



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**



Sâmea Valensca Alves Barros

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS ALTERNATIVAS ADITIVADAS COM
RESÍDUOS DE QUARTZITO**

Campina Grande – PB
2017

Sâmea Valensca Alves Barros

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS ALTERNATIVAS ADITIVADAS COM
RESÍDUOS DE QUARTZITO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, em cumprimento às exigências para obtenção do título de **Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Orientadores: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes

Agência Financiadora: CAPES

Campina Grande – PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B277d Barros, Sâmea Valensca Alves.
Durabilidade de argamassas alternativas aditivadas com resíduos de quartzito / Sâmea Valensca Alves Barros. – Campina Grande, 2017.
113 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes".
Referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Resíduos de Quartzito. 3. Argamassas Alternativas. I. Neves, Gelmires de Araújo. II. Menezes, Romualdo Rodrigues. III. Título.

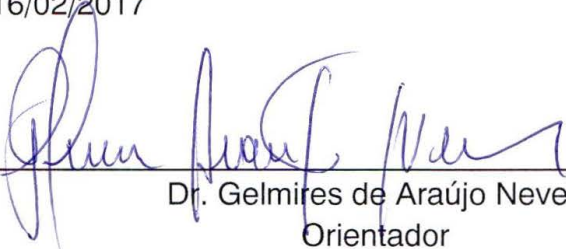
CDU 620.1(043)

SÂMEA VALENSCA ALVES BARROS

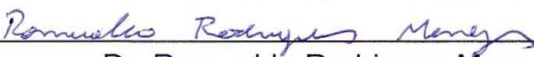
DURABILIDADE DE ARGAMASSAS ALTERNATIVAS ADITIVADAS COM
RESÍDUOS DE QUARTZITOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**.

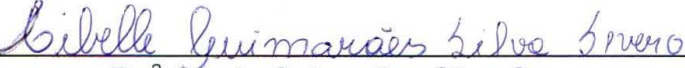
Aprovado em: 16/02/2017



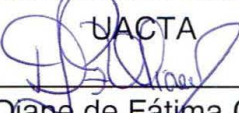
Dr. Gelmires de Araújo Neves
Orientador
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG



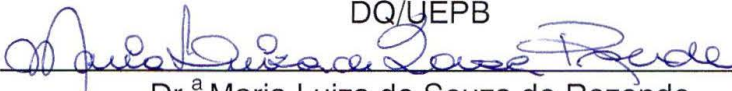
Dr. Romualdo Rodrigues Menezes
Orientador
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG




Dr.ª Cibele Guimarães Silva Severo
Examinadora Externa
UACTA



Dr.ª Diane de Fátima Oliveira
Examinadora Externa
DQ/UEPB



Dr.ª Maria Luiza de Souza de Rezende
Examinadora Externa
CCT/UAEP



Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho
Examinador Externo
CTRN/UAEC

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

AGRADECIMENTOS

A Nossa Senhora das Graças pela intercessão junto a Deus e ao seu santíssimo filho Jesus Cristo, pela força concedida nos momentos difíceis no decorrer desses quatro anos, pelas graças e bênçãos concedidas, por guiar meus passos e pensamentos em direção a superação diária e por despertar o interesse pela busca constante do conhecimento.

Ao meu pai (in memoriam) por ter despertado em mim o interesse pela Engenharia Civil e pelo exemplo de vida deixado, a minha mãe, Raimunda Alves Barros, pelo apoio, ajuda nos ensaios que foram realizados nos finais de semana e amor incondicional concedido ao longo dessa caminhada.

Aos meus irmãos, Susi Vanessa e Cícero Alves, pelo apoio, amor e ajuda concedida, cada um do seu jeito.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gelmires Neves, pelo conhecimento transmitido, paciência, incentivo e, principalmente, por sempre ter se colocado à disposição para sanar minhas dúvidas e não ter medido esforços para me apoiar no que foi preciso durante esses quatro anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Romualdo Menezes, e ao Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira pelo conhecimento transmitido que contribuiu para realização deste trabalho, por terem sido sempre muito solícitos.

Ao Prof. Dr. André Fiquene por ter cedido seu tempo e conhecimento para me auxiliar na realização de alguns ensaios no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos - LABGER.

Aos meus amigos do Laboratório de Tecnologia dos Materiais – LTM, Ivna Daniele, Isabelle Albuquerque, Paula Medeiros, Anna Raffaella, João Gonçalves, Mariaaugusta Ferreira, Lilian Pinheiro, Sileide Ramos, Karine Nóbrega, Raquel Leite,

Bruna, Danubia, Danielle Nascimento, Ester Almeida, Tatiara Almeida pelos bons momentos compartilhados e, em especial, a Wherlyson Patrício, a Juliana Marques, Juliana Figueirêdo, a Valmir José e a Rosiane Farias por terem me auxiliado na realização de alguns ensaios específicos da área de Engenharia de Materiais.

Aos técnicos do Laboratório de Solos da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Solange Patrício e Edvaldo, por terem emprestado, com a devida autorização, os moldes para realização dos meus ensaios e também por terem sido sempre muito solícitos.

Aos técnicos do Laboratório de Tecnologia dos Materiais – LTM, Sr. Beto, Sr. Baiano, Sr. Aloísio e Emanuel por toda ajuda prestada para realização do meu trabalho.

Aos alunos do PIBITI, João Emanuell e Gabriel Felix, que me acompanharam e me ajudaram na realização dos ensaios em algumas fases do doutorado.

As minhas amigas, Fabrícia de Oliveira, Izabelle Marie, Alessandra Soares e Célia Maria Rufino Franco pela atenção, incentivo e carinho concedidos ao longo dessa trajetória.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, instituição que faço parte com muito orgulho e alegria, por ter me concedido o afastamento para realização do meu doutoramento.

E por fim, mas não menos importante, a CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A exploração e processamento de quartzito como rocha ornamental têm produzido grande volume de resíduos, cujo descarte no meio ambiente tem causado vários danos ambientais, como a contaminação da fauna e flora, dos recursos hídricos e dos solos. Com o intuito de sanar essa problemática, empresários do setor, pesquisadores e agências de fomento vêm desenvolvendo pesquisas para viabilizar o uso destes resíduos como matérias-primas para construção civil. Assim, este trabalho tem como objetivo estudar a durabilidade de argamassas alternativas adicionadas com resíduos de quartzitos. A caracterização física, química, mineralógica e ambiental dos resíduos de quartzitos foi realizada fazendo uso das seguintes técnicas: análise granulométrica por peneiramento e difração a laser (AG); composição química por fluorescência de raios X (EDX); difração de raios X (DRX); análises químicas dos extratos lixiviados e solubilizados por absorção atômica. No estudo da durabilidade das argamassas adicionadas com resíduos de quartzito, utilizou-se as seguintes metodologias de investigação: reação álcali-agregado (RAA); resistência ao ataque por sulfatos; envelhecimento natural (exposição as condições ambientais locais) e envelhecimento acelerado (chuva dirigida). Os resultados indicaram que os agregados oriundos dos resíduos de quartzito apresentaram comportamento inócuo quanto a reação álcali-agregado, não sofrendo degradação quando imersos em solução de NaOH 1N. E reativo ao ataque por sulfatos, sofrendo expansões dimensionais quando imersos em solução de sulfato de sódio. Em relação ao envelhecimento natural e acelerado os resultados evidenciaram que as argamassas adicionadas com resíduos de quartzito apresentaram durabilidade no período avaliado comprovada pelo comportamento mecânico e microestrutura semelhantes aos das respectivas argamassas convencionais durante o período avaliado.

Palavras-chave: Resíduo de quartzito. Argamassas. Agregados. Durabilidade.

ABSTRACT

The exploration and processing of quartzite as ornamental rock generate a large amount of residues that, when improperly discarded, cause serious damages to the environment, such as the contamination of fauna, flora, water resources and soil. In order to attack this problem, mining companies, researchers and government agencies have performed studies on the use of these residues as raw matter for construction. So, the present study has the objective of analyzing the durability of alternative mortar compositions blended with quartzite residues. The physical, chemical and mineralogical characterization of the quartzite residues was performed through the application of the following techniques: granulometric analysis by sieving and laser diffraction (AG); chemical composition by X-ray fluorescence (EDX); X-ray diffraction (XRD); chemical analyses of the extracts lixivated and solubilized by atomic absorption. In the study of the durability of mortar samples blended with quartzite residues, we employed the following investigation methodologies: alkali-aggregate reaction (AAR); sulfate-attack resistance; natural aging (exposure to local environmental conditions) and quick aging (directed rain). The results indicated that the aggregates coming from the quartzite residues are innocuous with respect to the alkali-aggregate reaction, not being deteriorated when immersed in NaOH 1N solution. They were also reactive to the sulfate attack, presenting dimensional expansions when immersed in sodium sulfate solution. With respect to the natural and quick aging methods, the results reveal that the mortar samples blended with quartzite residues presented satisfactory durability, proven by the mechanical behavior and microstructure, which were similar to those of the respective conventional samples over the period of evaluation.

Keywords: Quartzite residue. Mortar. Aggregates. Durability.

PUBLICAÇÃO

Barros, S. V. A.; Marciano, J. E. A. ; Ferreira, H. C. ; Menezes, R. R. ; Neves, G. A.
Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate and the
mechanical behavior. **Construction and Building Materials**, 118 (2016) 344-351.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização de Várzea/PB (Vital <i>et al.</i> , 2013).	21
Figura 2 - (a) Pó de quartzito (b) Aparas de quartzito.....	22
Figura 3 - Etapas produtivas e seus impactos (Adaptado de Da Silva, 2011).	24
Figura 4 - Destinação final dos resíduos de quartzito gerados no município de Várzea/PB no processo de beneficiamento que compromete a qualidade paisagística e ambiental da região.	25
Figura 5 - Fluxograma com as etapas do trabalho.	36
Figura 6 - Ciclo de molhagem e secagem através do ensaio da chuva dirigida.	45
Figura 7 - Distribuição e classificação granulométrica da areia de quartzito.	48
Figura 8 - Curva de distribuição granulométrica do pó de quartzito.	49
Figura 9 - DRX dos resíduos de quartzito (a) Curva DRX do QS (b) Curva DRX do QP. Onde: M- mica; Q- Quartzo; F- Feldspato e D- Dolomita.	50
Figura 10 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica do QP.	51
Figura 11 - (a) Micrografia da areia de quartzito (b) EDS da areia de quartzito (c) Micrografia do pó de quartzito (d) EDS do pó de quartzito.	52
Figura 12 - a) Superfície de resposta e sua projeção no triângulo de composições para misturas com 0% de QP e b) Superfície de resposta e sua projeção no triângulo de composições para misturas com 15% de QP.	59
Figura 13 - Expansões dos traços 1:3 e 1:1:6 com 0% e 15% de QP.	62
Figura 14 - Micrografia das argamassas após imersão em solução de 1N de NaOH durante 28d: (a)Traço 1:3(Cimento: 100%QS e 0%QP) (b)Traço 1:3(Cimento: 85%QS e 15%QS) (c) 1:1:6(Cimento:Cal:100%QS e 0%QP) (d)Traço 1:1:6(Cimento:Cal:85%QS e 15%QP).....	64
Figura 15 - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio.	66
Figura 16 - DRX das argamassas estudadas após 42d de imersão em solução de sulfato de sódio. Onde: E –Etringita; M -Mica; O -Ortoclasio e Q -Quartzo.....	68
Figura 17 - Curvas TG e DTG das argamassas estudadas após 42d de imersão em solução de sulfato de sódio.	69
Figura 18 - RCS ao longo de 1 ano de envelhecimento das argamassas estudadas.	71
Figura 19 - DRX das argamassas estudadas após 28d de cura e 360d de envelhecimento natural. Onde: C-calcita, F-feldspato, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.	73
Figura 20 - DRX das argamassas estudadas após 28d de cura e 360d de envelhecimento natural. Onde: C-calcita, F-feldspato, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.	73
Figura 21 - TG e DTG após 28d de cura e após360d de envelhecimento.	75

Figura 22 - TG e DTG após 28d e após 360d de envelhecimento.	77
Figura 23 - RCS das argamassas curadas por 60d após exposição a chuva dirigida.	79
Figura 24 - RCS das argamassas curadas por 90d após exposição a chuva dirigida.	80
Figura 25 - (a) Traço 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP) (b) Traço 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP) (c) Traço 1:3 de referência (cimento: areia normal). Onde: C-calcita, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.	81
Figura 26 - (a) Traço 1:1:6 (cimento: cal: 0% de QP) (b) Traço 1:1:6 (cimento:cal:15% de QP) (c) Traço1:1:6 de referência (cimento: cal: areia normal). Onde: C-calcita, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.....	82
Figura 27 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo de envelhecimento.	84
Figura 28 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo de envelhecimento	85
Figura 29 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo do envelhecimento.	86
Figura 30 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo do envelhecimento.	88
Figura 31 - (a) argamassas curadas por 60d (b) argamassas curadas por 90d.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do cimento Portland CP IV 32 RS.	34
Tabela 2 - Composição química do cimento Portland CP II F 32.....	35
Tabela 3 - Composição química cimento Portland CP V ARI MAX.....	35
Tabela 4 - Quantidade em massa para moldar três corpos de prova para determinar o IAP com cal.	39
Tabela 5 - Quantidade em massa necessária para moldar três corpos de prova para determinar o IAP com cimento.	39
Tabela 6 - Composições (em % massa) obtidas no delineamento de misturas para formulação das argamassas com resíduos de quartzito e resistência à compressão simples aos 28d determinadas, após cura úmida e cura imersa.....	41
Tabela 7 - Propriedades físicas dos resíduos de quartzito.	47
Tabela 8 - Composição química dos resíduos de quartzito.	50
Tabela 9 - Valores determinados e teores máximos permitidos nos extratos lixiviado e solubilizado da areia de quartzito e do pó de quartzito.	54
Tabela 10 - Valores determinados e valores máximos permitidos nos extratos solubilizados das argamassas confeccionadas com os resíduos de quartzito.	55
Tabela 11 - Análise de variância para a significância de modelos de regressão.	57
Tabela 12 - Composição das misturas de ponto de verificação, os valores medidos correspondentes, os valores previstos e intervalo de confiança da resistência à compressão simples.....	60
Tabela 13 - Resistência à compressão simples das argamassas após 28d de imersão em NaOH 1N e em água destilada.	65
Tabela 14 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova após imersão por 42d em solução de sulfato de sódio.....	67
Tabela 15 - Consumo de portlandita e formação da calcita após 28d de cura e 360d de envelhecimento das argamassas alternativas e convencionais.	78
Tabela 16 - Consumo de portlandita e formação da calcita após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento acelerado das argamassas alternativas e convencionais curadas por 60d.	89
Tabela 17 - Consumo de portlandita e formação da calcita após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento acelerado das argamassas alternativas e convencionais curadas por 90d.	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMB	Anuário Mineral Brasileiro
APL's	Arranjos produtivos locais
ATD	Análise térmica diferencial
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Calcita
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CH	Portlandita ou hidróxido de cálcio
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CP IV RS 32	Cimento Portland Pozolânico resistente a sulfato
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de raios - X
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDS	Energia Dispersiva
HSC	Silicato de cálcio hidratado
IAP	Índice de atividade pozolânica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LABGER	Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos
LTM	Laboratório de Tecnologia dos Materiais
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PB	Paraíba

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
QS	Resíduo de quartzito na granulometria de areia
QP	Resíduo de quartzito na granulometria de pó
RAA	Reação álcali-agregado
RCS	Resistência à compressão simples
TG	Análise termogravimétrica
UAEAG	Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
UAEC	Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
UAEMA	Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais
UAEP	Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Rochas ornamentais: quartzito	20
2.2	Quartzito de Várzea	21
2.3	Impactos ambientais causados pelas indústrias de rochas ornamentais....	23
2.3.1	Impactos causados pelas indústrias de quartzito de Várzea/PB	25
2.4	Aplicação dos resíduos de rochas ornamentais na construção civil	26
2.5	Durabilidade de materiais alternativos	28
2.5.1	Metodologias para estudo da durabilidade de materiais alternativos	28
2.5.1.1	Envelhecimento natural	29
2.5.1.2	Envelhecimento acelerado	30
2.5.1.3	Resistência das argamassas as reações álcali-agregado	31
2.5.1.4	Resistência das argamassas ao ataque por sulfatos.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Materiais	34
3.2	Metodologia	35
3.2.1	Preparação das amostras.....	35
3.2.2	Métodos	36
3.2.2.1	Ensaio de Caracterização	36
3.2.2.1.1	Caracterização física, química e mineralógica	36
3.2.2.1.2	Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica	37
3.2.2.1.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	38
3.2.2.1.4	Atividade pozolânica	38
3.2.2.1.5	Caracterização ambiental.....	40
3.2.2.2	Planejamento experimental	40
3.2.2.2.1	Delineamento de misturas.....	40
3.2.2.3	Estudo da durabilidade	42
3.2.2.3.1	Preparação das argamassas	42
3.2.2.3.2	Reação álcali-agregado	43
3.2.2.3.3	Ataque por sulfatos	43
3.2.2.3.4	Envelhecimento natural.....	44
3.2.2.3.5	Envelhecimento acelerado	45

3.2.2.4	Determinação da resistência à compressão simples das argamassas	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Caracterização	47
4.1.1	Caracterização física, química e mineralógica	47
4.1.2	Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica	51
4.1.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	52
4.1.4	Atividade pozolânica do pó de quartzito	53
4.1.5	Caracterização ambiental	54
4.1.5.1	Caracterização ambiental dos resíduos de quartzito	54
4.1.5.2	Caracterização ambiental das argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito	55
4.1.6	Definição do tipo de cura para o estudo da durabilidade	56
4.1.7	Definição dos traços para o estudo da durabilidade	58
4.1.8	Durabilidade a reação álcali-agregado	61
4.1.9	Durabilidade ao ataque por sulfatos	66
4.1.10	Envelhecimento Natural.....	70
4.1.11	Envelhecimento Acelerado	79
5	CONCLUSÕES	93
6	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	ANEXO.....	109

1 INTRODUÇÃO

O estado da Paraíba apresenta uma geologia diversificada que o faz ser rico em bens de origem mineral, possuindo em toda sua extensão territorial 2.008 ocorrências minerais que englobam minerais metálicos, não metálicos e energéticos. Dentre estes, percebe-se que os minerais não metálicos (minerais industriais e de uso na construção civil), a exemplo das rochas ornamentais chegaram a movimentar no estado em 2009 cerca de US\$ 3.739.016 (AMB, 2010). Em 2015, a Paraíba ficou em quinto lugar na exportação de rochas ornamentais (granitos, mármore, quartzitos, etc.) no país, faturando US\$ 8.352.141 (MEDIC, 2016).

