – 10
	CP II-F	25 / 32 / 40	94 – 90	---	---	6 – 10
NBR 5.735	CP III	25 / 32 / 40	65 – 25	35 – 70	---	0 – 5
NBR 5.736	CP IV	25 / 32	85 – 45	---	15 – 50	0 – 5
NBR 5.733	CP V-ARI	---	100 – 95	---	---	0 – 5

Fonte: Adaptado pelo autor com base em ABNT, 1991.

Suas principais características referentes às exigências químicas, físicas e mecânicas estão resumidas na Tabela 6, que mostram os limites aceitáveis para cada tipo de cimento Portland.

Tabela 6. Resumo das exigências químicas, físicas e mecânicas dos cimentos Portland

Especificação	NBR 5.732	NBR 11.578	NBR 5.735	NBR 5.736	NBR 5.733
Sigla	CP I-S 32 ⁽¹⁾	CP II-E 32 ⁽²⁾	CP III-32 ⁽³⁾	CP IV-32 ⁽⁴⁾	CP V ARI ⁽⁵⁾
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 5,0%	≤ 2,5%	≤ 1,5%	---	≤ 1,0%
Perda ao Fogo (PF)	≤ 4,5%	≤ 6,5%	≤ 4,5%	≤ 4,5%	≤ 4,5%
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5%	≤ 6,5%	---	≤ 6,5%	≤ 6,5%
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0%	≤ 4,0%	≤ 4,0%	≤ 4,0%	≤ 4,5%
Anidrido carbônico (CO ₃)	≤ 3,0%	≤ 5,0%	≤ 3,0%	≤ 3,0%	≤ 3,0%
Resíduo na peneira nº 200	≤ 12%	≤ 12%	≤ 8%	≤ 8%	≤ 6%
Área específica Blaine	≥ 260 m ² /kg	≥ 260 m ² /kg	---	---	≥ 300 m ² /kg
Tempo de início de pega	≥ 1 h	≥ 1 h	≥ 1 h	≥ 1 h	≥ 1 h
Tempo de fim de pega	≤ 10 h	≤ 10 h	≤ 12 h	≤ 12 h	≤ 10 h
Expansibilidade a quente	≤ 5 mm	≤ 5 mm	≤ 5 mm	≤ 5 mm	≤ 5 mm
Expansibilidade a frio	≤ 5 mm	≤ 5 mm	≤ 5 mm	≤ 5 mm	≤ 5 mm
Resistência					
1 dia de idade	---	---	---	---	≥ 14 MPa
3 dias de idade	≥ 10 MPa	≥ 10 MPa	≥ 10 MPa	≥ 10 MPa	≥ 24 MPa
à 7 dias de idade	≥ 20 MPa	≥ 20 MPa	≥ 20 MPa	≥ 20 MPa	≥ 34 MPa
28 dias de idade	≥ 32 MPa	≥ 32 MPa	≥ 32 MPa	≥ 32 MPa	---
91 dias de idade	---	---	---	≥ 40 MPa	---

⁽¹⁾ Cimento Portland Comum (CP I), da classe de resistência 32 MPa (ABNT, 1991);

⁽²⁾ Cimento Portland Composto (CP II), da classe de resistência 32 MPa (ABNT, 1991);

⁽³⁾ Cimento Portland de Alto-Forno (CP III), da classe de resistência 32 MPa (ABNT, 1991);

⁽⁴⁾ Cimento Portland Pozolânico (CP IV), da classe de resistência 32 MPa (ABNT, 1991); e

⁽⁵⁾ Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) (ABNT, 1991).

Fonte: Adaptado pelo autor com base em ABNT, 1991.

Os compostos químicos do cimento Portland são expressos pela soma de seus óxidos representados pelos elementos presentes, sendo essencialmente de vários compostos de cálcio. As principais abreviaturas dos óxidos individuais e compostos presentes no cimento Portland são expressadas na Tabela 7 (TAYLOR, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Tabela 7. Abreviaturas dos óxidos e compostos típicos do cimento Portland.

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	3CaO SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO 3Al ₂ O ₃ SO ₃	C ₄ A ₃ \bar{S}
Álcalis (K ₂ O e Na ₂ O)	KN	---	---
SO ₃	\bar{S}	3CaO 2SiO ₂ 3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ 2H ₂ O	C \bar{S} H ₂

Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008.

O cimento Portland possui em sua composição alguns componentes químicos, conforme mostrado na Tabela 8, e que são encontrados também na composição química dos dregs e grits. Existe, assim, um grande potencial de uso desses resíduos provenientes da indústria de polpa celulósica para a fabricação de cimento Portland. Pode-se considerar o seu uso antes da formação do clínquer ou como aditivo junto com a adição do gesso (BURUBERRI et al., 2015; CASTRO et al., 2009).

Tabela 8. Composição química típica do cimento Portland.

Óxido	Abreviação	Teor (%)
CaO	C	61 – 67
SiO ₂	S	20 – 23
Al ₂ O ₃	A	4,5 – 07
Fe ₂ O ₃	F	2,5 – 3,5
MgO	M	0,8 – 06
Álcalis (K ₂ O e Na ₂ O)	KN	0,3 – 1,5
SO ₃	\bar{S}	01 – 2,3

Fonte: Adaptado de PETRUCCI e PAULON, 1998.

3.2.1. Produção de clínquer

3.2.1.1. Produção de clínquer com resíduos da indústria celulósica kraft

De acordo com Buruberry et al., (2015) e Castro et al., (2009), os resíduos da indústria celulósica kraft tem compatibilidade química e vantagens ambientais e energéticas para a produção de clínquer a partir de resíduos da indústria de pasta de papel

A produção do “Eco-clínquer Portland” foi realizada a partir da adição dos resíduos industriais como matéria-prima, obtendo-se valores inferiores de temperaturas para a

clínquerização completa, ocasionado principalmente pela presença das impurezas mineralizantes de alguns resíduos.

3.2.1.2. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental

Com a preocupação da extração excessiva de materiais não renováveis, matérias-primas virgens, para a produção de cimento Portland, Costa et al., (2009) realizou pesquisa com intuito de amenizar impactos na geração da fabricação do clínquer Portland com adição de um resíduo da indústria siderúrgica, escória do forno panela (EFP).

Os resultados foram viáveis para pesquisa, sendo uma emissão de CO₂ menor do que a referência e uma melhor eficiência na queimabilidade da farinha cru.

3.2.1.3. Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

POGGIALI (2010) relata em sua pesquisa a possibilidade da adição de cinza de bagaço de cana de açúcar em forma semelhante à escória de alto-forno, para a fabricação de cimento. Obteve-se resultados favoráveis em seus ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água com substituições 10 e 15% do material utilizado, tendo como provável justificativa o efeito “filler” do preenchimento dos vazios com as cinzas.

3.2.1.4. Influencia do Blaine no cimento Portland

O índice de finura do cimento e dos materiais aglomerantes são fatores importantes que influenciaram os resultados dos trabalhos. A dimensão do material afeta tanto a relação água-cimento (W/C) quanto o aumento do Blaine, desempenhando assim alterações da restência à compreensão dos materias (CHEN e WU, 2013, CHINDAPRASIRT et al., 2005) .

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Os dregs e grits in natura foram adquiridos de uma empresa de polpa celulósica kraft branqueada e armazenados em big bags de materiais reciclados. O clínquer foi obtido de uma empresa cimenteira brasileira e armazenados em bombonas de plástico para evitar contaminações. Estes materiais foram ensaiados, nos laboratórios da Universidade Federal de Viçosa – UFV e da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, sendo especificado de acordo com cada ensaio.

4.2. Metodologia

Na Figura 6 é apresentado um fluxograma esquemático do plano experimental.

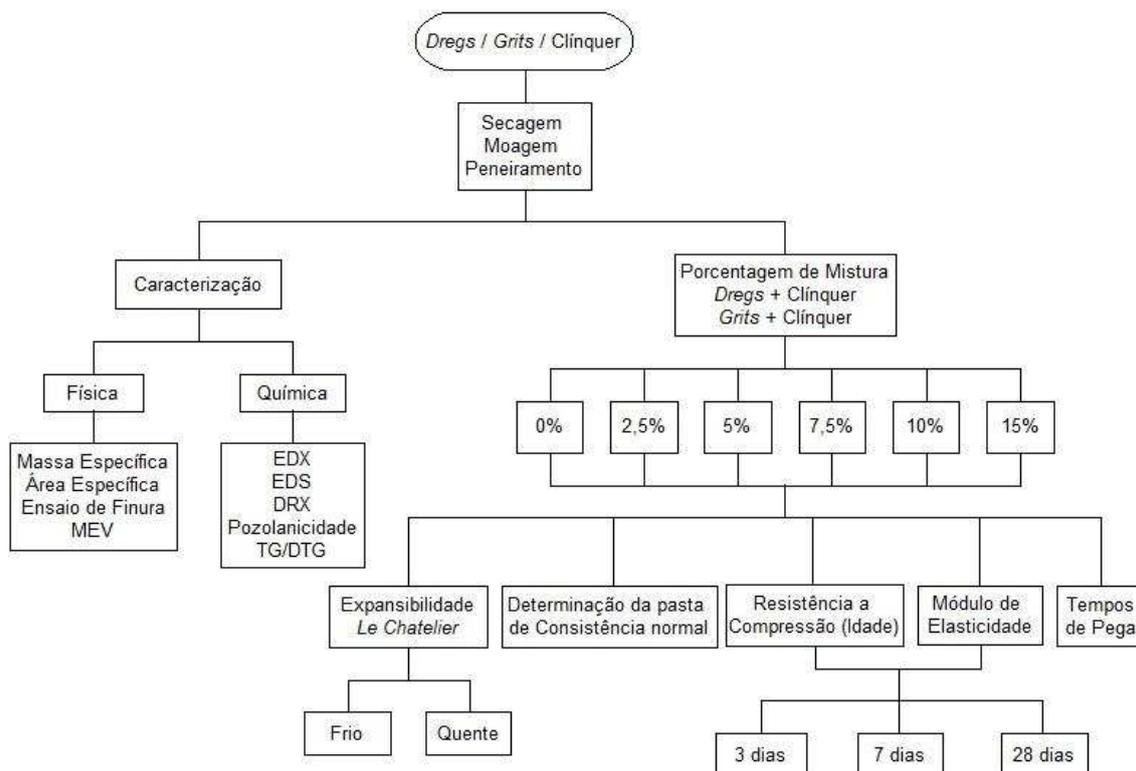


Figura 6. Fluxograma esquemático do plano experimental.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Primeiramente os materiais in natura (clínquer, Figura 7. a), dregs, grits (Figura 7. b e 7c) passaram pelo processo de secagem em estufa a 100°C durante 24 horas e, moídos em um moinho de bolas, Pavitest (Figura 8a). Em seguida, os materiais foram desagregados no

pulverizador, Pulverisette 14 Fritch (Figura 8b), e foram macerados no mão de graal e pistilo (Figura 8c) até a passagem completa em peneira 75 μm (n° 200) (Figura 9b e 9c). O clínquer foi moído, macerado até passagem completa em peneira 75 μm (n° 200) (Figura 9a). Todos os materiais foram armazenados em locais adequados para que não houvesse risco de contaminação.

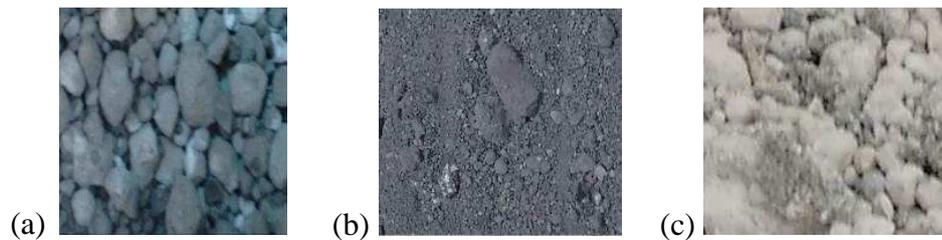


Figura 7. Amostras in natura (a) clínquer; (b) dregs e (c) grits.
Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

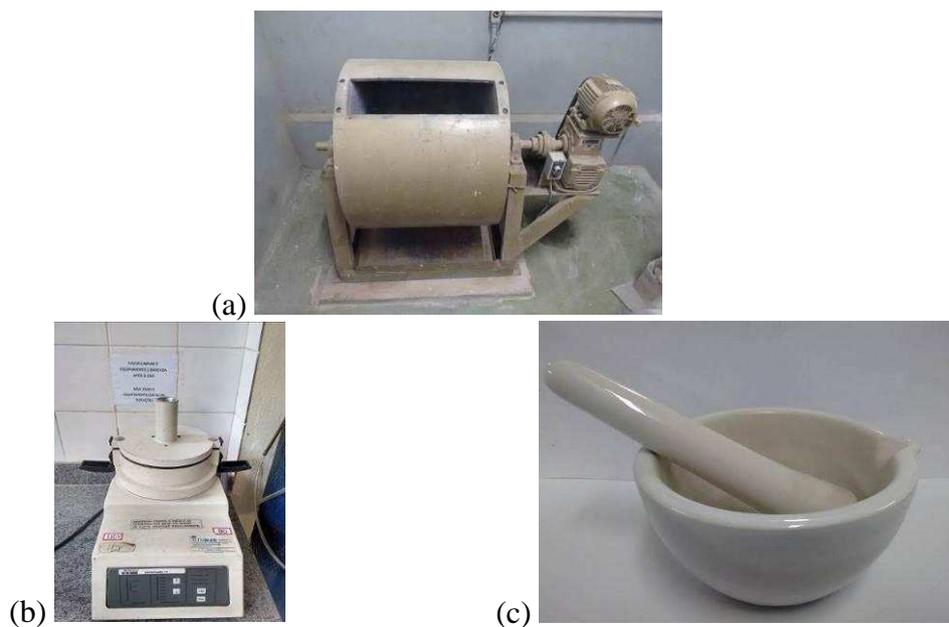


Figura 8. Equipamentos para moagem (a) Moinho de bolas; (b) Pulverizador e (c) Graal e pistilo de porcelana.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.



Figura 9. Amostras peneiradas (a) clínquer; (b) dregs e (c) grits.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.1. Caracterização dos materiais

Ensaio de massa e área específica, finura, difração de Raios X – DRX, microscopia eletrônica de varredura – MEV, espectroscopia de energia dispersiva de Raio X – EDX, sistema de energia dispersiva – EDS, atividade pozolânica e análises termogravimétricas – TG/DTG foram realizados para determinar a caracterização física, mineralógica e química.

As amostras analisadas nos ensaios de DRX, Pozolanicidade e TG/DTG foram realizados somente para os materiais in natura (clínquer, dregs e grits). Nos ensaios de massa e área específica, finura, DRX, MEV, EDX e EDS foram realizados nos materiais in natura mas também nas substituições mais relevantes na mistura dos dregs e grits ao clínquer.

4.2.1.1. Massa Específica

A determinação da massa específica dos materiais foi estabelecida por meio da massa sobre o volume de uma amostra. O ensaio de massa específica foi realizado conforme a norma ABNT NBR NM 23:2001 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2001).

4.2.1.2. Área Específica no permeabilímetro de Blaine

A área superficial específica é feita para determinar a finura dos materiais e indicar a necessidade de moagem do mesmo. O ensaio de área específica no permeabilímetro de Blaine deve ser feito de acordo com a norma ABNT NBR 16.372 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) (ABNT, 2015).

Todos os materiais foram mantidos à mesma temperatura do laboratório. Misturou-se o material cuidadosamente usando uma haste seca e limpa, de maneira a distribuir os finos do cimento.

Determinou-se a massa específica do material de acordo com a ABNT NBR NM 23 (ABNT, 2001).

Repetiu-se o procedimento na mesma camada e registrou-se os valores adicionais de tempo e temperatura. Preparou-se uma nova camada e do mesmo cimento e materiais, Figura 10, com uma segunda amostra e realizou-se o ensaio de permeabilidade duas vezes nessa camada,

registrando os tempos e temperaturas como descrito anteriormente. Realizou-se os cálculos posteriores a essas análises para determinar a área específica do material.



Figura 10. Materiais para o ensaio de área de permeabilidade de Blaine.
Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.1.3. Finura

A finura do material é determinado a partir da porcentagem, em massa retida, das dimensões de grãos superiores a 75 μm . O ensaio de determinação do índice de finura do cimento Portland foi realizado conforme a norma ABNT NBR 11579:2012 versão corrigida:2013 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) (ABNT, 2013).

4.2.1.4. Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X – EDX

A espectroscopia de energia dispersiva de raio-x (EDX), consiste de uma caracterização química, por uma análise quantitativa de elementos presentes nos materiais ensaiados, através de uma espectrometria de fluorescência de Raios X. O EDS tem a mesma finalidade do EDX, sendo, entretanto, uma análise pontual do material.

As análises de caracterização química, através da EDX, foram realizadas na sala de instrumentação do Departamento de Solos da UFV, no espectrômetro de fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (micro EDX 1300 Shimadzu), Figura 11.



Figura 11. Micro EDX 1300 Shimadzu.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.1.5. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), consiste em uma análise macroestrutural e microestrutural de materiais sólidos, com imagens de alta resolução. Na realização do ensaio foram obtidas imagens com aumentos de 500 a 2000 vezes para os três tipos de materiais (clínquer, dregs e grits) e suas misturas.

Para a realização das análises, foram separadas pequenas quantidades de material passado em peneira de 75 μm (nº 200) e porções da região de ruptura dos corpos de prova de resistência.

As amostras foram metalizadas no Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV, no equipamento – Metalizador Quorum Q150R S. A metalização consistiu em colocar as amostras em stubs, utilizando uma fita condutora de carbono dupla face e preencher as amostras com uma camada delgada de ouro, com o intuito de melhorar a condutividade elétrica do material.

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no Centro de Microscopia da UFMG, no equipamento – Microscópio FIB (para análise de Varredura) – Quanta FEG 3D FEI com o sistema de detecção de dispersão de energias e raios X (EDS). As análises também foram feitas no Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV, no equipamento – Microscópio Eletrônico de Varredura Leo 1430VP, Figura 12.

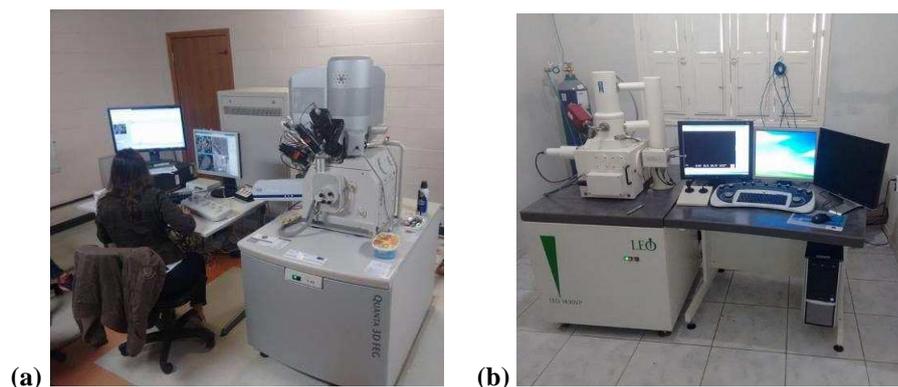


Figura 12. Microscópio Eletrônico de Varredura (a) Quanta FEG 3D FEI e (b) Leo 1430VP.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.1.6. Difratometria de Raios X – DRX

A difratometria de Raios X (DRX), consistiu na análise qualitativa de minerais presentes nos materiais ensaiados, por uma espectrometria de fluorescência de Raios X. Os estudos de difração de Raios X foram realizados usando-se um difratômetro Bruker D8-Discover, modelo Davinci (Figura 13) com $\text{CuK}\alpha$ (1,5406 Å), com um intervalo de 2θ de 20 a 100° e velocidade de varredura de 4° min⁻¹, do Laboratório de Raios X, AFM e Perfilometria – Departamento de Física da UFV.



Figura 13. Difrátômetro de raios-x Bruker D8-Discover Davinci.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.1.7. Atividade pozolânica

O ensaio de atividade pozolânica, segundo o método LUXAN et al (1989), consiste em medir a pozolanicidade por meio da variação de condutividade de uma solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 com e sem adição do material a ser analisado. A adição de 5g do material em uma solução de 200 ml a 40° C, foi realizada de forma contínua para a obtenção de uma mistura homogênea, sendo o seu tempo em 2 minutos pra cada análise, Figura 14.

