

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

STHÉFANY BATISTA PIRES DA SILVA

REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS PROVENIENTES DA EXTRAÇÃO E
BENEFICIAMENTO DE ARDÓSIA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO

BELO HORIZONTE

2015

STHÉFANY BATISTA PIRES DA SILVA

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS PROVENIENTES DA EXTRAÇÃO E
BENEFICIAMENTO DE ARDÓSIA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Luciana Boaventura Palhares

Co-orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2015

STHÉFANY BATISTA PIRES DA SILVA

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS PROVENIENTES DA EXTRAÇÃO E
BENEFICIAMENTO DE ARDÓSIA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais no
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 30/11/2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luciana Boaventura Palhares – **Orientadora** – **DEMAT/CEFET-MG**

Prof. Paulo Renato Perdigão de Paiva – **Co-orientador** – **DEMAT/CEFET-MG**

Prof. Augusto Cesar da Silva Bezerra – **DET/CEFET-MG**

Prof. Elaine Carballo Siqueira Corrêa – **DEMAT/CEFET-MG**

Prof. Junia Soares Nogueira Chagas – **DEPC/CEFET-MG**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Luciana Palhares pela orientação, pela ajuda constante no laboratório, pela dedicação a este projeto e por confiar no meu trabalho.

Ao professor Augusto Bezerra pelos ensinamentos e dicas do ponto de vista técnico, pela contribuição com sua experiência e por permitir a realização de testes no Departamento de Engenharia de Transportes.

À técnica do Laboratório de Mecânica de Pavimentos e Materiais do DET, Natália Alves, pela boa vontade ao realizar os ensaios e resistência à compressão.

Ao Seu Geraldinho, técnico do DEMAT, pelos ajustes técnicos e reparos feitos no laboratório de materiais cerâmicos durante o período de execução do TCC.

Aos professores que contribuíram direta ou indiretamente construtivamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

A mineração é uma atividade que geralmente, produz resíduos que podem ser usados em outros processos com valor econômico. No entanto, muitas vezes as empresas não dispõem seus resíduos de maneira adequada, de forma que se tornam cada vez mais prejudiciais para o ecossistema local. O sistema de extração de blocos de pedra de ardósia gera uma quantidade significativa de rejeitos, sob a forma de uma lama, composta principalmente de água, lubrificantes e pedra britada. Este resíduo sem destino definido acumula-se em jardins, reservatórios e rios, afetando o meio ambiente. Este trabalho avaliou o efeito da adição de resíduos de ardósia em concreto como substitutos parciais dos agregados miúdos. O pó de ardósia foi caracterizado por microscopia (MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura) para análise morfológica, cristalografia (análise de difração de raios-X) para verificar os minerais presentes na rocha e análise elementar (EDS) para verificar a existência de alguma contaminação. A distribuição do tamanho de partículas foi feita por duas técnicas: laser e peneiramento a seco em série de peneiras. Os resíduos de ardósia foram usados para substituir os agregados miúdos em 5, 10 e 15% em massa. A relação água/cimento foi de 0,55 e a resistência à compressão foi avaliada pela norma NBR 5738 (adaptada). A absorção de água foi analisada pela NBR 12653. Os resultados mostraram um aumento da resistência à compressão com o aumento da porcentagem de resíduos de ardósia. A substituição de ardósia em 15% revelou um aumento de 38% na resistência em relação ao concreto de referência. O acréscimo na resistência indicou a ocorrência dos efeitos fíler e pozolânico.

Palavras-chave: ardósia; concreto; agregado; rejeito de ardósia.

ABSTRACT

Mining is an activity that generally produce wastes that can be used in other processes with economic value. However, very often these companies do not dispose their waste correctly turning their activities increasingly harmful to the local ecosystem. The system of extracting blocks of rock generates a significant amount of waste in the form of a sludge composed mainly of water, lubricants and crushed rock. This waste with no defined destination accumulates in yards, reservoirs and streams, affecting the environment. This work evaluated the effect of slate wastes on concrete as partial substitute of fine aggregates. The slate powder was characterized by microscopy (MEV – Scanning Electron Microscopy), crystallography(X-ray diffraction analysis) and elemental analysis (EDS) to verify the minerals present in the rock, and whether there was any contamination. The particle size distribution was done by two technical: laser and sieve testing. The slate waste was used to replace fine aggregates in concrete mixes on 5, 10 and 15%. The water/cement ratio was set at 0,55 and the mechanical compression strength was evaluated by ABNT standard NBR 5738 (adapted). The water absorption was also analyzed by ASTM standard NBR 9778. The results showed that mechanical compression strength increase as the percentage of waste aggregate increase. The slate replacement of 15% on concrete samples revealed an increase of 38% related to referential concrete. The pozzolanic activity was negative. The increase in resistance indicates the presence of filler and pozzolanic effects.

Keywords: slate; concrete; aggregate; slate waste.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIROCHAS – Associação Brasileira de Rochas Ornamentais

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CP – Cimento Portland

DEMAT – Departamento de Engenharia de Materiais

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DET – Departamento de Engenharia de Transportes

DRX – Difração de Raios-X

DTA – *Differential Thermal Analysis*

EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy*

JCPDS – *Joint Committee on Powder Diffraction Standards*

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

RCD – Resíduo de construção e demolição

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Micrografia do cimento Portland.	14
Figura 02 – Nomenclatura do cimento Portland.....	15
Figura 03 – Evolução da resistência das fases cimentícias em função do tempo.....	16
Figura 04 – Curva de Abram de previsão da resistência do concreto de acordo com a relação água/cimento para cimentos de diferentes resistências finais.	21
Figura 05 – Representação da clivagem ardósiana.....	22
Figura 06 – Peças planas de ardósia	23
Figura 07 – Processo de arranque da ardósia.	24
Figura 08 – Resistência à compressão dos concretos com 0, 5, 10 e 15% de argila pozolânica.	27
Figura 09 – Efeito fíler nas pastas de cimento.....	29
Figura 10 – Corpos de prova antes do rompimento.	32
Figura 11 – Curva granulométrica do rejeito de ardósia.	33
Figura 12 – Curva granulométrica do rejeito de ardósia.	34
Figura 13 – Imagem obtida por MEV das partículas de rejeito de ardósia.	35
Figura 14 – Imagem obtida por MEV das partículas de rejeito de ardósia aglomeradas.	36
Figura 15 – Difratoograma de raios-X do pó de ardósia.	38
Figura 16 – Evolução da resistência à compressão axial com a idade.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição do clínquer.	13
Tabela 02 – Tipos de cimento regulamentados pela ABNT em função da composição.	15
Tabela 03 – Composição mineralógica das ardósias da Província de Ardósia de Minas Gerais.	23
Tabela 04 – Composição química média das ardósias cinzas da Província de Ardósias de Minas Gerais.....	24
Tabela 05 – Exigências químicas para materiais pozolânicos.....	27
Tabela 06 – Exigências físicas para materiais pozolânicos.	28
Tabela 07 – Traço dos corpos de prova produzidos.	32
Tabela 08 – Análise granulométrica do rejeito de ardósia em série de peneiras.....	33
Tabela 09 – Análise química qualitativa do pó de ardósia obtida por EDS.	37
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.	39
Tabela 11 – Resultados do ensaio de absorção por imersão.	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 A indústria da construção civil	11
2.2 Concreto de cimento Portland.....	11
2.2.1 Cimento Portland.....	12
2.2.2 Agregados.....	16
2.2.3 Aproveitamento de rejeitos como agregados	19
2.2.4 Influência da relação água/cimento na resistência do concreto	19
2.3 Rochas ornamentais	21
2.3.1 Composição e extração de ardósias.....	22
2.4 Atividade pozolânica	26
2.5 Efeito fíler	28
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 Caracterização do rejeito de ardósia	30
3.2 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Distribuição granulométrica	33
4.2 Análise morfológica das partículas	35
4.3 Análise química elementar.....	36
4.4 Análise mineralógica	37
4.5 Resistência à compressão.....	38
4.6 Absorção de água.....	41
5 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A extração e o tratamento de minérios produzem resíduos que necessitam de transporte e descarte adequados, o que gera custos adicionais aos processos industriais. O acúmulo destes resíduos pode causar desequilíbrios ambientais, de forma que métodos especiais de disposição são exigidos.

Dentre os resíduos sólidos derivados do beneficiamento mineral, incluem-se os provenientes da extração da ardósia, umas das rochas ornamentais mais utilizadas na construção civil no Brasil. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2014), em 2013 o Brasil foi o terceiro maior exportador de produtos em ardósia, atrás da Espanha e China. É o segundo maior produtor e o segundo maior consumidor mundial. O principal estado produtor é Minas Gerais, respondendo por cerca de 95% da extração, que se concentra nos municípios de Papagaios, Pompéu, Leandro Ferreira, Martinho Campos, Paraopeba, Caetanópolis, Curvelo e Felixlândia (CHIODI FILHO; RODRIGUES, 2009; CHIODI FILHO; CHIODI, 2015).

Da extração e corte da ardósia são geradas grandes quantidades de resíduos na forma de lama, composta basicamente por água, lubrificantes e rocha moída (SANTOS *et al.*, 2013). Este resíduo possui pequeno valor tecnológico agregado, sendo então acumulado em pátios e reservatórios. Do destino incorreto derivam os problemas de remanejamento e assoreamento de leitos fluviais (CARVALHO *et al.*, 2007).

A fim de fornecer alternativas de destinação a estes rejeitos, aliando a diminuição dos impactos ambientais, vários autores, tais como Oliveira e Rodrigues (2001) e Micapel Slate (2015) estudaram a incorporação destes resíduos em outros materiais. Muitos destes estudos avaliaram o uso de rejeitos minerais em produtos para a construção civil, tendo em vista que este é um dos segmentos que mais consome matérias-primas naturais e que contribui significativamente para a poluição ambiental.

1.1 Objetivo

Este trabalho objetiva avaliar o comportamento do concreto com substituição de parte dos seus agregados miúdos por rejeitos provenientes do beneficiamento da ardósia, visando a minimização dos danos ambientais e a redução de custos com extração de areia e demais agregados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A indústria da construção civil

A construção civil é uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais, responsável por 20 a 50% do total da extração de recursos naturais (MESQUITA, 2012). De acordo com Pacheco-Torgal e Jalali (2010), são necessárias 1,7 toneladas minerais para produzir uma tonelada de clínquer.

Crow (2008) destaca que a produção do concreto é responsável por 5% da emissão global de CO₂, sendo a maior parte deste gás subproduto da fabricação do cimento, o que classifica essa indústria da construção civil como um segmento altamente poluidor. Além disso, 40% a 60% do resíduo sólido urbano das grandes cidades são oriundos de construção, manutenção e demolição civis (SANTOS, 2013).

Apesar dos impactos ambientais gerados, a indústria de construção civil apresenta-se como um dos principais absorvedores de materiais reciclados (COURA, 2009; GONÇALVES, 2000; SANTOS; LACHOWSKI JÚNIOR, 2012), o que permite reduzir custos, minimizar gastos energéticos e geração de poluição.

Diante deste contexto, inúmeras pesquisas têm sido realizadas visando a substituição parcial de cimento e dos agregados por materiais alternativos, buscando reduzir os impactos ambientais e a fim de agregar valor a diversos rejeitos.

Os constituintes básicos do concreto – cimento, agregados e água – não causam riscos ambientais. Os substitutos alternativos também devem obedecer a esta proposição, além de não prejudicarem as propriedades químicas e mecânicas do material.