O setor das rochas ornamentais além de proporcionar lucratividade para o estado gera uma grande quantidade de resíduos tanto no processo de extração quanto no beneficiamento das rochas, destacando-se no estado a produção de quartzito folheado no município de Várzea/PB responsável pela geração de cerca de 3.000kg de rejeitos finos e de 17.000kg de aparas por dia (Babisk *et al.*, 2012). Assim, toneladas de resíduos de quartzito são produzidas por ano no município, esses materiais não são biodegradáveis e, quando indevidamente descartados, comprometem o meio ambiente e causam sérios danos à saúde pública, pois o pó disperso no ar quando inalado causa problemas respiratórios na população local (Moreira *et al.*, 2008; Ercikid *et al.*, 2015).

Portanto, a exploração sustentável de rochas ornamentais requer a gestão adequada dos resíduos oriundos desse processo, sendo esta uma questão de grande importância tecnológica, ambiental e econômica nos dias atuais (Torres *et al.*, 2009; Bacarji *et al.*, 2013; André *et al.*, 2014; Tennich *et al.*, 2015), justificando a utilização dos resíduos gerados no processo de beneficiamento dos quartzitos na construção civil, nos últimos anos.

O setor da construção civil é um dos setores econômicos que mais explora os recursos naturais, logo, a utilização dos resíduos gerados nos processos de beneficiamento das rochas ornamentais é uma das alternativas encontradas para redução dos impactos causados ao meio ambiente, por esta atividade antrópica. Portanto, estes resíduos passam por um processo de caracterização para escolha de uma técnica de reciclagem capaz de transformá-los em materiais com as

características que atendam as especificações técnicas para serem usados na construção civil (Gonçalves, 2000).

Com base nos aspectos citados acima, chegou-se a motivação dessa pesquisa: a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas sobre reciclagem, tanto em nível industrial como também acadêmico no Brasil, que objetivem soluções alternativas para os resíduos gerados pelas empresas mineradoras em relação ao meio ambiente, já que essas empresas, principalmente as de rochas ornamentais, são citadas como grandes poluidoras. E ainda, a inexistência de estudos sistemáticos sobre a durabilidade de argamassas incorporadas com resíduos de quartzito em substituição ao agregado convencional para uso na construção civil, na medida que já são fabricadas argamassas contendo resíduos de quartzito e não há estudos que comprovem a viabilidade técnica da aplicação desses resíduos para este fim.

A durabilidade dos compósitos a base resíduos é um fator de relevância para que estes conquistem seu espaço no mercado consumidor, pois se faz necessário que tenham suas características técnicas iniciais satisfatórias e estas se mantenham ao longo da sua vida útil. Sendo fundamental, segundo Menezes *et al.* (2002), que ocorram estudos sistemáticos para comprovar que o reaproveitamento de resíduos de rochas ornamentais é ecologicamente correto, economicamente e tecnicamente viável.

A Universidade Federal de Campina Grande juntamente com o CNPq e CAPES, através do Grupo de Reciclagem de Resíduos Sólidos, formados por professores e estudantes com formação multidisciplinar das Unidades Acadêmicas de Engenharia de Materiais(UAEMA), de Engenharia Civil(UAEC), de Engenharia Agrícola(UAEAG), de Engenharia de Produção (UAEP), desde de 1997 vem desenvolvendo pesquisas sobre reciclagem, através de resíduo da construção civil, cinza de casca de arroz, cinza de algaroba e, principalmente, os de mineração para diversas aplicações tais como: argamassas; blocos com e sem função estrutural; produtos cerâmicos, etc.

Esta pesquisa tem como objetivo estudar a durabilidade de argamassas alternativas incorporadas com resíduos de quartzitos para uso na construção civil. Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, inicialmente, realiza-se a caracterização física, química, mineralógica e ambiental dos resíduos de quartzito. Em seguida, efetua-se estudos da durabilidade ao envelhecimento natural e ao

envelhecimento acelerado; investigação da ocorrência da reação álcali-agregado (RAA) e da resistência ao ataque por sulfatos das argamassas fabricadas com agregados oriundos dos resíduos de quartzito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rochas ornamentais: quartzito

Nos mais diversos tipos de construções, as rochas ornamentais destacam-se pela durabilidade, resistência mecânica, efeitos estéticos e funcionais, inserindo-se em um importante setor da economia do país (Nogami *et al.*, 2009).

As rochas ornamentais são aquelas que podem ser utilizadas em revestimentos de pisos e de fachadas devido a estética e a facilidade de extração em blocos que apresentam, destacando como principais tipos: granitos; mármores; quartzitos e silexitos (Bezerra, 2009).

Os quartzitos são rochas ornamentais classificadas, de acordo com sua origem geológica, como metamórficas cuja composição mineralógica é constituída, em grande maioria, por minerais de quartzo, apresentando, também, feldspatos, moscovitas e biotitas, dependendo do tipo de quartzito presente na região. O conhecimento da composição mineralógica é importante porque a predominância de um destes minerais determina algumas propriedades destas rochas, como, por exemplo, a interpenetração dos grãos de quartzo confere à rocha uma grande tenacidade (Russo, 2011).

As propriedades físicas destas rochas, por definirem o padrão de qualidade comercial, são importantes porque são elas que conferem as características estéticas ao material. São exemplos destas propriedades: o padrão cromático, a forma e a textura (Costa *et al.*, 2001).

O quartzito é uma rocha fria, por não reter o calor do sol, sua extração ocorre em blocos, apresenta brilho, em geral são brancos, cinza claro, amarelo ou castanho. Porém, podem apresentar outras cores devido a grãos microscópicos dos seus minerais acessórios. Logo, estas propriedades fazem com que sejam utilizadas como rochas ornamentais, gerando valor econômico e social para as regiões onde há ocorrências (Pontes *et al.*, 2005).

Costa *et al.* (2001) afirmam que o quartzito é uma rocha ornamental bastante utilizada como revestimento porque apresenta propriedades refratárias e por ser antiderrapante.

Pontes *et al.* (2005) destacam que os quartzitos são facilmente diferenciados dos arenitos porque, quando estes últimos se partem, a fratura dá-se pelo cimento, ficando os grãos do quartzo salientes, enquanto nos quartzitos a fratura corta toda a massa da rocha. Embora com aspectos semelhantes a alguns calcários, distinguem-se por serem muito mais duros e por não darem efervescência na presença de ácidos.

2.2 Quartzito de Várzea

O município de Várzea/PB (Figura 1) localiza-se na região do Seridó Ocidental, compreendendo uma área de 190km², que faz divisa ao norte com os municípios de Ouro Branco e São José do Sabugi, a leste com Santa Luzia e ao sul com São Mamede (IBGE, 2013).

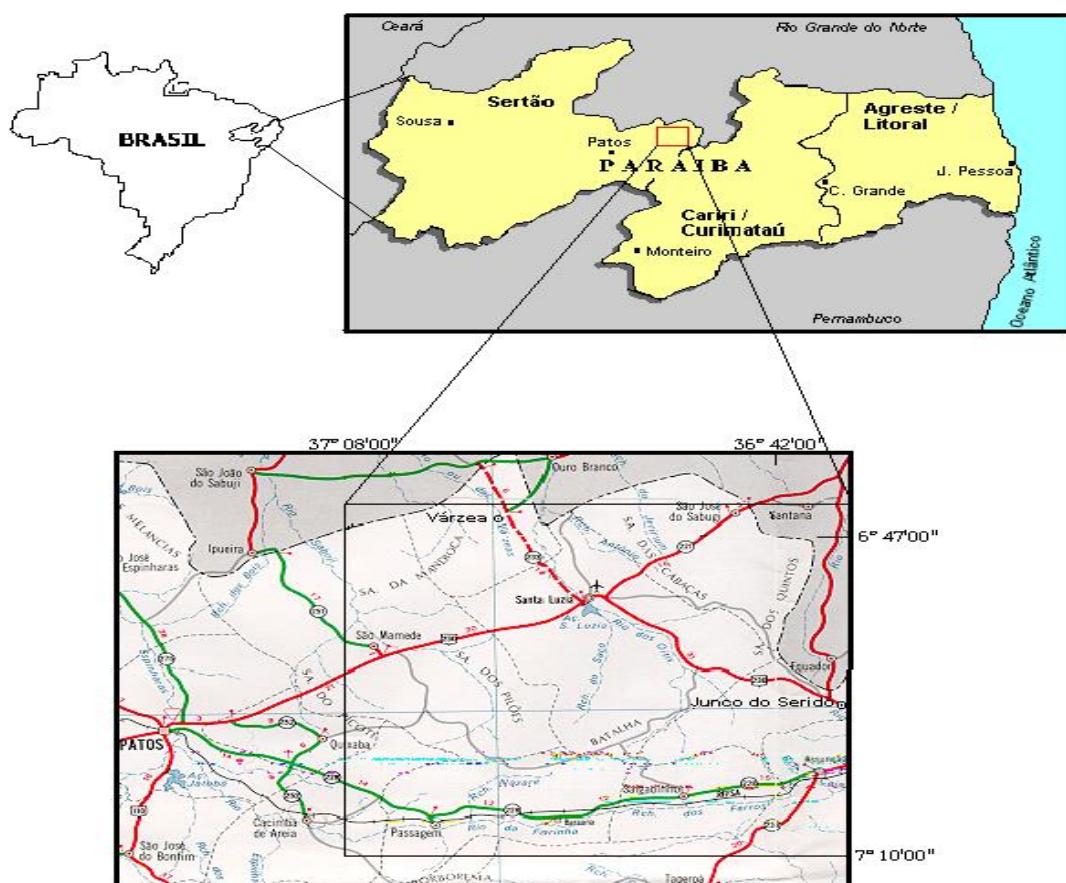


Figura 1 - Localização de Várzea/PB (Vital *et al.*, 2013).

Os quartzitos, embora foliados, são altamente resistentes à ruptura e ao impacto, apresentando grau de dureza em torno de 7 na escala de Mohs. A foliação

que os quartzitos de Várzea apresentam permite a sua extração em blocos, geralmente, feita a céu aberto adotando-se um sistema de desmonte manual.

O quartzito de Várzea é extraído da Serra do Poção, que tem cerca de 25km de extensão e abriga uma das maiores reservas de quartzito do Brasil. Este depósito natural é constituído por rochas pré-cambrianas do Proterozóico Superior, na Formação Equador do Grupo Seridó, onde ocorre um afloramento com uma cobertura de solo residual pequena (espessura média de 0,50m) que apresenta foliação subvertical (em ângulos entre 70^o e 90^o) e uma grande quantidade de fraturas devido a um grande falhamento (Vital *et al.*, 2013).

Os quartzitos de Várzea são constituídos por quartzo com mais de 75% de SiO₂, apresentam coloração branca, rosa, dourada, verde ou preta. Estes quando extraídos em blocos passam pelo beneficiamento visando a confecção de lajotas quadradas ou retangulares para aplicação em revestimento de paredes, calçadas, piscinas e em pisos de construção moderna e rústica (Souza *et al.*, 2011).

A comercialização dos quartzitos só acontece quando eles passam pelo beneficiamento nas serrarias, em ambos processos de extração e beneficiamento há produção de resíduos. Na fase de corte dos blocos de rochas nas dimensões comerciais ocorre a geração do pó de quartzito proveniente da abrasão do disco de corte na rocha (Figura 2 a) e de aparas que são fragmentos de rochas (Figura 2 b) com tamanho e espessura não comercializável (Babisk *et al.*, 2012).



Figura 2 - (a) Pó de quartzito

(b) Aparas de quartzito.

Os resíduos de quartzito finos e as aparas são classificados como resíduo sólido que é todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe ou se está obrigada a proceder, no estado sólido cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, art. 3º, XVI, Lei 12.305/2010).

2.3 Impactos ambientais causados pelas indústrias de rochas ornamentais

A atividade desenvolvida pelas indústrias de rochas ornamentais provoca impactos ambientais tanto pela exploração da área natural local onde ocorre o desenvolvimento desta atividade quanto pela geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos, sendo classificada como uma atividade efetiva ou potencialmente poluidora, conforme as resoluções do CONAMA 001/86 e 237/97.

Silva Neto e Silvestre (2013) afirmam que há três tipos de empresas atuantes na exploração de rochas ornamentais, são elas: as que estão no processo avançado de legalização, cumprindo com suas obrigações; as que buscam se legalizar, mas num processo mais lento; e as que estão à parte desse processo de legalização.

As pedreiras e serrarias ilegais, de acordo com Silva Neto e Silvestre (2013), são as que mais contribuem para ocorrência dos impactos, pois as demais estão em conformidade com as normas instituídas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos que criou instrumentos que estabelecem o aumento da prática de reciclagem e reutilização de resíduos, a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos e os instrumentos de planejamento a níveis nacional, estadual, microrregional, intermunicipal e municipal.

As indústrias de rochas ornamentais atendem as demandas da construção civil, proporcionando uma grande lucratividade para o país, porém gerando danos ao meio ambiente. Da Silva (2011) afirma que estes impactos são causados nas etapas produtivas destas indústrias, e estão resumidos no organograma da Figura 3.

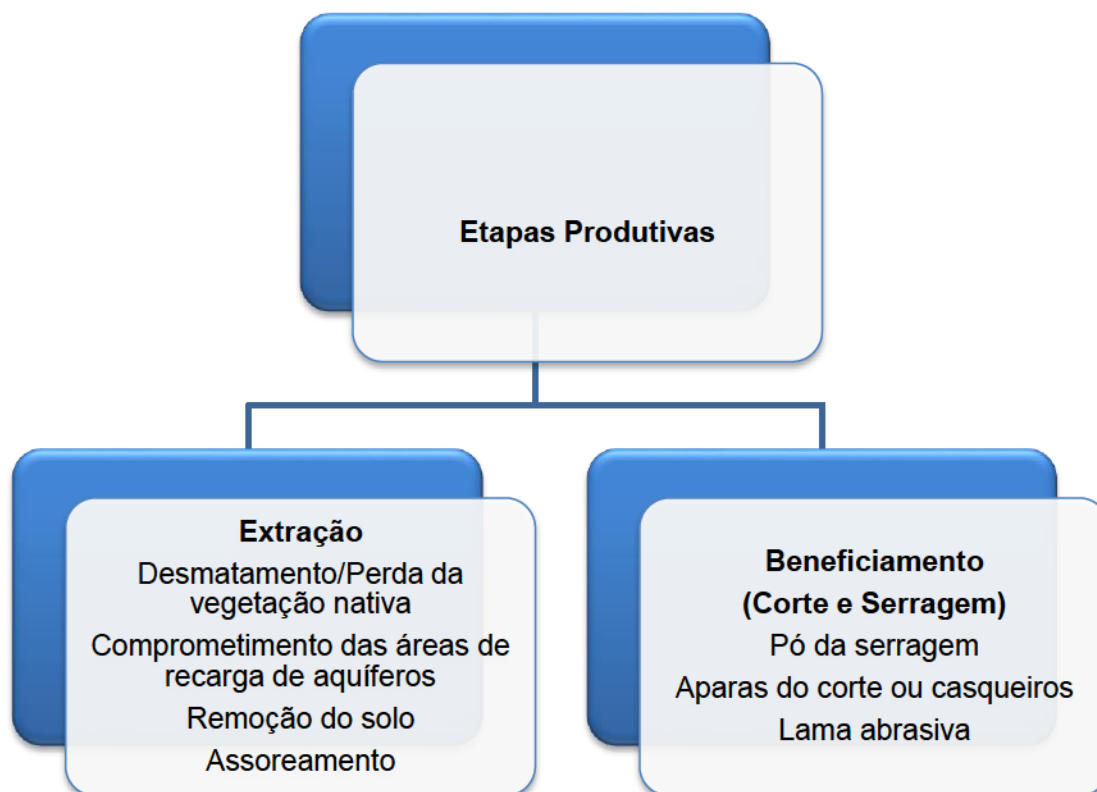


Figura 3 - Etapas produtivas e seus impactos (Adaptado de Da Silva, 2011).

Conhecer a produção residual das indústrias de rochas ornamentais é imprescindível para que se possa minimizar estes impactos e promover a gestão de seus resíduos. Pois, Menezes *et al.* (2002) afirmam que o desenvolvimento sustentável só é alcançado na atividade da indústria da mineração de rochas ornamentais quando esta ocorre de maneira planejada, proporcionando o uso futuro da área após a sua exploração, a fim de promover o equilíbrio com o meio ambiente e as gerações futuras.