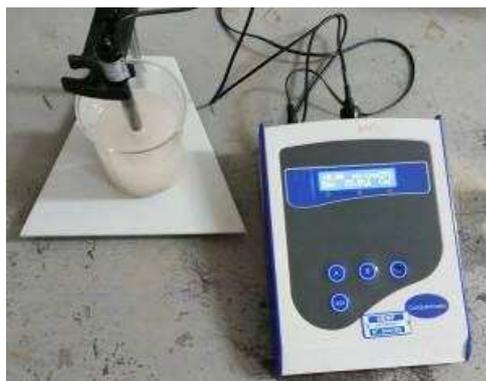


Figura 14. Ensaio de atividade pozolânica.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

A classificação do material por diferença de condutividade pelo índice de pozolanicidade é realizada na seguinte relação:

- Materiais sem atividade pozolânica: $\Delta < 0,4 \mu\text{S}/\text{cm}$;
- Materiais de atividade pozolânica moderada: $0,4 \mu\text{S}/\text{cm} < \Delta < 1,2 \mu\text{S}/\text{cm}$;
- Materiais de boa atividade pozolânica: $\Delta > 1,2 \mu\text{S}/\text{cm}$.

4.2.1.8. Análises termogravimétricas (TG/DTG)

As análises termogravimétricas (TG/DTG), tem por finalidade caracterizar quantitativamente fatos sofridos com a alteração térmica no material, tendo uma variação controlada da massa em função do tempo e temperatura do ensaio, através das curvas termogravimétrica TG e termogravimétrica derivada (DTG).

As análises termogravimétricas (TG/DTG) foram realizadas no laboratório de Tecnologias Ambientais do Departamento de Química da UFMG, em um equipamento Shimadzu DTG 60H com fluxo de ar sintético (50 mL min^{-1}), faixa de temperatura de $30\text{-}1000^\circ\text{C}$ e razão de aquecimento $10^\circ\text{C min}^{-1}$, utilizando massas de amostras de aproximadamente 6 mg.

4.2.2. Ensaio referentes aos materiais cimentícios

Todos os ensaios foram realizados de acordo com as normas brasileiras vigentes, conforme as normas brasileiras:

- a) ABNT NBR 5.732:1991 – Cimento Portland comum (ABNT, 1991)
- b) ABNT NBR 11.578:1991 Errata 1:1997 – Cimento Portland composto (ABNT, 1991)
- c) ABNT NM 23:2001 – Ensaio de massa específica (ABNT, 2001)

- d) ABNT NBR 16.372:2015 – Ensaio de área específica no permeabilímetro de blaine (ABNT, 2015)
- e) ABNT NBR 11.579:2012 versão corrigida:2013 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) (ABNT, 2013)
- f) ABNT NM 43:2003 – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal (ABNT, 2003)
- g) ABNT NM 65:2003 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega (ABNT, 2003)
- h) ABNT MB 3435 – NBR 11.582:2012 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier (ABNT, 2012)
- i) ABNT NBR 8.522:2008 – Determinação de módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT, 2008)
- j) ABNT NBR 7.215:1991 Errata 1:1997 – Resistência a compressão (ABNT, 1991).

4.2.2.1. Confeção dos corpos de prova

Para esse trabalho foram produzidos 12 corpos de prova, nas dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de comprimento aproximadamente, para cada traço de material carbonático ao clínquer (substituições de 2,5; 5; 7,5; 10 e 15%), e um traço (CPo – 0) como referência, sem adição de quaisquer materiais estudados, correspondendo a um total de 132 corpos de prova confeccionados, Tabela 9.

Tabela 9. Dosagem de materiais para o clínquer experimental.

Amostras	Serie	Traço (%)		Quantidade de corpos de provas	
		Clínquer	Substituições	Resistência à Compressão	Módulo de Elasticidade
	CPo - 0	100	0	12	9
Dregs	CPd - 2,5	97,5	2,5	12	9
	CPd - 5,0	95,0	5,0	12	9
	CPd - 7,5	92,5	7,5	12	9
	CPd - 10,0	90,0	10,0	12	9
	CPd - 15,0	85,0	15,0	12	9
	Grits	CPg - 2,5	97,5	2,5	12
CPg - 5,0		95,0	5,0	12	9
CPg - 7,5		92,5	7,5	12	9
CPg - 10,0		90,0	10,0	12	9
CPg - 15,0		85,0	15,0	12	9
Total				132	99

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

A confecção dos corpos de prova foi realizada substituindo-se uma determinada massa do clínquer por uma porção de dregs ou grits. Os materiais foram passados na peneira 75 µm (nº 200) correspondente ao volume de clínquer estipulados e apresentados na Tabela 10. Utilizou-se água destilada e de areia normatizada adquirida pelo Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo (IPT) com as suas devidas frações (#16 – grossa; #30 – média grossa; #50 – média fina; e #100 – fina), conforme (ABNT, 1991).

Tabela 10. Proporção de materiais utilizados para confecção de corpos de prova.

Materiais	Referência	Quantidade de materiais em gramas (g)									
		2,5%		5,0%		7,5%		10,0%		15,0%	
		Dregs	Grits	Dregs	Grits	Dregs	Grits	Dregs	Grits	Dregs	Grits
Clínquer	624	608,4	608,4	592,8	592,8	577,2	577,2	561,6	561,6	530,4	530,4
Dregs	0	15,6	0	31,2	0	46,8	0	62,4	0	93,6	0
Grits	0	0	15,6	0	31,2	0	46,8	0	62,4	0	93,6
Água destilada	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Areia IPT #16	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468
Areia IPT #30	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468
Areia IPT #50	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468
Areia IPT #100	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468

Fonte: Adaptado pelo autor com base em ABNT, 1991.

A quantidade de dregs e grits para substituição ao clínquer foi estabelecida de acordo com os procedimentos prescritos nas normas NBR 5.732 (ABNT, 1991) e NBR 11.578 (ABNT, 1991), referentes a porcentagens de material carbonático (CPI – 0-5% e CPII – 0-10%). A substituição de 15% foi estabelecida para avaliar a reação do material após o seu ápice, estabelecido pela norma.

A confecção dos corpos de prova foi preparado por uma argamassadeira, misturador mecânico, Figura 15, e compactada em moldes cilíndricos, Figura 16. a. Os corpos de prova foram moldados imediatamente após as misturas, com o tempo adequado, da argamassadeira. Os moldes foram homogeneamente distribuídos em quatro camadas, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal.

Após sua confecção, para melhor atender as condições de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas. Devidamente nomeados, Figura 16. b, foram submetidos à cura por imersão em um tanque com solução saturada de hidróxido de cálcio, onde continuaram submersos até a data de ruptura.



Figura 15. Argamassadeira, misturador mecânico.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.



Figura 16. Corpos de provas (a) Moldados e (b) Desmoldados e devidamente identificados.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.2.2. Consistência normal

A água para a pasta de consistência normal, consiste em definir a quantidade de água que deve ser utilizada para conferir à pasta preparada com determinado cimento, que será usada nos ensaios, a consistência dita normal. Este ensaio precede os ensaios de tempos pega e de expansibilidade. O ensaio de determinação da quantidade de água para a pasta de consistência normal foi realizada conforme a norma ABNT NBR NM 43 – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal (ABNT, 2003).

4.2.2.3. Tempos de pega

Os tempos de pega determinam os tempos de início e fim de pega do cimento Portland. O ensaio tempos de pega deve ser feito de acordo com a norma ABNT NBR NM 65 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega (ABNT, 2003).

4.2.2.4. Expansibilidade Le Chatelier

A expansibilidade Le Chatelier baseou-se em determinar a expansibilidade a quente e a frio da pasta de cimento água para a pasta de consistência normal. O ensaio expansibilidade Le Chatelier foi realizado conforme a norma ABNT NBR 11.582 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier (ABNT, 2012).

A expansibilidade a frio ou a quente é calculada pela diferença entre os afastamentos das hastes das agulhas inicial (após a cura inicial) e final (após o período de cura a frio ou a quente). O resultado é a média dos valores individuais e deve ser expresso com aproximação de 0,5 mm. Esse experimento determina as tensões internas no cimento, apresentando assim a sua estabilidade volumétrica.

4.2.2.5. Resistência a compressão

O ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento Portland foi feito conforme a norma ABNT NBR 7.215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1991).

Após a confecção dos corpos de prova, eles foram capeados com enxofre e submetidos ao ensaio de resistência à compressão, conforme a norma ABNT NBR 5.739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2007). Posteriormente foram rompidos nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os ensaios à compressão foram realizados com 4 corpos de prova para cada idade e traço estabelecido. Para a confecção e leitura dos dados ensaiados foram escolhidas uma célula de carga Trd 30 no software da Tesc. Aplicou-se uma taxa de 0,5MPa/s de carregamento, em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL600KN, Figura 17.



Figura 17. Máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL600KN.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.2.6. Módulo estático de elasticidade à compressão

O ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão foi realizado conforme a norma ABNT NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT, 2008).

O ensaio de módulo de elasticidade dos corpos de prova foi iniciado após a avaliação de um corpo de prova da mesma idade e de mesmo traço, para a estimação da resistência à compressão. Depois foram ensaiados 3 corpos de prova quanto ao módulo de elasticidade e, respectivamente, quanto a resistência à compressão para cada idade (3, 7, 28 dias) e traços previamente estabelecidos. Para a confecção e leitura dos dados ensaiados foram escolhidas uma célula de carga Trd 30 no software da Tesc. Aplicando uma taxa de 0,5MPa/s de carregamento, em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL600KN (Figura 17). Durante a execução do ensaio, os corpos de prova sofreram 3 ciclos de carga e descarga com a tensão do patamar inferior igual a 0,5MPa e a do patamar superior igual a 30% da tensão de ruptura prevista. Para a realização da mediação dessa deformação, foram feitas leituras com um clip gage modelo Trd11 (Figura 18) que a partir dos dados informados (diâmetro médio e ruptura prevista) o programa gerou um cálculo da resistência a compressão e o módulo de elasticidade dos corpos de prova.



Figura 18. Ensaio de módulo de elasticidade com clip gage.
Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

4.2.3. Análise Estatística

Todos os ensaios referentes a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade das substituições (2,5; 5; 7,5; 10 e 15%) de dregs e grits ao clínquer e a referência (100% clínquer) foram submetidos a análise de variância – ANOVA. Estabelecidas as diferenças significativas os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste Tukey a 5% de significância.

Também foram realizados ensaios referentes a resistência à compressão da substituição de 10% de dregs e grits ao clínquer em 3 áreas específicas (Blaine) diferentes (246, 369 e 441 m²/kg) e a referência (100% clínquer de cada Blaine) sendo submetidos a uma análise fatorial. Estabelecidas as diferenças significativas os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste Tukey a 5% de significância. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (R Core team 2013).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos Materiais

5.1.1. Clínquer

5.1.1.1. Caracterização do clínquer

Os resultados da caracterização do clínquer Portland estão listadas na Tabela 11.

Tabela 11. Caracterização do clínquer.

ENSAIOS	CLÍNQUER	*Limites	
MASSA ESPECÍFICA TOTAL (g/cm ³)	3,00	---	
AREA ESPECÍFICA "BLAINE" (m ² /kg)	246	≥ 240	
ÍNDICE DE FINURA (%)	0,26	≤ 12	
CONSISTÊNCIA NORMAL (A(%))	30,88	---	
TEMPO DE PEGA (h:min)	Início	1:45	≥ 1:00
	Fim	2:40	≤ 10:00
EXPANSIBILIDADE	Quente	0,00	≤ 5
LE CHATELIER (mm)	Frio	0,27	≤ 5

*Limites (ABNT 5.732, 1991, e ABNT 11.578, 1991)

Fonte: Adaptado pelo autor com base em ABNT, 1991.

De acordo com os valores adquiridos nos ensaios realizados, percebe-se que o clínquer atende todos os requisitos de caracterização dos limites impostos pelas normativas citadas anteriormente. Observa-se que o Blaine de 246m²/kg, se encontra próximo do limite inferior estabelecido pelas normas. De acordo com Arrivabene et al. (2012) e Poggiali et al. (2010), os valores encontrados da área específica e índice de finura do clínquer são indicativos da viabilidade técnica da utilização do mesmo, no que se refere à fabricação de cimento Portland.

5.1.1.2. Composição química

A composição química do clínquer, realizado por meio do ensaio EDX, em termos dos seus principais óxidos, está apresentada na Tabela 12. Pode-se observar, em comparação com os resultados obtidos por PETRUCCI e PAULON (1998) e LEA (1970), que seus principais componentes são os óxidos de cálcio (CaO), silícios (SiO₂), alumínio (Al₂O₃) e ferro (Fe₂O₃). Estes estão dentro da faixa aceitável da composição típica do cimento Portland. No entanto, os óxidos de alumínio (Al₂O₃) magnésio (MgO) e sulfúrico (SO₃) apresentam valores inferiores em comparação com a composição típicas. Os álcalis, óxido de potássio (K₂O) e sódio (Na₂O) apresentaram valores superiores, provavelmente por se tratar de um clínquer puro sem nenhuma adição de gesso e aditivos.

Tabela 12. Composição química do clínquer em (%).

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Cl	Outros
Clínquer (%)	64,55	20,65	3,02	3,23	0,33	1,47	1,71	1,0	0,27	0,07	3,72
Teor ¹ (%)	61 - 67	20 - 23	4,5 - 7	2,0 - 3,5	0,8 - 6	0,3 - 1,5	1,0 - 2,3	---	---	---	---
Teor ² (%)	64,1	22,0	5,5	3,0	1,4	---	---	2,1	---	---	---

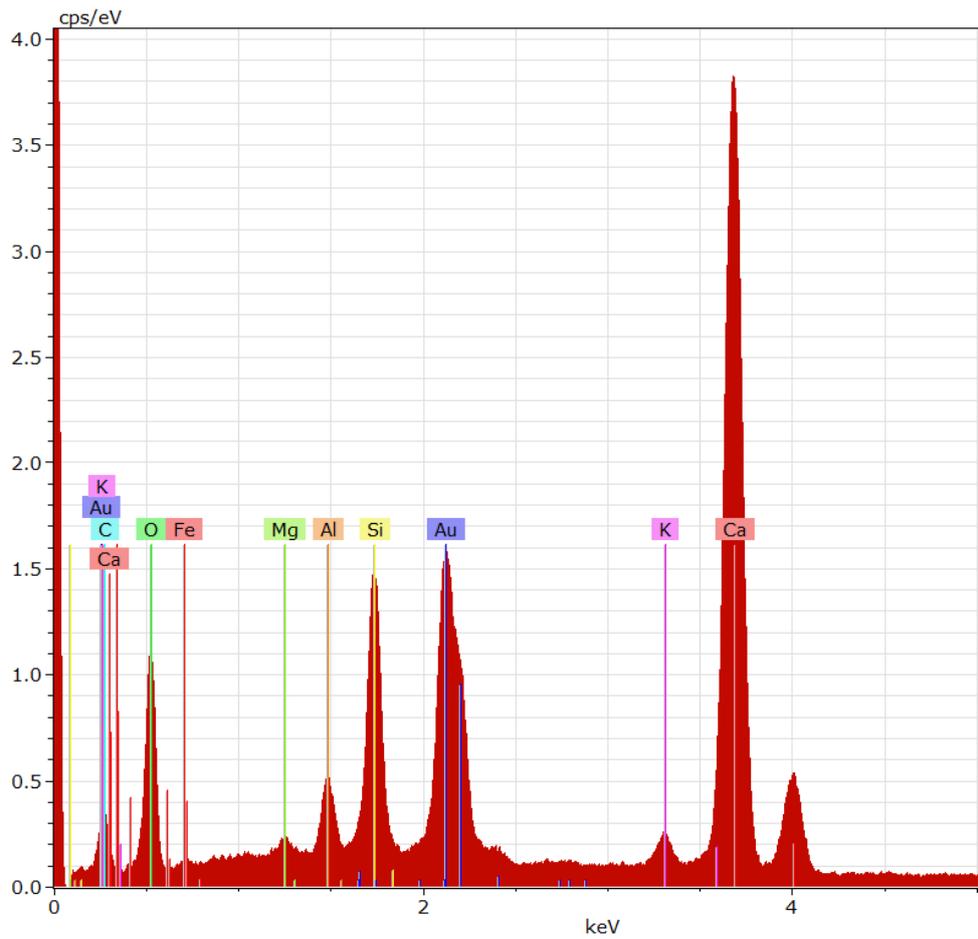
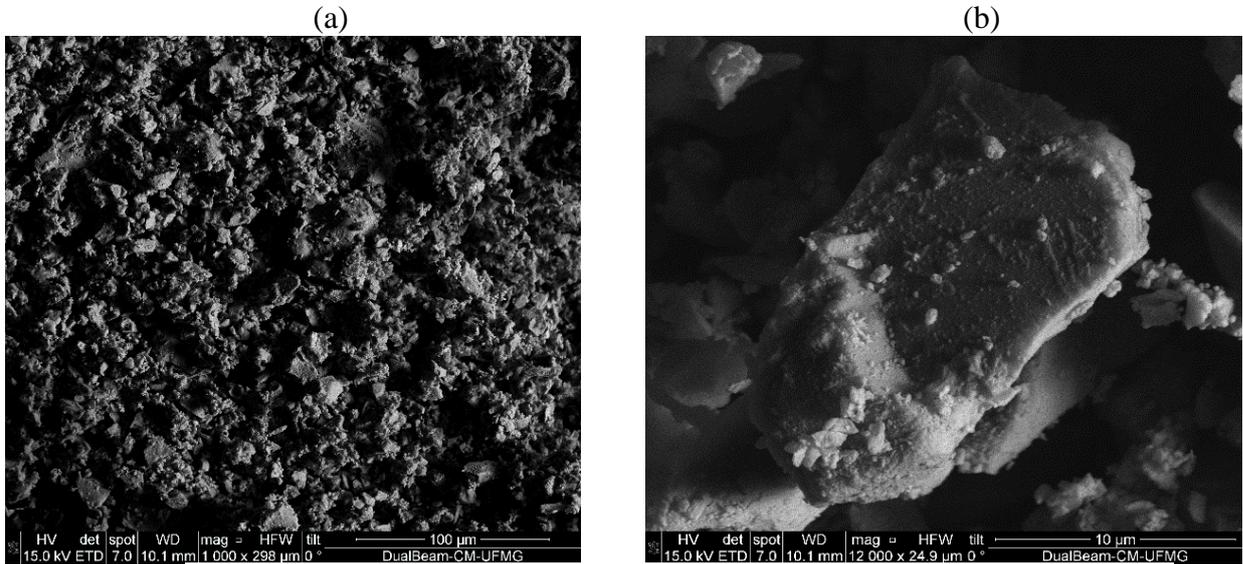
Fonte: ⁽¹⁾PETRUCCI e PAULON (1998) e ⁽²⁾LEA (1970).

5.1.1.3. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A amostra de clínquer foi caracterizada por MEV. As imagens obtidas, mostradas na Figura 19a e 19b, sugerem que o material é homogêneo e possui superfícies regulares, com grãos arredondados (C₃S) em placas similares a um hexágono (C₂S) (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A análise de EDS mostrou que o material apresenta cálcio, alumínio, potássio, ferro, oxigênio, sílica e carbono, corroborando com os resultados encontrados na análise de EDX.

A Figura 19a apresenta uma imagem com magnificação de 1.000x para avaliar a extensa quantidade de grãos arredondados que se encontrou na amostra. Em sequência na imagem

com magnificação de 2.000x, Figura 19b, nota-se um grão com placas retilíneas e similares a um hexágono.



(c) Figura 19. MEV e EDS com o clínquer em pó (a) imagem com magnificação de 1.000x. (b) imagem com magnificação de 2.000x. (c) gráfico de EDS com os teores dos elementos.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

5.1.1.4. Composição mineralógica

O difratograma de Raios X dos materiais (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) foi realizado para corroborar a existência dos compostos mineralógicos encontrados na composição química do clínquer. Os compostos apresentam as faces de silicato tricálcico (3CaO SiO_2) abreviação C_3S ; silicato dicálcico (2CaO SiO_2) abreviação C_2S ; Aluminato tricálcico ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$) abreviação C_3A ; e ferro aluminato, tetracálcico ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$) abreviação C_4AF sendo as principais faces cristalinas identificadas em suas estruturas.