2.2 Concreto de cimento Portland

O concreto é um material compósito constituído por um aglomerante e partículas de diferentes naturezas aglutinadas. De acordo com a definição de Ribeiro, Pinto e Starling (2002), os aglomerantes são pós que ao serem hidratados formam uma pasta resistente. Dentre os

aglomerantes mais utilizados na construção civil, estão a cal, o gesso, os asfaltos e o cimento Portland.

Os agregados são, por definição, particulados que integram 80% do peso e 20% do custo do concreto (BAUER, 2000), sendo representados por britas, areia, cascalhos, arenitos, entre outros.

2.2.1 Cimento Portland

Há registros de uso de materiais semelhantes ao cimento em monumentos egípcios, que datam 4500 anos. Entretanto, atribuiu-se ao inglês John Smeaton, em 1756, o início do desenvolvimento tecnológico da produção do aglomerante. Smeaton obteve nesta data um produto de alta resistência após calcinação de uma matéria prima calcária e argilosa (SILVA, 2011).

Em 1824, o cimento Portland (CP) foi patenteado por Joseph Aspdin. Após submeter, conjuntamente, rochas calcárias e argila a aquecimentos e transformar o produto obtido em um pó fino, o construtor obteve uma mistura que ao secar adquiria cor e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. Esta semelhança influenciou a nomenclatura conferida ao produto (SILVA, 2011; BATTAGIN, 2015).

O marco da produção em escala industrial de cimento Portland no Brasil foi a implantação de uma fábrica em Perus, no estado de São Paulo, em 1924, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland. Entretanto, existem registros de uma primeira produção em 1888, em uma pequena fábrica instalada na fazenda do comendador Antônio Proost Rodovalho, também em São Paulo, situada na cidade de Sorocaba (BATTAGIN, 2015).

China, Índia e Estados Unidos são os maiores produtores mundiais de cimento Portland, com produção de 2137, 270 e 74 milhões de toneladas em 2012, respectivamente. O Brasil é o 5º maior produtor (68,8 milhões de toneladas/ano) e o 4º maior consumidor (69,3 milhões de toneladas/ano), de acordo com dados de 2012 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013).

O relatório anual mais recente publicado pelo SNIC aponta 2,4% de crescimento no consumo de cimento no Brasil em 2013, em relação ao ano anterior, atingindo 71 milhões de toneladas, com um consumo per capita equivalente a 353 kg/habitante/ano.

Calcário (CaCO_3), areia (fonte de SiO_2), argila (fonte de SiO_2 e Al_2O_3) e minério de ferro (Fe_2O_3) são as matérias-primas para a produção do cimento. Após serem extraídas e cominuídas, em proporções definidas, por processos de britagem e moagem até atingirem a granulometria ideal, as partículas são homogeneizadas. A mistura obtida, denominada farinha, segue para uma torre de ciclones, onde ocorre troca de calor com os gases aquecidos provenientes do forno. O material sofre descarbonatação e então chega ao forno com uma temperatura média de 1000°C .

No forno cilíndrico rotativo, a farinha é submetida à ação do calor de uma chama até a temperatura de 1400°C . Nesse processo, ocorrem reações de secagem, de decomposição dos carbonatos e desestruturação dos argilominerais (SILVA, 2011). Os principais constituintes do clínquer, produto obtido após a queima, estão representados na tabela 01.

Tabela 01 - Composição do clínquer.

Nome do composto	Composição em óxidos	Nomenclatura usual	Porcentagem média
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	18 a 66%
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	11 a 53%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	05 a 20%
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	04 a 14%

Fonte: TOKUDOME, 2008.

O C_3S (alita) é o componente que confere resistência do cimento até o fim do primeiro mês de cura, diferente do C_2S (belita), que é importante para a resistência em idades mais avançadas. O C_3A contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia, e o C_4AF tem importante papel na resistência química, em especial ao ataque de sulfatos (PEREIRA, 2014). A figura 01 contém uma micrografia do clínquer, evidenciando as fases do cimento Portland tipo II.

Figura 01 – Micrografia do cimento Portland.



Cimento Portland Tipo II, contendo partes aproximadamente iguais de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (fase cinza = C_3S , cinza clara = C_2S , preta = C_3A , branca = C_4AF).
Fonte: KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1976.

Uma vez que a reação de endurecimento do cimento é hidráulica (ocorre na presença de água), o clínquer é submetido a uma moagem final a fim de se obter granulometria ideal para o favorecimento da cinética das reações de hidratação. No moinho é inserido o sulfato de cálcio (CaSO_4), responsável pelo tempo de pega, e outras adições, como fíler, pozolanas e escórias de alto-forno. Essa composição assegura as características finais de resistência do cimento no concreto e contribuem para a redução de custo.

A adição de outros materiais resulta em diferentes tipos de cimento, os quais seguem as definições e regulamentações das Normas Brasileiras (NBRs) 5732, 5733, 5735, 5736 e 11578 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como especificado na tabela 02.

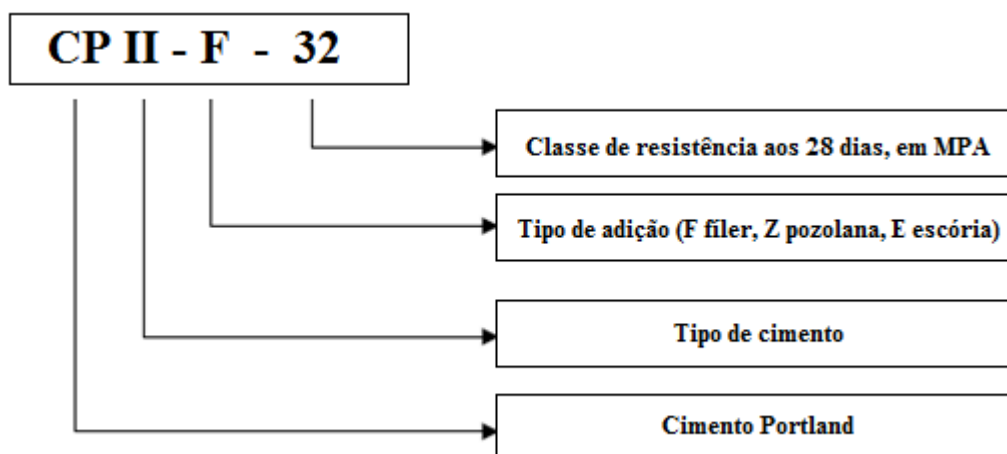
Tabela 02 –Tipos de cimento regulamentados pela ABNT em função da composição.

TIPO	Classe	Clínquer + gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	Fíler (calcário) (%)
CP I	25, 32 e 40	100	-		
CP I-S	25, 32 e 40	95-99	-	1-5	
CP II-E	25, 32 e 40	56-94	6-34	-	0-10
CP II-F	25, 32 e 40	90-94	-	-	6-10
CP II-Z	25, 32 e 40	76-94	-	6-14	0-10
CP III	25, 32 e 40	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	25 e 32	45-85	-	15-50	0-5
CP V-ARI	-	95-100	-	-	0-5

Fonte: ABNT, 1991.

A nomenclatura dos cimentos designa a sua classe de resistência e as suas adições. A figura 02 contém uma exemplificação do esquema de denominação.

Figura 02 – Nomenclatura do cimento Portland.

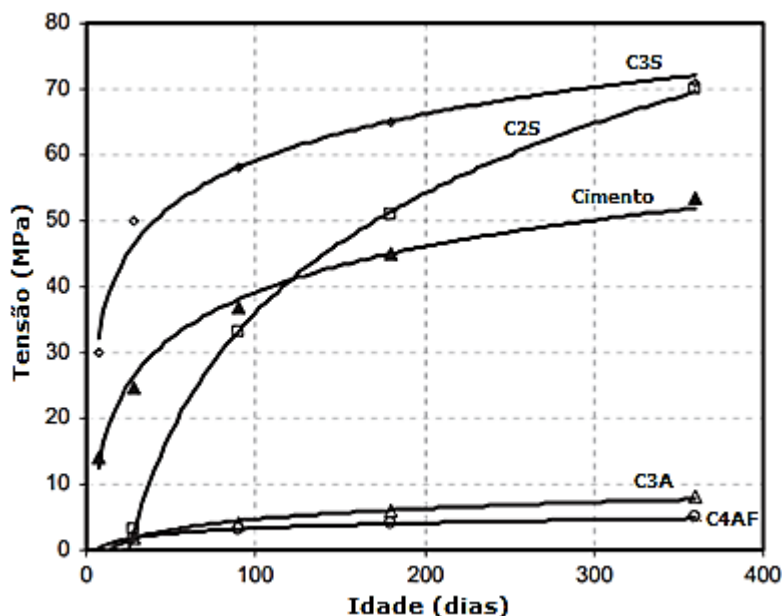


Fonte: TOKUDOME, 2008.

Além dos constituintes fundamentais, o cimento possui certa proporção de magnésia (MgO) e, em proporções menores, o óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O) e óxido de titânio (TiO₂) (BAUER, 2000). Na presença de água, ocorrem as reações de hidratação e formação

de produtos que são responsáveis por conferir resistência ao cimento. A figura 03 demonstra a evolução da resistência das fases cimentícias com o tempo.

Figura 03 – Evolução da resistência das fases cimentícias em função do tempo.



C3S = $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (silicato tricálcico); C2S = $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (silicato dicálcico); C3A = $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcico) e C4AF = $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ferroaluminato tetracálcico).

Fonte: ELATY, 2014.

2.2.2 Agregados

Ribeiro, Pinto e Starling (2002) caracterizam os agregados como materiais acrescentados ao cimento e à água para originar as argamassas e os concretos. Em termos de composições e propriedades gerais, a NBR 7211 (ABNT, 1993) define que:

Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, duráveis e limpos e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto (ABNT, 1993, p. 2).

A origem dos agregados pode ser natural ou industrializada. O primeiro caso inclui aqueles que já se encontram na forma particulada na natureza, tais como a areia e o cascalho. Os industrializados são fragmentados por processos de cominuição, assim como ocorre com a escória de alto-forno e a argila (BAUER, 2000).

Os agregados são também classificados segundo as suas dimensões. A ABNT fixa na NBR 7211 as características exigíveis de agregados para a produção de concreto, sendo:

Agregado miúdo: Areia de origem natural ou resultante de britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

Agregado graúdo: Pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos passam pela peneira de malha quadrada de abertura nominal de 152mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm.

A fim de aumentar a densidade da mistura, os agregados são geralmente inseridos em mais de dois tamanhos. Os agregados miúdos melhoram a trabalhabilidade e a uniformidade da mistura, auxiliando na retenção de agregados graúdos. Além disso, têm a função de minimizar a retração do concreto, aumentar a sua resistência ao desgaste superficial (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002) e proporcionar redução de custo ao ocupar volume.

De acordo com Pompeu Neto, Oliveira e Ramos (2011), as propriedades do concreto dependem das propriedades de seus componentes (matriz da pasta cimentícia e agregados) e das interações entre eles. Alguns agregados são quimicamente ativos e exibem ligações químicas na interface com a pasta de cimento (SHETTY, 2005; GAMBHIR, 2013). Uma vez que representam em torno de 70% do volume total do concreto (BAUER, 2000), o seu tamanho, a sua classificação, a sua forma e a sua textura superficial têm influência significativa sobre as propriedades do material, tanto no estado fresco, como no endurecido (JAMKAR; RAO, 2004).