Nesta perspectiva, o controle dos impactos ocasionados pelas indústrias de rochas ornamentais é realizado quando se promove a gestão dos resíduos. Logo, pesquisas vem sendo desenvolvidas com o intuito de promover a reciclagem dos resíduos de rochas ornamentais. Pontes (2005) afirma que a introdução de resíduos para a produção de um produto além de ser uma maneira de diminuir a quantidade de resíduos descartados no ambiente pode também prolongar o uso das reservas de matérias primas naturais ao transformar rejeitos em matérias primas úteis para a sociedade.

Uma ferramenta para promover a gestão destes resíduos é a reciclagem, pois visa aproveitar o resíduo e, atualmente, é considerada uma atividade

complementar que pode vir a contribuir para a diversificação dos produtos e redução nos custos finais. Assim, é fundamental a realização de pesquisas visando o aproveitamento desses resíduos como material alternativo em substituição às matérias-primas convencionais (Farias Filho, 2007).

2.3.1 Impactos causados pelas indústrias de quartzito de Várzea/PB

A indústria de extração e beneficiamento de quartzito de Várzea/PB apresenta uma produção mensal de 25 mil metros quadrados de quartzito, tendo em torno de 25 serrarias ativadas.

Os impactos ambientais foram observados sobre o solo de Várzea, refletidos na modificação da paisagem, mediante a remoção indiscriminada da vegetação, a disposição inadequada de um grande volume de resíduos (Figura 4). Além do comprometimento da qualidade paisagística, ocorrem também a alteração da qualidade do ar e das águas (Da Silva, 2011).



Figura 4 - Destinação final dos resíduos de quartzito gerados no município de Várzea/PB no processo de beneficiamento que compromete a qualidade paisagística e ambiental da região.

Observa-se, na Figura 4, que a atividade econômica da mineração que acontece nesta região provoca impactos ao meio ambiente local que compromete o desenvolvimento sustentável da região, em virtude da disposição irregular dos resíduos gerados nos processos de extração e beneficiamento de quartzito. Porém, como esta atividade traz benefícios sociais e econômicos para região, é necessário investigar formas adequadas para promover a gestão destes resíduos, dando um destino que agregue e proporcione o desenvolvimento sustentável desta região.

Uma das aplicações encontradas para os resíduos provenientes do beneficiamento de quartzito de Várzea/PB é a incorporação destes como componente na massa de cerâmica vermelha (Babisk *et al.*, 2012).

Já Russo (2011) verificou o uso de resíduos de quartzito como agregado em argamassas industrializadas, usando o resíduo de quartzito na granulometria de pedrisco submetido ao corte granulométrico de interesse (malha ABNT nº 1,2mm ou nº 2,4mm).

Nesta perspectiva, Farias Filho (2007) afirma que é fundamental a realização de pesquisas visando o aproveitamento desses resíduos como material alternativo em substituição às matérias primas convencionais.

No município de Várzea/PB, ações já vem sendo desenvolvidas para promover a sustentabilidade na extração e beneficiamento do quartzito, iniciadas com a implantação do projeto Tecnologia Avançada para Mineração de Quartzito da Paraíba que ocorre com a parceria estabelecida entre o Centro de Tecnologia Mineral (CTEM) e a usina piloto de argamassa da TECQUIMICA que transformam as aparas de quartzito em agregado para uso na fabricação de argamassa e blocos cerâmicos, assim como fazem uso dos resíduos finos.

Neste contexto, destaca-se a importância de realizar estudos que objetivam avaliar a durabilidade e as propriedades mecânicas das argamassas e blocos cerâmicos produzidos com estes resíduos. Duxson *et al.* (2007) perceberam que o sucesso dos materiais que incorporam resíduos depende da durabilidade por eles apresentados.

2.4 Aplicação dos resíduos de rochas ornamentais na construção civil

Os recursos naturais são fontes de matérias primas para diversos setores econômicos e, dentre eles, a construção civil é o que mais explora estes recursos para atender as suas demandas por materiais. Sendo as rochas ornamentais um

bem natural explorado por este segmento, esta exploração por sua vez causa impactos ambientais que podem ser minimizados pela própria construção civil quando ela investir em pesquisas que possam agregar valor aos resíduos que gera no processo de exploração e beneficiamento das rochas ornamentais.

Uma alternativa sustentável, de acordo com Martínez *et al.* 2013, é a substituição de agregados naturais por agregados reciclados na confecção de argamassas, pois reduz a exploração das pedreiras existentes, conservando assim os recursos naturais, bem como minimiza o impacto ambiental decorrente da disposição inadequada dos resíduos.

Na tentativa de solucionar esta problemática, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de incorporar estes resíduos em materiais alternativos que tenham propriedades mecânicas e durabilidade similares as dos materiais convencionais usados para que estes possam atender as demandas da construção civil e assim conferir uma destinação adequada aos resíduos gerados na exploração e beneficiamento das rochas ornamentais.

Nesta perspectiva, Rezende (2013) avaliou a influência do uso do resíduo de caulim nas propriedades físicas e mecânicas de concretos secos. Já Farias Filho *et al.* (2011) estudou argamassas alternativas incorporadas com resíduos de construção civil e da serragem do granito, obtendo resultados que evidenciaram a ação da formação de silicoaluminatos de cálcio e potássio que proporcionaram aumento na resistência à compressão simples dos produtos.

Outra aplicação dada aos resíduos das rochas ornamentais é o uso na fabricação de blocos pré-moldados para alvenaria de vedação, como substituição parcial do cimento, destacando-se o estudo de Moura e Leite (2011) que comprovou a viabilidade da utilização do resíduo de serragem do granito para este fim.

Santos *et al.* (2011) demonstrou que a substituição do agregado natural por resíduo proveniente da britagem do granito refletiu positivamente na resistência à compressão e flexão da argamassa.

Anjos (2011) avaliou as propriedades físico-mecânicas de resistência à compressão simples e absorção de água em tijolos de solo-cal incorporados com resíduos do beneficiamento de caulim, concluindo que os resíduos de caulim apresentam atividade pozolânica e propriedades adequadas para este uso.

Apesar dos estudos que vêm sendo realizados no desenvolvimento de materiais alternativos com resíduos de rochas ornamentais, ainda há uma lacuna na análise da durabilidade desses materiais.

2.5 Durabilidade de materiais alternativos

A durabilidade dos materiais nos quais são adicionados resíduos é uma propriedade relevante para que estes conquistem o mercado consumidor, pois se faz necessário que tenham suas propriedades técnicas iniciais satisfatórias e estas se mantenham ao longo da sua vida útil. Sendo fundamental, segundo Menezes *et al.* (2002), estudos sistemáticos que agreguem valor econômico e proporcionem o reaproveitamento técnico e ecológico correto dos resíduos gerados pela atividade mineradora.

Durabilidade é a capacidade do material manter suas propriedades durante toda sua vida útil (Mehta; Monteiro, 2008). Logo, neste contexto, pode-se afirmar que quando as propriedades de um material sob dadas condições de uso se deterioram a tal ponto que sua condição de uso passa a ser considerada comprometida e antieconômica afirma-se que este chegou ao fim de sua vida útil, não sendo assim durável.

Mehta e Monteiro (2008) correlacionam resistência e durabilidade, e definem durabilidade como a vida útil de um material sob dadas condições ambientais que pode ser avaliada pela resistência como parâmetro de degradação em resposta as condições ambientais que estão agindo sobre os materiais. Nesta perspectiva, julga-se necessário que no estudo da durabilidade de materiais sejam eles convencionais ou alternativos investigar a resistência deles à reação álcali-agregado e ao ataque por sulfatos.

Nesse sentido, pesquisas que buscam avaliar a durabilidade dos materiais alternativos vêm ocorrendo com o intuito de se chegar a metodologias que possam orientar estudos futuros e se comprovar sua eficácia.

2.5.1 Metodologias para estudo da durabilidade de materiais alternativos

De acordo com Farias Filho *et al.* (2011), não há um método padrão para o desenvolvimento do estudo da durabilidade de materiais alternativos, e sim resultados de pesquisas desenvolvidas que deram certo e citam procedimentos que

podem guiar a realização de novas pesquisas sobre a durabilidade de materiais constituídos com matérias primas alternativas. As metodologias comumente citadas na literatura são: envelhecimento natural e envelhecimento acelerado. O envelhecimento acelerado pode ocorrer por ciclos de molhagem e secagem ou por ciclos de chuva dirigida.

Oliveira (2004) corrobora com a afirmativa feita por Farias Filho *et al.* (2011) sobre as metodologias utilizadas nos estudos da durabilidade de um determinado material ao dizer que a durabilidade dos materiais alternativos é avaliada quando se analisa algumas características físicas como perda de massa, variação de volume ou expansão, ao longo do tempo no qual se submete o material a ciclos de molhagem ou secagem. Estas são determinadas utilizando os seguintes métodos de ensaio: envelhecimento natural e envelhecimento acelerado.

Farias Filho *et al.* (2011) avaliaram a durabilidade de argamassa alternativas contendo resíduos da construção civil e de granito como substituto parcial da cal, utilizando as técnicas do envelhecimento natural e acelerado por ciclos de molhagem e secagem. Enquanto, Rezende (2013) fez uso do método da chuva dirigida no ensaio de envelhecimento acelerado.

Já Duxson *et al.* (2007) acrescentam que a durabilidade de um material alternativo é um fator muito importante na determinação do sucesso deste. Destacam, ainda, que a durabilidade dos materiais alternativos deve ser avaliada também quanto a reação álcali-agregado e ao ataque por sulfatos.

2.5.1.1 Envelhecimento natural

A durabilidade é, de acordo com Farias Filho (2011), a capacidade que o material ou produto possui de manter, em níveis aceitáveis, suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, para o qual foi projetado e construído durante determinado período de tempo mediante exposição as condições climáticas ambientais que agem sobre eles durante sua vida útil.

Severo (2014) adotou a metodologia do envelhecimento natural (exposição ao meio ambiente) para avaliar a durabilidade de sistemas geopoliméricos para a composição de blocos, utilizando resíduos das indústrias do beneficiamento do caulim e granito, e verificou que estes materiais apresentaram comportamento satisfatório.

Bezerra (2014) aplicou a metodologia do envelhecimento natural para estudar a durabilidade de corpos cerâmicos ativados alcalinamente e verificou que com o aumento da exposição as condições climáticas ambientais ocorreu uma melhora em suas propriedades mecânicas. Fato que não se observa na literatura para estudos que não envolvem ativação alcalina.

Farias Filho *et al.* (2011) avaliaram a durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos da construção civil e de granito como substituto parcial da cal, utilizando a técnica do envelhecimento natural, e verificaram que o envelhecimento natural comprometeu a durabilidade do material após 60 dias, pois verificou a redução na resistência à compressão simples, e encontraram melhores resultados para os corpos de prova com 30% e 50% de resíduos da construção civil do que aqueles que incorporavam resíduos de rochas ornamentais.

2.5.1.2 Envelhecimento acelerado

Rezende (2013) estudou a durabilidade de concretos alternativos (incorporados com resíduos de caulim) adotando o método do envelhecimento acelerado, desenvolvendo o ensaio da chuva dirigida. Os resultados encontrados mostraram que os concretos incorporados com os resíduos apresentaram maiores valores de perda de massa que os de referência devido à baixa atividade pozolânica dos resíduos.

Brasileiro *et al.* (2000) estudaram a durabilidade de argamassas incorporadas com resíduos da construção civil fazendo uso dos processos de molhagem e secagem, e verificaram que a partir do quinto ciclo de molhagem e secagem se inicia o decréscimo da resistência à compressão simples dos corpos de prova, evidenciando assim o envelhecimento deles.

Souza (2008) utilizou a metodologia do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem para verificar a durabilidade de argamassas contendo resíduo de cinzas de casca de arroz, concluindo que ocorreu um processo de envelhecimento mais evidente nas argamassas incorporadas com cinza de casca de arroz do que as incorporadas com casca de arroz.

Farias Filho *et al.* (2011) fizeram uso da técnica do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem para avaliar a durabilidade de argamassa alternativas contendo resíduos da construção civil e de granito como substituto parcial da cal. Os resultados alcançados por eles evidenciaram a

formação de silicoaluminatos de cálcio e potássio que proporcionaram um aumento no comportamento mecânico, não observaram o comprometimento da durabilidade do material.

Beltrão (2014) implementou a metodologia do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem para analisar a durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos de caulim calcinado como substituto parcial do cimento Portland, concluindo que é viável a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de caulim pozolânico para argamassas e que sob envelhecimento acelerado apresentaram neossilicatos de cálcio e alumínio ou etringita (primária), silicato de cálcio hidratado, portlandita e calcita em todas as composições.

2.5.1.3 Resistência das argamassas as reações álcali-agregado

A durabilidade das argamassas incorporadas com resíduos de rochas ornamentais também pode ser influenciada pela ocorrência das reações álcali-agregado que apresenta caráter fortemente expansivo, levando ao desenvolvimento de tensões internas no material e consequente fissuração, frequentemente acompanhadas do aparecimento de eflorescências e exsudações à superfície (Afshinnia *et al.*, 2015).

Zerbenio *et al.* (2014) destacam que a reação álcali-agregado acontece nas argamassas endurecidas quando alguns constituintes mineralógicos do agregado e hidróxidos alcalinos (hidróxidos de sódio e potássio provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, agentes externos, etc.) desencadeiam reações químicas que são desenvolvidas nos poros da argamassa comprometendo sua qualidade e durabilidade.

A durabilidade de argamassas que apresentam cimento Portland na sua composição é limitada por uma série de fatores, dentre eles, o que mais se destaca é a ocorrência da reação álcali-agregado. Esta é uma reação química que ocorre entre os íons hidroxilas (OH^-), íons alcalinos (Na^+ e K^+) e alguns minerais reativos presentes no agregado, sendo os álcalis fornecidos principalmente pelo cimento Portland, mas podendo ter sua origem na água de amassamento, pozolanas, agentes externos, entre outros.

Garcia-Lodeiro *et al.* (2006) definem a reação álcali-agregado como um processo químico envolvendo óxidos alcalinos, em geral, decorrentes dos álcalis do

cimento e de certas formas de sílica reativa presentes nos agregados, encontrando-se entre uma das patologias que comprometem a durabilidade das argamassas daí a necessidade de se verificar a tendência do agregado alternativo a ser utilizado na sua constituição ser reativo ou não.

A reação álcali-agregado pode ocorrer de três formas distintas: reações álcalis-sílica, reações álcalis-silicato e reações álcalis-carbonato. A reação álcali-sílica envolve a presença de sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais e artificiais; a reação álcali-silicato apresenta mesma natureza da álcali-sílica porém, o processo ocorre mais lentamente, envolvendo alguns silicatos presentes nos feldspatos, folhelhos, argilosos, certas rochas sedimentares, metamórficas e magmáticas, fundamentalmente, a presença do quartzo deformado (tensionado) e minerais expansivos; e a reação álcali-carbonato acontece entre certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas presentes nos poros do concreto (Ribeiro *et al.*, 2012).

Metha e Monteiro (2008) afirmam que a reação álcali-agregado gera como produto um gel higroscópico expansivo que é o responsável por desencadear microfissuras nos concretos e nas argamassas, provocando a perda de elasticidade, resistência mecânica e durabilidade. Daí a importância de determinar a reatividade dos agregados oriundos dos resíduos de quartzito quanto a reação álcali-agregado ao desenvolver estudos de durabilidade de matérias primas alternativas.

Pesquisas com objetivo de verificar o desempenho de argamassas que incorporam resíduos de rochas ornamentais como matérias primas alternativas vem sendo realizadas com destaque (Ramos *et al.*, 2013; Martinez *et al.*, 2013), entretanto, esses estudos não citam o comportamento desses resíduos em relação a reação álcali-agregado que influenciam a durabilidade das mesmas.

2.5.1.4 Resistência das argamassas ao ataque por sulfatos

Os ataques químicos por sulfatos ocorrem com frequência em meios agressivos (águas e solos sulfatados) afetando a durabilidade dos materiais cimentícios a longo prazo, devido os íons sulfatos reagirem com o aluminato tricálcico do cimento ou com a alumina do agregado formando a etringita (elemento expansivo) que ocasiona perda gradual da resistência e fragmentação da superfície das argamassas comprometendo sua durabilidade, sendo importante conhecer a

reatividade do agregado em relação aos sulfatos ao desenvolver estudos de durabilidade de matérias primas alternativas.

O ataque de sulfatos em argamassas contendo cimento Portland pode ocorrer através de mecanismos físicos ou químicos. Os mecanismos físicos acontecem quando ocorre a cristalização do sulfato na estrutura dos poros das argamassas, desencadeando o aumento da pressão de cristalização dos sais que penetraram nos poros das argamassas e a expansão volumétrica da estrutura que causam fissuras e degradação dessas (Metha e Monteiro, 2008).

Os mecanismos químicos ocorrem pela decomposição de produtos da hidratação do cimento e formação de novos produtos, estes sendo solúveis podem ser lixiviados e se forem insolúveis podem sofrer expansão no local onde se formam (Neville, 1997).

Segundo Metha e Monteiro (2008), o comprometimento da durabilidade das argamassas ocorre por fenômenos físico-químicos, que se encontram intrinsecamente relacionados, tornando-se impossível separar a causa e o efeito.

Hoppe Filho *et al.* (2015) e Ouyang *et al.* (2014) afirmam que a presença de íons sulfato (SO_4^{2-}) provenientes do meio reagem com o hidróxido de cálcio (portlandita), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) presentes no cimento Portland utilizado na argamassa, formando gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado), etringita secundária (AFt) e, também, a taumasita ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) em alguns casos.

A composição do cimento Portland utilizado, a permeabilidade e a absorção capilar de água da argamassa são fatores importantes no processo de degradação dessas por expansão, fissuração, perda de massa e, conseqüentemente, perda de resistência à compressão, comprometendo sua durabilidade (Hoppe Filho *et al.*, 2015).