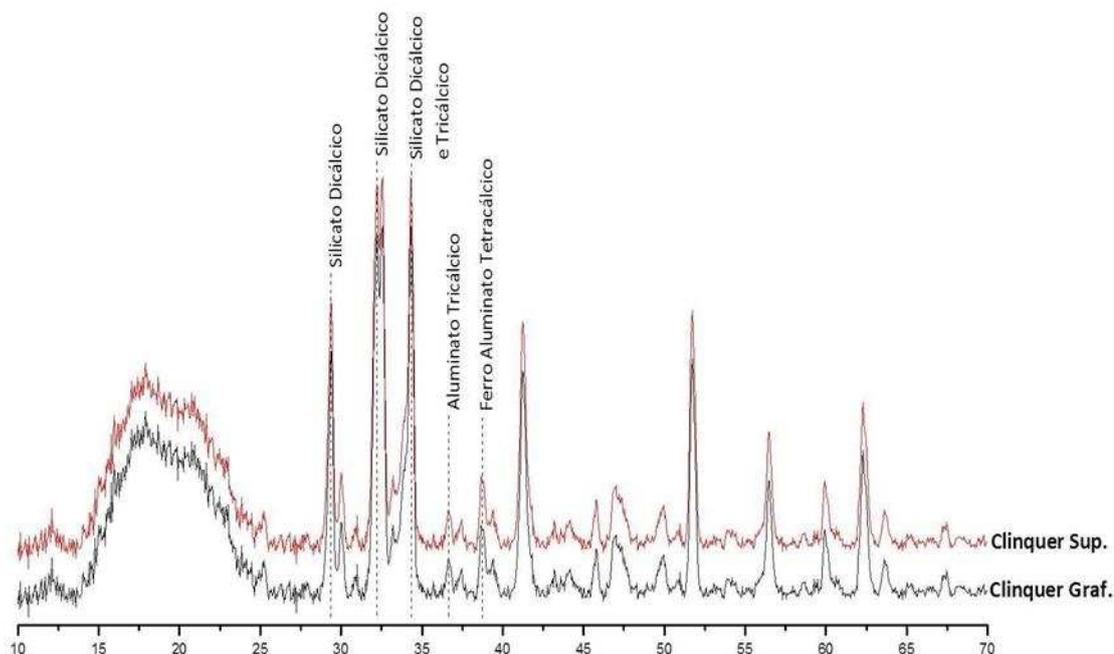


Figura 20. DRX do clínquer.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Resultados similares foram obtidos por Mehta e Monteiro (2008) e Souza (2009) nas elevadas concentrações de C_3S (Alita) e C_2S (Belita) entre o intervalo de 2θ de 28 a 40° dos ângulos, corroborando com as imagens encontradas nas análises realizadas pelo MEV.

5.1.2. Dregs e Grits

5.1.2.1. Caracterização dos dregs e grits

Os resultados da caracterização física quanto à massa, área específica e índice de finura do dregs e grits estão listadas na Tabela 13.

Tabela 13. Caracterização dos dregs e grits.

ENSAIOS	DREGS	GRITS
MASSA ESPECÍFICA TOTAL (g/cm ³)	2,44	2,67
AREA ESPECÍFICA "BLAINE" (m ² /kg)	1.031	972
ÍNDICE DE FINURA (%)	0,78	95,20

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Os resultados encontrados da massa específica dos dregs e grits são favoráveis para a mistura ao clínquer, que possui massa específica superior a 3 g/cm³. Os elevados valores de área específica dos dregs e grits favorecem o preenchimento de poros e atuam como filler. O índice de finura dos grits foram muito superiores ao dos dregs. Esse alto índice de finura apresentado pelos grits pode comprometer a sua homogeneização durante a mistura ao clínquer.

5.1.2.2. Pozolanicidade dos dregs e grits

Por meio do ensaio de atividade pozolânica obteve-se uma condutividade elétrica de 0,31 mS/cm para os dregs e de 0,87 mS/cm para os grits. Esses resultados demonstram que os materiais não possuem uma atividade pozolânica. Sendo que ambos os resíduos promovem interação de melhorias na reatividade com o cimento. Todavia, enquanto adição cimentícia de preenchimentos de poros (filler), estes materiais cumprem bem o seu papel, tendo elevados valores de Blaine, conforme observado na Tabela 13 (MEHTA e MONTEIRO, 2008; POGGIALI, 2010).

5.1.2.3. Composição química dos dregs e grits

A Tabela 14 mostra a composição química dos dregs e grits, expressa em óxidos. Observou-se que os materiais apresentam um elevado teor de óxido de cálcio (CaO) que influencia em diversas características do cimento Portland. A adição do componente CaO no processo produtivo do cimento Portland é extremamente importante por influenciar no aumento das propriedades mecânicas do cimento Portland. No entanto, sua elevada

concentração prejudica a estabilidade de volume das argamassas e concretos, atuando como expansivo (PETRUCCI e PAULON, 1998; MEHTA e MONTEIRO, 2008 e MACHADO et al., 2002).

Os dregs apresentaram uma alta concentração de óxidos de enxofre (SO₃) e magnésio (MgO), superior aos encontrados nos grits. Essas concentrações em quantidades superiores, demonstrados na Tabela 12, podem conferir elevada expansibilidade ao cimento. De acordo com Petrucci e Paulon (1998), a presença desse fenômeno só pode ser observado após os ensaios de 28 dias de resistência dos materiais.

Os óxidos de ferro (Fe₂O₃) e álcalis (K₂O – Na₂O) também foram encontrados em maiores concentrações nos dregs em comparação aos grits. Ambos os componentes desenvolvem papéis como fundentes. O Fe₂O₃, em porcentagens não elevadas, auxilia a converção de toda a sílica em silicato e os álcalis agem como aceleradores da pega, e podem substituir o gesso (CaSO₄) no processo industrial (PETRUCCI e PAULON, 1998; MEHTA e MONTEIRO, 2008 e POGGIALI, 2010).

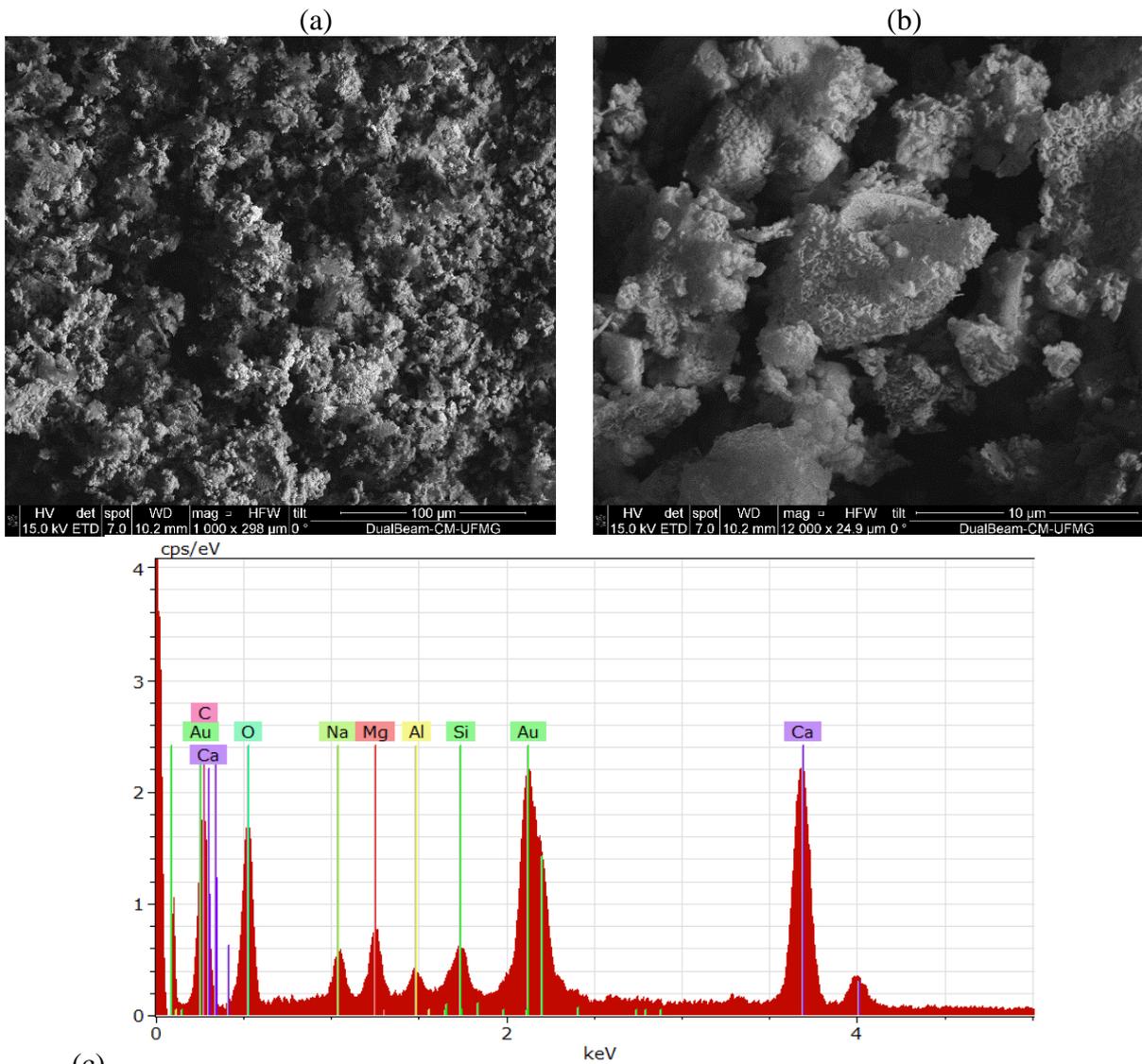
Tabela 14. Composição química por EDX dos dregs e grits (%).

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Cl	Outros
Dregs (%)	68,85	6,67	0,74	3,27	3,14	0,91	3,64	6,44	0,18	0,39	5,78
Grits (%)	83,36	5,21	0,29	1,16	0,66	0,50	2,77	0,97	0,08	0,27	4,73

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

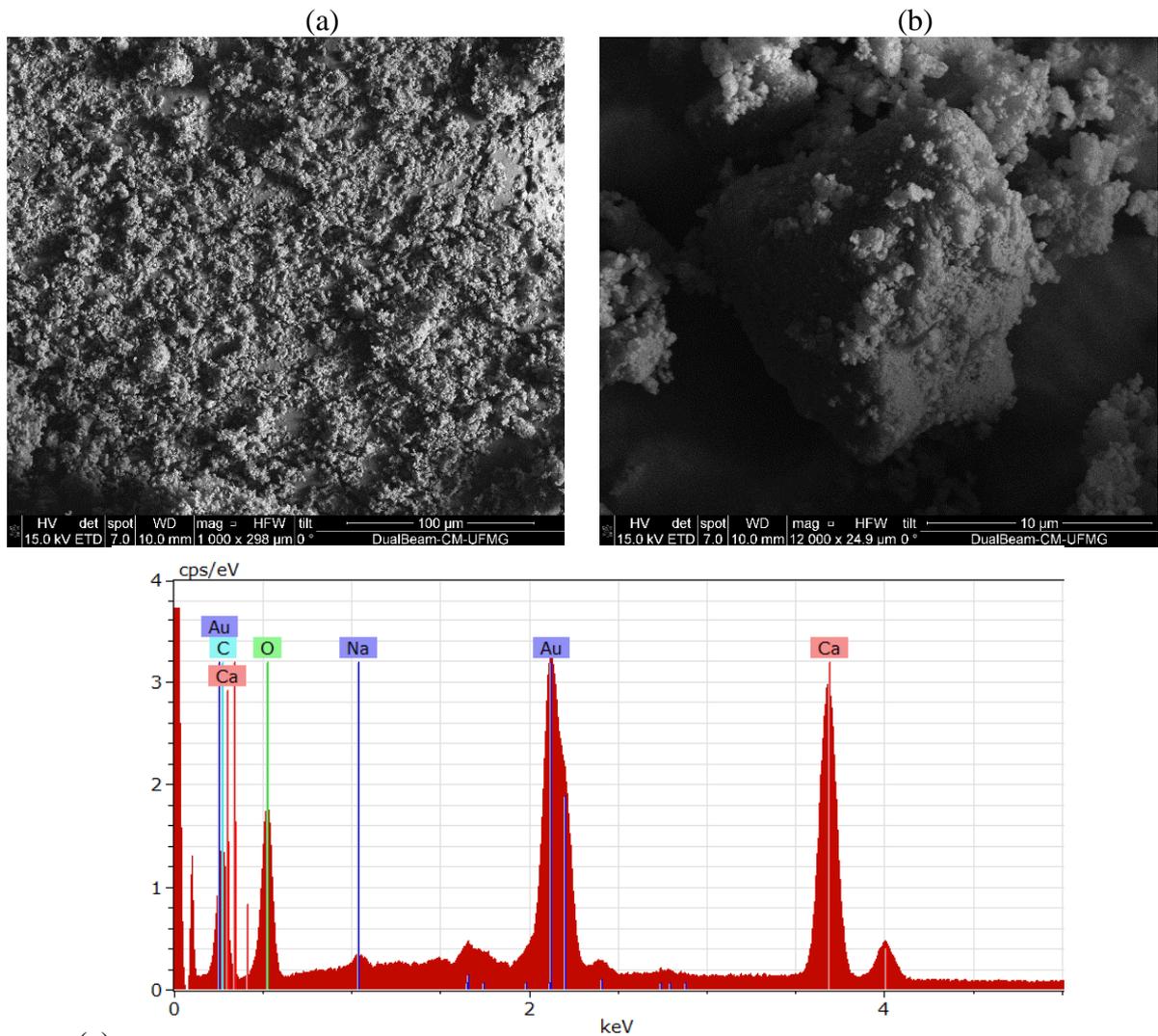
5.1.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

As Figura 21 e 22 apresentam as imagens de microscopia eletrônica de varredura dos dregs e grits, respectivamente, que mostram partículas com dimensões menores quando comparadas aos do clínquer, com grãos arredondados ricos em Ca. A análise de EDS mostrou os elementos dos dregs e grits em uma granulometria menor que 0,075 mm de finura. Comparando o EDX e a difração de Raios X, percebe-se que os resultados se revalidam, sustentando a existência dos óxidos de cálcio em maiores teores, e magnésio, sódio e alumínio em menores concentrações.



(c)
 Figura 21. MEV e EDS com o dregs em pó (a) imagem com magnificação de 1.000x. (b) imagem com magnificação de 2.000x. (c) gráfico de EDS com os teores dos elementos.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.



(c)
 Figura 22. MEV e EDS com o grits em pó (a) imagem com magnificação de 1.000x. (b) imagem com magnificação de 2.000x. (c) gráfico de EDS com os teores dos elementos.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

5.1.2.5. Composição mineralógica

O difratograma de Raios X dos materiais, mostrado na Figura 23, foi realizado para sustentar a existência dos compostos mineralógicos encontrados em sua composição química. Ambos apresentaram as fases de carbonato de cálcio (CaCO_3), pirssote ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), óxido ferroso (FeO) como as principais faces cristalinas identificadas em suas estruturas. Nota-se também a semelhança nítida dos difratogramas dos dregs com grits nestas faces.

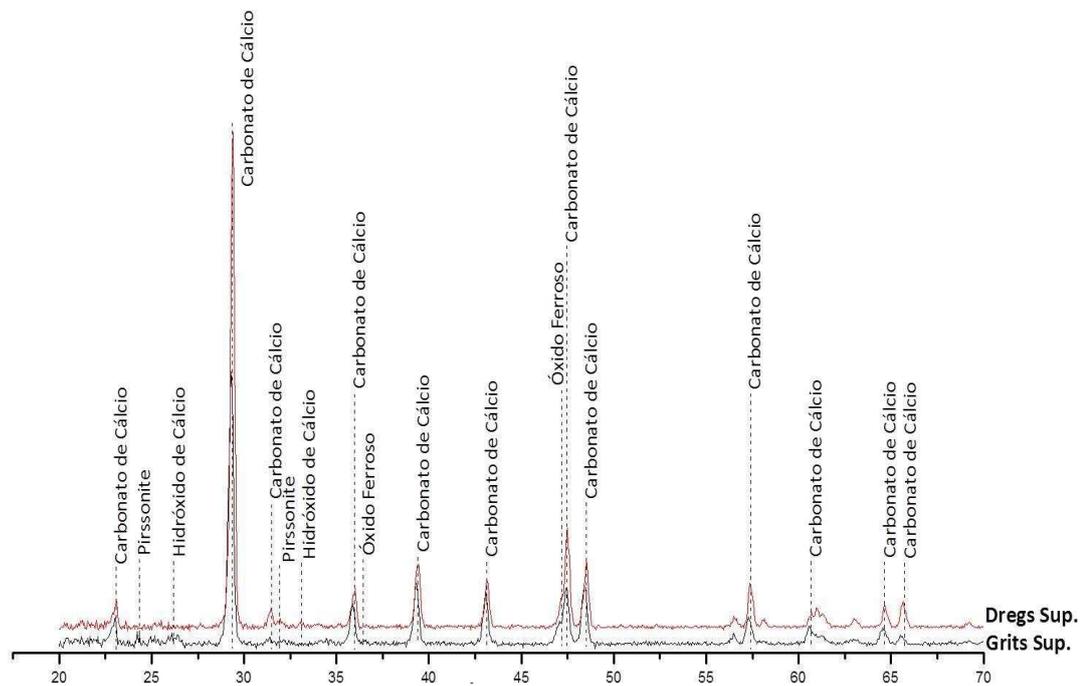


Figura 23. DRX do dregs e grits.
 Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

5.1.2.6. Análise térmica

As Figura 24 e 25 apresentam as curvas termogravimétricas (TG/DTG) para o dregs e grits, respectivamente. A faixa de temperatura de aquecimento foi de 30 a 1000°C para todas as amostras. A curva TG dos grits, indicada na Figura 25, mostrou uma perda de massa inicial relacionada à água fisicamente adsorvida (água fisissorvida) na superfície. Observa-se também que, na faixa de 600-800 °C, ocorreu uma perda de aproximadamente 60% de massa que pode estar relacionada à decomposição característica dos carbonatos de cálcio, calcita (CaCO_3), para formação de CaO e liberação de CO_2 (SIQUEIRA, 2013). Todas as afirmações relacionadas aos resultados de TG/DTG, estão em concordância com os ensaios EDX, DRX e MEV.

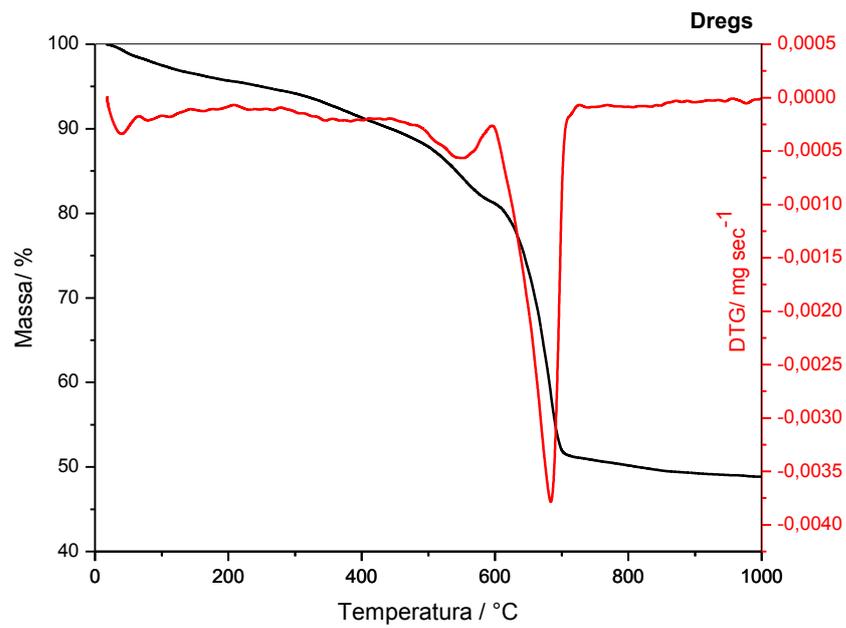


Figura 24. Curvas TG/DTG do dregs com fluxo de ar sintético (50 mL min^{-1}) e razão de aquecimento $10^\circ\text{C min}^{-1}$.
 Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

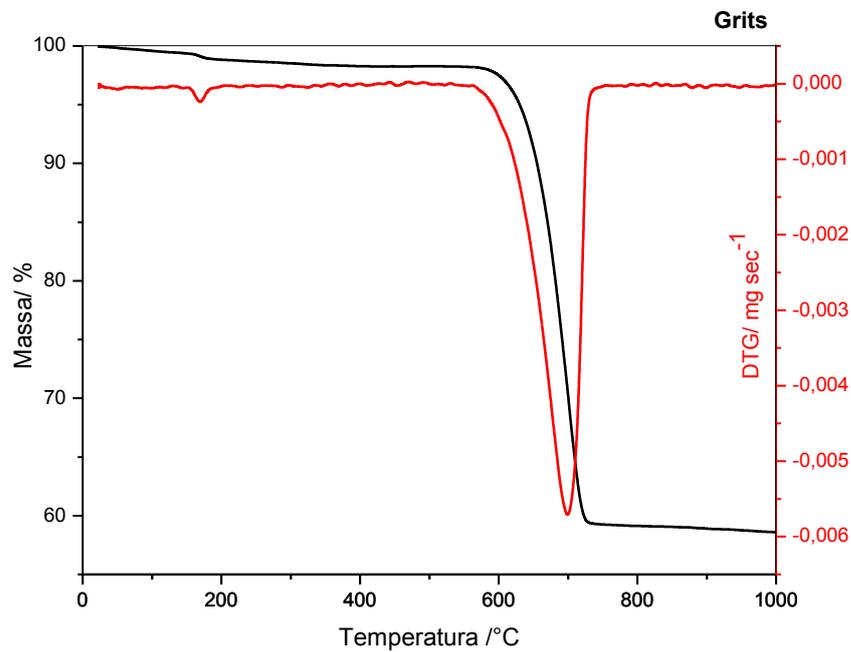


Figura 25. Curvas TG/DTG do grits com fluxo de ar sintético (50 mL min^{-1}) e razão de aquecimento $10^\circ\text{C min}^{-1}$.
 Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

5.2. Ensaios referentes aos materiais cimentícios

Os ensaios de massa, área específica e finura realizados nas substituições adotadas junto com a referência (0% de materiais) mantiveram-se dentro dos limites aceitos pelas normas brasileiras citadas anteriormente (Tabela 15). Entretanto, observou-se que a área específica do clínquer encontra-se no limite inferior da norma, demonstrando a sua baixa resistência nos ensaios de massa, área específica e finura (Figura 26.).