Muitas propriedades do agregado dependem inteiramente das propriedades da rocha de origem, tais como composição mineral e química, dureza, resistência, estabilidade física e química e estrutura de poros (NEVILLE, 2011). Por essa razão, devem ser excluídos os agregados provenientes de rochas macias ou de baixa resistência à compressão e que contenham matéria orgânica ou materiais que prejudiquem a aderência à pasta de cimento (BAUER, 2000).

Outras propriedades do agregado, dentre elas, a forma, o tamanho e a textura superficial das partículas, afetam significativamente as características do concreto. A forma das partículas é um importante parâmetro no que se refere à trabalhabilidade e à compactação do concreto. A influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades é ainda mais acentuada. O formato é uma função das características da rocha de origem. Muitas rochas contêm planos de

partição, o que reflete na estrutura petrográfica do agregado. Sendo assim, particulados de xistos e ardósias são comumente encontrados em formas laminadas, enquanto granito, basalto e quartzito apresentam-se como partículas equidimensionais (SHETTY, 2005).

A textura do agregado também deve ser considerada, uma vez que está associada à forma. Geralmente, agregados arredondados apresentam texturas suaves e agregados angulares têm texturas grosseiras. Sendo assim, Shetty (2005) destaca que os agregados angulares são superiores aos arredondados por dois aspectos principais: apresentam melhor efeito de bloqueio ou travamento no concreto e a área superficial de agregados de texturas grosseiras é maior, o que faz com que a força total de ligação com a matriz seja mais intensa que aquela formada com superfícies de texturas suaves (de agregados arredondados).

A ligação mecânica entre a superfície do agregado angular e a pasta de cimento dentro do concreto tem efeito mais significativo quando a razão de água/cimento é inferior a 0,40. Para relações superiores a esta, o efeito da textura tem decréscimo até 0,65, a partir de onde não se observa mais o efeito da forma do agregado (JAMKAR; RAO, 2004; ÖZTURAN; ÇEÇEN, 1997; SHETTY, 2005).

A influência da forma e da textura do agregado miúdo sobre o comportamento do concreto é geralmente mais importante do que as do agregado graúdo. Isto é devido ao fato de a forma e textura de agregados miúdos terem efeitos significativos sobre a necessidade de água na mistura. O efeito da forma e da textura do agregado graúdo na resistência é mais significativo para concretos de alta resistência (ÖZEN, 2008).

Quiroga e Fowler (2003) destacam que o tamanho máximo do agregado tem influência na resistência, trabalhabilidade, contração e permeabilidade do concreto. Considerando uma trabalhabilidade e teor de cimento constantes, misturas com agregados graúdos no tamanho máximo permitido exigem menor quantidade de água, e, por conseguinte, a proporção de água/cimento pode ser reduzida.

A distribuição granulométrica é outro parâmetro que deve ser controlado por ter influência na densidade de compactação, no conteúdo de poros e assim, na trabalhabilidade do concreto fresco (ÖZEN, 2008). De acordo com Bauer (2000), alto percentual de agregados miúdos exige aumento na quantidade de água e de cimento para que se mantenha a relação água/cimento, tornando o concreto mais dispendioso. Por outro lado, concretos com baixa quantidade de finos são pouco trabalháveis, com alta permeabilidade e maior susceptibilidade a agentes agressivos.

2.2.3 Aproveitamento de rejeitos como agregados

A areia e a brita são os agregados convencionais utilizados na construção civil. Como mencionado por Coura (2009), a extração de grande parte do agregado natural provoca impacto ambiental, uma vez que exige a retirada da cobertura vegetal. Sendo assim, a fim de aliar a destinação de rejeitos e a minimização de custos de produção, a utilização de agregados alternativos vem sendo amplamente estudada. Estes agregados podem ser materiais reciclados, provenientes de demolições da própria construção civil, por exemplo, ou subprodutos de outros processos.

O estudo da utilização de resíduos cerâmicos como um possível substituto de agregado é bastante comum. Brito, Pereira e Correia (2005) e Senthamarai e Manoharan (2005) utilizaram fragmentos de tijolos ocos e resíduos de cerâmicas usadas como isolantes elétricos, respectivamente, para produção de concreto. Cabral *et al.* (2009), Batayneh, Marie e Asi (2007) e Brasileiro (2013) avaliaram a influência do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades deste material.

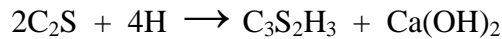
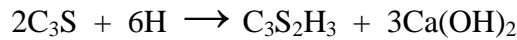
No que diz respeito ao reaproveitamento de rejeitos minerais, Coura (2009) avaliou a possibilidade de incorporação de rejeitos de mármore triturado em concreto, substituindo 20%, 40%, 60% e 100% da areia natural. Verificou-se que os concretos elaborados apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores às do concreto de referência.

Santos, Lira e Ribeiro (2013) examinaram os efeitos da substituição total da areia por resíduos de britagem de granito em argamassa, constatando que a incorporação refletiu positivamente na resistência à compressão e flexão do material.

2.2.4 Influência da relação água/cimento na resistência do concreto

A resistência do concreto é tradicionalmente caracterizada pela resistência à compressão. Os géis de silicatos de cálcio hidratados, denominados C-S-H, são os componentes resultantes da hidratação do cimento, responsáveis pela resistência do material. De acordo com Aïtcin (2000), C-S-H é uma denominação genérica, tendo em vista que a composição química destes

produtos é bastante variada. Neville *apud* Gonçalves (2000) descreve as reações de hidratação como a seguir:



onde C_2S = silicato dicálcico, C_3S = silicato tricálcico e $C_3S_2H_3$ = silicato de cálcio hidratado.

A relação entre a água e o cimento (a/c) afeta a resistência e a durabilidade do concreto. De acordo com McArthur e Spalding (2004), após a hidratação completa do cimento qualquer excesso de água evapora, produzindo poros e reduzindo a resistência à compressão. Esta influência já havia sido estudada por Féret em 1896, que desenvolveu uma equação relacionando uma constante empírica (K), o volume de água (w), de cimento (c) e de ar (a) e a resistência do concreto (f_c) (NEVILLE, 2011):

$$f_c = K \left(\frac{c}{c+w+a} \right)^2$$

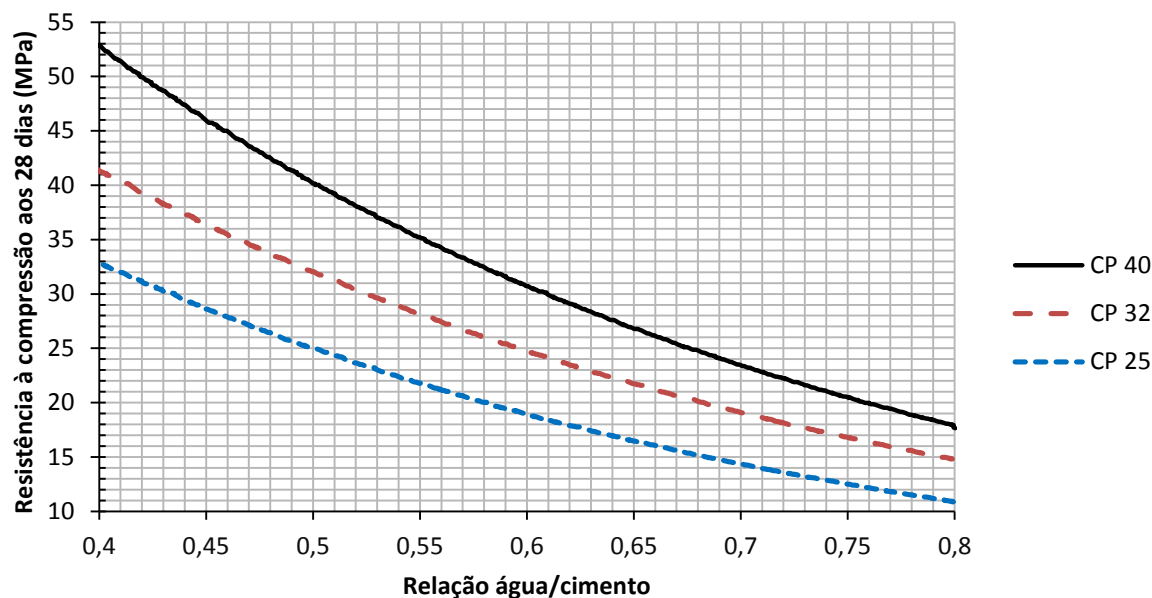
A equação de Duff Andrew Abrams, autor que aprofundou os estudos de dosagem do concreto em 1919, também evidencia que a resistência à compressão (S) é inversamente proporcional à relação a/c em volume (w/c) (NEVILLE, 2011). Abrams desenvolveu curvas para previsão da resistência do concreto baseadas nessa relação água/cimento. A figura 04 apresenta uma curva desenvolvida por Abrams que relaciona a resistência do cimento em função do fator a/c.

$$S = \frac{K_1}{K_2^c}$$

K_1 e K_2 também são constantes empíricas.

Segundo Gani (1997), uma relação teórica a/c de 0,25 em peso para a relação a/c seria suficiente para a completa hidratação do cimento. Entretanto, este valor é insuficiente porque a água fica retida nos poros do gel de C-S-H formado, tendo como consequência cimento não hidratado. Considerando este fato, são requeridas relações a/c maiores que 0,38 para garantir a completa hidratação do aglomerante.

Figura 04 – Curva de Abram de previsão da resistência do concreto de acordo com a relação água/cimento para cimentos de diferentes resistências finais.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RODRIGUES e FREITAS (2000).

As curvas de Abrams partem do pressuposto de que toda a água adicionada está disponível para a hidratação do cimento. Portanto, desconsidera qualquer evaporação durante a hidratação e a absorção de água pelos agregados (GANI, 1997).

2.3 Rochas ornamentais

As rochas ornamentais e de revestimento são os materiais geológicos naturais que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por várias técnicas. São principalmente aplicadas em revestimentos e artigos de construção civil, tais como balcões e tampos de mesa, (CHIODI FILHO; CHIODI, 2009), sendo os principais representantes desta classe o granito, o mármore e a ardósia.

O Brasil é um dos quatro grandes produtores e exportadores mundiais de rochas ornamentais e de revestimento. Segundo Santos, Lira e Ribeiro (2013), do beneficiamento dessas rochas naturais são gerados de 25 a 30% de pó, correspondente, no Brasil a 240 000 toneladas de resíduo por ano.

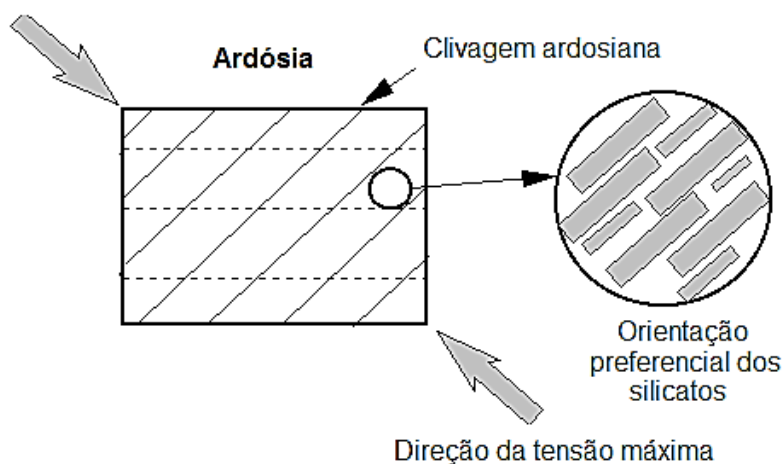
A indústria de rochas ornamentais é responsável por diversos impactos ambientais, resultantes da poeira, lama e fragmentos de rocha gerados. Por esse motivo, Gonçalves, Moura e Molin (2002), Reis e Tristão (2010), Santos e Lachowski Júnior (2012), Coura (2009) e Santos, Lira e Ribeiro (2013) avaliaram o efeito do aproveitamento de rejeitos de mineração na construção civil.