Neste contexto, é importante analisar a resistência dos agregados das argamassas incorporadas com resíduos de quartzito que contém cimento Portland resistente ao ataque por sulfatos, pois os íons de sulfato presentes no meio levam a deterioração causando reações expansivas, fissurações quando reagem com o aluminato tricálcico do cimento hidratado ou com a alumina do agregado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais convencionais utilizados nesse trabalho de pesquisa foram: Cimento Portland e Cal hidratada (Carbomil®). Essa cal foi usada por apresentar elevado teor de pureza e ter na sua composição química 87% portlandita (Ca(OH)_2), 11% calcita (CaCO_3) e 2% de água livre e dióxido de carbono.

Vale ressaltar que três tipos de cimento Portland foram utilizados devido o CP II F 32, escolhido a princípio para o desenvolvimento de todos os ensaios realizados nessa pesquisa, ter deixado de ser comercializado em sacos de 50Kg pela Cimpor. Logo, foi necessário repetir todo o planejamento experimental com outro tipo de cimento.

O cimento Portland CP IV 32 RS (Nassau®, Sociedade Brasileira de Cimento Portland) foi escolhido para o estudo do envelhecimento natural, envelhecimento acelerado e durabilidade a reação álcali agregado por ser resistente a sulfato, ter teor de pozolana 22,5% (determinado por dissolução seletiva - método Voinovitch), equivalente alcalino 1,35% e apresentar composição química descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do cimento Portland CP IV 32 RS.

Material	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	OO ^a (%)	PF ^b (%)	C ₃ A ^c (%)
Cimento	45,1	28,2	2,2	8,1	3,1	5,4	2,1	0,3	1,3	0,2	4,0	16,21

^a OO: Outros óxidos; ^b PF: Perda ao Fogo; ^c %C₃A = 2,650(%Al₂O₃) – 1,692(%Fe₂O₃).

Para determinação da atividade pozolânica, atendendo as especificações da ABNT NBR 5752 (2014), utilizou-se o cimento Portland CP II F 32 (Cimpor®, Sociedade Brasileira de Cimento Portland). Não sendo utilizado nos demais ensaios em função do fato mencionado no início desse capítulo. Este cimento apresentou equivalente alcalino 0,63% e composição química descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do cimento Portland CP II F 32.

Material	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	OO ^a (%)	PF ^b (%)	C ₃ A ^c (%)
Cimento	60,07	18,0	5,79	4,6	2,04	2,75	0,8	0,0	0,0	0,0	5,2	8,74

^a OO: Outros óxidos; ^b PF: Perda ao Fogo; ^c %C₃A = 2,650(%Al₂O₃) – 1,692(%Fe₂O₃).

Já para o estudo da durabilidade ao ataque por sulfatos, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI MAX (Nacional, Sociedade Brasileira de Cimento Portland) por não conter adição de pozolana na sua composição química (Tabela 3).

Tabela 3 - Composição química cimento Portland CP V ARI MAX.

Material	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	OO ^a (%)	PF ^b (%)	C ₃ A ^c (%)
Cimento	61,35	19,1	1,33	5,33	4,1	4,87	1,04	0,5	0,0	0,0	2,2	7,18

^a OO: Outros óxidos; ^b PF: Perda ao Fogo; ^c %C₃A = 2,650(%Al₂O₃) – 1,692(%Fe₂O₃).

Os materiais alternativos utilizados foram os resíduos do beneficiamento do quartzito cedidos pela Empresa Tecquímica do Brasil, localizada no município de Várzea/PB. Estes foram utilizados em substituição total ao agregado natural e receberam a denominação: QS (areia de quartzito) e QP (pó de quartzito).

3.2 Metodologia

3.2.1 Preparação das amostras

A areia de quartzito foi oriunda da moagem, britagem e classificação em peneiras abaixo da peneira da ABNT de malha n^o 4 (4,8mm) das aparas de quartzito, que resultam do corte das placas de quartzito. Processos esses realizados pela Empresa Tecquímica do Brasil que já cedeu o QS na granulometria utilizada.

O pó de quartzito foi proveniente da serragem das placas de quartzito, após coleta passou pelo moinho de bolas e pela peneira da ABNT de malha n^o 200 no Laboratório de Tecnologia dos Materiais (LTM) da UAEMA da UFCG, para ser utilizado como material de preenchimento na proporção de 15%.

3.2.2 Métodos

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa consiste nas etapas descritas na Figura 5, conforme atividades desenvolvidas e ensaios realizados.

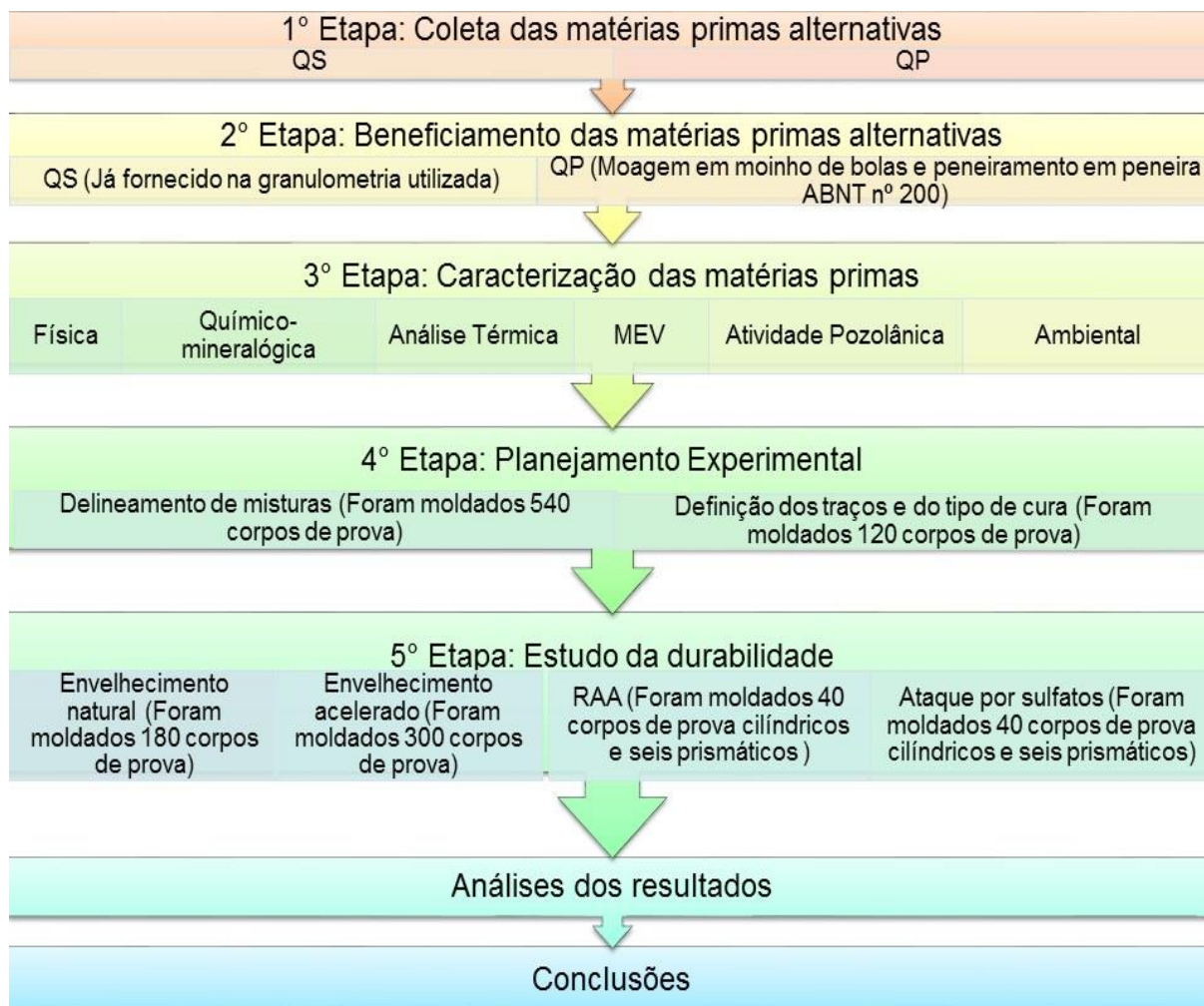


Figura 5 - Fluxograma com as etapas do trabalho.

3.2.2.1 Ensaios de Caracterização

3.2.2.1.1 Caracterização física, química e mineralógica

A caracterização física das amostras estudadas foi realizada com a determinação dos seguintes parâmetros: massa específica real, área específica pelo método de Blaine, granulometria por peneiramento e granulometria por difração a laser. A determinação da massa específica real das amostras foi realizada segundo o método da ABNT NBR 6474 (1998).

A análise granulométrica ocorreu por peneiramento para o QS e por difração a laser para o QP. O peneiramento ocorreu utilizando a série normal de peneiras, seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2001). Enquanto, a difração a laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associada com um processo de medida óptica. Neste método é combinado a relação proporcional entre a difração do laser, a concentração e tamanho de partículas.

Para realização desse ensaio as amostras foram beneficiadas em peneira ABNT nº 200 (0,074mm), dispersas em 250mL de água destilada em agitador a velocidade de 17000rpm por 10min. Em seguida a dispersão foi colocada em um equipamento Modelo 1064 da CILAS, em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

A composição química dos materiais foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), esta técnica se baseia no princípio da absorção de raios X pelo material que provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Enquanto, a análise química foi realizada através de espectrometria de fluorescência de raios X (EDX), com detector EDS (Shimadzu EDX 720) para obter os óxidos presentes na composição das amostras.

A caracterização mineralógica foi realizada utilizando a difração de raios X (DRX) que consiste em uma análise qualitativa capaz de identificar as fases mineralógicas presentes na amostra. Para esta análise, as amostras são colocadas em porta amostra de alumínio e depois no Difrátômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, corrente de 30mA, modo de escaneamento por passos (fixed time scan), com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6s, com ângulo 2θ percorrido de 5° a 60° .

3.2.2.1.2 Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica

A ATD é uma técnica onde há o aquecimento simultâneo da amostra a ser analisada e uma substância termicamente inerte. Continuamente são medidas as temperaturas da amostra e do material inerte, e a diferença entre as temperaturas dos materiais indicam as reações ocorridas na amostra em consequência do aumento na temperatura. As reações endotérmicas e exotérmicas ocorridas durante o ensaio aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva ATD resultante. O aparelho utilizado para realização do ensaio foi o RB 3020, modelo BP Engenharia,

com taxa de aquecimento de 12,5°C/min, temperatura máxima 1000°C e o padrão utilizado foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

Para a análise termogravimétrica, utilizou-se o aparelho da marca Shimadzu, modelo DTG-60H com taxa de aquecimento de 12,5°C/min, temperatura máxima 1000°C e atmosfera de ar, mede-se periodicamente o peso das amostras que estão sendo ensaiadas e se obtêm a relação entre a variação da massa das amostras em função da temperatura.

3.2.2.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O MEV é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Devido à maneira com que as imagens são criadas, imagens de MEV tem uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra. Os equipamentos utilizados na realização dos ensaios foram: equipamento SEM VEGA 3 da Tescan para o MEV e o equipamento EDS act20 da Oxford para realizar a Espectroscopia de energia dispersiva.

3.2.2.1.4 Atividade pozolânica

O índice de atividade pozolânica (IAP) do resíduo de quartzito fino foi determinado de acordo com as normas ABNT NBR 5751 (2012) e ABNT NBR 5752 (2014).

Na determinação deste índice com a cal, preparou-se conforme a ABNT NBR 5751 (2012) uma argamassa com uma parte de hidróxido de cálcio, nove partes de areia normal brasileira atendendo as prescrições da ABNT NBR 7214 (1982) mais uma quantidade do material que se quer determinar a sua atividade pozolânica (Tabela 4). A quantidade de água da mistura foi determinada para obter uma argamassa com índice de consistência de (225 ± 5) mm, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7215 (1996).

Tabela 4 - Quantidade em massa para moldar três corpos de prova para determinar o IAP com cal.

Material	Massa (g)	Onde
Hidróxido de cálcio	104	δ_{poz} = massa específica do material pozzolânico (NBR NM 23)
Areia normal	234 de cada uma das frações	
Material pozzolânico	$2 \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}}$	δ_{cal} = massa específica da cal hidratada (NBR NM 23)

Fonte: ABNT NBR 5751 (2012)

Já na determinação da atividade pozzolânica com o cimento, preparou-se duas argamassas conforme a ABNT NBR 5752 (2014), sendo uma de referência e a outra que substitui 35% do volume do cimento pelo material que se deseja conhecer o índice de atividade pozzolânica (Tabela 5). Determinando-se a quantidade de água para cada mistura de forma a obter argamassa com índice de consistência de (225 ± 5) mm, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7215 (1996).

Tabela 5 - Quantidade em massa necessária para moldar três corpos de prova para determinar o IAP com cimento.

Material	Massa (g)		Onde
	Argamassa A	Argamassa B	
Cimento Portland	312,0	202,8	δ_{poz} e δ_{cim} são, respectivamente, massas específicas do material pozzolânico e do cimento (NBR 6474/84).
Material Pozzolânico	-----	$109,2 \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cim}}$	
Areia normal	936,0	936,0	
Água	X	Y	X e Y são as quantidades de água necessárias para produzir índices de consistência de (225 ± 5) mm (NBR 7215/97).

Fonte: ABNT NBR 5752 (2014)

3.2.2.1.5 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental dos resíduos de quartzito e das argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito ocorreu de acordo com a execução das análises químicas dos extratos lixiviados e solubilizados por absorção atômica, utilizando As, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn como parâmetros. O equipamento usado na realização dessa análise foi o Espectrofotômetro de Absorção Atômica da PerKinElmer, modelo AAnalyst 200 e com utilização de gás acetileno, por calibração de 1, 5, 10 e 20ppm. Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados de acordo com as seguintes normas: ABNT NBR 10005 (2004a), ABNT NBR 10006 (2004b) e TCLP 1311 (US EPA, 1992).

3.2.2.2 Planejamento experimental

Utilizou-se a técnica do delineamento de misturas para realização do planejamento experimental e determinação das composições das argamassas com resíduos de quartzito que apresentem resistência à compressão simples adequada para uso na construção civil, como argamassas de revestimento.

3.2.2.2.1 Delineamento de misturas

O delineamento de misturas ocorreu com o objetivo de variar a quantidade de resíduos de quartzito (e distribuição do tamanho de partículas), cimento e cal para definir os traços e escolher o melhor tipo de cura que proporcionassem argamassas alternativas com resistência mecânica adequada para aplicação na construção civil, e para o estudo da durabilidade. Utilizou-se o modelo simplex-lattice centróide {3,2} aumentado com pontos interiores, buscando substituir totalmente o agregado convencional (areia natural) por QS e QP. O mesmo foi definido utilizando as seguintes restrições nas formulações: quantidade máxima de cimento de 50%, o montante máximo de cal de 50%, quantidade mínima de QS de 50% e máximo de QP 15%. Estas restrições foram baseadas em dados obtidos a partir da literatura e nas características de processamento das formulações. O delineamento estatístico foi realizado com duas repetições (três lotes independentes), utilizando o software Statistica 7.0, resultando em 21 composições (Tabela 6).

Após a formulação do planejamento experimental (Tabela 6) foi determinado a quantidade de água para cada uma das composições de forma a obter um

espalhamento padrão em todas elas. O espalhamento padrão adotado foi de (260 ± 10) mm determinado por meio do ensaio “flow table” conforme a ABNT NBR 13276 (2005), a fim de garantir adequada trabalhabilidade as argamassas.

Tabela 6 - Composições (em % massa) obtidas no delineamento de misturas para formulação das argamassas com resíduos de quartzito e resistência à compressão simples aos 28d determinadas, após cura úmida e cura imersa.

	Cimento	Cal	QS	QP	Cura úmida (MPa)			Cura imersa (MPa)		
					1	2	3	1	2	3
1	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
2	50	0	50	0	25,96	20,87	22,4	27,48	19,86	22,4
3	0	50	50	0	0,08	0,12	0,05	0,08	0,13	0,05
4	0	0	85	15	0	0	0	0	0	0
5	35	0	50	15	21,4	19,44	17,73	19,08	17,94	20,52
6	0	35	50	15	0,15	0,13	0,7	0,15	0,13	0,7
7	0	0	92	8	0	0	0	0	0	0
8	0	25	75	0	0,09	0,13	0,07	0,09	0,13	0,07
9	0	42,5	50	7,5	0,14	0,21	0,1	0,14	0,21	0,1
10	0	17,5	67,5	15	0,22	0,18	0,2	0,22	0,18	0,2
11	25	0	75	0	14,55	14,25	12,56	13,7	12,23	12,43
12	42,5	0	50	7,5	21,32	18,51	21,5	20,31	19,76	20,33
13	17,5	0	67,5	15	10,01	9,24	10,39	8,7	8,1	10,49
14	25	25	50	0	6,43	4,94	6,51	6,22	5,8	5,6
15	17,5	17,5	50	15	4,55	3,21	4	4,06	3,21	4,02
16	0	21	71	8	0,17	0,16	0,1	0,17	0,16	0,1
17	21	0	71	8	14,38	11,57	11,03	14,62	10,41	10,1
18	16,5	16,5	67	0	4,6	4,22	4,87	4,8	3,82	3,9
19	21	21	50	8	5,1	5,8	5,06	5,04	5,13	5,01
20	11,5	11,5	62	15	3,2	3,1	3,16	3,12	2,55	2,91
21	14	14	64	8	3,58	2,98	2,93	3,42	2,88	2,68

Determinada a quantidade de água para cada uma das composições, preparou-se os corpos de prova em misturador mecânico, sendo moldados 5 corpos de prova de (50×100) mm para cada composição e cada tipo de cura. O valor utilizado no delineamento de mistura corresponde ao valor médio de 5 corpos de

prova (o valor das replicatas também corresponde ao valor médio de 5 corpos de prova). Após conformação, os corpos de prova foram curados por via úmida (cura úmida) e por via imersa (cura imersa). A câmara úmida foi realizada em caixa de isopor contendo areia úmida, onde os corpos de prova foram envoltos por plástico e enterrados na areia úmida por um período de 28 dias. Enquanto, a imersa ocorreu em caixa de isopor com água saturada com 2% de cal onde os corpos de prova foram imersos por um período de 28 dias.