Tabela 15. Resultados dos ensaios de massa, área específica e finura.

Ensaio	Massa específica total (g/cm ³)	Área específica total (m ² /kg)	Índice de finura (%)
Clínquer	3,00	246	0,26
Dregs	2,44	1.031	0,78
Grits	2,67	972	95,20
2,5%	Dregs	2,94	0,22
	Grits	3,05	1,28
5,0%	Dregs	2,99	0,28
	Grits	3,01	2,46
7,5%	Dregs	2,93	1,00
	Grits	2,99	5,36
10,0%	Dregs	2,87	0,54
	Grits	3,00	2,72
15,0%	Dregs	2,98	0,44
	Grits	2,95	3,96
Limites	---	≥ 245	≤ 12

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

O índice de finura dos grits in natura mostrou-se alta, confirmado pela sua alta área específica, quando comparada aos dregs. Esse motivo levou à utilização de uma máquina de pulverização, possibilitando que o material passasse na peneira 75 µm.

5.2.1. Tempos de pega

Os ensaios de tempos de pega mantiveram-se em sua maior parte dentro dos limites preconizados pelas normas, exceto na substituição de 15% com a área específica de 404 m²/kg, onde o início de pega ficou abaixo ao recomendado (Tabela 16). Estes valores inferiores da substituição de 15% podem ser justificados pela elevada concentração de álcalis, óxido de potássio (K₂O) e sódio (Na₂O), que aceleram o tempo de pega, podendo estar relacionada com a alta a área específica do mesmo comparada com as outras substituições.

Tabela 16. Resultados do ensaio de tempos de pega.

Ensaio	Tempos de pega (h:min)	
	Início	Fim
Clínquer	1:45	2:40
2,5%	Dregs	1:55
	Grits	2:47
5,0%	Dregs	1:15
	Grits	2:15
7,5%	Dregs	1:20
	Grits	2:25
10,0%	Dregs	1:30
	Grits	2:45
15,0%	Dregs	1:11
	Grits	2:43
15,0%	Dregs	1:40
	Grits	3:26
15,0%	Dregs	1:16
	Grits	2:37
15,0%	Dregs	1:24
	Grits	2:56
15,0%	Dregs	0:32
	Grits	3:10
15,0%	Dregs	0:55
	Grits	2:42
Limites	≥ 1h	≤ 10hs

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

5.2.2. Expansibilidade Le Chatelier

A expansibilidade Le Chatelier realizada nas substituições adotadas e na referência mantiveram-se dentro dos limites recomendados pelas normas (ABNT 5.732:1991 e ABNT 11.578:1991), conforme apresentada na Tabela 17.

Tabela 17. Resultados do ensaio de expansibilidade le chatelier.

Ensaio	Expansibilidade le chatelier (mm)	
	Quente	Frio
Clínquer	0,00	0,27
2,5%	Dregs	0,00
	Grits	0,00
5,0%	Dregs	0,00
	Grits	0,00
7,5%	Dregs	0,00
	Grits	0,00
10,0%	Dregs	0,00
	Grits	0,00
15,0%	Dregs	0,00
	Grits	0,00
Limites	≤ 5	≤ 5

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

5.2.3. Evolução da resistência à compressão e média estatística

Os resultados do ensaio a resistência mecânica à compressão nos corpos de prova cilíndricos fabricados com as devidas adições (0; 2,5; 5; 7,5; 10 e 15%) dos teores de dregs e grits em substituição ao clínquer, encontram-se nos gráficos das Figura 26, 27 e 28, sendo rompidos com 3, 7 e 28 dias de idade.

Os valores médios da evolução da resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com as porcentagens de teores de dregs e grits são apresentados na Figura 26. em formato de gráfico de barras, com os seus respectivos desvios padrões na forma de barras finas.

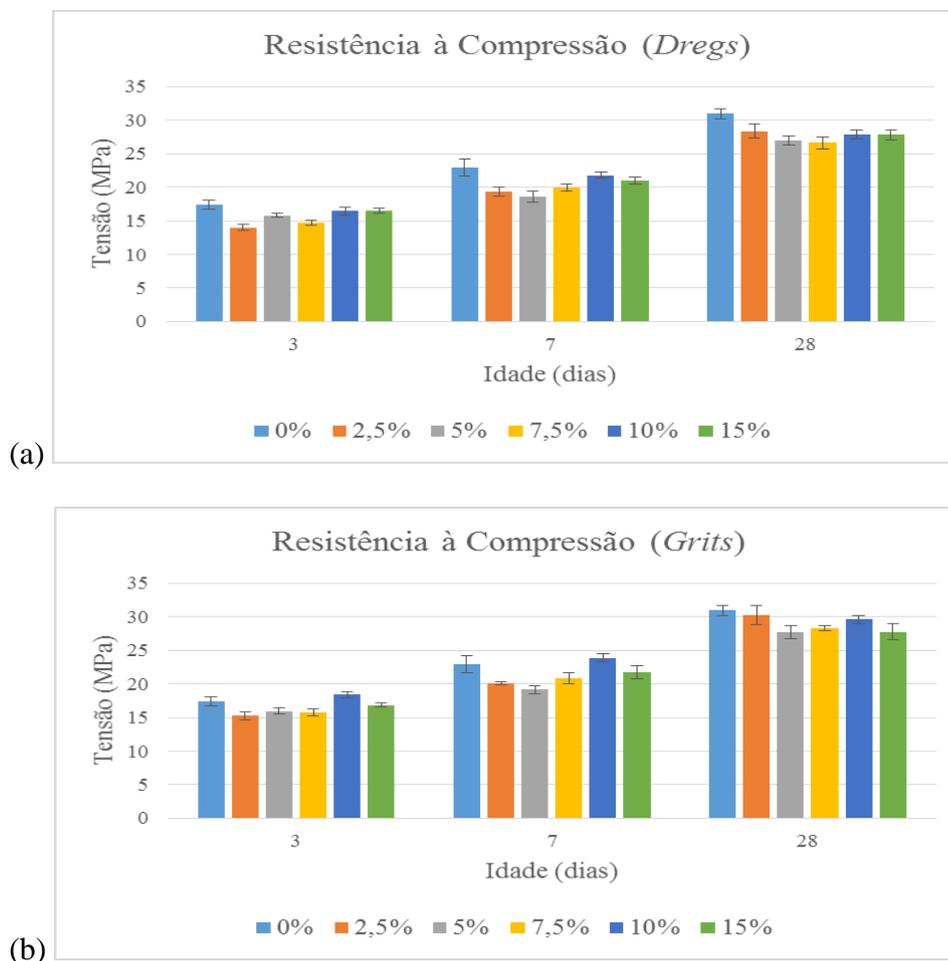


Figura 26. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com as porcentagens de: (a) Dregs e (b) Grits. Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

A evolução da resistência à compressão dos corpos de prova tende a aumentar com o aumento das reações. Os gráficos em formato de linhas, são apresentados para demonstrar a

evolução da resistência com as devidas porcentagens de substituições de dregs (Figura 27) e grits (Figura 28) em cada tempo de cura.

A análise estatística realizada para a resistência à compressão dos corpos de prova, foram efetuadas por meio da análise de variância – ANOVA e pelo teste Tukey, com o α igual a 5% de significância (Apêndices M e O).

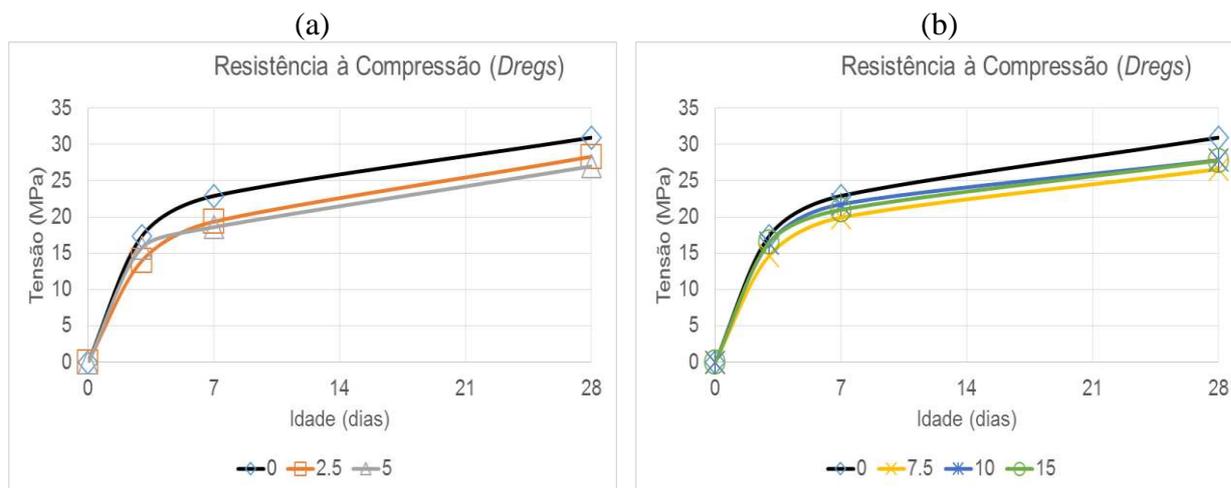


Figura 27. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos dregs e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos dregs.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Analisando os valores dos desvios padrões das medias com substituições de dregs, Figura 27, observa-se que:

- Os corpos de prova com as incorporações de dregs apresentaram o mesmo comportamento de taxa de crescimento de evolução com base na referência (0% de materiais);
- Todas as substituições apresentaram resistências menores em comparação com a referência (0% de materiais) na idade de 28 dias, As substituições de 10 e 15% apresentaram melhores valores a resistência na primeira idade (3 dias), ficando iguais estatisticamente à referência;
- A substituição de 10% apresentou tendência maior valor a resistência a compressão nas primeiras idades (3 e 7 dias), mas não manteve essa evolução aos 28 dias.

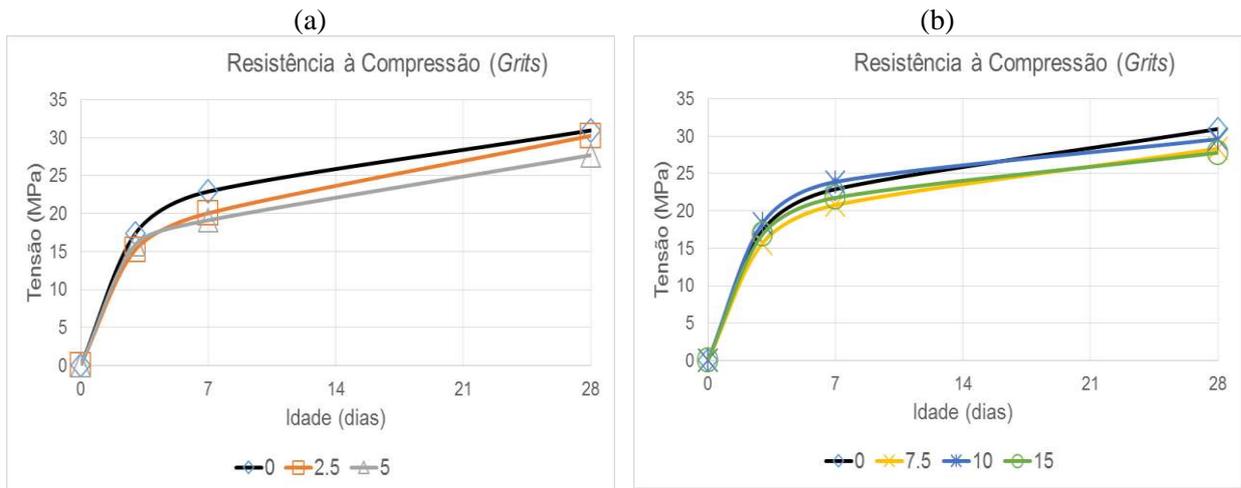


Figura 28. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos grits e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos grits.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Analisando os valores dos desvios padrões das médias com substituições de grits, Figura 28, observa-se que:

- Os corpos de prova com as incorporações de grits mostraram o mesmo comportamento de taxa de crescimento de evolução com base na referência (0% de materiais);
- Todas as substituições apresentaram resistência menores em comparação com a referência (0% de materiais) na idade de 28 dias;
- As substituições de 10 e 15% apresentaram melhores valores à resistência nas primeiras idades (3 e 7 dias), ficando iguais estatisticamente à referência;
- A substituição de 10% melhorou a resistência nas primeiras idades (3 e 7 dias), mas não manteve essa evolução na resistência aos 28 dias;
- Os resultados relativos à substituição de 2,5 e 10% encontram-se iguais estatisticamente à referência aos 28 dias.

5.2.4. Módulo estático de elasticidade à compressão

Os gráficos das Figura 29. , 30 e Figura 30 apresentam os resultados do ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão nos corpos de prova cilíndricos fabricados com as devidas adições (0; 2,5; 5; 7,5; 10 e 15%) dos teores de dregs e grits em substituição ao clínquer, realizados com 3, 7 e 28 dias de idade.

Os valores médios da evolução de módulo estático de elasticidade à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com as porcentagens de teores de dregs e grits são apresentados no formato de gráfico de barras, com os seus respectivos desvios padrões na forma de barras finas (Figura 29).

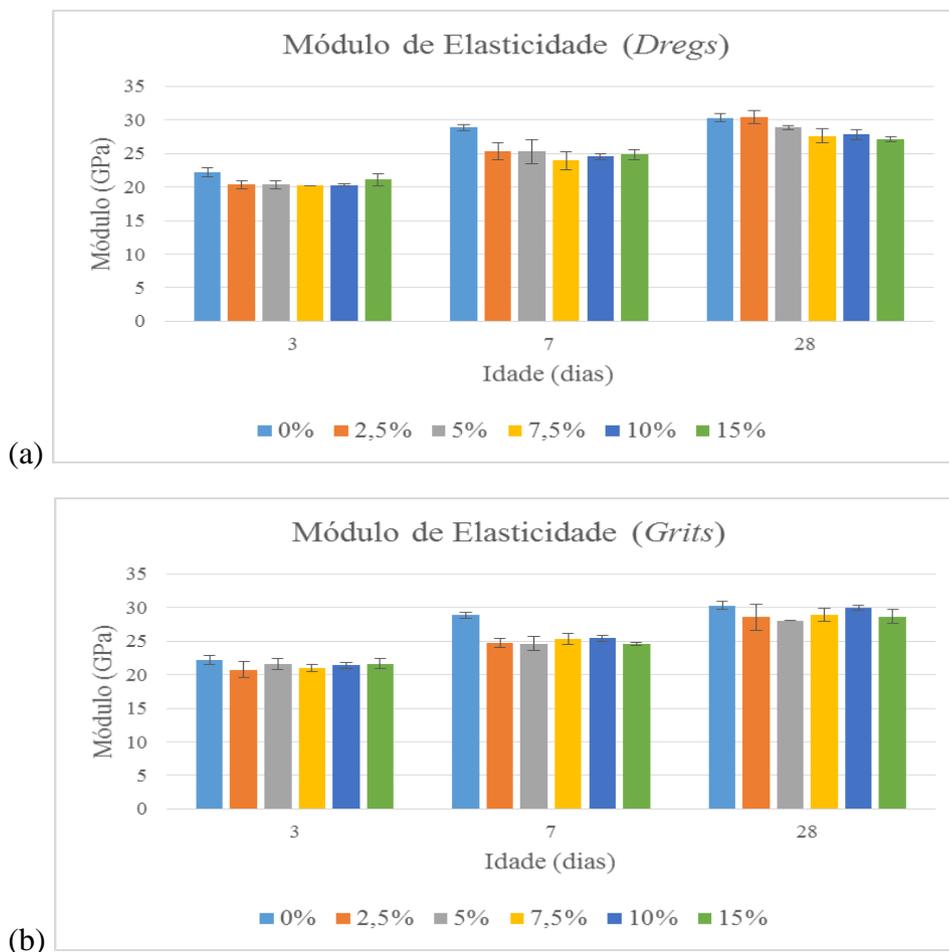


Figura 29. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade: (a) Dregs. e (b) Grits
 Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

A evolução do módulo estático de elasticidade à compressão dos corpos de prova tende a aumentar com a hidratação das partículas do clínquer com a idade. Os gráficos em formato de linhas, são apresentados para demonstrar a evolução do módulo estático de elasticidade com as devidas porcentagens de substituições de dregs na Figura 30, e grits na Figura 31, em cada tempo de cura.

A análise estatística realizada para o módulo estático de elasticidade à compressão dos corpos de prova, foram efetuadas por meio da análise de variância – ANOVA e pelo teste Tukey, com o α igual a 5% de significância Apêndices N e P.

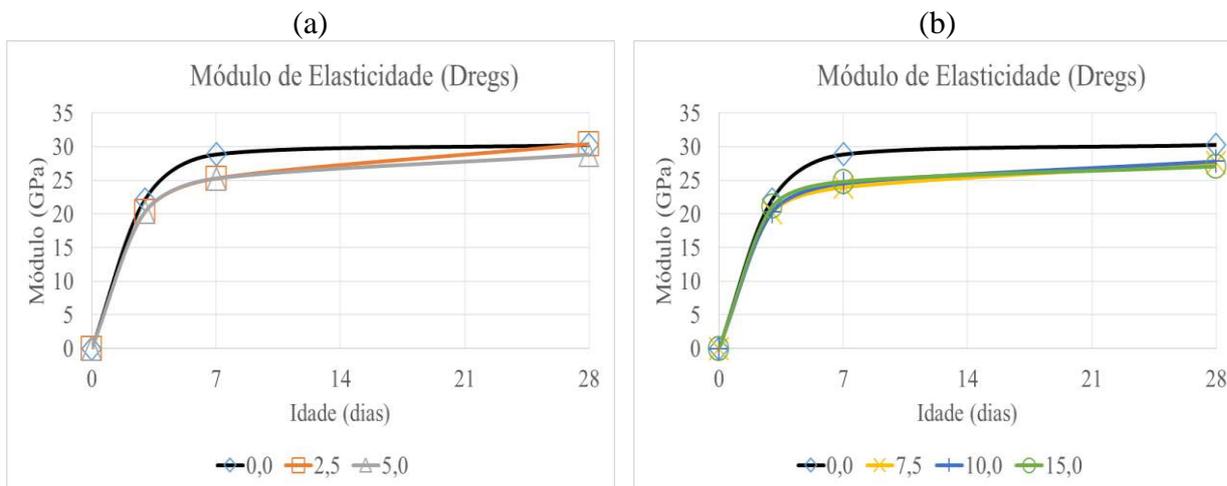


Figura 30. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos dregs e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos dregs.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Analisando os valores dos desvios padrões das médias com substituições de dregs observa-se que:

- Os corpos de prova com incorporação de dregs apresentaram o mesmo comportamento de taxa de crescimento de evolução do modelo estático de elasticidade, com base na referência (0% de materiais);
- As substituições apresentaram menores resistências em comparação com a referência (0% de materiais) na idade de 28 dias, exceto a substituição de 2,5 % que se apresentou um pouco acima da referência;
- A substituição de 15% demonstrou maiores valores a módulo de elasticidade na primeira idade (3 dias), ficando iguais estatisticamente à referência;
- Todas as substituições mantiveram os módulos de elasticidade similares na idade de 7 dias, diferentes estatisticamente à referência;
- Os resultados relativos à substituições 2,5; 5 e 7,5% foram estatisticamente iguais à referência aos 28 dias.