2.3.1 Composição e extração de ardósias

As ardósias são rochas metamórficas foliadas¹. Procedem de rochas sedimentares, fundamentalmente argilosas, que foram afetadas por um metamorfismo de baixo a médio grau (a temperaturas e pressões moderadas) formando uma rocha de granulação fina e de intensa orientação planar (CRESPO; PUIME, 2013).

A definição científica da foliação baseia-se na presença de planos preferenciais de partição paralelos, que definem um tipo específico de clivagem, denominada clivagem ardosiana (CHIODI FILHO; RODRIGUES, 2009). A facilidade de divisão ao longo dos planos de partição está representada na figura 05.

Figura 05 – Representação da clivagem ardosiana.



Fonte: YKONLINE, 2015.

¹ A textura foliada é caracterizada pelo arranjo dos minerais de forma paralela. Não é possível o reconhecimento de grãos individuais sem ampliação, já que os minerais não são segregados em faixas que diferem em composição e cor.

A característica de facilidade de divisão ao longo dos seus planos de clivagem confere a essa rocha propriedades para produção de peças planas (figura 06). Considerada rocha ornamental, os produtos em ardósia são aplicados na construção civil, principalmente em revestimentos e telhados.

Figura 06 – Peças planas de ardósia



Fonte: ARDÓSIAS, 2015.

A composição mineralógica das ardósias consiste essencialmente de quartzo e minerais sílico-aluminosos, tais como a mica branca (sericita), a clorita e a grafita. A variedade de coloração é derivada da composição química, sendo, geralmente a cor preta atribuída ao grafite, a vermelha e roxa ao óxido de ferro e a verde à clorita (WICANDER; MONROE, 2011).

Chiodi Filho, Rodrigues e Artur (2003) caracterizaram as ardósias extraídas da denominada Província de Ardósia de Minas Gerais, considerada o principal jazimento mundial. A tabela 03 a seguir expõe a composição mineralógica das ardósias dessa região, classificadas por coloração.

Tabela 03 - Composição mineralógica das ardósias da Província de Ardósia de Minas Gerais.

Minerais (%)	Ardósia		
	Negra	Cinza	Verde
Quartzo	24-26	26-30	30-32
Mica branca	31-33	32-34	34-36
Clorita	20-23	18-20	18-20
Feldspato	12-15	12-15	14-15
Carbonato	3-5	2-3	0,5-1
Óxido de ferro	2-3	2-3	2-3
Material Carbonoso	0,5-1	0,2-0,6	<0,1

Fonte: CHIODI FILHO; RODRIGUES; ARTUR, 2003.

A composição química médias das ardósias do zoneamento cromático cinza, selecionado para este estudo, está descrita na tabela 04.

Tabela 04 - Composição química média das ardósias cinzas da Província de Ardósias de Minas Gerais.

Ardósia cinza - Composição química (porcentagem em peso)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CO ₂	TiO ₂	C	P ₂ O ₅
62,85	15,47	4,57	3,77	2,82	1,86	1,72	0,91	0,79	0,28	0,16

Adaptado de CHIODI FILHO; RODRIGUES; ARTUR, 2003.

A extração da ardósia é iniciada após a definição da zona de exploração, a céu aberto ou em minas subterrâneas, sendo a primeira a mais comum. González (1992) destaca que depósitos de maior profundidade geram maior quantidade de resíduo, e como consequência, maiores custos com a retirada e destinação das camadas superiores.

A primeira etapa de extração a céu aberto consiste no desmonte. São retiradas as camadas sobrepostas ao depósito mediante jateamento, uso de escavadeiras e equipamentos de mineração. A superfície da rocha torna-se então descoberta. A seguir, tem-se a fase de preparação, na qual há criação de frentes escalonadas segundo o plano de estratificação das rochas (GONZÁLEZ, 1992).

A última etapa se prossegue com o arranque da ardósia com máquinas cortadoras (figura 07) ou fios diamantados. Uma vez retirados, os blocos são encaminhados para a manufatura (GONZÁLEZ, 1992).

Figura 07 – Processo de arranque da ardósia.



Fonte: ALTIVO, 2015.

A extração e corte da ardósia geram, além do pó, grandes quantidades de resíduos na forma de lama, composta basicamente por água, lubrificantes e rocha moída (SANTOS *et al.*, 2013). Problemas de remanejamento e assoreamento de leitos fluviais podem ser originados da destinação incorreta desses rejeitos (CARVALHO *et al.*, 2007).

A fim de reduzir os impactos ambientais e agregar valor a esses materiais armazenados, vários autores têm estudado a incorporação dos resíduos ardosianos em diversas aplicações. Freitas (2012) utilizou pó de ardósia na técnica agrícola de rochagem, que consiste na incorporação de rochas moídas ao solo para restituição de componentes orgânicos e concomitante aproveitamento de resíduos minerais. Os resultados positivos apontaram grande potencial do resíduo para restauração de áreas de cerrado.

Em seu livro de reciclagem de resíduos industriais, Castells (2000) descreve testes nos quais espécies de plantas foram cultivadas em vários tipos de solos compostos por mistura de lama de ardósia e aditivos agrícolas. Sob simulações climáticas, comprovou-se a possibilidade de utilização destes rejeitos como substrato de vegetação.

O processamento do pó da ardósia por prensagem e sinterização já foi avaliado por Catarino *et al.* (2003) como uma solução de reciclagem. As transformações de fases que ocorreram na sinterização originaram novos componentes com aplicabilidade tecnológica.

O emprego dos rejeitos da mineração da ardósia na fabricação de produtos de cerâmica foi estudado por Oliveira e Rodrigues (2001), que produziram cerâmicas vermelhas destinadas à construção civil, e por Palhares, Moreira e Perini (2012), que utilizaram estes resíduos para confecção de peças cerâmicas através da técnica de colagem de barbotinas.

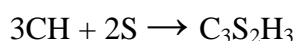
A Micapel Slate, empresa produtora de ardósia, em parceria com a EGESA Engenharia S.A., executou um projeto de pavimentação de vias de rodagem com o emprego de britas de ardósia (obtidas de rejeitos). O desempenho foi plenamente satisfatório, comprovando de que a brita de rejeitos de ardósia tem as mesmas qualidades que outras formas de brita, como o calcário, o gnaisse e o granito, e que seu emprego pode contribuir para a proteção e a preservação ambientais. (MICAPEL SLATE, 2015).

2.4 Atividade pozolânica

As pozolanas são substâncias silicosas ou silicoaluminosas que, embora não possuam qualidades aglomerantes próprias, reagem com o hidróxido de sódio na presença de água e à temperatura ambiente, resultando na formação de compostos cimentícios (ABNT, 1992). Podem ser naturais, como as de origem vulcânica e sedimentar, ou artificiais, como por exemplo, as resultantes do beneficiamento de argilas cozidas (BAUER, 2000).

A denominação pozolânica é originada da palavra Pozzuoli, nome da vila próxima ao vulcão Vesúvius, onde a cinza vulcânica foi encontrada pela primeira vez (NEVILLE, 2011). De acordo com Bauer (2000), a utilização de materiais pozolânicos no concreto melhora diversas qualidades do material, tais como a trabalhabilidade e a impermeabilidade, além de reduzir os ataques por reagentes agressivos, como pela água do mar e sulfatada. Gonçalves (2000) enfatiza que as pozolanas minimizam a exsudação. Este fenômeno é uma forma de segregação em que a água tende a subir para a superfície o concreto recém aplicado e os grãos cimentícios são sedimentados (BAUER, 2000).

Leite e Molin (2001) destacam a possibilidade de aumento da resistência à compressão de concretos com agregados com atividade pozolânica, tendo em vista que estes materiais reagem com o Ca(OH)_2 do cimento, tendo como produto o C-S-H. A reação pozolânica entre a sílica e o hidróxido de cálcio, foi descrita por Nelson e Young *apud* Gonçalves (2000), como a seguir:

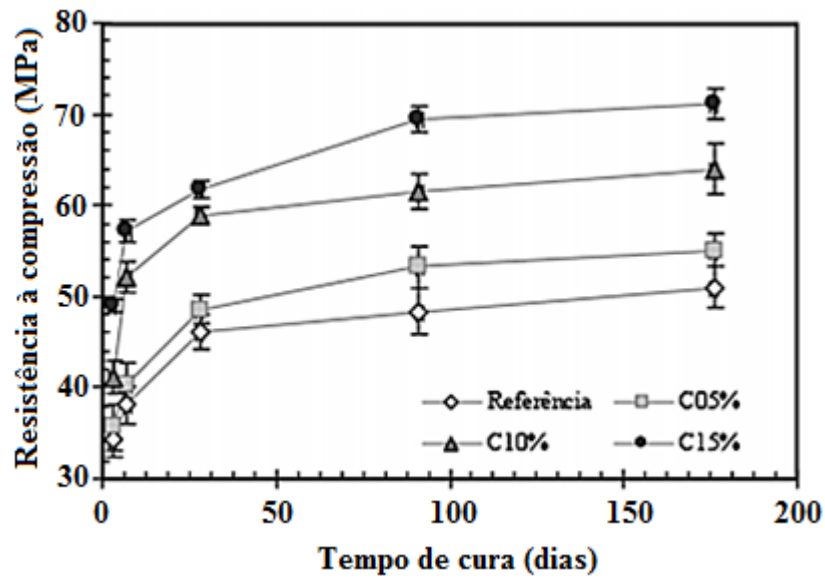


onde C = CaO, H = H₂O e S = SiO₂

De acordo com Coliante (2013), após a reação o C-S-H formado sofre um rearranjo, tornando o sistema mais denso. Como resultado da ação pozolânica tem-se a conversão de poros maiores em menores, o que desempenha um importante papel no aumento da resistência mecânica.

Cordeiro e Désir (2010) avaliaram atividade pozolânica de argilas calcinadas em quantidades de substituição de 0, 5, 10 e 15% em massa do cimento. Os resultados indicaram (figura 08) que o uso da substância pozolânica contribui expressivamente para o aumento de resistência à compressão do concreto em relação ao de referência.

Figura 08 – Resistência à compressão dos concretos com 0, 5, 10 e 15% de argila pozzolânica.



Fonte: CORDEIRO; DÉ SIR, 2010.

A ABNT define na NBR 12653 as exigências químicas e físicas para materiais pozzolânicos, representadas, respectivamente, nas tabelas 05 e 06.

Tabela 05 – Exigências químicas para materiais pozzolânicos.