A resistência à compressão simples (RCS) foi determinada após 28 dias em máquina universal de ensaios mecânicos (SHIMADZU AG-IS) com velocidade de carga de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, após obter esses dados, realizou-se a análise no Software Statistica 7.0 para determinar o melhor tipo de cura e os traços para o estudo da durabilidade.

Os corpos de prova de argamassas após curados por 28 dias foram rompidos e depois destorroados para serem submetidos aos ensaios de lixiviação e solubilização conforme as normas ABNT NBR 10.005 (2004a) e ABNT NBR 10.006 (2004b). A análise química dos extratos lixiviados e solubilizados ocorreu utilizando os mesmos parâmetros, metodologia e equipamentos adotados com os resíduos de quartzito puros.

3.2.2.3 Estudo da durabilidade

O estudo da durabilidade foi realizado utilizando as metodologias do envelhecimento natural; envelhecimento acelerado; reação álcali-agregado; ataque por sulfatos. Sendo o envelhecimento acelerado através do ensaio de chuva dirigida.

3.2.2.3.1 Preparação das argamassas

Foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões (50X 100)mm para cada um dos traços definidos no planejamento experimental e para cada uma das metodologias do estudo da durabilidade, em seguida foram curados por período de 24h em câmara úmida com 100% de umidade relativa. Logo depois, desmoldados e colocados no tipo de cura definido no planejamento experimental por 28d. Vale ressaltar que para reação álcali-agregado e ataque por sulfatos foram moldados também corpos de prova prismáticos com as especificações mencionadas a seguir.

3.2.2.3.2 Reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado (RAA) das argamassas incorporadas com resíduos de quartzito foi realizada segundo a norma da ASTM C1260, adaptando as necessidades desse estudo. Utilizou-se o teste da barra de argamassa acelerado com corpos de prova prismáticos com dimensões 25mm x 25mm x 285mm não seguindo a distribuição granulométrica sugerida pela norma da ASTM C1260 porque as barras foram moldadas nos traços definidos no delineamento de misturas. Em seguida curados por período de 24h em câmara úmida com 100% de umidade relativa. Logo depois, desmoldados e colocados em imersão em água a temperatura de $(80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ por mais 24h. Após imersão, efetuou-se a medida do comprimento de cada barra que foi adotada como leitura zero (leitura inicial), e em seguida as barras foram transferidas para solução de NaOH 1N onde foram mantidas a temperatura de $(80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ por um período de 28d.

Ao fim dos 28d, realizou-se a análise microestrutural das seções polidas das barras de argamassa para identificar se ocorreu a formação do gel característico da RAA. As seções para realização do MEV foram obtidas a partir de um corte transversal das barras de argamassas com serra mármore com disco diamantado, para cada traço estudado foi obtida uma seção de 1cm x 1cm sendo bem metalizadas com ouro durante quatro minutos a uma corrente de 10mA em equipamento SANYU electron modelo SC-701. O resultado do EDS foi obtido da média de três pontos distintos de cada amostra.

O estudo da durabilidade das argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito a reação álcali-agregado foi realizado avaliando os resultados obtidos no teste de barra de argamassa acelerado, no MEV das seções polidas das argamassas após a realização desse teste e da degradação das argamassas medida pela RCS dos corpos de prova cilíndricos com dimensões (50X 100)mm imersos em água destilada e em solução de NaOH 1N, sob mesmas condições.

3.2.2.3.3 Ataque por sulfatos

A durabilidade das argamassas incorporadas com resíduos de quartzito ao ataque por sulfatos foi avaliada pela variação dimensional dessas quando imersas em solução de sulfato de sódio, seguindo a metodologia da norma ABNT NBR 13583 (2014), adaptando as necessidades desse estudo. Auxiliada pelas técnicas:

perda da resistência à compressão, difração de raios X, análise termogravimétrica e a derivada primeira da curva termogravimétrica em função da temperatura. Foram moldados seis corpos de prova prismáticos com dimensões 25mm x 25mm x 285mm nos traços definidos no delineamento de misturas, em seguida curados por período de 28d em câmara úmida com 100% de umidade relativa). Após período de cura, foram imersos em água saturada com cal por 48h, depois os corpos de prova foram divididos em duas séries de 3 onde a primeira série foi imersa em solução de sulfato de sódio e a segunda, em água saturada com cal, ambas por 42d. A expansão resultante das argamassas, em porcentagem, foi determinada aos 7, 14, 28 e 42d de imersão.

Como a ABNT NBR 13583 (2014) não especifica um valor limite para expansão aos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio para considerar a argamassa resistente ao ataque por sulfatos, adotou-se o limite de 0,06% estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002) à medida que se trata de uma metodologia apropriada para avaliação de cimento Portland sem adições minerais como o utilizado nessa pesquisa e de um ensaio acelerado como a metodologia proposta pela ABNT NBR 13583 (2014). A degradação das argamassas foi medida pela RCS dos corpos de prova cilíndricos com dimensões (50X 100)mm imersos em água destilada e em solução de sulfato de sódio.

3.2.2.3.4 Envelhecimento natural

O estudo do envelhecimento natural foi realizado com a exposição dos corpos de prova às condições climáticas ambientais do município de Campina Grande/PB (sol e chuva) por 28, 60, 120, 180 e 360 dias. Durante período de exposição dos corpos de prova (outubro de 2015 a outubro de 2016) às condições ambientais, de acordo com os dados do INMET (2017), foram: temperatura média mensal máxima 31,51°C e a precipitação mínima de 3mm (mês de novembro de 2015); temperatura média mensal mínima 17,92°C (mês de agosto de 2016); precipitação máxima de 127,5mm (mês de janeiro de 2016); umidade relativa do ar variou de 71,37% a 83,29% e a velocidade média do vento foi 3,6m/s. Após cada idade de exposição foi determinada a RCS, de acordo com a ABNT NBR 7215 (1997), dos traços incorporados com os resíduos de quartzito e comparados com os resultados obtidos para os respectivos traços convencionais que foram submetidos às mesmas condições de ensaio.

Utilizou-se neste estudo, como ensaios complementares para análise da durabilidade, a difração de raios X (DRX), a análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG). Estes ensaios ocorreram com finalidade de avaliar as perdas de massa correspondentes às transformações mineralógicas, bem como as alterações na microestrutura após cada idade de exposição. A preparação das amostras para realização desses ensaios de caracterização ocorreu destorroando os corpos de prova rompidos, depois foram passados na peneira ABNT nº 200 (0,074mm) e acondicionados em recipientes fechados até a data de cada ensaio.

3.2.2.3.5 Envelhecimento acelerado

O envelhecimento acelerado foi realizado por ciclos de molhagem e secagem utilizando o ensaio de chuva dirigida, onde cada ciclo teve a duração de 24h e estes foram realizados para os corpos de prova curados por 60 e 90 dias. A definição de ciclo adotada nesta pesquisa foi adaptada da utilizada por Farias Filho (2007) e Oliveira (2004).

A Figura 6 ilustra as etapas que constituem o conceito de ciclo usado neste estudo.



Figura 6 - Ciclo de molhagem e secagem através do ensaio da chuva dirigida.

O ciclo se inicia com a exposição dos corpos de prova a simulação de chuva por 3h, logo após são retirados do simulador de chuva, colocados ao ar por meia hora e depois pesados (P_i) e colocados na estufa à $(60^\circ \pm 5^\circ)\text{C}$ durante 20h para perda da umidade. Após saírem da estufa, passa meia hora expostos ao ar para novamente serem pesados (P_f), e assim se finalizar o ciclo (Figura 6).

Após o primeiro e vigésimo ciclo foram determinados os valores da resistência à compressão simples dos traços das argamassas adicionadas com resíduos de quartzito, depois de rompidos os corpos de prova foram destorroados, passados na peneira ABNT nº 200 (0,074mm) e acondicionados em recipientes fechados até a data dos ensaios: ATD, TG e DRX. Essa metodologia foi repetida para os traços convencionais que serviram de parâmetro de comparação, uma vez que ainda não há uma regulamentação específica para determinar o comportamento das argamassas incorporadas com resíduos quanto ao estudo de sua durabilidade.

3.2.2.4 Determinação da resistência à compressão simples das argamassas

A resistência à compressão simples foi determinada com velocidade de carga de $(0,25 \pm 0,05)\text{MPa/s}$, de acordo com a ABNT NBR 7215 (1997), usou-se cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões (50X100)mm para cada um dos traços definidos no delineamento de misturas. Os ensaios de RCS foram realizados em Máquina Universal, marca SHIMADZU AG-IS 100KN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização

4.1.1 Caracterização física, química e mineralógica

As propriedades físicas do QS e do QP utilizados neste trabalho pesquisa são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas dos resíduos de quartzito.

Ensaio		QS	QP	Limites
Massa específica real (g/cm ³)		2,67	2,77	-
Massa unitária ou aparente (g/cm ³)		1,33	1,79	-
Teor de materiais pulverulentos (%)		1,06	-	-
Superfície específica (Blaine) (cm ² /g)		-	5189,38	≥2600
Granulometria	Diâmetro máximo (mm)	2,4	-	-
	Módulo de finura (%)	2,9	-	-

Os resíduos QS e QP foram classificados como agregado normal, quanto aos valores da massa unitária determinados para o QS (1,33 g/cm³) e para o QP (1,79 g/cm³), segundo a norma da ABNT NBR NM 45 (2006), por terem apresentado valores dentro do intervalo $1 \leq \gamma \leq 2$ g/cm³ (Tabela 7). Bauer (1995) afirma que os agregados classificados como normal são os mais utilizados para obtenção de concreto e argamassa.

Em relação ao teor de materiais pulverulentos para o QS, observou-se que o valor encontrado (1,06%) indicou baixo teor de finos. Logo, não prejudicou a quantidade de água que foi utilizada para obtenção da consistência adequada, pois o aumento da quantidade de água intensificaria a retração e diminuiria a resistência das argamassas.

A distribuição granulométrica do QS e as curvas de classificação das areias quanto sua curva granulométrica (ABNT NBR 7211, 2009) são ilustradas na Figura 7.

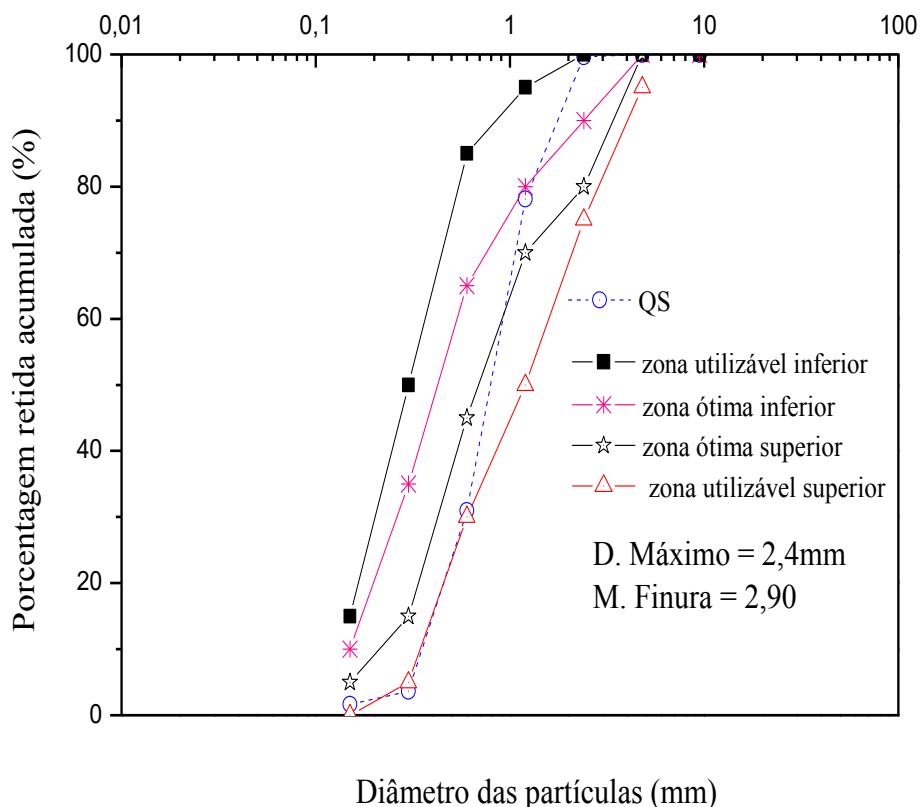


Figura 7 - Distribuição e classificação granulométrica da areia de quartzito.

De acordo com Bauer (1995), a distribuição granulométrica da areia na argamassa influencia a trabalhabilidade e a compacidade da mesma. Verificou-se na Figura 7 que o QS, de acordo com a norma da ABNT NBR 7211 (2009), se encontra na zona utilizável superior e que sua granulometria é contínua, logo pode ser utilizado como agregado para argamassa, pois irá gerar argamassas mais trabalháveis e resistentes.

A distribuição granulométrica do QP é ilustrada na Figura 8.

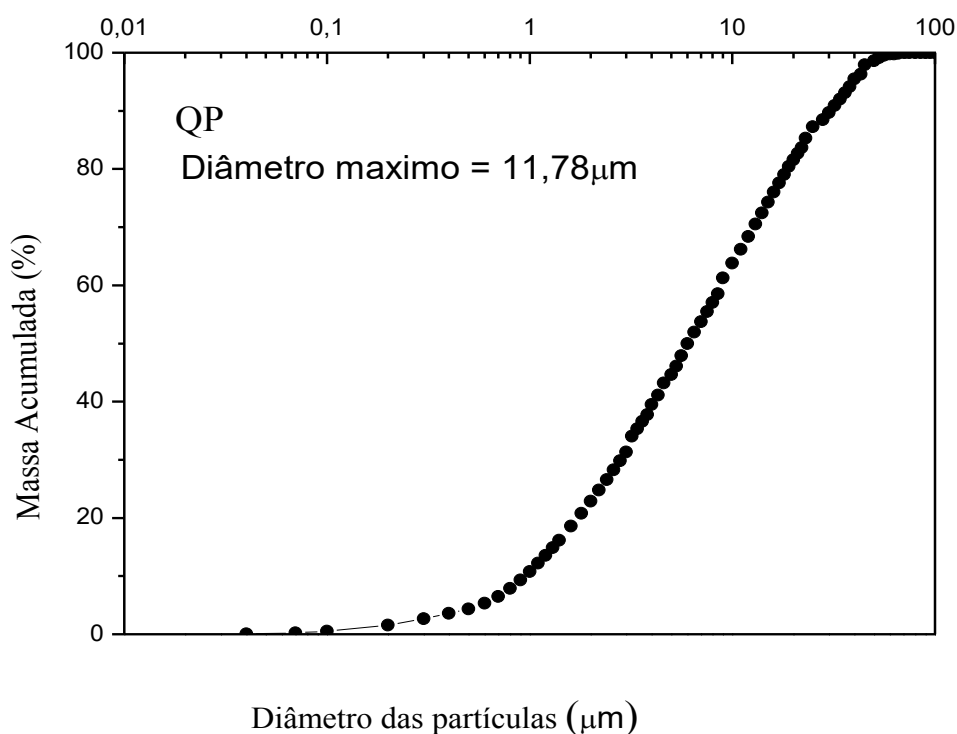


Figura 8 - Curva de distribuição granulométrica do pó de quartzito.

Em relação a curva de distribuição do tamanho de partículas do QP (Figura 8), observou-se uma elevada quantidade de finos, com 90% do volume acumulado abaixo de 30 μ m, 20% menor do que 2 μ m e diâmetro máximo de 11,78 μ m, indicando sua utilização como agregados finos, com características de enchimento. Sendo classificados como filler, de acordo com Bauer (1995), segundo este autor o filler é muito usado na fabricação de concreto e argamassa, logo, pode-se usar o QP em argamassas com o objetivo de preencher os vazios e assim proporcionar uma maior resistência, melhorando o empacotamento do sistema.

Na Tabela 8 estão contidos os valores da composição química do QS e do QP.

Observou-se na Tabela 8 que o QS e o QP apresentaram teores elevados de sílica (67,50% e 77,90%) e de alumina (17,28% e 11,91%). A sílica presente nos resíduos é proveniente da sílica livre, feldspato e mica. Há grande quantidade de potássio nos resíduos (7,22% e 4,83%) que, provavelmente, está relacionado com a mica presente nestes materiais. Os baixos teores de MgO (1,62% e 0,93%) e CaO (1,20% e 0,83%) são oriundos dos carbonatos. Os teores de Fe₂O₃ de 2,20% para o

resíduo QS e de 1,22% para o resíduo QP, são provenientes provavelmente da mica e do baixo teor de fases de ferro cristalizado, tais como hidratos de ferro.

Tabela 8 - Composição química dos resíduos de quartzito.

Componentes químicos (%)	QS	QP
SiO ₂	67,50	77,90
Al ₂ O ₃	17,28	11,91
K ₂ O	7,22	4,83
Fe ₂ O ₃	2,20	1,22
MgO	1,62	0,93
CaO	1,20	0,83
SO ₃	0,36	0,28
BaO	0,21	0,24
Perda ao fogo	2,00	1,61

Estes resultados (Tabela 8) foram confirmados por EDS (Figura 11b e Figura 11d). Valores similares aos encontrados neste trabalho foram detectados na análise química de resíduos finos de quartzito realizada por Carreiro *et al.* (2016).