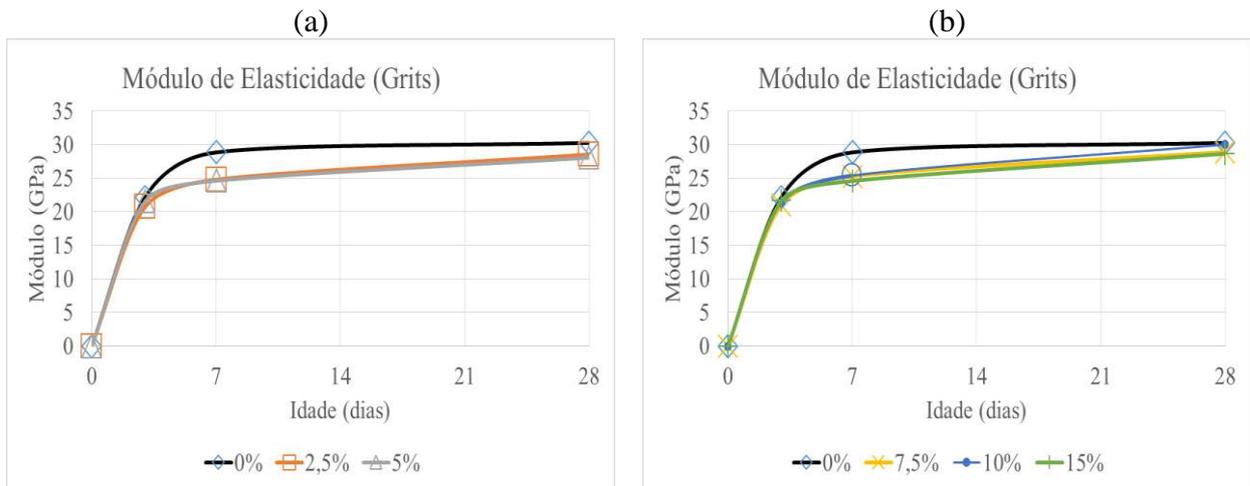


Figura 31. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade: (a) porcentagens de substituição de 0; 2,5 e 5% dos grits e (b) porcentagens de substituição de 0; 7,5; 10 e 15% dos grits.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Analisando os valores dos desvios padrões das médias com substituições de grits observa-se que:

- Os corpos de prova com incorporações de grits mostraram o mesmo comportamento de taxa de crescimento de evolução do modelo estático de elasticidade, com base na referência (0% de materiais);
- Todas as substituições apresentaram menores resistências em comparação com a referência (0% de materiais) na idade de 28 dias;
- Todas as substituições demonstraram melhores valores a módulo de elasticidade na primeira idade (3 dias), ficando iguais estatisticamente à referência;
- Todas as substituições mantiveram-se iguais na idade de 7 dias, mantendo-se diferentes estatisticamente à referência;
- Os resultados relativos à todas substituições encontram-se iguais estatisticamente à referência aos 28 dias.

5.2.5. Resistência à compressão com variação do Blaine

Observou-se que as substituições de 10% de dregs e grits se diferenciaram estatisticamente quanto à resistência, a partir dos resultados do ensaio a resistência mecânica à compressão nos corpos de prova cilíndricos fabricados com as devidas adições (0; 2,5; 5; 7,5; 10 e 15%) dos teores de dregs e grits em substituição ao clínquer.

Por esse motivo foram realizados novos ensaios com essas substituições em comparação a com outros valores de área específica do clínquer (369 e 441 m²/kg). Estes resultados encontram-se nos gráficos das Figura 32, 34 e 35, sendo rompidos com 3, 7 e 28 dias de idade.

Os valores médios da evolução da resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com as porcentagens de teores de dregs e grits são apresentados no formato de gráfico de barras, com os seus respectivos desvios padrões na forma de barras finas (Figura 32.).

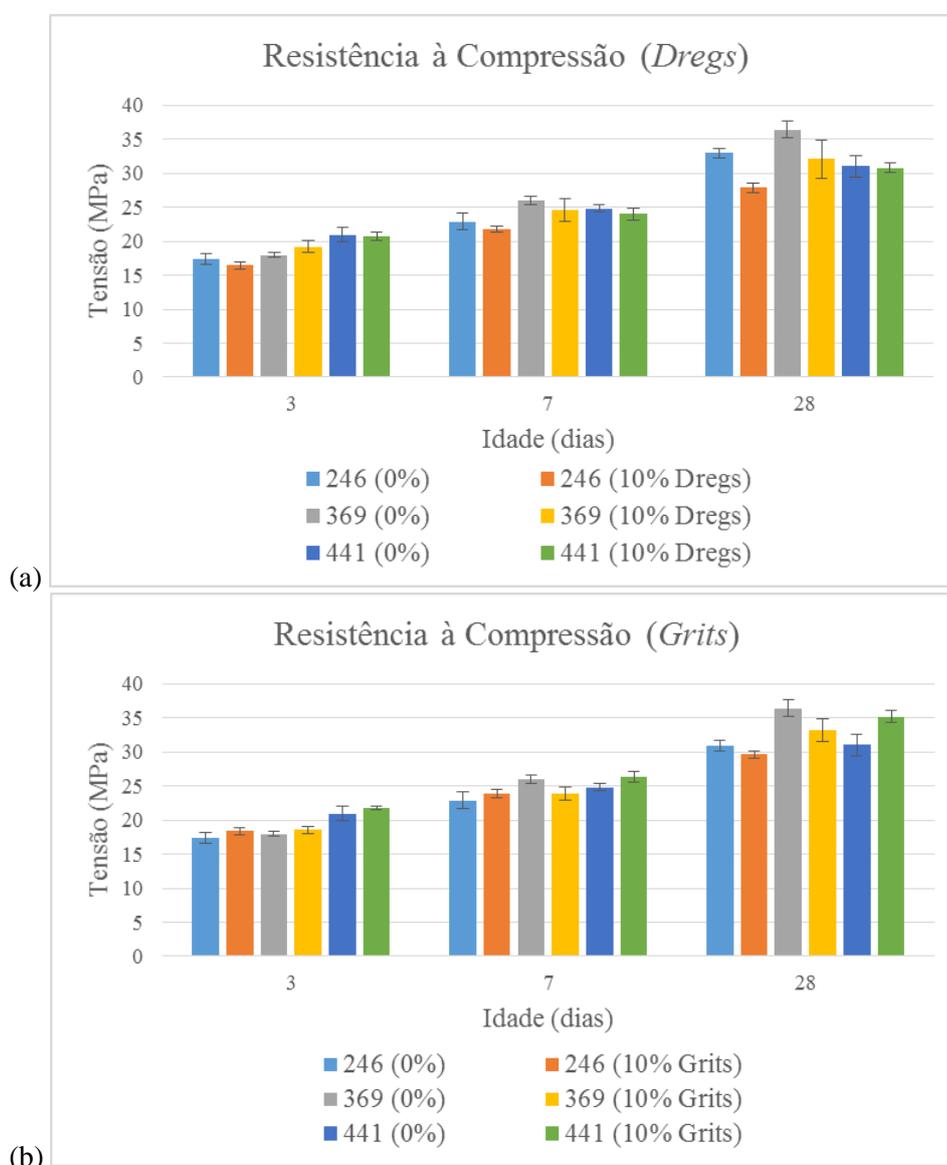


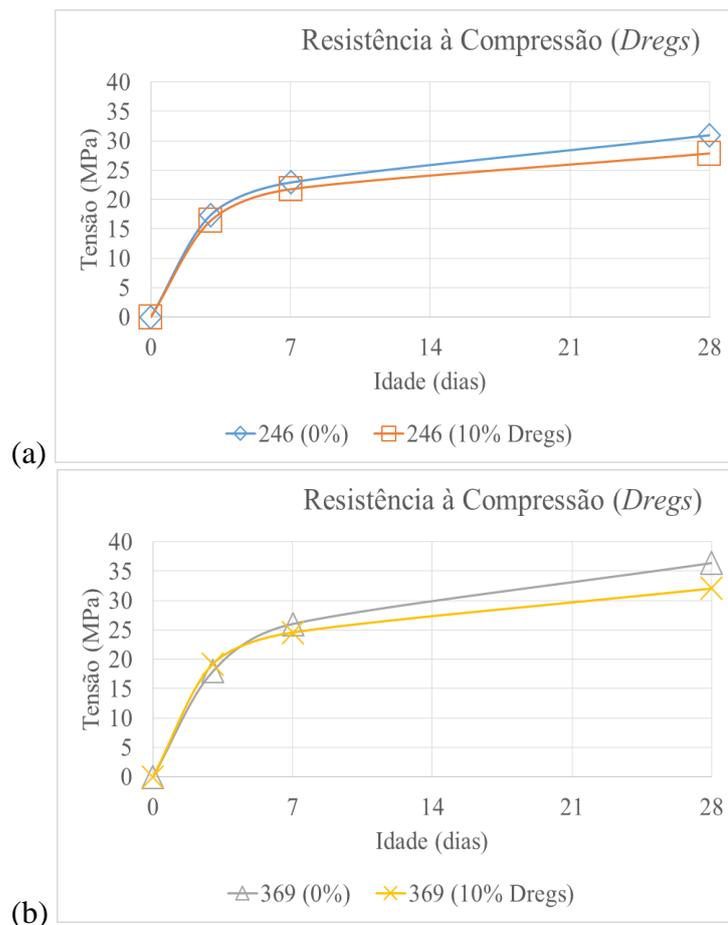
Figura 32. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com as porcentagens de 0 e 10% de: (a) Dregs e (b) Grits.

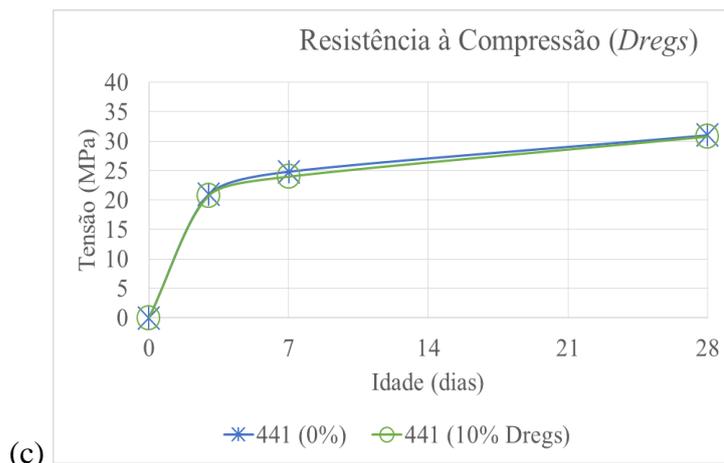
Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

A evolução da resistência à compressão dos corpos de prova tende a aumentar com a hidratação das partículas do clínquer com a idade. Os gráficos em formato de linhas, são apresentados para demonstrar a evolução da resistência com as devidas porcentagens de substituições de dregs, Figura 33, e grits, Figura 34, em cada tempo de cura.

A análise estatística realizada para a resistência à compressão dos corpos de prova foram efetuadas por meio da análise de variância – ANOVA fatorial e pelo teste Tukey, com o α igual a 5% de significância (Apêndices Q e R).

Pela ANOVA fatorial observou-se que a interação entre a área específica e substituições não foram significativas apenas para a idade de 3 dias, utilizando os grits, e para a idade de 7 dias utilizando os dregs. Porém, ao analisar tais interações pelo teste de Tukey, na idade de 3 dias, a área específica de 441 m²/kg, com 0% e 10% de grits, foram estatisticamente diferentes das demais e na idade de 7 dias, para os dregs, houveram mais interações estatisticamente diferentes (Apêndice Q e R).





(c) Figura 33. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão com porcentagens de substituição de 0 e 10%) dos dregs: (a) com área específica do clínquer de $246\text{m}^2/\text{kg}$; (b) com área específica do clínquer de $369\text{m}^2/\text{kg}$ e (c) com área específica do clínquer de $441\text{m}^2/\text{kg}$.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Analisando os valores dos desvios padrões das medias com substituições de dregs (Figura 33) em cada idade, dentro de cada específica, observa-se os seguintes resultados, pelo teste de Tukey que:

- Os corpos de prova com substituições mostraram o mesmo comportamento de taxa de crescimento de evolução com base na referência (0% de materiais) com áreas específicas diferentes;
- Nas idades de 3 dias, a substituição de dregs ficou estatisticamente iguais à referência, para as áreas específicas de 246, 369 e 441 m^2/kg ;
- Nas idades de 7 dias, a substituição de dregs ficou igual estatisticamente à referência com área específica de 441 m^2/kg ;
- Todas as substituições apresentaram resistências menores em comparação com a referência (0% de materiais) com áreas específicas de 246, 369 e 441 m^2/kg na idade de 28 dias na idade de 28 dias; e
- Os resultados relativos à substituição de 10% com área específica de 441 m^2/kg encontram-se igual estatisticamente com à referência aos 28 dias, estando com diferença de 0,23 MPa, respectivamente.

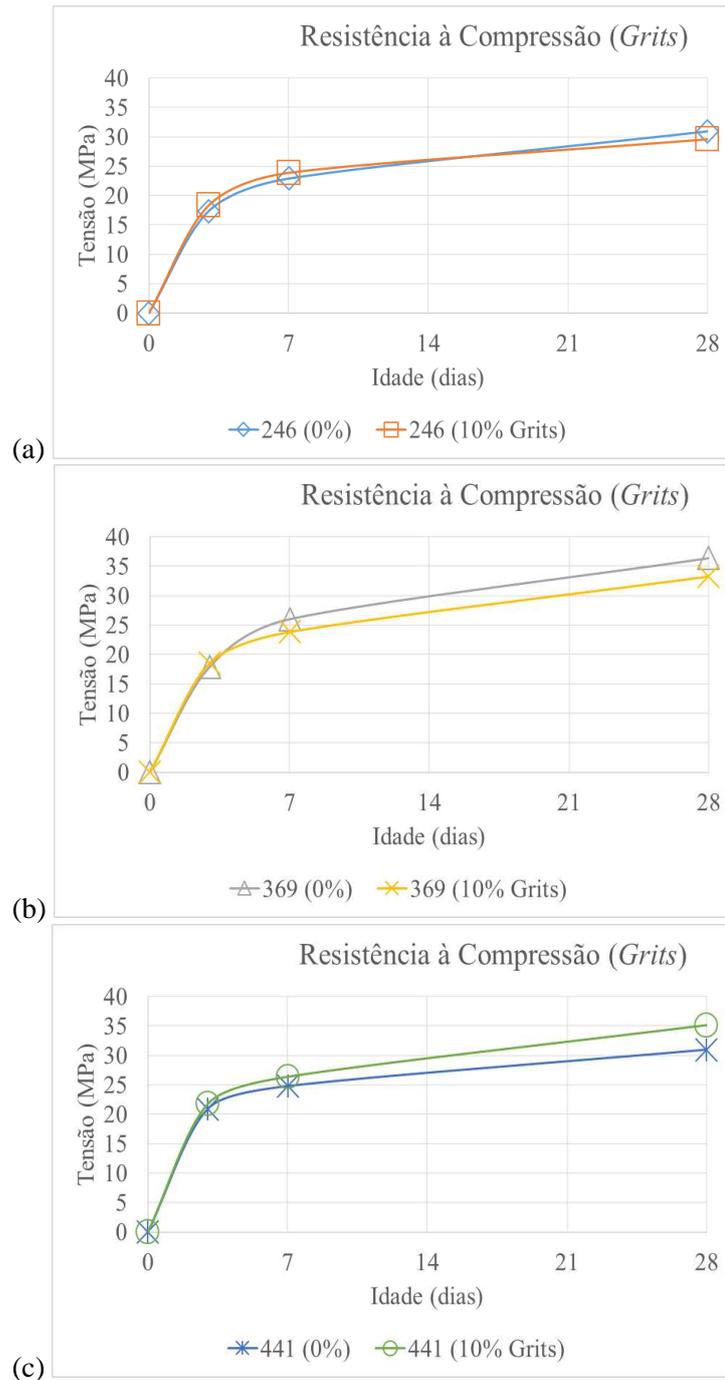


Figura 34. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão com porcentagens de substituição de 0 e 10% dos grits: (a) com área específica do clínquer de 246m²/kg; (b) com área específica do clínquer de 369m²/kg e (c) com área específica do clínquer de 441m²/kg.

Fonte: Arquivo particular do autor, 2016.

Analisando os valores dos desvios padrões das médias com substituições de grits (Figura 34) em cada idade, dentro de cada área específica, observa-se os seguintes resultados, pelo teste de Tukey que:

- Os corpos de prova com substituições mostraram o mesmo comportamento de taxa de crescimento de evolução com base na referência (0% de materiais) com áreas específicas diferentes;
- Nas idades de 3 dias, a substituição de grits ficou estatisticamente igual à referência, para as áreas específicas de 246, 369 e 441 m²/kg;
- Nas idades de 7 dias, a substituição de grits ficou estatisticamente igual à referência, para as áreas específicas de 369 e 441 m²/kg;
- As substituições apresentaram menores resistências em comparação com a referência (0% de materiais) com áreas específicas de 246 e 369 m²/kg na idade de 28 dias. No entanto, a substituição com área específica de 441 m²/kg melhorou a resistência em todas as idades (3, 7 e 28 dias) em comparação com a referência (0% de materiais);
- Os resultados relativos à substituição de 10% com área específica de 246 m²/kg encontram-se estatisticamente iguais com a referência aos 28 dias.

Observa-se que o comportamento dos resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão na substituição de 10% de dregs e grits comparado com a referência (0% de materiais) com áreas específicas de 246, 369 e 441 m²/kg ao longo das idades de 3, 7 e 28 dias são semelhantes. As características químicas e as dimensões das partículas dos materiais influenciaram diretamente nos resultados ensaiados. Esse desempenho parece estar relacionado aos fatores referentes à reação álcali-agregado (processo de deterioração química do concreto endurecido) e preenchimento dos vazios (efeito filler) dos corpos de prova (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Paulon (1981), a magnitude das reações das partículas está diretamente relacionada com as suas dimensões. Se forem pequenas aumentam as reações; mas se forem ainda menores, ou seja, na ordem de microns, tendem a reduzir as reações. Essa tendência explica os resultados de diminuição da resistência à compressão dos corpos de prova de idade de 28 dias em todas as substituições com área específica de 441 m²/kg, comparado com área específica de 369 m²/kg.

6. CONCLUSÕES

A caracterização físico-química dos dregs e grits mostrou que há um grande potencial para se utilizar esses materiais na incorporação ao clínquer na produção de cimento Portland. Os compostos presentes nos dregs e grits mostraram-se compatíveis à produção de cimento Portland.

As diferentes incorporações de dregs e grits (2,5; 5; 7,5 10 e 15%) ao clínquer mostraram-se viáveis para a produção de Cimento Portland comum com adição (CP I-S) e Cimento Portland composto (CP II-F).

A incorporação de ambos os materiais ao clínquer se enquadraram nos limites mínimos quanto aos testes de resistência à compressão e ao módulo de elasticidade estabelecidos pela norma brasileira. Todavia, as substituições de grits apresentam melhores resultados em comparação aos dregs.

O limite aceitável para a incorporação de dregs e de grits na produção de cimento Portland é de 10% de substituição de ambos materiais.

A alteração do grau de moagem do clínquer resulta na variação do Blaine (246, 369 e 441 m²/kg). Estes resultados influenciam diretamente no aumento da resistência à compressão na substituição de 10% de dregs e grits ao clínquer.

7. REFERÊNCIAS

ABUBAKR S.; SMITH A.; SCOTT G. Sludge characteristics and disposal alternatives for the pulp and paper industry. In: International environmental conference, Atlanta, 1995. **Anais...**, Atlanta: Tappi Press, 1995, p. 269–279

ALMEIDA, H.C.; SILVEIRA, C. B.; ERNANI, P. R.; CAMPOS, M. L.; ALMEIDA D. Composição química de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose (DREGS). **Quím. Nova**, v. 30, n. 7, p. 1669-1672, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Anual book of ASTM Standards**, Part 13, 134, Philadelphia, 1981 apud JAVELLANA, M.P., JAWED, I. Extraction of free lime in Portland cement and clinker by ethylene glycol. **Cement and Concrete Research**, v.12, p.399–403, 1982.

ARRIVABENE, L. F., JUNIOR, L. A. B. P., OLIVEIRA, J. R., TENÓRIO, J. A. S. e ESPINOSA, D. C. R., Technical feasibility of fabrication of cement agglomerated with granite waste and BOF steel slag. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 2, p. 241–246, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.732: **Cimento Portland comum**. 1 ed. Rio de Janeiro.1991. 5p.