Propriedades	Classes de material pozzolânico		
	N*	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + FeO ₃ , % mínima	70	70	50
SO ₃ , % máxima	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máxima	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máxima	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máxima	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT, 1992. *A classe N refere-se a pozzolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis à norma, a C contém as cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em usinas termoeletricas e a E refere-se a qualquer pozzolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Tabela 06 – Exigências físicas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 25 µm, % máxima	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
- com cimento aos 28 dias em relação ao controle, % mínima	75	75	75
- com o cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0
- água requerida, % máxima	115	110	110

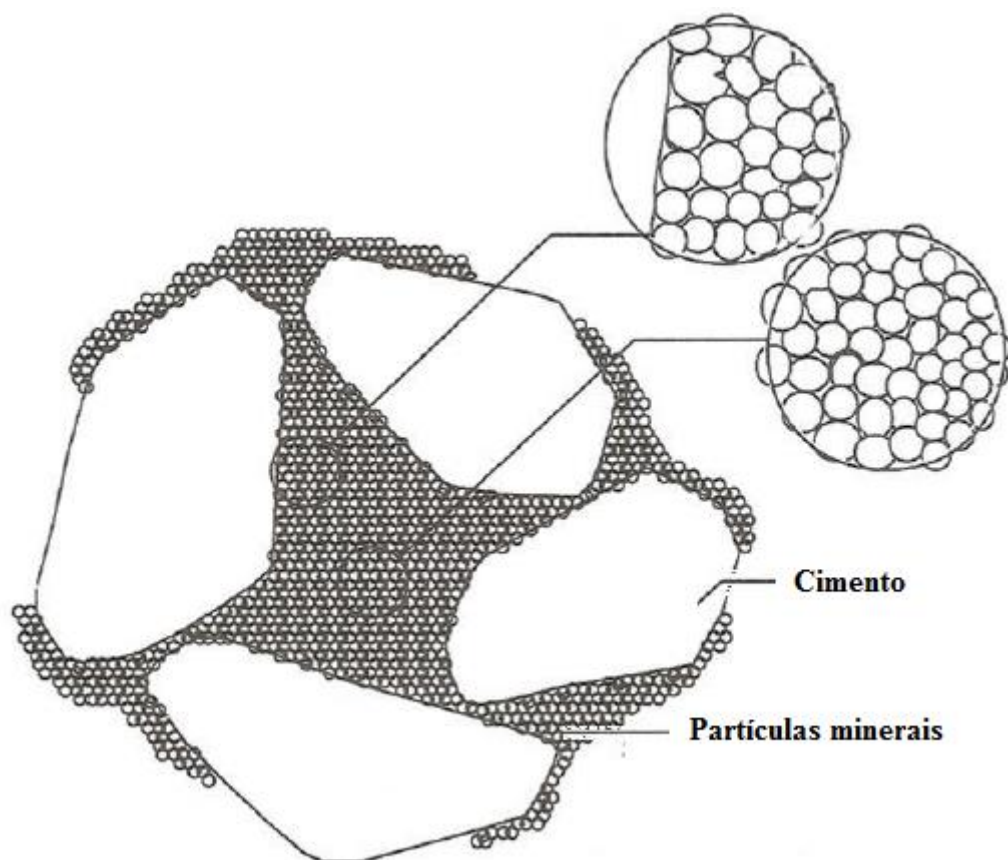
Fonte: ABNT, 1992.

A atividade pozolânica com o cimento é determinada por procedimentos padronizados pela NBR 5752, que consistem na comparação da resistência à compressão de argamassas com e sem pozolana na idade de 28 dias (ABNT, 1992).

2.5 Efeito fíler

As adições minerais que não possuem atividade pozolânica podem gerar outros efeitos positivos na microestrutura do concreto. As partículas adicionadas, que geralmente, possuem elevada finura. Dessa forma, elas são capazes de preencher vazios entre partículas maiores, provocando diminuição da porosidade total do concreto, e, por consequência, aumentando a resistência mecânica (DALLACORT *et al.*, 2002). Este fenômeno de empacotamento, representado na figura 09, é denominado efeito fíler e sua ocorrência tem importância significativa para o aumento da resistência de concretos produzidos com partículas de rejeitos minerais.

Figura 09 – Efeito filer nas pastas de cimento.



Fonte: COLIANTE, 2013.

Além da diminuição da porosidade, as partículas com efeito filer provocam outros benefícios permanentes no material. Com a redução da porcentagem de vazios, há decréscimo da permeabilidade do concreto, o que afeta positivamente a durabilidade (POGGIALI, 2010).

3 METODOLOGIA

O estudo experimental compreendeu dois estágios: caracterização do rejeito de ardósia e avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto com o agregado de rocha.

Os rejeitos de ardósia foram cedidos pela Micapel Slate, empresa brasileira do segmento de rochas ornamentais e de revestimento. As amostras referem-se a resíduos resultantes do beneficiamento das ardósias do zoneamento cromático cinza, provenientes das minas localizadas em Pompéu, Minas Gerais, Brasil.

O pó recebido foi peneirado a seco em peneira de abertura igual a 2mm para a retirada de impurezas. A fração passante foi então utilizada como agregado, sem que fosse submetida a outros tratamentos.

3.1 Caracterização do rejeito de ardósia

a) Distribuição granulométrica

Para levantamento da distribuição de tamanho das partículas de rejeito realizou-se ensaio em série de peneiras de 9, 14, 28, 35, 100, 200 e 325 mesh e de granulometria a laser no equipamento Cilas, modelo 1090.

b) Análise morfológica das partículas

Realizou-se análise morfológica por microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca SHIMADZU e modelo SSX-550. Para o ensaio, preparou-se uma solução do pó de ardósia em água com dispersante. Após agitação da solução por 24 horas, uma gota desta foi depositada no porta-amostra e seca em estufa a 60°C. Em seguida, prosseguiu-se com a metalização da superfície com ouro para realização das microscopia.

c) Análise química elementar

Acoplada ao MEV, a composição química qualitativa da amostra foi determinada utilizando-se o detector de energia dispersiva (EDS). O resultado compreende a média da composição de 5 pontos.

d) Análise mineralógica

O rejeito foi caracterizado quanto à composição mineralógica por difração de Raios-X (DRX) em equipamento SHIMADZU XRD-7000, objetivando identificar a composição e as respectivas estruturas cristalinas dos compostos. Foram adotadas as seguintes condições de análise: velocidade de escaneamento = 2°/min e varredura θ a $2\theta = 3$ a 85°. As fases cristalinas presentes foram identificadas em caráter qualitativo, segundo os arquivos de dados JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*).

As análises de granulometria a laser, DRX e MEV/EDS foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG.

3.2 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto

a) Produção dos corpos de prova

Para produção dos corpos de prova, utilizou-se o cimento composto CP II-E-32, que é comumente aplicado em concretos estruturais e convencionais, em peças como lajes, vigas, pilares, fundações e em argamassas em geral.

O traço adotado foi 1:2:3, onde 1 equivale à fração de cimento, 2 de agregados miúdos e 3 de agregados graúdos, em massa. A relação água/cimento utilizada foi de 0,55. Além do pó da ardósia, areias lavadas fina e grossa, de granulometrias máximas de 4,8 e 5,53mm, respectivamente, foram utilizadas como agregados miúdos e a brita gnaisse n°0, como agregado graúdo.

Além do concreto de referência, sem adição do pó de ardósia, foram produzidos corpos de prova com 5, 10 e 15% de pó de ardósia em substituição à areia, em massa. Para cada percentual de ardósia e para cada idade de ruptura, fez-se 4 corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, totalizando 48 corpos de prova. A produção dos corpos de prova foi referenciada pela NBR 5738 (ABNT, 2008) adaptada. A tabela 07 apresenta o traço dos corpos de prova produzidos.

Tabela 07 – Traço dos corpos de prova produzidos.

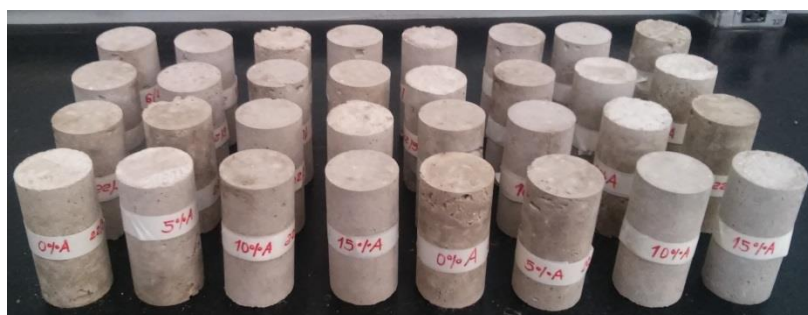
Cimento (g)	Areias fina e grossa (g)	Rejeito de ardósia (g)	Percentual em relação à massa de areia	Brita (g)	Nº de corpos de prova
100	200	0	0	300	4
100	190	10	5	300	4
100	180	20	10	300	4
100	170	30	15	300	4

Fonte: autor.

b) Determinação da resistência à compressão

Para estudo da influência da ardósia nas propriedades mecânicas, determinou-se a resistência à compressão axial de corpos de prova aos 3, 7 e 28 dias de idade em máquina universal de ensaios de marca Emic, modelo DL-30000, do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) do CEFET-MG. A figura 10 contém a imagem dos corpos de prova antes do rompimento.

Figura 10 – Corpos de prova antes do rompimento.



Fonte: autor.

c) Absorção de água por imersão

A absorção de água pelo concreto foi avaliada através do método de imersão, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1987).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição granulométrica

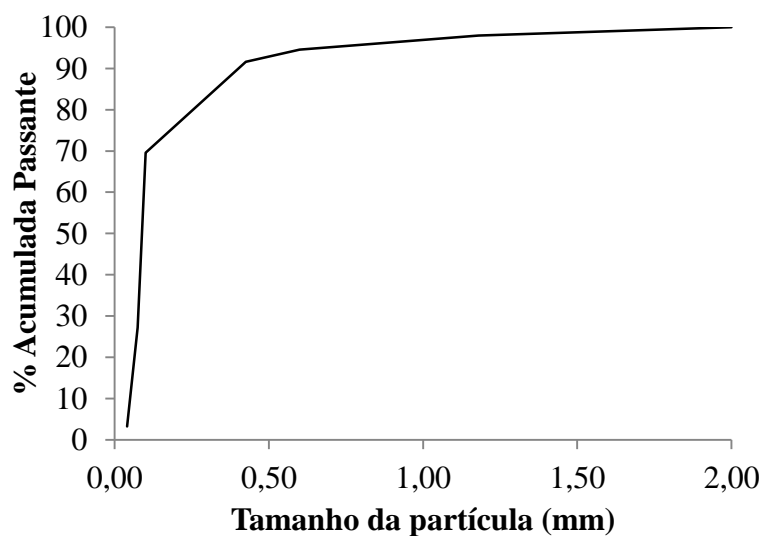
A tabela 08 apresenta os resultados da análise em série de peneiras e a figura 11 contém a representação gráfica deste teste. Os resultados da análise granulométrica a laser estão na figura 12.

Tabela 08 – Análise granulométrica do rejeito de ardósia em série de peneiras.

Tamanho da abertura (mm)	Massa acumulada (g)	% Passante	% Retida	% Acumulada Retida	% Acumulada Passante
2,000	0	100,00	0	0	100,00
1,180	6,05	97,98	2,02	2,02	97,98
0,600	10,31	96,56	3,44	5,45	94,55
0,425	8,84	97,05	2,95	8,40	91,60
0,100	66,13	77,96	22,04	30,44	69,56
0,075	127,14	57,62	42,38	72,82	27,18
0,040	71,85	76,05	23,95	96,77	3,23
Fundo	9,68	96,77	3,23	100,00	0,00

Fonte: autor.

Figura 11 – Curva granulométrica do rejeito de ardósia.



Fonte: autor.

Uma vez que a dimensão característica máxima das partículas (D_{max}), definida na NBR NM 248 (ABNT, 2003), é igual ao valor da abertura da peneira da série normal na qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5%, tem-se que $D_{max} = 1,18\text{mm}$.