As Figura 9a e 9b ilustram os resultados das curvas de raios X dos resíduos QS e QP.

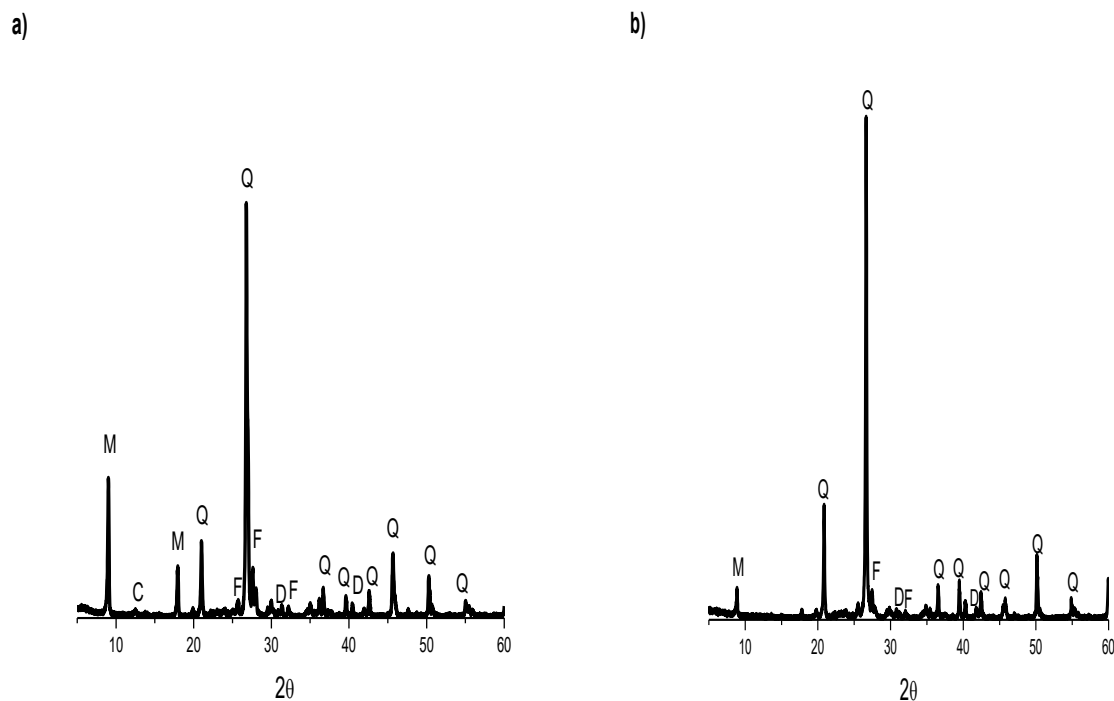


Figura 9 - DRX dos resíduos de quartzito (a) Curva DRX do QS (b) Curva DRX do QP. Onde: M- mica; Q- Quartzo; F- Feldspato e D- Dolomita.

Analisando os resultados nos difratogramas das Figuras 9a e 9b, verificou-se que os resíduos apresentaram as seguintes fases mineralógicas: quartzo (SiO_2 , JCPDS file: 46-1045); caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, JCPDS file: 14-0164); feldspato (KSi_3AlO_3 , JCPDS file:84-0710), mica ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, JCPDS file:83-1808) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, JCPDS file: 36-046). Estes resultados se assemelharam aos encontrados por Menezes *et al.* (2009) e Vijayalakshmi *et al.* (2013) para resíduos de granito.

4.1.2 Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica

Na Figura 10, encontra-se as curvas das análises térmica diferencial e termogravimétrica do QP.

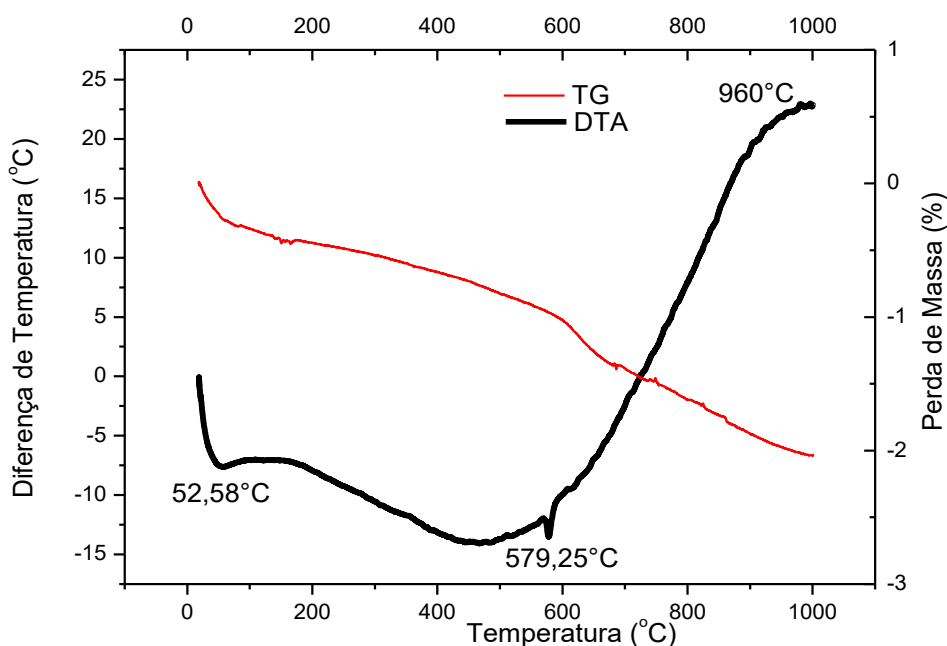


Figura 10 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica do QP.

Analisando as curvas da Figura 10, verificou-se que a amostra apresentou pico endotérmico a 52,58 °C caracterizando a presença de água livre e pico endotérmico de grande intensidade a 579,25 °C correspondente à transformação polimórfica do quartzo α (alfa) em quartzo β (beta) (Souza Santos, 1992). Para análise termogravimétrica tem-se uma perda de massa total de 2,27 correspondendo a perda de água livre.

4.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 11a, 11b, 11c e 11d ilustram a morfologia e a composição química determinada por espectroscopia de energia dispersiva dos resíduos de quartzitos estudados neste trabalho de pesquisa.

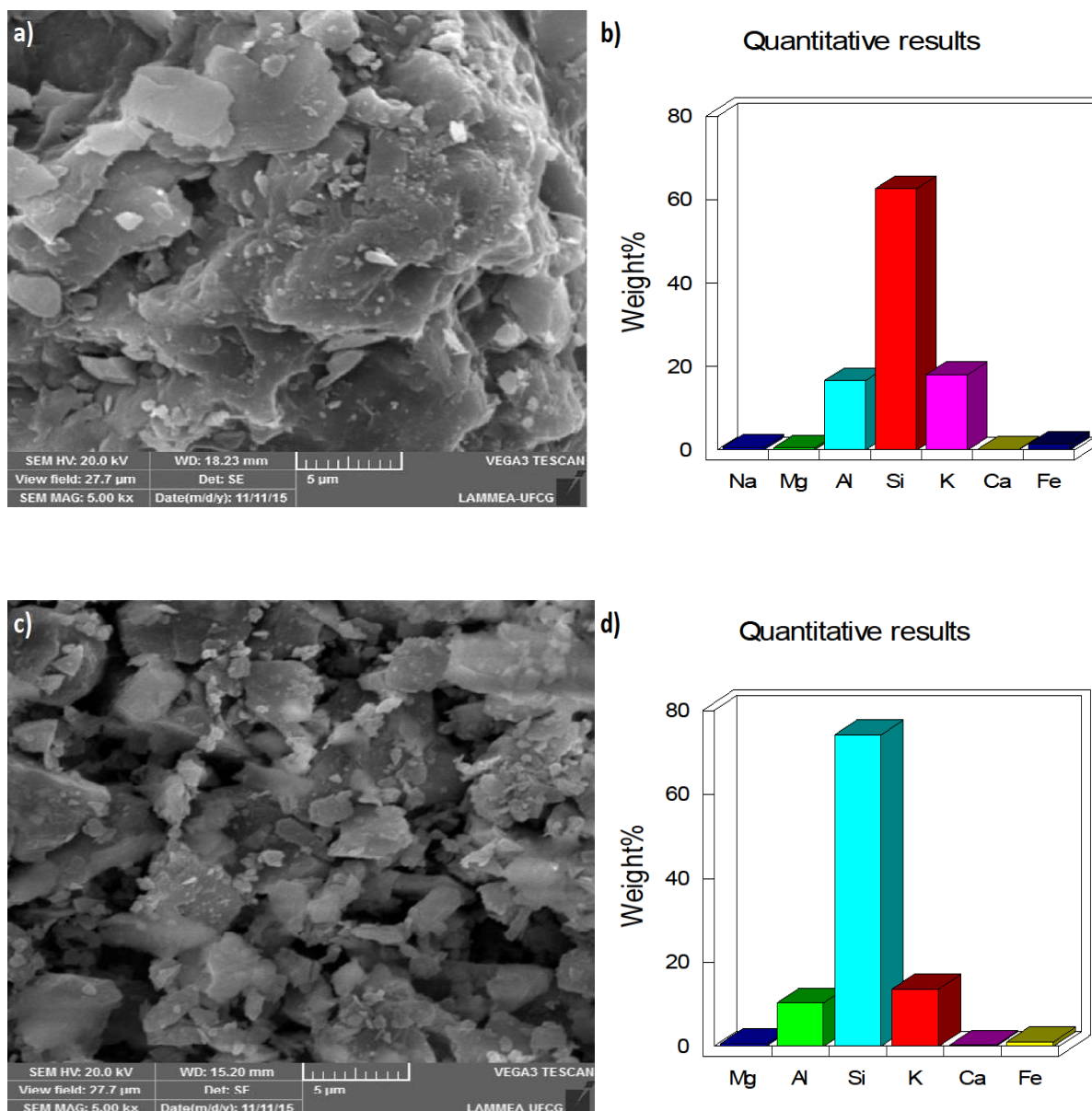


Figura 11 - (a) Micrografia da areia de quartzito (b) EDS da areia de quartzito (c) Micrografia do pó de quartzito (d) EDS do pó de quartzito.

Analisando os resultados das micrografias, observou-se aglomerados de partículas de quartzo com tamanho variando de 0,43 a 6,36 μm no QS e de 0,5 a 6,5 μm no QP. Em relação a composição química determinada por EDS, verificou-se

picos elevados de sílica e alumina, resultado este confirmado na composição química por EDX (Tabela 8) e nos padrões de DRX (Figura 9).

4.1.4 Atividade pozolânica do pó de quartzito

Na determinação deste índice com a cal, a resistência à compressão simples obtida foi de 1,06 MPa aos sete dias, média de três corpos de prova com desvio relativo máximo calculado menor que 6%. Segundo a ABNT NBR 12653 (2014), este valor indica que o pó de quartzito não apresentou atividade pozolânica com a cal. Pois para apresentar atividade pozolânica com a cal teria que ter obtido uma resistência à compressão simples aos sete dias superior ou igual a 6 MPa.

O IAP obtido com o cimento, aos vinte oito dias, em relação à argamassa de referência foi de 53%, confirmando assim que o QP não apresentou atividade pozolânica com o cimento. Uma vez que para apresentar esta atividade, de acordo com a ABNT NBR 12653 (2014), este índice teria que ter dado no mínimo 75%.

Os resultados obtidos para o QP caracterizaram o mesmo como um material que não possui atividade pozolânica, confirmando o que já se esperava, à medida que a composição mineralógica (Figura 9) deste resíduo obtido por meio difração de raios-X (DRX) mostrou que o mesmo é constituído essencialmente por quartzo e sua composição química (Tabela 8) mostrou que o mesmo é composto principalmente por sílica. Porém, a sílica que constitui o quartzo é uma sílica que se apresenta na forma cristalina, logo não é uma sílica reativa. Pois, a atividade pozolânica depende da sílica encontrada na composição química dos materiais, sendo necessário apresentarem sílicas amorfas (com estrutura desordenadas atômicamente) que são reativas para estes possuírem atividade pozolânica.

O QP não apresentou atividade pozolânica, porém suas demais propriedades físicas fazem com que o mesmo seja alvo de investigação na preparação de argamassas já que o mesmo foi classificado como filler e o efeito filler, segundo Bauer (1995), faz com que este agregado atue como material de preenchimento que melhora o empacotamento do sistema levando a um aumento da resistência.

4.1.5 Caracterização ambiental

4.1.5.1 Caracterização ambiental dos resíduos de quartzito

Com base nos valores encontrados para o extrato lixiviado (Tabela 9), o resíduo de quartzito foi classificado ambientalmente como resíduo perigoso, de acordo com a norma ABNT NBR 10004 (2004c).

O QS apresentou os seguintes contaminantes: arsênio (5,96 vezes acima do valor máximo permitido), alumínio (24,2 vezes acima do valor máximo permitido), ferro (5,57 vezes acima do valor máximo permitido) e manganês (3,68 vezes acima do valor máximo permitido). De outro lado, o QP apresentou os seguintes contaminantes: arsênio (7,7 vezes acima do valor máximo permitido), alumínio (198,5 vezes acima do valor máximo permitido), cobre (1,27 vezes acima do valor máximo permitido), ferro (17,8 vezes acima do valor máximo permitido) e manganês (9,68 vezes acima do valor máximo permitido). Para os contaminantes em comum, os teores mais elevados encontram-se no QP.

Tabela 9 - Valores determinados e teores máximos permitidos nos extratos lixiviado e solubilizado da areia de quartzito e do pó de quartzito.

	Valor determinado no extrato lixiviado (mg/L)		Teores máximos permitido ^a	Valor determinado no extrato solubilizado (mg/L)		Teores máximos permitido ^a
	QS	QP		QS	QP	
Al	4,84	39,7	0,20	4,7	0,2	0,2
As	29,8	38,5	5,0	19,8	26,7	0,01
Ba	0,45	1,2	70,00	0,37	0,08	0,7
Cd	0,13	0,01	0,50	0,135	<0,05	0,005
Cr	0,22	0,05	5,0	0,22	0,01	0,05
Cu	0,05	2,54	2,0	0,05	0,02	2,0
Fe	1,67	5,34	0,30	1,67	0,01	0,3
Ni	0,03	1,17	7,0	0,03	<0,01	0,07
Mn	1,47	3,87	0,40	1,46	0,01	0,1
Zn	0,23	0,53	5,0	0,19	0,02	5,0

^a ABNT NBR 10004 (2004c).

Fonte: Adaptado das planilhas obtidas na análise química por absorção atômica dos extratos lixiviados e solubilizados realizada pela Funmineral - Anexo A (2015)

Os resultados (Tabela 9) destacaram a necessidade da reutilização dos resíduos de quartzito, com a imobilização de metais pesados como a mais alta prioridade, em vez de apenas incidindo sobre a quantidade de resíduo adicionado à

argamassa ou a sua resistência mecânica pura. De acordo com Gerven *et al.* (2004), os resíduos sólidos que apresentam metais pesados na sua constituição, quando reutilizados em matrizes de cimento, podem ter a lixiviação destes elementos controlada. O autor reivindica que a carbonatação da portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e / ou do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) da matriz de cimento pela ação de dióxido de carbono, carbonatos, promove mudanças na solubilidade dos componentes e na porosidade da matriz, e redução da lixiviação de metais pesados.

4.1.5.2 Caracterização ambiental das argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito

As argamassas confeccionadas com os resíduos de quartzito nos traços determinados no delineamento de misturas foram denominadas de A, B, C e D, e submetidas a testes de lixiviação, a fim de verificar as suas características de toxicidade (Tabela 10).

Tabela 10 - Valores determinados e valores máximos permitidos nos extratos solubilizados das argamassas confeccionadas com os resíduos de quartzito.

	Valor determinado no extrato lixiviado (mg/L)				Teores máximos permitido ^a (mg/L)	Valor determinado no extrato solubilizado (mg/L)				Teores máximos permitido ^a (mg/L)
	A	B	C	D		A	B	C	D	
Al	<0,10	0,12	0,37	0,48	0,20	0,14	0,16	0,25	0,34	0,2
As	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,0	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Ba	1,12	0,92	1,10	1,30	70,00	0,92	0,94	0,90	0,20	0,7
Cd	0,035	0,030	0,030	0,022	0,50	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,005
Cr	0,15	0,11	0,29	0,21	5,0	<0,01	<0,01	<0,01	0,10	0,05
Cu	0,024	0,016	0,016	0,014	2,0	0,013	<0,01	<0,01	<0,01	2,0
Fe	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,063	0,045	0,040	0,038	0,3
Ni	0,13	0,081	0,067	0,050	7	0,029	0,031	0,012	<0,01	0,07
Mn	0,035	0,029	0,024	0,012	0,40	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Zn	0,030	0,031	0,016	0,015	5,0	0,012	<0,01	<0,01	<0,01	5,0

^a ABNT NBR 10004 (2004c).

Fonte: Adaptado das planilhas obtidas na análise química por absorção atômica dos extratos lixiviados e solubilizados realizada pela Funmineral - Anexo B (2015)

De acordo com as concentrações de metais pesados nos extratos lixiviados e solubilizados das composições A e B (Tabela 10), classificou-se essas argamassas como materiais não perigosos pertencentes a classe II B, não perigosos e inertes. Enquanto, as argamassas C e D foram classificadas como materiais não

perigosos pertencentes a classe II A e são não inertes, podendo o alumínio solubilizar na presença da água.