_____. NBR 5.733: **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. 1 ed. Rio de Janeiro.1991. 5p.

_____. NBR 5.735: **Cimento Portland de Alto-Forno**. 1 ed. Rio de Janeiro.1991. 5p.

_____. NBR 5.736: **Cimento Portland Pozolânico**. 1 ed. Rio de Janeiro.1991 Errata 1:1999. 5p.

_____. NBR 5.738: **Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2007. 9p

_____. NBR 5.739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2015. 9p

_____. NBR 7.215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. 1 ed. Rio de Janeiro. 1991 Errata 1:1997. 8p.

_____. NBR 8.522: **Concreto – Determinação de módulo estático de elasticidade à compressão**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2008. 16p

_____. NBR 10.004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. 1 ed. Rio de Janeiro 2004. 71p.

_____. NBR 10.007: **Amostragem de resíduos sólidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. 6p.

_____. NBR 11.578: **Cimento Portland composto**. 1 ed. Rio de Janeiro.1991 Errata 1:1997. 5p.

_____. NBR 11.579: **Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2012 corrigido: 2013. 4p.

_____. NBR 11.582: **Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2012. 4p.

_____. NBR 16.372: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da área específica (no permeabilímetro de blaine)**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2015. 11p

_____. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. 1 ed. Rio de Janeiro. 2001. 5p

_____. NBR NM 43: **Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal**. 1 ed. Rio de Janeiro. 2003. 8p

_____. NBR NM 65: **Cimento Portland – Determinação do tempo de pega**. 1 ed. Rio de Janeiro. 2003. 4p

BAJPAI, P. Generation of Waste in Pulp and Paper Mills. In: _____. **Management of Pulp and Paper Mill Waster**. Suíça: Springer International Publishing, 2015. cap.2, p. 9-17.

BIERMANN, C. J. **Essentials of pulping and papermaking**, San Diego: Academic Press, 1993, 472p.

BRANCO, S. B., **Influência da adição de resíduo sólido alcalino da indústria de papel e celulose (dregs) nos atributos químicos do solo e na lixiviação de compostos fenólicos**. 2011. 57 f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo), Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2011.

BRITT, K. H. **Handbook of pulp and paper technology**. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1965, 537 p.

BURUBERRI, L. H., SEABRA, M.P. e LABRINCHA, J.A., Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 3, n. 3, p. 252–260, 2015.

CABRAL, F.; RIBEIRO, H.M.; HILÁRIO, L.; MACHADO, L.; VASCONCELOS, E. Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials. **Bioresource Technology**, v. 286, n. 17, p. 8294–8298, 2008.

CASTRO, F.; VILARINHO, C.; TRANCOSO, D.; FERREIRA, P.; NUNES, F.; MIRAGAIA, A. Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production. **Int. J. Materials Engineering Innovation**, v. 1, n. 1, p. 74-90, 2009.

CHEN, X.; WU, S. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 804-812, 2013.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 425-428, 2005.

COLODETTE, J.L., GOMES, F.J.B. (Ed.). **Branqueamento de Polpa Celulósica**. Viçosa: Editora UFV, 2015. 816p.

GARCIA, M. L., COUTINHO, J. S. Grits and dregs for cements replacement-Preliminary studies. In: 11th International Conference on non- conventional Materials and Technologies, Bath, U.K., 2009. **Anais...** Bath, 2009

GAVRILESCU, D. Solid waste generation in kraft pulp mills. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 3, n. 3, p. 399–404, 2004.

GIERER J. Chemistry of delignification. **Wood Science and Technology**, v. 19, n. 4, p. 289-312, 1985.

GOMIDE, J.L. **Polpa de celulose: química dos processos alcalinos de polpação**. Viçosa, MG: UFV, 1979. 50p.

GREEN, R. P.; HOUGH, G. **Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes**. 3. ed. Tappi Press, 1992.

GUERRA, M. A. S. L. **Avaliação de indicadores biológicos e físico-químicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose**. 2007, 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2007.

GUERRINI, I. A. **Uso de resíduos industriais de fábrica de celulose e papel em plantios de eucalipto**. 2003. 96 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2003.

HYTONEN, J. Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. **Silva Fennica**, v. 37, n. 2, p. 219–234, 2003.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. O Setor em números. Junho/2016 Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Cenarios/Cenarios_Junho.pdf> Acesso em: 07 Jul. 2016.

IPPC – Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques (BAT) in the Production of Pulp, Paper and Board. Sevilha. Espanha. European Commission. 2013. Disponível em: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/PP_BREF_FD_07_2013.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2015.

ITAMBÉ – Cia. de Cimento Itambé. 2010. Disponível em: <<https://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1276.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2016.

ISAIA, G.C., (2ªEd.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon – Instituto Brasileiro de Concreto, 2010. 1773p.

JORDAN, M., SANCHEZ, M.A., PADILLA, L., CESPEDES, R., OSSES, M., GONZALEZ, B. Kraft mill residues effects on Monterey Pine growth and soil microbial activity. **Journal of Environmental Quality**, v. 31, n. 3, p. 1004–1009, 2002.

KRIGSTIN S.; SAIN M. Characterization and potential utilization of recycled paper mill sludge. **Pulp and Paper Canada**, v. 107, n. 5, p. 29–32, 2006.

LAFARGE – Fabricação do cimento. Disponível em: <http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/2_2_1-Manufacturing_process>. Acesso em: 17 Set. 2015.

LEA, F.M. The chemistry of cement and concrete. 3. ed. Surrey: Edward Arnold Publishers Ltd., 1970. 723p.

LUXAN, M.P., Madruga, F., Saavedra, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete research**, v.19, p.63-68, 1989.

MACHADO, A. T., GOMES, A. O., CARDOSO. R. J. C. e CRUZ. E. B., **O uso de escórias de aciaria como agregado na construção civil**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), p. 1595–1602, 2002.

MACHADO, C.C.; PEREIRA, R.S.; PIRES, J.M.M. Influence of the thermal treatment of industrial solid residue (grits) on the mechanical resistance of a latosol for forest engineering roads. **Revista Árvore**, v.27, n.4, p.543-550, 2003.

MACHADO, C.C.; PIRES, J.M.M.; PEREIRA, R.S.; FONTES, M.P.F.; PORTUGAL, C.R.M. Chemical and environmental behavior of the solid wastes in forest roads pavements. **Scientia Forestalis**, v.28, n.70, p.131-136, 2006

MARTINS F. M.; Martins J. M.; FERRACIN, L. C.; CUNHA C. J. 2007. Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill. **Journal of Hazardous Materials**, v.147, n.1-2, p.610-617, 2007.

MATA, R. A. **Efeitos de lixiviado de cinzas de precipitadores eletrostáticos de caldeiras de recuperação no tratamento biológico de efluentes de indústrias de polpa celulósica kraft**. 2016, 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2016.

MATIAS, D.V.S. **Análise do potencial de valorização dos resíduos de Licor Verde da Indústria de Pasta de Papel**. 2012. 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade de Coimbra - UC, Coimbra -Portugal, 2012.

METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. PINI, 1994. 573p.

METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades, e Materiais**. São Paulo: 3. Ed. Ibracon – Instituto Brasileiro de Concreto, 2008. 674p.

METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concrete – Microstructure, Properties, and Materials**. California. Ed. Third, 2006. 684p.

MIELI, J. C. A. **Sistema de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel**. 2007, 99 f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2007.

MODELO R. C. E.; **Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil**. 2006. 119p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos) – Universidade de Aveiro, Aveiro -Portugal, 2006,

MONTE, M.C.; FUENTE E.; BLANCO A.; NEGRO C. Waste management from pulp and paper production in the European Union. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 293–308, 2009.

MORAIS, D. M. **Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito Federal**. 2007. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

MROUEH, U.M., WAHSTROM, M. By-products and recycled materials in earth construction in Finland – an assessment of applicability. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 35, n. 1-2, p. 117–129, 2002.

NEVILLE, A.M., **Propriedades do concreto**. 2ª,Ed. São Paulo: Ed. PINI, 1997. 828p.

NURMESNIEMI, H.; POYKIO, R.; KEISKI, R. L. A case study of waste management at the Northern Finnish pulp and paper mill complex of Stora Enso Veitsiluoto Mills. **Waste Management**, v. 27, n. 12, p. 1939–1948; 2007.

PAULON, V. A., **Reação Álcali-Agregado em Concreto**. 1981. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 1981.

PEREIRA, R.S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais**. 2005. 329p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2005.

PETRUCCI, E. G. R.; PAULON, V. A., **Concreto de cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Globo, 1998. xii, 307 p

POGGIALI, F. S. J., **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

SENAI-CETCEP (Centro de Tecnologia de Celulose e Papel). **Celulose**. São Paulo: SENAI-SP, 2013. 351 p

SEYYEDALIPOUR, S. F.; KEBRIA, D. Y, MALIDARREH, N. R; NOROUZNEJAD, G., Study of Utilization of Pulp and Paper Industry Wastes in Production of Concrete. **Journal of Engineering Research and Applications**, v. 4, n. 1, p. 115–122, 2014.

SILVA, C. M.; MORAIS. I. L. H. **Controle Ambiental na Indústria de Celulose e Papel**. Apostila de Aulas, ENF 666 e ENF 816 – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2013.

SIQUEIRA, F. B., **Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento**. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2013.

SIXTA H.; SÜSS H.-U.; POTTHAST A.; SCHWANNINGER M.; KROTSCHECK. A. W.; Pulp Bleaching. In: _____. **Handbook of pulp**. Weinheim: Wiley-VCH, 2006, cap.7, p. 609-932.

SOUZA, T. I.; CARDOSO, A.V. Utilização de Resíduos Sólidos da Indústria de Celulose Kraft na Fabricação de Cimento: caracterização físico-química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18., Porto de Galinhas, 2008. **Anais...** Porto de Galinhas, 2008.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. 2. ed. Wiltshire: Thomas Telford, 1997. 459p.

TEIXEIRA, J. R. **Utilização de resíduos sólidos alcalinos de indústrias de celulose na correção da acidez do solo**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2003.

WOLFF E. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha**. 2008. Dissertação (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2008.

ZAMBRANO, M.; PICHÚN, C.; ALVEAR, M.; VILLARROEL, M.; VELÁSQUEZ, I.; BAEZA, J.; VIDAL, G. Green liquor dregs effect on Kraft mill secondary sludge composting. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 3, p. 1028–1035, 2010.

APÊNDICE A – PROPRIEDADES DO CLÍNQUER PORTLAND

Tabela 18. Massa específica.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer				
Resultados obtidos em 15/02/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene			
Temperatura do banho (°C)	21	21	21	21
Massa da amostra (g)	60			
Leitura inicial (cm ³)	0,2	0,6	0,3	0,4
Leitura Final (cm ³)	20,2	20,5	20,3	20,4
Volume da amostra (cm ³)	20,0	19,9	20,0	20,0
Massa específica da amostra (g/cm ³)	3,00	3,02	3,00	3,00
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,015		0,000	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	3,01		3,00	
Massa específica total dos Clínquer (g/cm ³)	3,00			

Tabela 19. Área Específica de Blaine do clínquer.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer - BLAINE				
Resultados obtidos em 15/02/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4134		0,4134	
Massa da amostra (g)	2,93		2,93	
Tempo de queda (s)	71,70	74,64	70,49	69,47
Área específica da amostra (m ² /kg)	246,12	251,11	244,03	242,26
Área específica dos Clínquer (m ² /kg)	248,62		243,15	
Área específica total dos Clínquer (m ² /Kg)	245,88			

Tabela 20. Finura.

ENSAIO DE FINURA DO CLÍNQUER	
Resultados obtidos em 15/02/16	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,13
Índice de finura (%)	0,26

Tabela 21. Atividade Pozolânica.

ATIVIDADE POZOLÂNICA Clínquer	
Resultados obtidos em 25/02/16	
Calibração (K)	0,938
Temperatura (°C)	24
Leitura Inicial (mS/cm)	7,83
Leitura final (mS/cm)	8,81
Δ mS/cm	0,98

Tabela 22. Água para a pasta de consistência normal

ÁGUA PARA A PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL CLÍNQUER	
Resultados obtidos em 18/02/16	
Temperatura ambiente (°C)	24
Umidade relativa do ar (%)	95
Temperatura da água (°C)	25
Massa de cimento (g)	500,00
Massa de água (g)	154,40
Consistência (mm)	6
A (%)	30,88

Tabela 23. Tempos de Pega.

TEMPOS DE PEGA		
Resultados obtidos em 19/02/16		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	20
	Umidade relativa (%)	92
	Temperatura de água (°C)	20
Início do ensaio (h:min):		14:23
Início de pega (h:min):		16:08
Fim de pega (h:min):		17:03
Tempo de início de pega (h:min):		1:45
Tempo de fim de pega (h:min):		2:40

Tabela 24. Expansibilidade le chatelier.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER					
Resultados obtidos em ensaio realizado em 18/02 a 25/02/16					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,8	1,3	0,5	1,2	1,2	0,0
0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,27	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 25. Resistência à compressão.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 100% CLÍNQUER												
Resultados obtidos em ensaio realizado em 02/03 a 30/03/16												
Temperatura ambiente (°C) : 25					Umidade relativa do ar (%):			93	Temperatura da água (°C):		25	
Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados									
			Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
N°												
0%	B - 01	05/mar	3	50,12	49,98	50,050	1967,42	3460	17,59	17,40	0,73	5,99
	B - 02			50,33	50,03	50,180	1977,66	3568	18,04			
	B - 07			50,05	50,24	50,145	1974,90	3231	16,36			
	B - 08			50,07	50,23	50,150	1975,29	3482	17,63			
	B - 03	09/mar	7	50,22	49,98	50,100	1971,36	4327	21,95	22,91	1,22	6,01
	B - 04			50,03	50,10	50,065	1968,60	4427	22,49			
	B - 09			50,72	50,43	50,575	2008,92	4879	24,28			
	B - 10			50,28	50,15	50,215	1980,42	5000	25,25			
	B - 05	30/mar	28	50,29	50,20	50,245	1982,78	5609	28,29	30,95	0,75	2,56
	B - 06			50,23	50,13	50,180	1977,66	6104	30,86			
	B - 11			49,97	50,15	50,060	1968,21	5953	30,25			
	B - 12			50,20	49,91	50,055	1967,82	6247	31,74			

Tabela 26. Módulo de elasticidade.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 100% CLÍNQUER							
Resultados obtidos em ensaio realizado em 02/03 a 30/03/16							
Umidade relativa do ar (%):			93	Temperatura ambiente (°C):		25	
Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados				
			Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
N°							
0%	B - 01	05/mar	3		22,18	0,70	2,24
	B - 02			22,67			
	B - 07			20,00			
	B - 08			21,68			
	B - 03	09/mar	7		28,85	0,42	1,02
	B - 04			24,74			
	B - 09			29,14			
	B - 10			28,55			
	B - 05	30/mar	28		30,27	0,61	2,25
	B - 06			29,77			
	B - 11			30,08			
	B - 12			30,95			

APÊNDICE B – PROPRIEDADES DOS DREGS E GRITS

Tabela 27. Massa específica dregs.

MASSA ESPECÍFICA DOS DREGS				
Resultados obtidos em 01/12/15	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene			
Temperatura do banho (°C)	25	25	25	25
Massa da amostra (g)	45	45	50	55
Leitura inicial (cm ³)	0,9	0,8	0,9	0,4
Leitura Final (cm ³)	19,4	19,4	21,3	22,9
Volume da amostra (cm ³)	18,5	18,6	20,4	22,5
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,43	2,42	2,45	2,44
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,01		0,01	
Massa específica dos Dregs (g/cm ³)	2,43		2,45	
Massa específica total dos Dregs (g/cm ³)	2,44			

Tabela 28. Massa específica grits.

MASSA ESPECÍFICA DOS GRITS				
Resultados obtidos em 02/12/15	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene			
Temperatura do banho (°C)	26	26	25	25
Massa da amostra (g)	50			
Leitura inicial (cm ³)	0,4	0,3	0,7	0,8
Leitura Final (cm ³)	19	19	19,5	19,5
Volume da amostra (cm ³)	18,6	18,7	18,8	18,7
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,69	2,67	2,66	2,67
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,01		0,01	
Massa específica dos Grits (g/cm ³)	2,68		2,67	
Massa específica total dos Grits (g/cm ³)	2,67			

Tabela 29. Ensaio de finura do dregs.

ENSAIO DE FINURA DO DREGS	
Resultados obtidos em 15/02/16	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,39
Índice de finura (%)	0,78

Tabela 30. Ensaio de finura do grits.

ENSAIO DE FINURA DO GRITS	
Resultados obtidos em 15/02/16	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	47,6
Índice de finura (%)	95,2

Tabela 31. Área Específica de Blaine do dregs.

ÁREA ESPECÍFICA DOS DREGS - BLAINE				
Resultados obtidos em 05/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,5928		0,5928	
Massa da amostra (g)	1,65		1,65	
Tempo de queda (s)	113,73	161,31	142,99	125,74
Área específica da amostra (m ² /Kg)	945,10	1.125,57	1.059,73	993,75
Área específica dos Dregs (m ² /Kg)	1.035,34		1.026,74	
Área específica total dos Dregs (m ² /Kg)	1.031,04			

Tabela 32. Área Específica de Blaine do grits.

ÁREA ESPECÍFICA DOS GRITS - BLAINE				
Resultados obtidos em 01/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4603		0,4603	
Massa da amostra (g)	2,4		2,4	
Tempo de queda (s)	628,57	481,04	543,53	525,69
Área específica da amostra (m ² /Kg)	1.044,95	914,14	971,70	955,62
Área específica dos Grits (m ² /Kg)	979,54		963,66	
Área específica total dos Grits (m ² /Kg)	971,60			

Tabela 33. Atividade Pozolânica do dregs.

ATIVIDADE POZOLÂNICA Dregs	
Resultados obtidos em 25/02/16	
Calibração (K)	0,938
Temperatura (°C)	24
Leitura Inicial (mS/cm)	8,53
Leitura final (mS/cm)	8,22
Δ mS/cm	-0,31

Tabela 34. Atividade Pozolânica do grits.

ATIVIDADE POZOLÂNICA Grits	
Resultados obtidos em 25/02/16	
Calibração (K)	0,938
Temperatura (°C)	24
Leitura Inicial (mS/cm)	8,13
Leitura final (mS/cm)	9,00
Δ mS/cm	0,87

APÊNDICE C – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 2,5% DE DREGS

Tabela 35. Massa específica 2,5% dregs.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Dregs 2,5%		
Resultados obtidos em 29/04/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,4	0,4
Leitura Final (cm ³)	20,8	20,8
Volume da amostra (cm ³)	20,4	20,4
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,94	2,94
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,000	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,94	
Massa específica total dos Dregs 2,5% (g/cm ³)	2,94	

Tabela 36. Área Específica de Blaine do 2,5% dregs.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Dregs 2,5% - BLAINE				
Resultados obtidos em 06/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	26	26	26	26
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,837		1,837	
Porosidade adotada	0,4173		0,4173	
Massa da amostra (g)	2,85		2,85	
Tempo de queda (s)	91,70	77,99	79,23	94,39
Área específica da amostra (m ² /Kg)	291,36	268,70	270,83	295,60
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	280,03		283,22	
Área específica total dos Dregs 2,5% (m ² /Kg)	281,62			

Tabela 37. Finura 2,5% dregs.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Dregs 2,5%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,11
Índice de finura (%)	0,22

Tabela 38. Tempos de Pega 2,5% dregs.