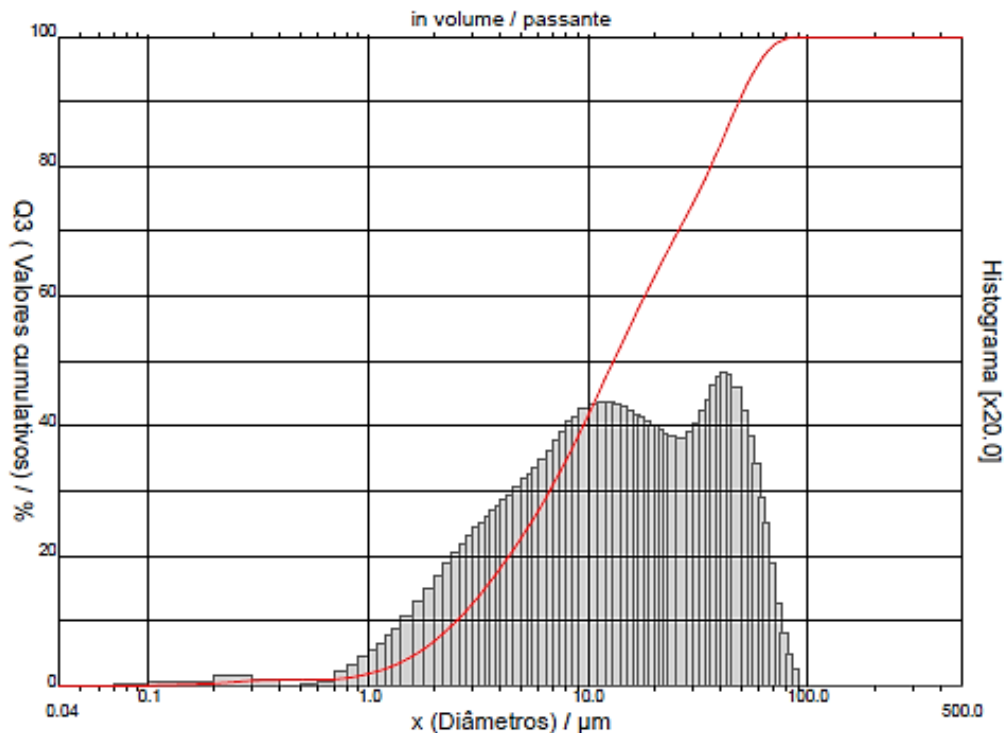
O cálculo do módulo de finura (M.F) é dado pela soma das porcentagens acumuladas retidas em todas as peneiras da série normal dividida por 100 (ABNT, 2003). Sendo assim:

$$M.F = \frac{217,9}{100} = 2,18$$

O módulo de finura classifica os agregados miúdos como grossos, médios e finos, o que determina a sua utilização. Para valores de MF inferiores a 2,4, o agregado é classificado como fino (ROMANO, 2004; RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002), como no caso do rejeito da ardósia utilizado neste trabalho.

Cabral (2009) produziu concreto utilizando resíduos de cerâmica vermelha de granulometria média (MF = 2,80) como agregado. Santos (2013) produziu argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito com granulometria média (MF = 2,84) e obteve bons resultados.

Figura 12 – Curva granulométrica do rejeito de ardósia.

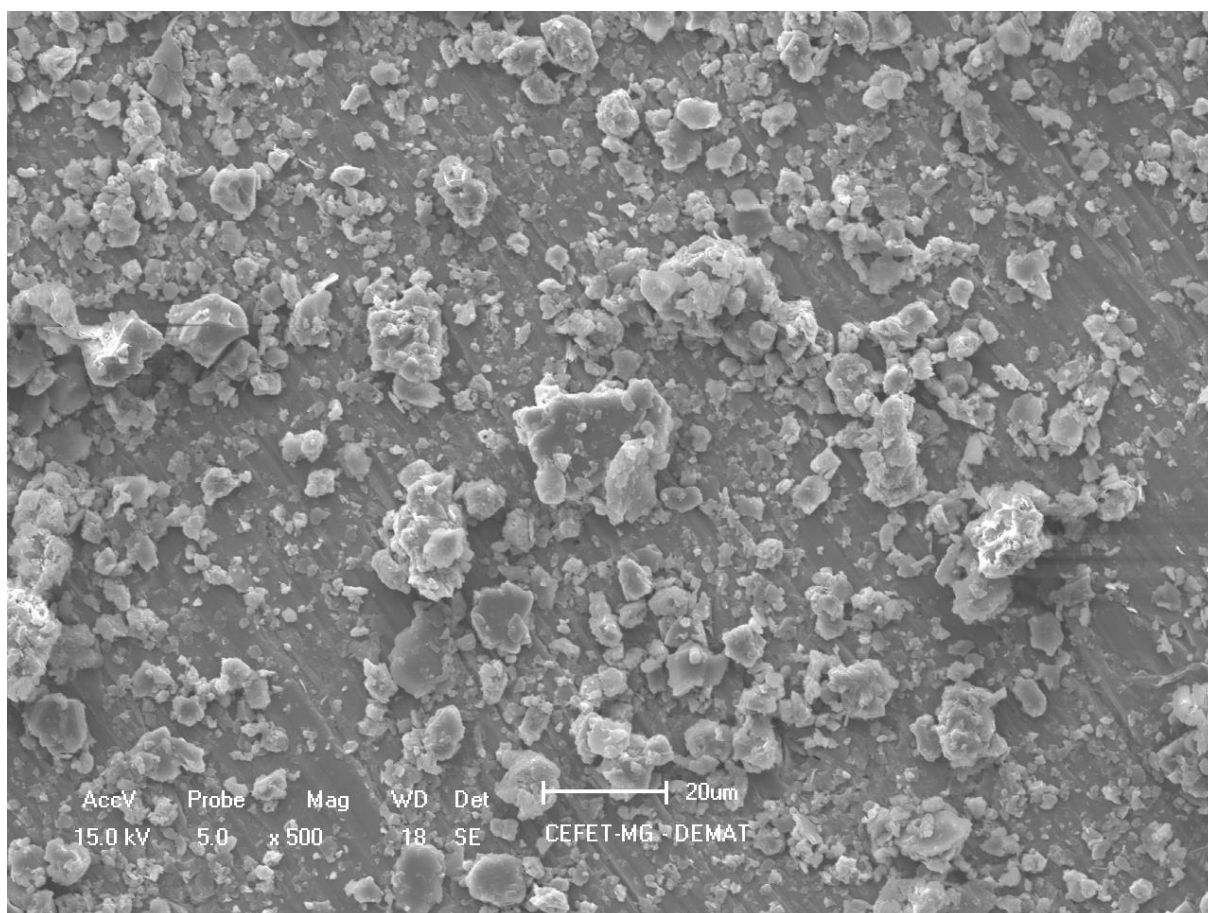


Fonte: autor.

4.2 Análise morfológica das partículas

Nas figuras 13 e 14 estão representadas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do rejeito da ardósia. A primeira imagem evidencia a heterogeneidade granulométrica das partículas, assim como o seu formato lamelar, oriundo da clivagem ardósiana apresentado pela rocha de origem. Palhares *et al.* (2013) e Catarino *et al.* (2003), em seus estudos com pó de ardósia, mostraram resultados semelhantes.

Figura 13 – Imagem obtida por MEV das partículas de rejeito de ardósia.

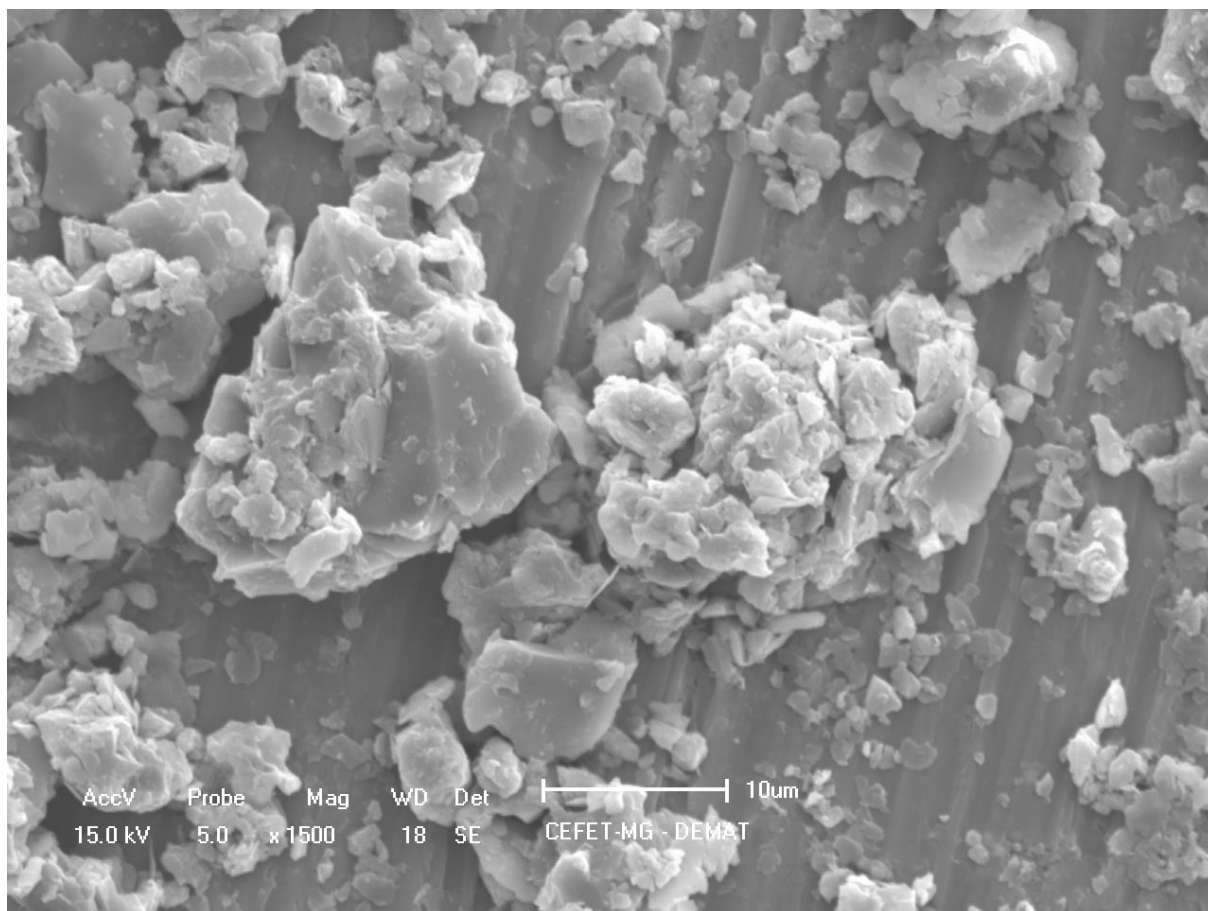


Fonte: autor.

A tendência à aglomeração destas partículas minerais está evidenciada na figura 09. Castro e Pandolfelli (2009) explicam que esta interação advém de forças de van der Waals entre as partículas e forças eletrostáticas entre posições de sítios de cargas opostas.

A textura foliada é percebida, principalmente, nas extremidades das partículas.

Figura 14 – Imagem obtida por MEV das partículas de rejeito de ardósia aglomeradas.



Fonte: autor.

4.3 Análise química elementar

Os resultados da análise química via EDS estão representados na tabela 09. Observa-se maior porcentagem de quartzo e alumina devido à presença de silicatos de alumínio na ardósia. Chiodi Filho (2003) analisou três tipos de ardósia e os resultados foram consistentes com as análises aqui apresentadas. Entretanto, a ardósia nesse estudo apresentou maiores quantidades de quartzo.