As composições A e B apresentaram característica de não-perigosos no que diz respeito aos metais analisados, fato este conseguido com o uso da cal nessas formulações. O teor de cal usado permitiu que todos os metais presentes nos resíduos fossem imobilizados (Tabela 10), provavelmente devido ao pH elevado e a disponibilidade de Ca^{2+} para as reações de co-precipitação, relacionada com o processo de imobilização.

A adição da cal pode também reduzir a vulnerabilidade ambiental do sistema. Materiais à base de cimento contém quantidades significativas de água e de elevada estrutura porosa, o que os torna susceptíveis à lixiviação em condições ambientais. Esta vulnerabilidade depende, em grande medida, de fatores tais como a permeabilidade, a composição mineralógica e química, e as condições ambientais (devido à ação de CO_2 , sulfatos, cloreto, etc.). A carbonatação é, provavelmente, o mecanismo de degradação mais comum em sistemas de cimento que contém metais imobilizados, reduzindo o pH (aumentar a resolubilização potencial de espécies de resíduos precipitados) e consumindo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e C-S-H. Além disso, a reação de imobilização, também diminui $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na pasta de cimento e aumenta a vulnerabilidade à carbonatação e corrosão ácida (Chen *et al.*, 2009). Assim, a adição da cal em cimento Portland pode melhorar a resistência à degradação do meio ambiente dos sistemas à base de cimento que contenham metais pesados, e reduzir o comportamento de lixiviação após longos períodos de tempo.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram a eficácia da reciclagem dos resíduos de quartzito em argamassas contendo cimento e cal, devido à imobilização dos metais pesados presentes nos resíduos.

4.1.6 Definição do tipo de cura para o estudo da durabilidade

As principais propriedades estatísticas das regressões obtidas com a análise de variância ao nível de 5% (Tabela 11), utilizando a nomenclatura usualmente relatada na literatura, mostraram que o modelo mais significativo e adotado em função do valor de R^2 , do valor de p (tem que ser inferior ao nível significância) e do valor de F foi o special cubic tanto para cura por via úmida quanto para cura por via imersa.

Tabela 11 - Análise de variância para a significância de modelos de regressão.

RCS	Modelo de regressão	SSR	G.L.	MSR	SSE	G.L.	MSE	F test	p value	R ² (%)
	Linear	3006,92	3	1002,31	341,77	59	5,7928	173,03	0,00000	89,79
CI	Quadratic	251,29	6	41,88	90,48	53	1,7072	24,53	0,00000	97,30
	Special cubic	29,490	2	14,745	60,990	51	1,1959	12,33	0,000043	98,18
	Linear	3101,68	3	1033,89	338,88	59	5,7437	180,00	0,000000	90,15
CU	Quadratic	259,51	6	43,25	79,37	53	1,4976	28,88	0,000000	97,69
	Special cubic	32,64	2	16,32	46,73	51	0,9163	17,82	0,000001	98,64

^a SSR: soma dos quadrados de regressão; G.L.: grau de liberdade; MSR: quadrado médio de regressão; SSE: soma dos quadrados do erro; MSE: erro do quadrado médio ; R²: coeficiente de determinação múltipla.

Assim, determinou-se as equações de regressão (1) e (2) que descreveram o comportamento da resistência à compressão simples aos 28d em função das proporções de cimento; cal; QS e QP para cada condição de cura ao nível de 5% de significância.

$$CU = 28,59. \text{Cimento} - 0,258. \text{Cal} + 0,217. \text{QS} + 16,69. \text{QP} + 164,13. \text{Cimento. Cal} + 34,12. \text{Cimento. QS} + 37,59. \text{Cimento. QP} + 0,48. \text{CalQS} - 11,06. \text{Cal. QP} - 22,74. \text{QS. QP} - 494,77. \text{Cimento. Cal. QS} - 649,68. \text{Cimento. Cal. QP} \quad (1)$$

$$CI = 36,58. \text{Cimento} - 0,298. \text{Cal} + 0,196. \text{QS} + 13,45. \text{QP} + 143,15. \text{Cimento. Cal} + 18,63. \text{Cimento. QS} + 31,95. \text{Cimento. QP} + 0,58. \text{CalQS} - 7,4. \text{Cal. QP} - 18,78. \text{QS. QP} - 458,92. \text{Cimento. Cal. QS} - 628,26. \text{Cimento. Cal. QP} \quad (2)$$

Observou-se nas equações (1) e (2) que os modelos de regressão foram estatisticamente significativos no nível exigido e apresentaram pouca variabilidade (altos coeficientes de determinação múltipla).

O significado dos modelos de regressão também podem ser avaliados comparando o valor do teste F, com o valor F tabulado na distribuição de Fisher-Snedecor. A medida que o teste F determina a significância e a realização das previsões de um modelo. Com base nas Eq (1) e (2) observou-se que a cura por via úmida propiciou valores de resistência mecânica próximos aos obtidos com a cura

por via imersa, no entanto, o valor do F calculado para a Eq (2), cura imersa, apresentou diferença em relação ao da Eq (1), cura úmida.

Segundo Box and Wetz (1973), um modelo estatístico é significativo e preditivo quando o valor do F calculado é no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F tabelado em distribuição Fisher-Snedecor. Assim, analisou-se o valor do teste F obtido e o F tabelado em distribuição Fisher-Snedecor para verificar qual é o modelo, e, conseqüentemente a condição de cura, mais preditivo, uma vez que a condição de cura produz efeitos importantes sobre as propriedades mecânicas como a resistência à compressão simples e causa influência na durabilidade das argamassas (Sajedi *et al.*, 2011).

Obteve-se para cura por via úmida um F calculado de 17,81 e para a cura por via imersa um F calculado de 12,33, logo a condição de cura mais preditiva foi por via úmida, por apresentar um F calculado maior que a cura por via imersa, maior que oito vezes o valor F tabulado. Ademais, a cura por via úmida é mais próxima da condição usual de utilização de argamassas, não sendo observado comercialmente aplicações de argamassas utilizando cura imersa. Assim, com base nessas observações definiu-se utilizar no estudo da durabilidade apenas a condição de cura úmida.

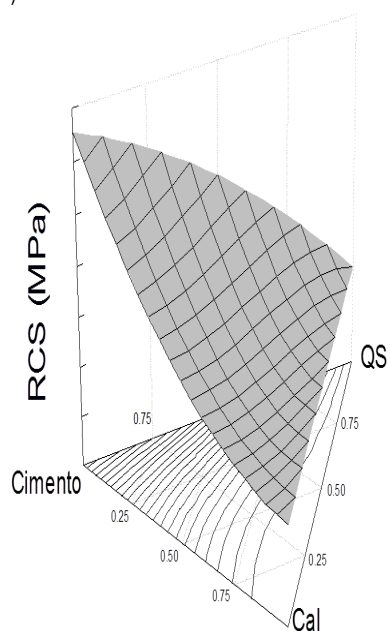
Estes resultados destacaram que o delineamento estatístico de experimentos com mistura pode ser usado com sucesso para otimizar formulações de argamassa contendo grandes quantidades de resíduos de rochas ornamentais, auxiliando no processo de definição do melhor tipo de cura em função do desempenho mecânico das composições.

4.1.7 Definição dos traços para o estudo da durabilidade

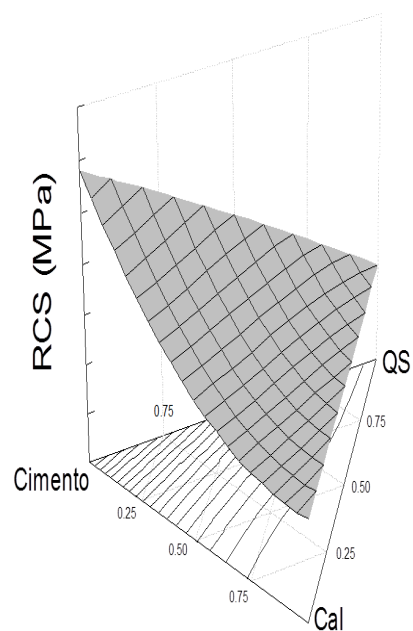
Com o modelo de regressão obtido para a cura por via úmida, Eq (1), foram traçadas superfícies de resposta geradas e definimos nelas uma região cujas composições pudessem ser transformadas em traços usualmente utilizados na construção civil (Figura 12) e que possuíssem resistência à compressão simples aos 28 dias que atendessem as especificações técnicas para a argamassa de revestimento definido pela norma da ABNT NBR 13281 (2005), ou seja, argamassa cuja resistência à compressão simples mínima após 28 dias fosse 2 MPa ou ≥ 8 MPa.

As Figuras 12a e 12b mostram as superfícies de resposta obtidas no delineamento de mistura realizado e suas respectivas projeções para o triângulo de composição para cura úmida para as composições que não incorporam QP e que incorporam 15% de QP.

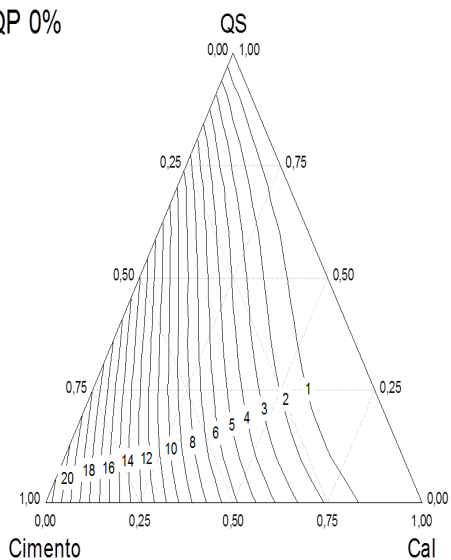
a) QP 0%



b) QP 15%



a) QP 0%



b) QP 15%

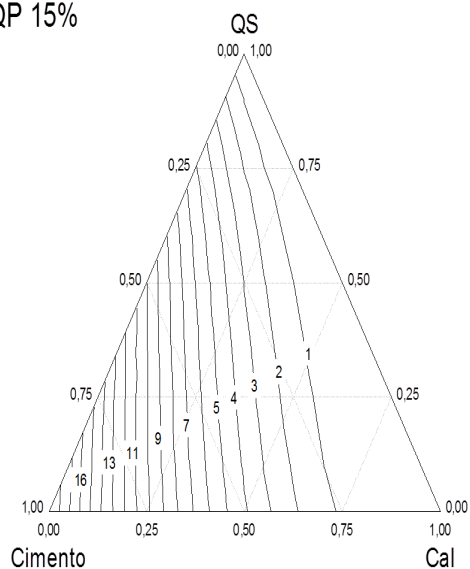


Figura 12 - a) Superfície de resposta e sua projeção no triângulo de composições para misturas com 0% de QP e b) Superfície de resposta e sua projeção no triângulo de composições para misturas com 15% de QP.

Nas projeções no triângulo de composições foi definida a região ótima, onde definiu-se os pontos a serem trabalhados. Esses pontos também foram usados para verificar os modelos estatísticos. Os resultados obtidos para as argamassas A, B, C e D estudadas estão ilustrados na Tabela 12, a resistência à compressão simples após o período de cura úmida de 28 dias obtido através da equação (1) (valores previstos) e determinada experimentalmente (valores medidos). Na Tabela 12, observou-se que os resultados ficaram no intervalo de significância de 5%, ou seja, confirmaram a validação do modelo calculado.

Tabela 12 - Composição das misturas de ponto de verificação, os valores medidos correspondentes, os valores previstos e intervalo de confiança da resistência à compressão simples.

Condição de cura	Composições (%)				Valores previstos (Mpa)	Valores medidos (Mpa)	Intervalo de confiança [-95%;+95%]	
	N	Cimento	Cal	QS				QP
Cura úmida	A	11	7	82	0	4,3	2,3	[2,1;6,5]
	B	11	7	67	15	4,6	3,3	[2,4;6,8]
	C	22	0	78	0	12,4	10,4	[10,1;14,7]
	D	21	0	64	15	11,7	10,8	[9,5;13,9]

Valores de resistência à compressão simples acima de 2MPa foram observados na Tabela 12, de acordo com a norma ABNT NBR 13281 (2005), esses valores permitem o uso das argamassas alternativas na construção civil. Estes resultados foram semelhantes aos da literatura sobre a incorporação de resíduos oriundos da extração e do beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas. Marmol *et al.* (2010), incorporou até 20% de resíduos de granito em argamassa, e alcançou uma resistência à compressão simples mínima de 2 MPa e máxima de 5 MPa após 28 dias de cura, concluindo que o nível ótimo de incorporação dos resíduos de granito seria de 10%. Corinaldesi *et al.* (2010) também alcançaram resultados parecidos ao incorporarem resíduos de mármore em argamassa, substituindo 10% de areia por resíduos de pó de mármore e obtiveram valores de resistência à compressão simples após 28 dias de cura mais elevados que 2MPa, mas utilizando superplastificante na mistura. Na literatura raramente observa-se estudos que substituíram 100% do agregado natural por resíduos. Nos estudos acima mencionados foram observados apenas uma substituição parcial do agregado natural. Enquanto, no presente trabalho, grandes quantidades de resíduos de

quartzito foram incorporados em composições de argamassa substituindo totalmente o agregado natural e se alcançou valores superiores a 2MPa para resistência à compressão simples sem uso de superplastificantes.

Logo, essas composições por terem atendido as especificações definidas pela norma da ABNT NBR 13281 (2005), assim como fazem parte da região ótima de desempenho mecânico (RCS) e por serem transformadas em traços habitualmente usados em argamassas de revestimento foram escolhidas para realização do estudo da durabilidade. Ademais, não se observou alterações significativas na resistência à compressão simples nas composições contendo 15% de QS (note que materiais em pó são difíceis de incorporar em formulações, uma vez que mudam o empacotamento do sistema) fato que contribuiu para o aproveitamento desse material fino.

As composições A, B, C e D quando transformadas em traços correspondem: 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP); 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP) e 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP), respectivamente. Vale ressaltar que foram transformados em traços em massa por unidade do cimento e a quantidade de água para cada traço foi determinada para obter uma consistência padrão de (260 ± 10) mm.

4.1.8 Durabilidade a reação álcali-agregado

A Figura 13 ilustra os valores obtidos na determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado das argamassas adicionadas com resíduos de quartzitos nos traços: 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP) e 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP).

Para as quatro proporções estudadas observou-se na Figura 13 um aumento das expansões ao longo do tempo de exposição a solução de NaOH 1N, o traço 1:3 com 0% e 15% de QP apresentou expansões máximas de 0,07% e 0,08% aos 28 dias, respectivamente. Enquanto o traço 1:1:6 com 0% e 15% de QP apresentou expansões máximas de 0,10% e 0,11% aos 28 dias, respectivamente.

As expansões obtidas para os traços estudados aos 16 dias de exposição a solução de NaOH 1N não foram significativas (Figura 13), pois ficaram abaixo do valor limite de 0,10% sugerido pela norma ASTM C 1260 (2007). O traço 1:3 com incorporação 0% e 15% de QP apresentou expansões de 0,055% e 0,025%,

respectivamente. Para o traço 1:1:6 com 0% e 15% de QP foram de 0,078% e 0,072%, respectivamente. Em função desses valores o QS e QP são considerados resíduos de comportamento inócuo quando se usa o cimento Portland CP IV 32 RS.

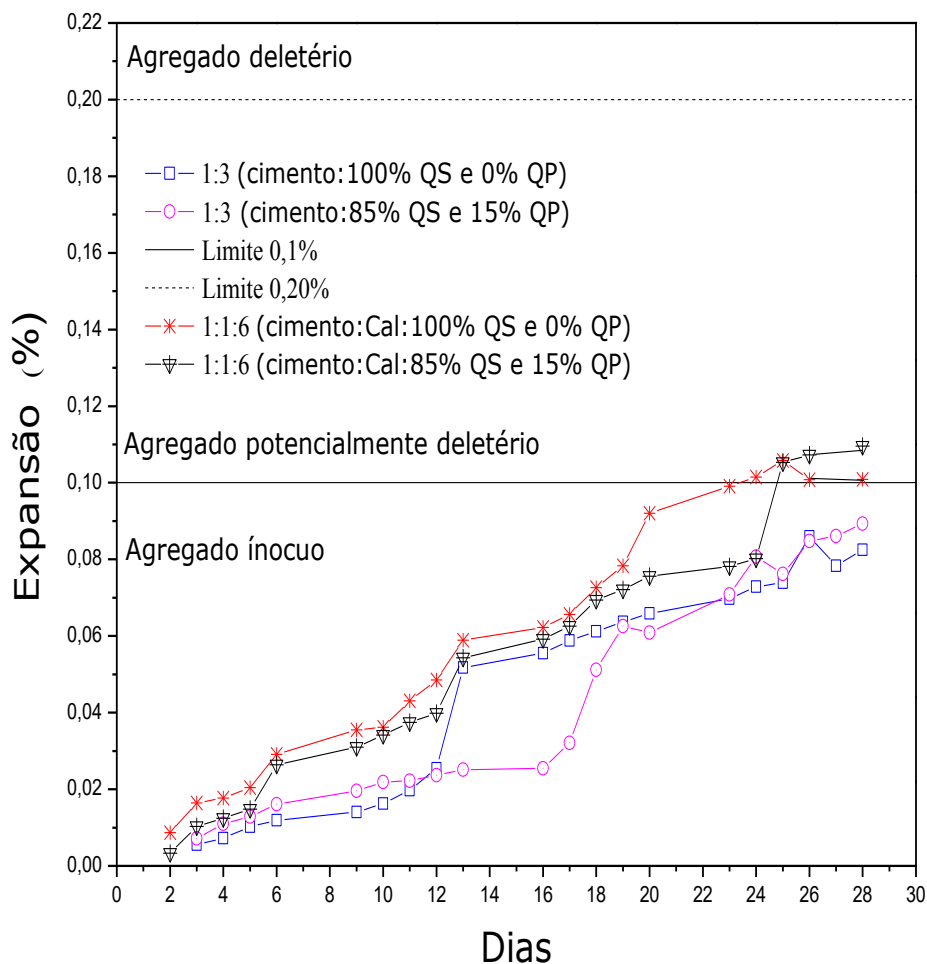


Figura 13 - Expansões dos traços 1:3 e 1:1:6 com 0% e 15% de QP.