TEMPOS DE PEGA DREGS 2,5%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		13:55
Início de pega (h:min):		15:50
Fim de pega (h:min):		16:42
Tempo de início de pega (h:min):		1:55
Tempo de fim de pega (h:min):		2:47

Tabela 39. Expansibilidade le chatelier 2,5% dregs.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER DREGS 2,5%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 40. Resistência à compressão 2,5% dregs.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 2,5% DREGS												
Temperatura ambiente (°C): 25				Umidade relativa do ar (%): 93				Temperatura da água (°C): 25				
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
2,5% Dregs	C - 25	26/fev	3	50,11	50,24	50,175	1977,26	2793	14,13	13,99	0,48	3,77
	C - 26			50,14	50,25	50,195	1978,84	2664	13,46			
	C - 31			50,00	50,21	50,105	1971,75	2836	14,38			
	C - 32			49,80	50,36	50,080	1969,78	3058	15,52			
	C - 27	01/mar	7	50,16	50,13	50,145	1974,90	3653	18,50	19,36	0,67	4,46
	C - 28			50,21	50,24	50,225	1981,21	3797	19,17			
	C - 33			50,76	50,24	50,500	2002,96	3990	19,92			
	C - 34			50,69	50,29	50,490	2002,17	3976	19,86			
	C - 29	22/mar	28	50,30	50,60	50,450	1999,00	5409	27,06	28,32	1,05	4,47
	C - 30			50,06	50,16	50,110	1972,14	5516	27,97			
	C - 35			50,45	50,80	50,625	2012,89	5796	28,79			
	C - 36			50,42	50,14	50,280	1985,55	5853	29,48			

Tabela 41. Módulo de elasticidade 2,5% dregs.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 2,5% DREGS							
Umidade relativa do ar (%):			93	Temperatura ambiente (°C): 25			
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados			
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
2,5% Dregs	C - 25	26/fev	3		20,33	0,59	3,32
	C - 26			19,65			
	C - 31			20,56			
	C - 32			20,77			
	C - 27	01/mar	7		25,29	1,28	5,37
	C - 28			23,93			
	C - 33			26,47			
	C - 34			25,47			
	C - 29	22/mar	28		30,40	0,94	2,19
	C - 30			47,66			
	C - 35			29,74			
	C - 36			31,07			

APÊNDICE D – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 2,5% DE GRITS

Tabela 42. Massa específica 2,5% grits.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Grits 2,5%		
Resultados obtidos em 25/04/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,95	0,90
Leitura Final (cm ³)	20,65	20,50
Volume da amostra (cm ³)	19,70	19,60
Massa específica da amostra (g/cm ³)	3,05	3,06
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,016	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	3,05	
Massa específica total dos Grits 2,5% (g/cm ³)	3,05	

Tabela 43. Área Específica de Blaine do 2,5% grits.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Grits 2,5% - BLAINE				
Resultados obtidos em 01/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4269		0,4269	
Massa da amostra (g)	2,91		2,91	
Tempo de queda (s)	115,54	117,80	108,17	107,13
Área específica da amostra (m ² /Kg)	330,09	333,30	319,39	317,85
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	331,70		318,62	
Área específica total dos Grits 2,5% (m ² /Kg)	325,16			

Tabela 44. Finura 2,5% grits.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Grits 2,5%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,64
Índice de finura (%)	1,28

Tabela 45. Tempos de Pega 2,5% grits.

TEMPOS DE PEGA DREGS 2,5%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		13:55
Início de pega (h:min):		15:50
Fim de pega (h:min):		16:42
Tempo de início de pega (h:min):		1:55
Tempo de fim de pega (h:min):		2:47

Tabela 46. Expansibilidade le chatelier 2,5% grits.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER GRITS 2,5%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 47. Resistência à compressão 2,5% grits.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 2,5% GRITS												
Temperatura ambiente (°C):25				Umidade relativa do ar (%):93				Temperatura da água (°C): 25				
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
2,5% Grits	C - 13	26/fev	3	50,09	50,27	50,180	1977,66	3037	15,36	15,24	0,63	5,51
	C - 14			50,34	50,14	50,240	1982,39	3187	16,08			
	C - 19			50,27	50,14	50,205	1979,63	2944	14,87			
	C - 20			50,22	50,10	50,160	1976,08	2894	14,65			
	C - 15	01/mar	7	50,13	50,08	50,105	1971,75	3976	20,16	20,05	0,22	1,25
	C - 16			50,46	50,38	50,420	1996,62	3954	19,80			
	C - 21			49,92	49,97	49,945	1959,18		0,00			
	C - 22			50,70	50,06	50,380	1993,45	4026	20,20			
	C - 17	22/mar	28	50,19	50,26	50,225	1981,21	6283	31,71	30,25	1,39	4,82
	C - 18			50,24	50,41	50,325	1989,10	5989	30,11			
	C - 23			50,23	50,26	50,245	1982,78	5115	25,80			
	C - 24			50,24	50,12	50,180	1977,66	5724	28,94			

Tabela 48 Módulo de elasticidade 2,5% grits.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 2,5% GRITS							
Umidade relativa do ar (%):			93	Temperatura ambiente (°C): 25			
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados			
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
2,5% Grits	C - 13	26/fev	3		20,73	1,20	4,11
	C - 14			21,58			
	C - 19			20,02			
	C - 20			19,88			
	C - 15	01/mar	7		24,78	0,68	1,93
	C - 16			24,30			
	C - 21						
	C - 22			25,26			
	C - 17	22/mar	28		28,53	1,89	4,68
	C - 18			29,87			
	C - 23			24,61			
	C - 24			27,20			

APÊNDICE E – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 5% DE DREGS

Tabela 49. Massa específica 5% dregs.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Dregs 5%		
Resultados obtidos em 02/05/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,5	0,6
Leitura Final (cm ³)	20,6	20,6
Volume da amostra (cm ³)	20,1	20,0
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,99	3,00
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,015	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,99	
Massa específica total dos Dregs 5% (g/cm ³)	2,99	

Tabela 50. Área Específica de Blaine do 5% dregs.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Dregs 5% - BLAINE				
Resultados obtidos em 01/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4374		0,4374	
Massa da amostra (g)	2,8		2,8	
Tempo de queda (s)	104,27	86,59	81,39	91,55
Área específica da amostra (m ² /Kg)	337,92	307,94	298,55	316,64
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	322,93		307,60	
Área específica total dos Dregs 5% (m ² /Kg)	315,26			

Tabela 51. Finura 5% dregs.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Dregs 5%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,14
Índice de finura (%)	0,28

Tabela 52. Tempos de Pega 5% dregs.

TEMPOS DE PEGA DREGS 5%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		15:25
Início de pega (h:min):		16:45
Fim de pega (h:min):		17:50
Tempo de início de pega (h:min):		1:20
Tempo de fim de pega (h:min):		2:25

Tabela 53. Expansibilidade Le Chatelier 5% dregs.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER DREGS 5%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,0
0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 54. Resistência à compressão 5% dregs.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 5% DREGS												
Temperatura ambiente (°C): 23				Umidade relativa do ar (%): 91					Temperatura da água (°C): 23			
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
5% Dregs	C - 49	03/mar	3	50,10	49,95	50,025	1965,46	3059	15,56	15,81	0,36	3,18
	C - 50			50,08	50,18	50,130	1973,72	3124	15,83			
	C - 55			50,32	50,22	50,270	1984,76	3238	16,31			
	C - 56			50,15	50,21	50,180	1977,66	3073	15,54			
	C - 51	07/mar	7	50,14	50,11	50,125	1973,33	3840	19,46	18,61	0,84	5,73
	C - 52			50,19	50,16	50,175	1977,26	3632	18,37			
	C - 57			50,26	50,07	50,165	1976,48	3467	17,54			
	C - 58			50,20	50,31	50,255	1983,57	3782	19,07			
	C - 53	28/mar	28	50,29	50,13	50,210	1980,02	4828	24,39	26,99	0,69	2,68
	C - 54			50,24	50,24	50,240	1982,39	5208	26,27			
	C - 59			50,56	50,45	50,505	2003,36	5538	27,64			
	C - 60			50,92	50,02	50,470	2000,58	5416	27,07			

Tabela 55 Módulo de elasticidade 5% dregs.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 5% DREGS							
Umidade relativa do ar (%): 93				Temperatura ambiente (°C): 25			
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados			
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
5% Dregs	C - 49	03/mar	3		20,34	0,61	3,20
	C - 50			20,44			
	C - 55			20,89			
	C - 56			19,69			
	C - 51	07/mar	7		25,28	1,76	4,93
	C - 52			59,18			
	C - 57			24,03			
	C - 58			26,52			
	C - 53	28/mar	28		28,84	0,36	0,89
	C - 54			28,58			
	C - 59			29,09			
	C - 60			45,98			

APÊNDICE F – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 5% DE GRITS

Tabela 56. Massa específica 5% grits.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Grits 5%		
Resultados obtidos em 25/04/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,00	0,90
Leitura Final (cm ³)	19,90	20,90
Volume da amostra (cm ³)	19,90	20,00
Massa específica da amostra (g/cm ³)	3,02	3,00
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	-0,015	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	3,01	
Massa específica total dos Grits 5% (g/cm ³)	3,01	

Tabela 57. Área Específica de Blaine do 5% grits.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Grits 5% - BLAINE				
Resultados obtidos em 06/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4302		0,4302	
Massa da amostra (g)	2,85		2,85	
Tempo de queda (s)	98,98	89,71	93,38	91,55
Área específica da amostra (m ² /Kg)	315,52	300,38	306,46	303,44
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	307,95		304,95	
Área específica total dos Grits 5% (m ² /Kg)	306,45			

Tabela 58. Finura 5% grits.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Grits 5%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	1,23
Índice de finura (%)	2,46

Tabela 59. Tempos de Pega 5% grits.

TEMPOS DE PEGA GRITS 5%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		10:30
Início de pega (h:min):		12:00
Fim de pega (h:min):		13:15
Tempo de início de pega (h:min):		1:30
Tempo de fim de pega (h:min):		2:45

Tabela 60. Expansibilidade Le Chatelier 5% grits.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER GRITS 5%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 61. Resistência à compressão 5% grits.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 5% GRITS												
Temperatura ambiente (°C):23				Umidade relativa do ar (%): 91				Temperatura da água (°C): 25				
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
5% Grits	C - 37	03/mar	3	50,19	50,13	50,160	1976,08	3174	16,06	15,96	0,45	3,66
	C - 38			50,66	50,72	50,690	2018,06	3338	16,54			
	C - 43			50,00	50,33	50,165	1976,48	3066	15,51			
	C - 44			50,04	50,24	50,140	1974,51	3102	15,71			
	C - 39	07/mar	7	50,18	50,56	50,370	1992,66	3976	19,95	19,13	0,63	4,31
	C - 40			50,15	50,09	50,120	1972,93	3711	18,81			
	C - 45			50,11	50,27	50,190	1978,45	3811	19,26			
	C - 46			50,16	50,06	50,110	1972,14	3646	18,49			
	C - 41	28/mar	28	50,18	50,14	50,160	1976,08	5251	26,57	27,70	1,02	4,06
	C - 42			50,10	50,18	50,140	1974,51	5667	28,70			
	C - 47			50,23	50,18	50,205	1979,63	5366	27,10			
	C - 48			50,13	50,20	50,165	1976,48	5616	28,41			

Tabela 62 Módulo de elasticidade 5% grits.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 5% GRITS								
Umidade relativa do ar (%):				93	Temperatura ambiente (°C):			25
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados				
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
5% Grits	C - 37	03/mar	3		21,59	0,84	2,76	
	C - 38			22,19				
	C - 43			18,72				
	C - 44			21,00				
	C - 39	07/mar	7		24,61	1,05	4,28	
	C - 40			24,63				
	C - 45			25,65				
	C - 46			23,56				
	C - 41	28/mar	28		28,06	0,04	0,11	
	C - 42			58,80				
	C - 47			28,09				
	C - 48			28,03				

APÊNDICE G – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 7,5% DE DREGS

Tabela 63. Massa específica 7,5% dregs.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Dregs 7,5%		
Resultados obtidos em 03/05/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,3	0,3
Leitura Final (cm ³)	20,7	20,8
Volume da amostra (cm ³)	20,4	20,5
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,94	2,93
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	-0,014	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,93	
Massa específica total dos Dregs 7,5% (g/cm ³)	2,93	

Tabela 64. Área Específica de Blaine do 7,5% dregs.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Dregs 7,5% - BLAINE				
Resultados obtidos em 06/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	26	26	26	26
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,837		1,837	
Porosidade adotada	0,4159		0,4159	
Massa da amostra (g)	2,85		2,85	
Tempo de queda (s)	78,29	77,30	80,98	80,93
Área específica da amostra (m ² /Kg)	267,84	266,14	272,40	272,32
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	266,99		272,36	
Área específica total dos Clínquer (m ² /Kg)	269,67			

Tabela 65. Finura 7,5% dregs.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Dregs 7,5%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,5
Índice de finura (%)	1

Tabela 66. Tempos de Pega 7,5% dregs.

TEMPOS DE PEGA DREGS 7,5%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		14:35
Início de pega (h:min):		15:46
Fim de pega (h:min):		17:18
Tempo de início de pega (h:min):		1:11
Tempo de fim de pega (h:min):		2:43

Tabela 67. Expansibilidade Le Chatelier 7,5% dregs.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER DREGS 7,5%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 68. Resistência à compressão 7,5% dregs.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 7,5% DREGS												
Temperatura ambiente (°C): 23				Umidade relativa do ar (%): 91				Temperatura da água (°C): 23				
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
7,5% Dregs	C - 73	07/mar	3	50,18	50,16	50,170	1976,87	2944	14,89	14,67	0,41	4,00
	C - 74			50,18	50,20	50,190	1978,45	2787	14,09			
	C - 79			50,21	50,32	50,265	1984,36	2980	15,02			
	C - 80			50,15	50,13	50,140	1974,51	2901	14,69			
	C - 75	11/mar	7	50,08	50,14	50,110	1972,14	3933	19,94	19,93	0,52	3,33
	C - 76			49,70	50,51	50,105	1971,75	3940	19,98			
	C - 81			50,27	50,29	50,280	1985,55	3825	19,27			
	C - 82			50,18	50,21	50,195	1978,84	4062	20,53			
	C - 77	01/abr	28	50,08	50,66	50,370	1992,66	5487	27,54	26,61	0,87	4,37
	C - 78			50,62	50,68	50,650	2014,88	5351	26,56			
	C - 83			50,40	50,70	50,550	2006,93	5108	25,45			
	C - 84			50,13	50,25	50,190	1978,45	5323	26,90			

Tabela 69 Módulo de elasticidade 7,5% dregs.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 7,5% DREGS							
Umidade relativa do ar (%): 93				Temperatura ambiente (°C): 25			
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados			
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
7,5% Dregs	C - 73	07/mar	3		20,18	0,05	0,17
	C - 74			20,21			
	C - 79			20,14			
	C - 80			47,36			
	C - 75	11/mar	7		23,95	1,33	3,94
	C - 76			38,29			
	C - 81			23,01			
	C - 82			24,90			
	C - 77	01/abr	28		27,62	1,06	3,94
	C - 78			28,71			
	C - 83			26,59			
	C - 84			27,56			

APÊNDICE H – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 7,5% DE GRITS

Tabela 70. Massa específica 7,5% grits.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Grits 7,5%		
Resultados obtidos em 26/04/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,20	0,60
Leitura Final (cm ³)	20,30	20,60
Volume da amostra (cm ³)	20,10	20,00
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,99	3,00
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,015	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,99	
Massa específica total dos Grits 7,5% (g/cm ³)	2,99	

Tabela 71. Área Específica de Blaine do 7,5% grits.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Grits 7,5% - BLAINE				
Resultados obtidos em 01/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	26	26	26	26
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,837		1,837	
Porosidade adotada	0,4273		0,4273	
Massa da amostra (g)	2,85		2,85	
Tempo de queda (s)	77,51	74,42	77,42	79,35
Área específica da amostra (m ² /Kg)	277,56	271,97	277,40	280,83
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	274,76		279,12	
Área específica total dos Grits 7,5% (m ² /Kg)	276,94			

Tabela 72. Finura 7,5% grits.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Grits 7,5%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	2,68
Índice de finura (%)	5,36

Tabela 73. Tempos de Pega 7,5% grits.

TEMPOS DE PEGA GRITS 7,5%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		14:00
Início de pega (h:min):		15:40
Fim de pega (h:min):		17:26
Tempo de início de pega (h:min):		1:40
Tempo de fim de pega (h:min):		3:26

Tabela 74. Expansibilidade Le Chatelier 7,5% grits.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER GRITS 7,5%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 75. Resistência à compressão 7,5% grits.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 7,5% GRITS												
Temperatura ambiente (°C): 23				Umidade relativa do ar (%): 91			Temperatura da água (°C): 23					
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
7,5% Grits	C - 61	07/mar	3	50,17	50,09	50,130	1973,72	3009	15,24	15,69	0,54	4,95
	C - 62			50,15	50,08	50,115	1972,54	3059	15,51			
	C - 67			50,06	50,02	50,040	1966,64	3059	15,55			
	C - 68			50,33	50,17	50,250	1983,18	3267	16,47			
	C - 63	11/mar	7	50,30	50,31	50,305	1987,52	3962	19,93	20,78	0,84	4,99
	C - 64			50,17	50,22	50,195	1978,84	4169	21,07			
	C - 69			50,09	50,11	50,100	1971,36	4005	20,31			
	C - 70			49,96	50,03	49,995	1963,10	4284	21,82			
	C - 65	01/abr	28	50,16	50,17	50,165	1976,48	5516	27,91	28,34	0,38	1,58
	C - 66			50,20	50,28	50,240	1982,39	5645	28,48			
	C - 71			50,27	50,28	50,275	1985,15	5595	28,18			
	C - 72			50,04	50,15	50,095	1970,96	5674	28,79			

Tabela 76 Módulo de elasticidade 7,5% grits.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 7,5% GRITS								
Umidade relativa do ar (%):			93		Temperatura ambiente (°C):			25
	Modelo Ensaiado N°	Data	Idade (dias)	Resultados				
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
7,5% Grits	C - 61	07/mar	3		20,98	0,54	2,61	
	C - 62			20,45				
	C - 67			21,53				
	C - 68			20,97				
	C - 63	11/mar	7		25,29	0,85	3,52	
	C - 64			24,48				
	C - 69			25,20				
	C - 70			26,18				
	C - 65	01/abr	28		28,91	0,92	3,22	
	C - 66			28,92				
	C - 71			27,98				
	C - 72			29,82				

APÊNDICE I – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 10% DE DREGS

Tabela 77. Massa específica 10% dregs.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Dregs 10%		
Resultados obtidos em 04/05/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,9	0,5
Leitura Final (cm ³)	21,8	21,4
Volume da amostra (cm ³)	20,9	20,9
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,87	2,88
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,007	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,87	
Massa específica total dos Dregs 10% (g/cm ³)	2,87	

Tabela 78. Área Específica de Blaine do 10% dregs.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Dregs 10% - BLAINE				
Resultados obtidos em 01/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	26	26	26	26
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,837		1,837	
Porosidade adotada	0,4456		0,4456	
Massa da amostra (g)	2,65		2,65	
Tempo de queda (s)	81,86	76,89	90,65	94,78
Área específica da amostra (m ² /Kg)	326,66	316,58	343,75	351,49
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	321,62		347,62	
Área específica total dos Dregs 10% (m ² /Kg)	334,62			

Tabela 79. Finura 10% dregs.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Dregs 10%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,27
Índice de finura (%)	0,54

Tabela 80. Tempos de Pega 10% dregs.

TEMPOS DE PEGA DREGS 10%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		15:00
Início de pega (h:min):		16:16
Fim de pega (h:min):		17:37
Tempo de início de pega (h:min):		1:16
Tempo de fim de pega (h:min):		2:37

Tabela 81. Expansibilidade Le Chatelier 10% dregs.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER DREGS 10%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 82. Resistência à compressão 10% dregs.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 10% DREGS												
Temperatura ambiente (°C): 23				Umidade relativa do ar (%): 91				Temperatura da água (°C): 23				
	Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
10% Dregs	C - 97	18/mar	3	50,17	50,20	50,185	1978,05	3138	15,86	16,43	0,54	3,87
	C - 98			50,10	50,05	50,075	1969,39	3174	16,11			
	C - 103			49,92	50,19	50,055	1967,82	3281	16,67			
	C - 104			50,19	50,16	50,175	1977,26	3374	17,06			
	C - 99	22/mar	7	50,84	50,21	50,525	2004,95	4305	21,47	21,76	0,44	2,34
	C - 100			50,69	50,20	50,445	1998,60	4305	21,54			
	C - 105			50,11	50,51	50,310	1987,92	4427	22,27			
	C - 106			50,06	50,23	50,145	1974,90	4728	23,94			
	C - 101	12/abr	28	50,27	50,71	50,490	2002,17	5581	27,87	27,85	0,71	3,34
	C - 102			50,66	50,48	50,570	2008,52	5781	28,78			
	C - 107			50,14	50,21	50,175	1977,26	5473	27,68			
	C - 108			50,05	50,08	50,065	1968,60	5330	27,07			

Tabela 83 Módulo de elasticidade 10% dregs.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 10% DREGS							
Umidade relativa do ar (%):93				Temperatura ambiente (°C): 25			
	Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados			
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
10% Dregs	C - 97	18/mar	3		20,28	0,14	0,71
	C - 98			20,30			
	C - 103			20,14			
	C - 104			20,41			
	C - 99	22/mar	7		24,54	0,43	1,97
	C - 100			24,05			
	C - 105			24,70			
	C - 106			24,86			
	C - 101	12/abr	28		27,81	0,72	2,97
	C - 102			28,64			
	C - 107			27,47			
	C - 108			27,32			

APÊNDICE J – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 10% DE GRITS

Tabela 84. Massa específica 10% grits.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Grits 10%		
Resultados obtidos em 27/04/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,90	0,10
Leitura Final (cm ³)	20,90	20,10
Volume da amostra (cm ³)	20,00	20,00
Massa específica da amostra (g/cm ³)	3,00	3,00
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	0,000	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	3,00	
Massa específica total dos Grits 10% (g/cm ³)	3,00	

Tabela 85. Área Específica de Blaine do 10% grits.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Grits 10% - BLAINE				
Resultados obtidos em 06/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	28	28	28	28
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,847		1,847	
Porosidade adotada	0,4588		0,4588	
Massa da amostra (g)	2,7		2,7	
Tempo de queda (s)	101,16	85,31	97,81	98,74
Área específica da amostra (m ² /Kg)	371,37	341,03	365,17	366,90
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	356,20		366,03	
Área específica total dos Grits 10% (m ² /Kg)	361,12			

Tabela 86. Finura 10% grits.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Grits 10%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	1,36
Índice de finura (%)	2,72

Tabela 87. Tempos de Pega 7,5% grits.