Conforme requerido pela NBR 12653, o somatório dos constituintes SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , foi superior a 70%, indicando a possibilidade da rocha apresentar atividade pozolânica quando adicionada ao cimento em proporções adequadas. O teor de álcalis disponíveis, entretanto, estava acima do delimitado pela NBR 12653 (ABNT, 1992), uma vez que é necessário um

percentual máximo de 1,5%. Estes limites de composição química definidos pela norma estão descritos na tabela 05.

Tabela 09 – Análise química qualitativa do pó de ardósia obtida por EDS.

Constituinte	% em massa
SiO ₂	60,5
Al ₂ O ₃	12,7
Fe ₂ O ₃	7,9
K ₂ O	5,8
Na ₂ O	5,2
MgO	4,3
CaO	1,8
TiO ₂	0,8
Total	100,0

Fonte: autor.

De acordo com LEA (1971), não deve haver limitações restritivas quanto à composição química dos materiais pozzolânicos, uma vez que não há correlação exata entre finura e composição química.

4.4 Análise mineralógica

A figura 15 mostra o difratograma do pó de ardósia estudado, confirmando a presença de materiais cristalinos. A composição mineralógica da ardósia varia com a sua procedência. Entretanto, de forma geral, os filossilicatos e o quartzo encontravam-se em quantidades expressivas. Os demais minerais, tais como a calcita, apareceram em menores quantidades. Os principais minerais identificados foram:

Quartzo (Q): mineral duro composto de SiO₂ cristalina;

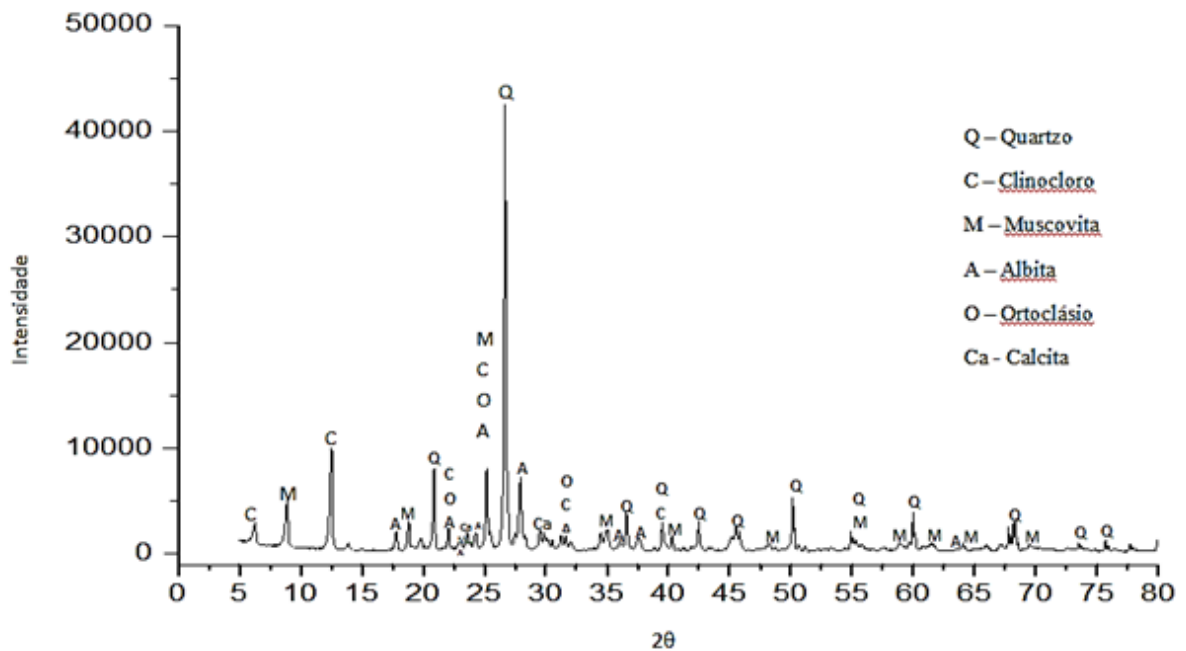
Clinocloro (C): 5MgO.Al₂O₃.SiO₂.4H₂O - hidróxido silicato de magnésio, ferro e alumínio, pertencente ao grupo das cloritas, responsável pela cor verde das ardósias;

Muscovita (M): $K_2O \cdot 2MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 8SiO_2 \cdot 4H_2O$ - hidróxido silicato potássico alumínico pertencente a classe das micas e principal determinante da clivagem da ardósia.

Albita (A) e ortoclásio (O): $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ e $KAlSi_3O_8$, respectivamente - silicatos pertencentes a série dos feldspatos.

Palhares *et al.* (2006) analisou ardósias provenientes da mesma região e os resultados encontrados apresentam as mesmas fases do presente trabalho.

Figura 15 – Difratoograma de raios-X do pó de ardósia.



Fonte: autor.

4.5 Resistência à compressão

Na tabela 10 estão as médias dos resultados obtidos nos ensaios de compressão e o desvio padrão (DP) das séries.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.

Idade	3 dias				7 dias				28 dias			
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
Resistência Média (MPa)	15,98	20,44	24,39	23,33	21,54	25,03	29,05	31,31	24,81	27,73	26,29	34,34
DP	0,688	0,448	0,504	0,839	0,876	2,515	0,361	0,768	0,223	0,791	1,714	0,352

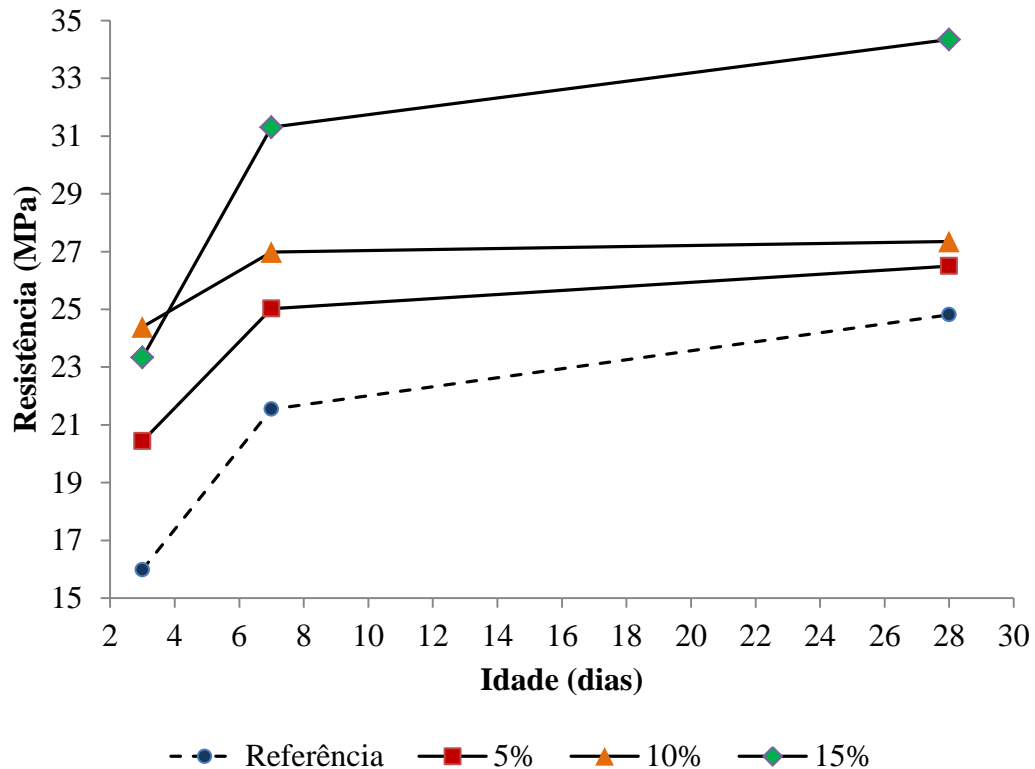
Fonte: autor.

Observou-se que todos os concretos produzidos com ardósia apresentaram, para todas as idades e todos os teores de substituição, maiores resistências à compressão em relação à do concreto de referência. Este resultado indica o benefício da incorporação do rejeito em relação ao desempenho mecânico do concreto.

A figura 16 contém a representação gráfica da evolução da resistência com o tempo. Na idade de 3 dias, a adição de 15% apresentou resistência intermediária às dos concretos com 5 e 10% de ardósia. Uma vez que os valores de resistência para adições de 10 e 15% foram próximos, acredita-se que a idade foi precoce para que houvesse completa hidratação do aglomerante, havendo competição com a hidratação da ardósia e as demais reações no concreto.

Para as idades de 7 e 28 dias, observa-se aumento progressivo de resistência com o aumento do teor de ardósia e com o tempo. Resultados equivalentes foram encontrados por Gonçalves (2000) que ao adicionar resíduos do corte de granito no concreto verificou um ganho médio de 8% na resistência para o teor de 10% de adição e 19,6% para 20% de adição. No trabalho de Coura (2000) os concretos com traços contendo agregados miúdos parcialmente substituídos por resíduos de mármore triturado atingiram maiores resistências que o concreto com agregados convencionais.

Figura 16 – Evolução da resistência à compressão axial com a idade.



Fonte: autor.

Este ganho na resistência traz o indicativo da ocorrência da atividade pozolânica, uma vez que os elementos responsáveis por este efeito somam mais de 70% da composição química da ardósia. Fernando Toscano (INPI, 2012) incorporou rejeitos do beneficiamento de ardósia na fabricação do cimento, substituindo parcialmente o clínquer. Seu estudo patentado já havia comprovado as propriedades pozolânicas dessa rocha.

Acredita-se que houve também a ocorrência do efeito fíler, já que o pó utilizado como agregado possuía baixa granulometria. A granulometria do pó foi suficiente para promover refinamento dos poros e maior densificação do concreto. Além disso, a estrutura lamelar da ardósia e a sua textura grosseira favoreceram a força total de ligação com a matriz de cimento devido à elevada área superficial.

4.6 Absorção de água

O ensaio de absorção de água por imersão avaliou a absorção de água pelos concretos extraídos, de idade igual a 46 dias, por meio da relação entre suas respectivas massas secas em estufa e as saturadas em água. Os resultados do teste estão representados na tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de absorção por imersão.

Procedimento	Massa (g)	% de ardósia			
		0%	5%	10%	15%
Massa ao ar	Ao ar	444,37	393,31	448,77	448,29
Massa após secagem em estufa	Após 24h	428,15	377,18	430,89	430,12
	Após 48h	427,56	376,72	430,37	429,62
	Após 72h	427,46	376,53	430,23	429,52
Massa superfície seca	Após 24h	457,10	399,99	458,31	458,36
	Após 48h	457,50	401,86	458,52	458,58
	Após 72h	458,21	402,27	459,23	459,40
Massa superfície seca após fervura por 5h	Após 24h	459,02	403,04	459,97	461,79
Absorção após saturação em água (%)		7,19	6,84	6,74	6,96
Absorção após saturação e fervura (%)		7,38	7,04	6,91	7,51

Fonte: autor.

Verifica-se uma tendência de decréscimo da massa de água absorvida com o aumento do teor do agregado de substituição. O concreto com 15% de ardósia, entretanto, apresentou absorção intermediária aos de 5 e 10% de ardósia. Tendo em vista que os teores de absorção são próximos, pode-se considerar uma absorção média de 7%. Uma vez que a relação água/cimento é igual para todos os corpos ensaiados, é ideal que a absorção de água seja a mesma. Quanto maior a relação a/c, maior a porosidade resultante da evaporação da água em excesso e, como consequência, maior a quantidade de água absorvida.