TEMPOS DE PEGA GRITS 10%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		14:23
Início de pega (h:min):		15:47
Fim de pega (h:min):		17:19
Tempo de início de pega (h:min):		1:24
Tempo de fim de pega (h:min):		2:56

Tabela 88. Expansibilidade Le Chatelier 10% grits.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER GRITS 10%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 89. Resistência à compressão 10% grits.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 10% GRITS

Temperatura ambiente (°C): 23		Umidade relativa do ar (%): 91		Temperatura da água (°C): 23								
Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados									
			Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
10% Grits	C - 85	18/mar	3	50,28	50,26	50,270	1984,76	3761	18,95	18,36	0,51	3,19
	C - 86			50,06	49,90	49,980	1961,92	3553	18,11			
	C - 91			50,38	50,04	50,210	1980,02	3324	16,79			
	C - 92			50,10	50,08	50,090	1970,57	3553	18,03			
	C - 87	22/mar	7	50,10	50,29	50,195	1978,84	4886	24,69	23,87	0,58	3,41
	C - 88			49,98	50,22	50,100	1971,36	4707	23,87			
	C - 93			50,00	50,70	50,350	1991,08	4677	23,49			
	C - 94			50,04	50,15	50,095	1970,96	4621	23,44			
	C - 89	12/abr	28	49,96	50,26	50,110	1972,14	5796	29,39	29,60	0,58	2,40
	C - 90			50,07	49,96	50,015	1964,67	5924	30,15			
	C - 95			50,11	50,09	50,100	1971,36	5910	29,98			
	C - 96			50,11	50,02	50,065	1968,60	5688	28,89			

Tabela 90 Módulo de elasticidade 10% grits.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 10% GRITS

Umidade relativa do ar (%):93		Temperatura ambiente (°C): 25					
Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados				
			Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
10% Grits	C - 85	18/mar	3		21,38	0,45	1,50
	C - 86			21,70			
	C - 91			21,06			
	C - 92			18,84			
	C - 87	22/mar	7		25,39	0,50	2,21
	C - 88			25,78			
	C - 93			24,83			
	C - 94			25,56			
	C - 89	12/abr	28		30,00	0,37	1,44
	C - 90			29,79			
	C - 95			30,43			
	C - 96			29,78			

APÊNDICE K – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 15% DE DREGS

Tabela 91. Massa específica 15% dregs.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Dregs 15%		
Resultados obtidos em 05/05/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,60	0,50
Leitura Final (cm ³)	20,70	20,70
Volume da amostra (cm ³)	20,10	20,20
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,99	2,97
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	-0,015	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,98	
Massa específica total dos Dregs 15% (g/cm ³)	2,98	

Tabela 92. Área Específica de Blaine do 15% dregs.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Dregs 15% - BLAINE				
Resultados obtidos em 01/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4850		0,4850	
Massa da amostra (g)	2,55		2,55	
Tempo de queda (s)	98,43	100,41	86,84	77,78
Área específica da amostra (m ² /Kg)	421,04	425,25	395,48	374,28
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	423,15		384,88	
Área específica total dos Dregs 15% (m ² /Kg)	404,01			

Tabela 93. Finura 15% dregs.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Dregs 15%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	0,22
Índice de finura (%)	0,44

Tabela 94. Tempos de Pega 15% dregs.

TEMPOS DE PEGA DREGS 15%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		14:40
Início de pega (h:min):		15:12
Fim de pega (h:min):		17:50
Tempo de início de pega (h:min):		0:32
Tempo de fim de pega (h:min):		3:10

Tabela 95. Expansibilidade Le Chatelier 15% dregs.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER DREGS 15%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 96. Resistência à compressão 15% dregs.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 15% DREGS												
Temperatura ambiente (°C): 23			Umidade relativa do ar (%): 91			Temperatura da água (°C): 23						
Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados									
			Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
15% Dregs	C - 121	19/mar	3	49,95	50,15	50,050	1967,42	3288	16,71	16,48	0,35	2,85
	C - 122			49,90	50,20	50,050	1967,42	3231	16,42			
	C - 127			50,43	50,27	50,350	1991,08	3188	16,01			
	C - 128			50,08	50,04	50,060	1968,21	3303	16,78			
	C - 123	23/mar	7	50,13	50,22	50,175	1977,26	4198	21,23	21,00	0,54	3,82
	C - 124			50,51	50,76	50,635	2013,68	4284	21,27			
	C - 129			50,17	50,14	50,155	1975,69	3990	20,20			
	C - 130			50,34	50,11	50,225	1981,21	4219	21,30			
	C - 125	13/abr	28	50,63	50,71	50,670	2016,47	5695	28,24	27,79	0,73	3,04
	C - 126			50,33	50,08	50,205	1979,63	4893	24,72			
	C - 131			50,04	50,50	50,270	1984,76	5595	28,19			
	C - 132			50,40	50,57	50,485	2001,77	5394	26,95			

Tabela 97 Módulo de elasticidade 15% dregs.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 15% DREGS							
Umidade relativa do ar (%):93				Temperatura ambiente (°C):25			
Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados				
			Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	
15% Dregs	C - 121	19/mar	3		21,09	0,93	5,05
	C - 122			22,16			
	C - 127			20,68			
	C - 128			20,44			
	C - 123	23/mar	7		24,79	0,81	3,36
	C - 124			25,57			
	C - 129			24,85			
	C - 130			23,96			
	C - 125	13/abr	28		27,07	0,34	1,44
	C - 126			26,94			
	C - 131			27,46			
	C - 132			26,80			

APÊNDICE L – PROPRIEDADES DA SUBSTITUIÇÃO DE 15% DE GRITS

Tabela 98. Massa específica 15% grits.

MASSA ESPECÍFICA DO Clínquer / Grits 15%		
Resultados obtidos em 27/04/16	1 ^a	2 ^a
Líquido usado no ensaio	Querosene	
Temperatura do banho (°C)	21	21
Massa da amostra (g)	60	
Leitura inicial (cm ³)	0,35	0,35
Leitura Final (cm ³)	20,65	20,70
Volume da amostra (cm ³)	20,30	20,35
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,96	2,95
Diferença entre as amostras (g/cm ³)	-0,007	
Massa específica do Clínquer (g/cm ³)	2,95	
Massa específica total dos Grits 15% (g/cm ³)	2,95	

Tabela 99. Área Específica de Blaine do 15% grits.

ÁREA ESPECÍFICA DO Clínquer/ Grits 15% - BLAINE				
Resultados obtidos em 06/04/16	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
Fluido manométrico	Dibutyl phthalate			
Constante do aparelho (Pa ^{1/2} /m)	0,829		0,829	
Volume da camada (cm ³)	1,663		1,663	
Temperatura ambiente (°C)	29	29	29	29
Viscosidade do ar (x10 ⁻⁵ Pa.s)	1,852		1,852	
Porosidade adotada	0,4500		0,4500	
Massa da amostra (g)	2,7		2,7	
Tempo de queda (s)	108,21	90,98	92,95	94,81
Área específica da amostra (m ² /Kg)	372,60	341,65	345,33	348,76
Área específica dos Clínquer (m ² /Kg)	357,12		347,04	
Área específica total dos Grits 15% (m ² /Kg)	352,08			

Tabela 100. Finura 15% grits.

ENSAIO DE FINURA DO Clínquer/ Grits 15%	
Massa inicial (g)	50
Resíduo (g)	1,98
Índice de finura (%)	3,96

Tabela 101. Tempos de Pega 15% grits.

TEMPOS DE PEGA GRITS 15%		
Condições da câmara úmida	Temperatura (°C)	21
	Umidade relativa (%)	91
	Temperatura de água (°C)	21
Início do ensaio (h:min):		11:08
Início de pega (h:min):		12:03
Fim de pega (h:min):		13:50
Tempo de início de pega (h:min):		0:55
Tempo de fim de pega (h:min):		2:42

Tabela 102. Expansibilidade Le Chatelier 15% grits.

EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER GRITS 15%					
Leituras do ensaio de expansibilidade a frio			Leituras do ensaio de expansibilidade a quente		
Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Afastamento (mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Expansibilidade a frio (mm):		0,00	Expansibilidade a quente (mm):		0,00

Tabela 103. Resistência à compressão 15% grits.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 15% GRITS												
Temperatura ambiente (°C): 23				Umidade relativa do ar (%): 91			Temperatura da água (°C): 23					
	Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados								
				Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
15% Grits	C - 109	19/mar	3	50,08	50,00	50,040	1966,64	3345	17,01	16,85	0,34	2,34
	C - 110			50,18	50,42	50,300	1987,13	3396	17,09			
	C - 115			50,19	50,24	50,215	1980,42	3260	16,46			
	C - 116			50,33	50,09	50,210	1980,02	3052	15,41			
	C - 111	23/mar	7	50,05	50,14	50,095	1970,96	4456	22,61	21,76	1,00	4,57
	C - 112			50,04	50,12	50,080	1969,78	4456	22,62			
	C - 117			50,09	50,04	50,065	1968,60	4141	21,03			
	C - 118			50,12	50,14	50,130	1973,72	4098	20,76			
	C - 113	13/abr	28	49,93	50,15	50,040	1966,64	5595	28,45	27,78	1,19	4,69
	C - 114			50,29	50,18	50,235	1982,00	5760	29,06			
	C - 119			50,20	50,10	50,150	1975,29	5230	26,47			
	C - 120			50,28	50,16	50,220	1980,81	5373	27,12			

Tabela 104 Módulo de elasticidade 10% grits.

MÓDULO DE ELASTICIDADE 15% GRITS							
Umidade relativa do ar (%): 93				Temperatura ambiente (°C): 25			
	Modelo Ensaiado	Data	Idade (dias)	Resultados			
				Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
15% Grits	C - 109	19/mar	3		21,64	0,78	4,14
	C - 110			22,54			
	C - 115			21,18			
	C - 116			21,20			
	C - 111	23/mar	7		24,58	0,22	0,92
	C - 112			24,79			
	C - 117			24,60			
	C - 118			24,36			
	C - 113	13/abr	28		28,64	1,07	3,79
	C - 114			29,73			
	C - 119			27,58			
	C - 120			28,61			

APÊNDICE M – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM SUBSTITUIÇÕES DE DREGS

Dregs Res3

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	31.906	6.3812	27.51	7.7831e-08
Residuo	18	4.175	0.2320		
Total	23	36.081			

CV = 3.05 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.309254

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

a	0	17.405
ab	0.15	16.48
ab	0.1	16.425
b	0.05	15.81
c	0.075	14.6725
c	0.025	13.99

Dregs Res7

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	51.082	10.2163	21.641	4.9021e-07
Residuo	18	8.497	0.4721		
Total	23	59.579			

CV = 3.34 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.8366363

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias		
a	0	22.9075
ab	0.1	21.76
bc	0.15	21
cd	0.075	19.93
d	0.025	19.3625
d	0.05	18.61

Dregs Res28

Quadro da analise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	47.074	9.4147	16.592	3.4545e-06
Residuo	18	10.214	0.5674		
Total	23	57.287			

CV = 2.68 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.5892286

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias		
a	0	30.95
b	0.025	28.325
bc	0.1	27.85
bc	0.15	27.7925
bc	0.05	26.9925
c	0.075	26.6125

APÊNDICE N – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO COM SUBSTITUIÇÕES DE DREGS

Dregs Mod3

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	9.1358	1.82717	5.912	0.0055513
Residuo	12	3.7087	0.30906		
Total	17	12.8446			

CV = 2.68 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)
p-valor: 0.3700722

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos	Tratamentos	Medias
a	0	22.17667
ab	0.15	21.09333
b	0.05	20.34
b	0.025	20.32667
b	0.1	20.28333
b	0.075	20.17667

Dregs Mod7

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	37.771	7.5541	9.3707	0.00079012
Residuo	12	9.674	0.8061		
Total	17	47.444			

CV = 3.5 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)
p-valor: 0.6736919

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos	Tratamentos	Medias
a	0	28.84667
b	0.025	25.29
b	0.075	25.28667
b	0.05	25.27667
b	0.15	24.79333
b	0.1	24.53667

Dregs Mod28

Quadro da analise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	26.0371	5.2074	13.176	0.00015868
Residuo	12	4.7425	0.3952		
Total	17	30.7796			

CV = 2.18 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.5891153

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos	Tratamentos	Medias
a	0.025	30.40333
a	0	30.26667
ab	0.075	28.90667
ab	0.05	28.83667
bc	0.1	27.81
c	0.15	27.06667

APÊNDICE O – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM SUBSTITUIÇÕES DE GRITS

Grits Res3

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	27.624	5.5248	19.834	9.4064e-07
Residuo	18	5.014	0.2786		
Total	23	32.638			

CV = 3.18 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.6942658

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

a	0.1	18.3625
ab	0	17.405
bc	0.15	16.8525
cd	0.05	15.955
cd	0.075	15.6925
d	0.025	15.24

Grits Res7

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	63.486	12.6973	22.021	4.3001e-07
Residuo	18	10.379	0.5766		
Total	23	73.865			

CV = 3.55 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.236917

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

a	0.1	23.8725
ab	0	22.9075
bc	0.15	21.755
cd	0.075	20.7825
cd	0.025	20.0525
d	0.05	19.1275

Grits Res28

Quadro da analise de variancia

GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5 37.242	7.4484	9.7174	0.00012521
Residuo	18 13.797	0.7665		
Total	23 51.039			

CV = 3.01 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.8029271

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

a	0	30.95
ab	0.025	30.2525
abc	0.1	29.6025
bc	0.075	28.34
c	0.15	27.775
c	0.05	27.695

APÊNDICE P – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO COM SUBSTITUIÇÕES DE GRITS

Grits Mod3

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	3.9580	0.79159	2.0443	0.14396
Residuo	12	4.6466	0.38722		
Total	17	8.6046			

CV = 2.91 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.3404208

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

De acordo com o teste F, as medias nao podem ser consideradas diferentes.

Niveis Medias

1	0.22	21.7667
2	0.025	20.73000
3	0.05	21.59333
4	0.075	20.98333
5	0.1	21.38000
6	0.15	21.64000

Grits Mod7

Quadro da análise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	46.901	9.3801	21.676	1.2584e-05
Residuo	12	5.193	0.4327		
Total	17	52.094			

CV = 2.59 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.7012583

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos	Tratamentos	Medias
a	0	28.84667
b	0.1	25.39
b	0.025	24.78
b	0.05	24.61333
b	0.15	24.58333
b	0.075	23.95333

Grits Mod28

Quadro da analise de variancia

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	5	16.8323	3.3665	4.4115	0.016385
Residuo	12	9.1573	0.7631		
Total	17	25.9896			

CV = 3.03 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.2899171

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os residuos podem ser considerados normais.

Teste de Tukey

Grupos	Tratamentos	Medias
a	0	30.26667
ab	0.1	30
ab	0.15	28.64
ab	0.025	28.53333
ab	0.05	28.06
b	0.075	27.62

**APÊNDICE Q – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM
SUBSTITUIÇÕES DE 10% DREGS EM DIFERENTES ÁREAS**

Dregs Res 3

ANOVA – Fatorial

Effect	Univariate Tests of Significance for Tensão (Fatorial_3_Dregs) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	8468,974	1	8468,974	21179,87	0,000000
Area	62,615	2	31,307	78,30	0,000000
Material	0,007	1	0,007	0,02	0,898707
Area*Material	5,186	2	2,593	6,48	0,007568
Error	7,197	18	0,400		

Tukey – Fatorial

Cell No.	Tukey HSD test; variable Tensão (Fatorial_3_Dregs) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,39986, df = 18,000						
	Area	Material	Tensão Mean	1	2	3	4
2	1	10	16,42884	****			
1	1	0	17,40294	****	****		
3	2	0	17,94782		****	****	
4	2	10	19,21654			****	
6	3	10	20,75943				****
5	3	0	20,95406				****

Dregs Res 7

ANOVA – Fatorial

Effect	Univariate Tests of Significance for Tensão (Fatorial_7_Dregs) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	13832,41	1	13832,41	19138,79	0,000000
Material	7,80	1	7,80	10,79	0,004113
Area	36,81	2	18,40	25,46	0,000006
Material*Area	0,38	2	0,19	0,26	0,772800
Error	13,01	18	0,72		

Tukey – Fatorial

Tukey HSD test; variable Tensão (Fatorial_7_Dregs) Homogenous Groups, alpha = ,05000						
Cell No.	Material	Area	Tensão Mean	1	2	3
4	10	1	21,76175			****
1	0	1	22,90814	****		****
6	10	3	23,97814	****		
5	10	2	24,57172	****	****	
3	0	3	24,80790	****	****	
2	0	2	26,01615		****	

Dregs Res 28

ANOVA – Fatorial

Univariate Tests of Significance for Tensão (Fatorial_28_Dregs) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	23825,45	1	23825,45	15740,76	0,000000
Material	39,09	1	39,09	25,82	0,000078
Area	97,52	2	48,76	32,22	0,000001
Material*Area	17,77	2	8,88	5,87	0,010899
Error	27,25	18	1,51		

Tukey – Fatorial

Tukey HSD test; variable Tensão (Fatorial_28_Dregs) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1,5136, df = 18,000						
Cell No.	Area	Material	Tensão Mean	1	2	3
2	1	10	27,85268		****	
6	3	10	30,78358	****		
1	1	0	30,95095	****		
5	3	0	31,00888	****		
4	2	10	32,05802	****		
3	2	0	36,39132			****

**APÊNDICE R – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS COM
SUBSTITUIÇÕES DE 10% GRITS EM DIFERENTES ÁREAS**

Grits Res 3

ANOVA – Fatorial

Effect	Univariate Tests of Significance for Tensão (Fatorial_3_Grits) Sigma-restricted parameterization				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	8815,658	1	8815,658	27283,40	0,000000
Area	58,671	2	29,336	90,79	0,000000
Material	3,788	1	3,788	11,72	0,003026
Area*Material	0,134	2	0,067	0,21	0,815130
Error	5,816	18	0,323		

Tukey – Fatorial

Cell No.	Tukey HSD test, variable Tensão (Fatorial_3_Grits) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,32311, df = 18,000				
	Area	Material	Tensão Mean	1	2
1	1	0	17,40294	****	
3	2	0	17,94782	****	
2	1	10	18,36297	****	
4	2	10	18,54623	****	
5	3	0	20,95406		****
6	3	10	21,77940		****

Grits Res 7

ANOVA – Fatorial

Effect	Univariate Tests of Significance for Tensão (Fatorial_7_Grits) Sigma-restricted parameterization				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	14569,76	1	14569,76	25062,56	0,000000
Area	20,49	2	10,25	17,62	0,000058
Material	0,09	1	0,09	0,16	0,697567
Area*Material	16,30	2	8,15	14,02	0,000213
Error	10,46	18	0,58		

Tukey – Fatorial

Tukey HSD test; variable Tensão (Fatorial_7_Grits) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,58134, df = 18,000						
Cell No.	Area	Material	Tensão Mean	1	2	3
1	1	0	22,90814	****		
4	2	10	23,83524	****	****	
2	1	10	23,87460	****	****	
5	3	0	24,80790		****	****
3	2	0	26,01615			****
6	3	10	26,39110			****

Grits Res 28

ANOVA – Fatorial

Univariate Tests of Significance for Tensão (Fatorial_28_Grits) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	25715,39	1	25715,39	25684,24	0,000000
Area	84,44	2	42,22	42,17	0,000000
Material	0,06	1	0,06	0,06	0,808140
Area*Material	57,83	2	28,91	28,88	0,000002
Error	18,02	18	1,00		

Tukey – Fatorial

Tukey HSD test; variable Tensão (Fatorial_28_Grits) Homogenous Groups, alpha = ,05000						
Cell No.	Area	Material	Tensão Mean	1	2	3
2	1	10	29,60390	****		
1	1	0	30,95095	****		
5	3	0	31,00888	****		
4	2	10	33,26807		****	
6	3	10	35,17718		****	****
3	2	0	36,39132			****