Nassar e Soroushian (2012) explicaram em seu estudo de resistência e durabilidade dos concretos produzidos com parte do cimento substituído por vidro moído que a capacidade de absorção de água reflete na aderência entre a superfície das partículas de agregado e a pasta de cimento. Tendo em vista que a absorção de água dos concretos produzidos com ardósia foi

menor, em todos os casos, que a do concreto referencial, corrobora-se o aumento da resistência devido às formações de ligações químicas advindas do efeito pozolânico.

A NBR 6136 (ABNT, 2007) exige uma absorção máxima de água igual a 10% para que o concreto seja usado na produção de blocos estruturais. Sendo assim, os concretos produzidos neste trabalho apresentaram uma absorção satisfatória.

5 CONCLUSÃO

O uso do rejeito do beneficiamento da ardósia como agregado miúdo proporcionou aumento na resistência à compressão quando comparado com o concreto produzido com agregado convencional. O incremento na resistência cresceu progressivamente com o aumento do teor de ardósia.

O incremento da resistência ocorreu, provavelmente, em função da atividade pozolânica da ardósia com o cimento e por efeito fíler, o que foi corroborado pelo teste de absorção de água.

Apesar do perfil poluidor, a indústria da construção civil apresenta potencial para absorver rejeitos de outros processos industriais, como da extração e beneficiamento da ardósia. Além da melhora nas propriedades do concreto, esta conciliação resulta em diminuição dos impactos ambientais e redução dos custos totais de produção.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS. **Panorama mundial do setor de rochas**. 2014. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br/noticia.php?eve_id=3342>. Acesso em: 04 abr. 2015.

AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 30, n. 9, p.1349-1359, set. 2000. Elsevier BV. DOI: 10.1016/s0008-8846(00)00365-3.

ALTIVO. **Processo de extração da ardósia**. Disponível em: <<http://www.altivopedras.com/mineracao/#!>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, L. H. V.; FREITAS, E. G. A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro, 2000. (Apostila)

ARDÓSIAS, P.. **Placas de ardósia**. Disponível em: <<http://portalardosia.wix.com/portalardosia#!outrosprodutos/cwti>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento portland comum. Rio de Janeiro: 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: cimento portland de alto-forno. Rio de Janeiro: 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: cimento portland pozolânico. Rio de Janeiro: 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: 2008. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento portland - índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro: 1992. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - requisitos. Rio de Janeiro: 2008. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregado para concreto. Rio de Janeiro: 1993. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento portland composto. Rio de Janeiro: 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: 1992. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: 2003. 6 p.

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, Ibrahim. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste management**, [S.l.], v. 27, n. 12, p.1870-1876, jan. 2007

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2000.

BRASILEIRO, L. L. **Utilização de agregados reciclados provenientes de rcd em substituição ao agregado natural no concreto asfáltico**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013.

BRITO, J. de; P., A. S.; C., J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement and concrete composites**, [S.l.], v. 27, n. 4, p.429-433, abr. 2005.

CABRAL, A. E. B. et al. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [S.l.], v. 55, n. 336, p.448-460, 2009.

CARVALHO, G. M. X. de et al. Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno. **Polímeros: ciência e tecnologia**, Belo Horizonte, v. 17, n. 2, p.98-103, jun. 2007.

CASTELLS, X. E.. **Reciclaje de residuos industriales**: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción. Madrid: Diaz de Santos, 2000. 609 p.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 55, n. 333, p.18-32, 2009. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s0366-69132009000100003.

CATARINO, L. et al. Ceramic products obtained from rock wastes. **Journal of materials processing technology**. [S.l.], v. 143-144, p. 843-845, dez. 2003.

CHIODI FILHO, Cid.; CHIODI, D. K. **Ardósia no Brasil**. Disponível em: <<http://www.mpmslate.com/site/ardosia/ardosia-no-brasil-mg/>>. Acesso em: 03 abr. 2015.

CHIODI FILHO, Cid; CHIODI, D. K. **Relatório técnico 33**: perfil de rochas ornamentais e de revestimento. [S.l.]: Ministério de Minas e Energia, 2009.

CHIODI FILHO, Cid; RODRIGUES, E. P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. São Paulo: Abirochas, 2009. 118 p.

CHIODI FILHO, Cid; RODRIGUES, E. P.; ARTUR, A. C. Ardósias de Minas Gerais, Brasil: características geológicas, petrográficas e químicas. **Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 2, p.119-127, 2003.

COLIANTE, J. G. R. **Cura térmica em argamassas de concreto de alto desempenho**: caracterização da microestrutura e da resistência à compressão. 2013. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORDEIRO, G. C; DÉSIR, J. M. Potencial de argila caulinítica de campos dos goytacazes, rj, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, [S.l.], v. 56, n. 337, p.71-76, 2010.

COURA, C. V. G. **Análise experimental sobre a substituição do agregado miúdo por mármore triturado na confecção de concreto**. 2009. 196 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

CRESPO, R. A.; PUIME, A. O. **Labrado y conformado de la pizarra**. Antequara: Ic Editorial, 2013.

CROW, J. M. The concrete conundrum. **Chemistry world**, Londres, p.62-66, mar. 2008.

DALLACORT, R. et al. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento portland por resíduo cerâmico moído. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.511-518, 2002. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s1415-43662002000300022.

ELATY, M. A. A. A. Compressive strength prediction of portland cement concrete with age using a new model. **Hbrc journal**, [S.l.], v. 10, n. 2, p.145-155, ago. 2014.

FREITAS, V. L. O. **Restauração de áreas degradadas pela extração de ardósia, utilizando seus rejeitos, no município de Papagaio, Minas Gerais**. 2012. 116 f. Tese (Doutorado) - Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

GAMBHIR, M. L. **Concrete technology: theory and practice**. 5. ed. New Delhi: Tata Mcgraw-hill Education, 2013. 774 p.

GANI, M. S. J. **Cement and concrete**. London: Chapman & Hall, 1997.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; MOLIN, D. C. C. D. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (rcg), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p.53-68, mar. 2002.

GONZÁLEZ, X. A. R. **La industria de la pizarra**. [S.l.]: Diaz de Santos, 1992.

INPI (Brasil). Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Fernando Toscano Pimenta. **Ardósia em cimentos pozolânicos**. BR nº PI 1003671-7 A2, 07 jun. 2010, 28 fev. 2012.

JAMKAR, S. S.; RAO, C. B. K. Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. **Cement and concrete research**, Aurangabad, v. 34, n. 11, p.2021-2027, nov. 2004.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics**. 2. ed. Cambridge: John Wiley & Sons, 1976.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 3. ed. New York: Dover Publishing, 1971.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. **Sitientibus**, Feira de Santana, v. 1, n. 26, p.111-130, jan. 2001.

MCARTHUR, H.; SPALDING, D.. **Engineering materials science: properties, uses, degradation, remediation**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2004.

MESQUITA, A. S. G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. **Holos**, Teresina, v. 2, n. 28, p.58-65, 2012.

MICAPEL SLATE. **A utilização de brita de ardósia na pavimentação de vias rodagem**. Disponível em: <<http://www.micapel.com/portugues/valeler/brita.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

NASSAR, R.; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and building materials**, [s.l.], v. 29, p.368-377, abr. 2012. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0950061811006118?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 26 out. 2015.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. London: Prentice Hall, 2011.

OLIVEIRA, M. C.; RODRIGUES, E. P. Aproveitamento de rejeitos da mineração e beneficiamento de ardósia na fabricação de cerâmica vermelha para construção civil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45, 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CBC, 2001.

ÖZEN, M. **Investigation of relationship between aggregate shape parameters and concrete strength using imaging techniques**. 2008. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Middle East Technical University, Famagusta, 2008.

ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. **Cement and concrete research**, Istanbul, v. 27, n. 2, p.165-170, jan. 1997.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and building materials**, [S.l.], v. 24, n. 5, p.832-838, maio 2010.

PALHARES, L. B. et al. Microstructure evaluation of slate pieces submitted to heat treatment at diferente temperatures. In: **WORLD CHEMISTRY CONGRESS**, 44., 2013, Turkey. **Anais...** Turkey: 2013. p. 490 - 496.

PALHARES, L. B. et al. Study of pore size distribution of slate ceramic pieces produced by slip casting of waste powders. **Minerals engineering**, [s.l.], v. 19, n. 5, p.525-527, abr. 2006. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.mineng.2005.10.001. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0892687505003705?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

PALHARES, L. B.; MOREIRA, B. H. M.; PERINI, P. C. D. Reaproveitamento de resíduos de ardósia na fabricação de peças cerâmicas pela técnica de colagem de barbotinas. **Pós em revista**, Belo Horizonte, v. 7, p.157-161, 2012.

PEREIRA, H. R. S. **Caracterização da resistência à compressão do concreto convencional com areia de fundição em substituição parcial a areia natural**. 2014. Disponível em: <<http://www.catolicasc.org.br/arquivosUpload/5385129631423243086.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

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) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

POMPEU NETO, B. B.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista matéria**, Belém, v. 16, n. 2, p.690-702, set. 2011.

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The effects of aggregate characteristics on the performance of portland cement concrete**. Austin: Icar, 2003. 382 p.

REIS, A. S.; TRISTÃO, F. A. Tactile-floor tile hydraulic with addition residue improvement dimension stones. **Revista ibracon de estruturas e materiais**, [S.l.], v. 3, n. 4, p.409-419, 2010.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 102 p.

ROMANO, C. A. **Apostila de tecnologia do concreto**. Curitiba: Cefet-pr, 2004. Disponível em: <<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2013/04/Concreto-02.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

SANTOS, A. P. dos; LACHOWSKI JÚNIOR, N. **Estudo experimental e análise da viabilidade do emprego do pó de mármore para a produção de concreto auto-adensável**. 2012. 89 f. TCC (Graduação) - Tecnologia em Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SANTOS, C. G. dos et al. **Adição de rejeitos de extração de ardósia em concreto**. 2013. Disponível em: <<http://blog.newtonpaiva.br/pos/e8-eng15/>>. Acesso em: 03 abr. 2015.

SANTOS, R. A. dos. Inconsciência dos construtores frente à gestão ambiental no canteiro de obras: estudo de caso na região sul de João Pessoa/PB. **Revista monografias ambientais**, [S.l.], v. 10, n. 10, p.2278-2287, 13 jan. 2013.

SANTOS, R. A. dos; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **Reget**, [S.l.], v. 8, n. 8, p.1818-1828, 9 jan. 2013.

SENTHAMARAI, RM.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and concrete composites**, [S.l.], v. 27, n. 9-10, p.910-913, out. 2005. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.04.003. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0958946505000557?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 27 ago. 2015.

SHETTY, M. S. **Concrete technology: theory and practice**. New Delhi: S. Chand & Company Ltda, 2005.

SILVA, S. B. P. da. **Controle e otimização do processo de produção do cimento Portland**. Belo Horizonte: 2011.

SNIC. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro: Snic, 2013.

TOKUDOME, N. et al. **Cimento: treinamento de mão-de-obra para construção civil**. Curitiba: Cimento Itambé, 2008.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. Tradução: Harue Ohara Avritcher.

YKONLINE. **Metamorphic rocks**. Disponível em: <<http://ykonline.yksd.com/distancedcourses/Courses/EarthScience/lessons/ThirdQuarter/Chapter8/8-4/images/12SlateDiagram.gif>>. Acesso em: 28 nov. 2015.