O valor do equivalente alcalino para o cimento usado (1,35%) corroborou para alcançar os objetivos dessa pesquisa. Pois, equivalentes acima de 0,6% são suficientes para desencadear reações álcali-agregado acentuadas ao reagir com agregados reativos (Ribeiro *et al.*, 2012), e facilitam a identificação do comportamento do agregado (Penacho *et al.*, 2014).

Nesse sentido, verificou-se que os resíduos de quartzito (QS e QP) são potencialmente inócuos, pois a sílica presente em sua composição química não foi solúvel ao reagir com os álcalis presentes no cimento Portland usado, isto é, a estrutura ordenada da sílica presente no QS e no QP não permitiu que os íons alcalinos (K^+) e hidroxilas (OH^-) presentes na solução intersticial da pasta de cimento produzissem um gel na forma de um silicato alcalino.

A microestrutura das seções polidas das barras de argamassa submetidas ao ensaio de barras de argamassa acelerado com 0% e 15% de QP foi analisada para os traços estudados com o intuito de comprovar a não ocorrência da formação do gel característico da reação álcali-agregado que tem coloração esbranquiçada e se forma nos poros das argamassas.

As Figuras 14a, 14b, 14c e 14d ilustram as imagens das micrografias dos traços estudados com ampliação de 150X.

As imagens da Figura 14 indicaram que não ocorreu a formação do gel característico da reação álcali-agregado nos poros e nem nas fissuras visualizadas, confirmando os resultados obtidos no teste de barra de argamassa acelerado.

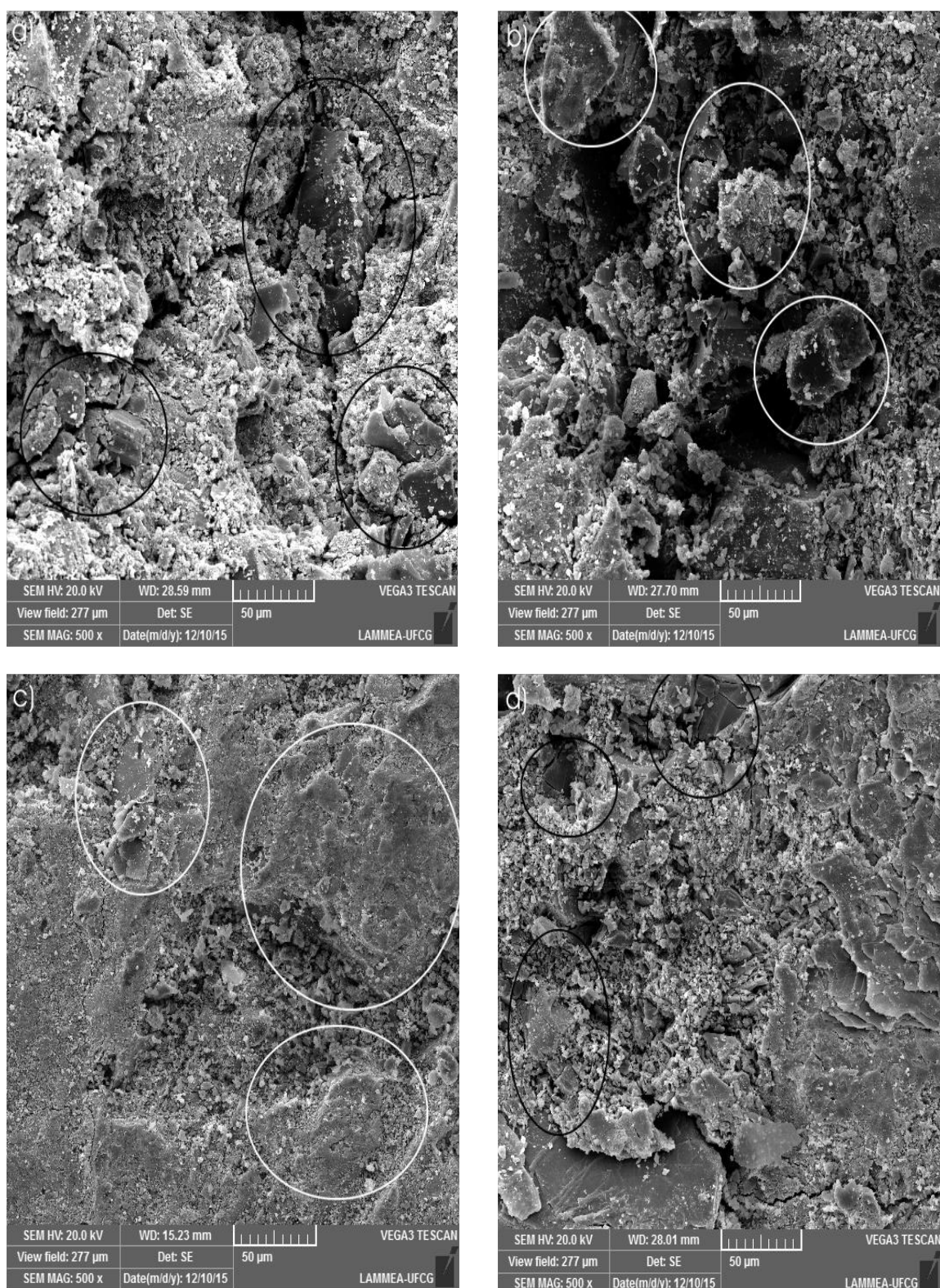


Figura 14 - Micrografia das argamassas após imersão em solução de 1N de NaOH durante 28d: (a)Traço 1:3(Cimento: 100%QS e 0%QP) (b)Traço 1:3(Cimento: 85%QS e 15%QP) (c) 1:1:6(Cimento:Cal:100%QS e 0%QP) (d)Traço 1:1:6(Cimento:Cal:85%QS e 15%QP).

Na Tabela 13 estão contidos os valores da RCS das argamassas após imersão em solução de NaOH 1N e em água destilada à mesma temperatura durante 28d.

Tabela 13 - Resistência à compressão simples das argamassas após 28d de imersão em NaOH 1N e em água destilada.

Traço	RCS após imersão em NaOH 1N (MPa)	Desvio Padrão	RCS após imersão em água destilada (MPa)	Desvio Padrão
1:3(cimento:100%QS e 0%QP)	15,31	±0,38	6,79	±0,42
1:3(cimento:85%QS e 15%QP)	14,22	±0,67	9,75	±0,79
1:1:6(cimento:cal:100%QS e 0%QP)	9,26	±0,28	4,30	±0,30
1:1:6(cimento:cal:85%QS e 15%QP)	12,87	±0,75	7,10	±0,90

Observou-se nos valores da Tabela 13 que os traços com 15% de QP em sua constituição apresentaram maiores valores da RCS, para condição ideal de imersão em água destilada, porque o resíduo na forma de pó funcionou como material de preenchimento e promoveu um melhor empacotamento da mistura, deixando a argamassa mais densa. Estudos com incorporação de resíduos de rochas ornamentais em argamassas foram realizados por autores que obtiveram resultados para resistência à compressão simples aos 28 dias sem a imersão em solução de NaOH 1N semelhantes aos encontrados nesse estudo (Corinaldesi et. al., 2010; Penacho *et al.*, 2014).

Em relação a degradação, verificou-se que os corpos de prova submetidos ao ataque da solução de NaOH 1N apresentaram um aumento significativo no valor da resistência à compressão simples demonstrando que não ocorreu a degradação dos corpos de prova, isto é, eles não foram suscetíveis à agressão confirmando os resultados alcançados no teste de barra de argamassa acelerado realizado com as argamassas incorporadas com resíduos de quartzito.

As argamassas confeccionadas com agregados oriundos dos resíduos de quartzito não sofreram degradação após imersão em solução de NaOH 1N porque apresentaram estabilidade química. Essa estabilidade foi decorrente da composição química dos agregados oriundos dos resíduos de quartzito, pois predominou a sílica cristalina que não permitiu eles reagirem com os álcalis existentes nas misturas.

O agregado de quartzito segundo as especificações técnicas da ASTM C 1260 (2007) ao reagir com cimento com alto teor de álcalis e com os álcalis fornecidos pela solução de NaOH 1N teve comportamento inócua. Logo, o mesmo quando usado com cimento Portland CP IV 32 RS não desencadeia a ocorrência da reação álcali-agregado.

4.1.9 Durabilidade ao ataque por sulfatos

As Figuras 15a e 15b ilustram as curvas das expansões obtidas pelas argamassas incorporadas com resíduos QS e QP quando imersas em solução de sulfato de sódio ao longo dos 42d de imersão.

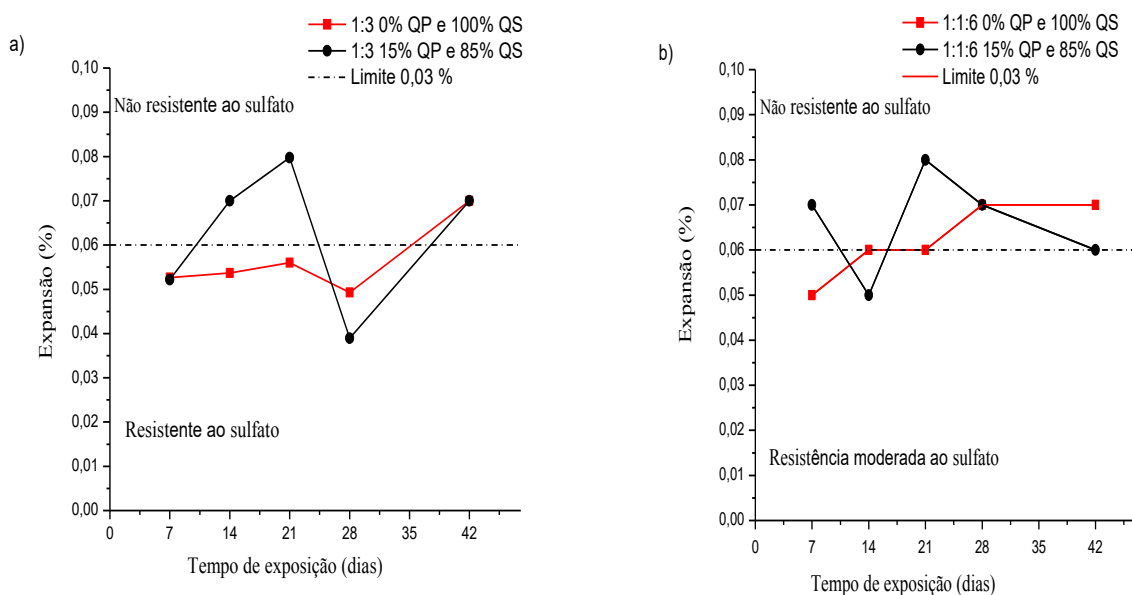


Figura 15 - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio.

Os valores obtidos para as expansões das argamassas de cimento Portland incorporadas com resíduos QS e QP aos 42d de exposição ao ataque por sulfato de sódio foram: 0,07% para o traço 1:3(Cimento: 0% QP e 100% QS), 0,07 % para o traço 1:3(Cimento: 15% QP e 85% QS), 0,07% para o traço 1:1:6 (Cimento: Cal: 0% QP e 100% QS) e 0,06% para o traço 1:1:6 (Cimento: Cal: 15% QP e 85% QS). Logo, esses valores evidenciaram que as argamassas estudadas não são resistentes ao ataque por sulfato de sódio quando o método de avaliação aplicado for a variação dimensional de barras de argamassas imersas em solução de sulfato

de sódio desde que os valores obtidos apresentaram-se acima da expansão estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002).

Na Tabela 14 estão contidos os resultados da resistência à compressão simples das argamassas incorporadas com resíduos de quartzitos após imersão em água destilada e em solução sulfato de sódio por 42d.

Tabela 14 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova após imersão por 42d em solução de sulfato de sódio.

Traço	RCS após imersão em água destilada (MPa)	Desvio padrão	RCS após imersão em solução de sulfato de sódio (MPa)	Desvio padrão
1:3(cimento:100%QS e 0%QP)	12,97	±0,58	13,40	±0,70
1:3(cimento: 85%QS e 15%QP)	12,15	±0,94	12,61	±0,31
1:1:6(cimento:cal:100%QS e 0%QP)	2,00	±0,20	3,33	±0,49
1:1:6(cimento:cal:85%QS e 15%QP)	4,24	±0,64	4,81	±0,42

Os resultados apresentados na Tabela 14 indicaram que não ocorreu perda da RCS quando se compara os valores da RCS obtidos após imersão em água destilada e solução de sulfato de sódio por 42d para as argamassas estudadas. Então, de acordo com o comportamento mecânico apresentado, verificou-se que não ocorreu a degradação dos corpos de prova, apesar de terem apresentado expansões características de argamassas não resistentes ao ataque por sulfatos. Provavelmente, a desagregação não ocorreu devido o cimento apresentar teor de C₃A abaixo de 8% que indica, segundo a ABNT NBR 5737 (1991), que o cimento apresenta um certo grau de resistência ao ataque por sulfatos.

As expansões ocorreram, possivelmente, devido a alumina do agregado reagir com os íons sulfatos formando a etringita. Conforme afirmam Merida *et al.* (2015) quando essa reação acontece pode-se afirmar que os agregados são reativos com os íons sulfato.

Observou-se (Tabela 14), ainda, que os valores da RCS das argamassas de cimento Portland as quais foram adicionados resíduos de QS e QP imersas em solução agressiva de sulfatos apresentaram valores da RCS superiores ao limite

inferior 2MPa estabelecido pela norma ABNT NBR 13 281 (2005) para uso em argamassas de revestimentos.

As Figuras 16a e 16b ilustram os DRX das argamassas nos traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP) e 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP) após imersão em sulfato de sódio por 42d.

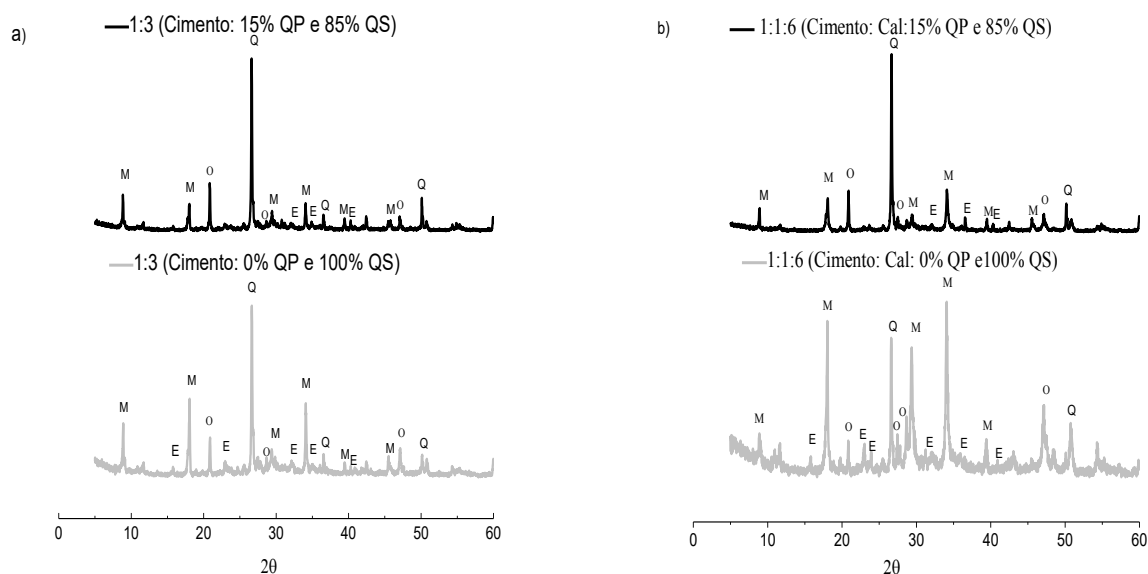


Figura 16 - DRX das argamassas estudadas após 42d de imersão em solução de sulfato de sódio. Onde: E –Etringita; M -Mica; O -Ortoclásio e Q -Quartzo

Verificou-se nos difratogramas as seguintes as seguintes fases: etringita ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, JCPDS file: 720646); quartzo (SiO_2 , JCPDS file: 46-1045); ortoclásio (KSi_3AlO_3 , JCPDS file:84-0710) e mica ($KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$, JCPDS file:83-1808). Observou-se, ainda, que a formação da etringita foi em pequena quantidade, pois os picos foram de baixa intensidade.

Segundo estudos Van Aardt *et al.* (1985) e Brown (1981), as argamassas de cimento Portland que apresentam a formação de etringita e não ocorre fissuração é porque a quantidade formada não excedeu um limiar capaz de gerar tensões sobre os sólidos vizinhos, bem como o processo de formação provavelmente deve ter sido um processo fotoquímico que ocasiona crescimento orientado dos cristais de etringita sólidos no sentido da vizinhança. Em relação às argamassas adicionadas com resíduo QP estudadas neste trabalho, observou-se que as argamassa são mais compactas e com menor quantidade de poros, provalmente, reduziu a quantidade de etringita formada.

As Figuras 17a, 17b, 17c e 17d ilustram as curvas da TG e da DTG da argamassas incorporadas com os resíduos QS e QP após imersão em solução sulfato de sódio por 42d.

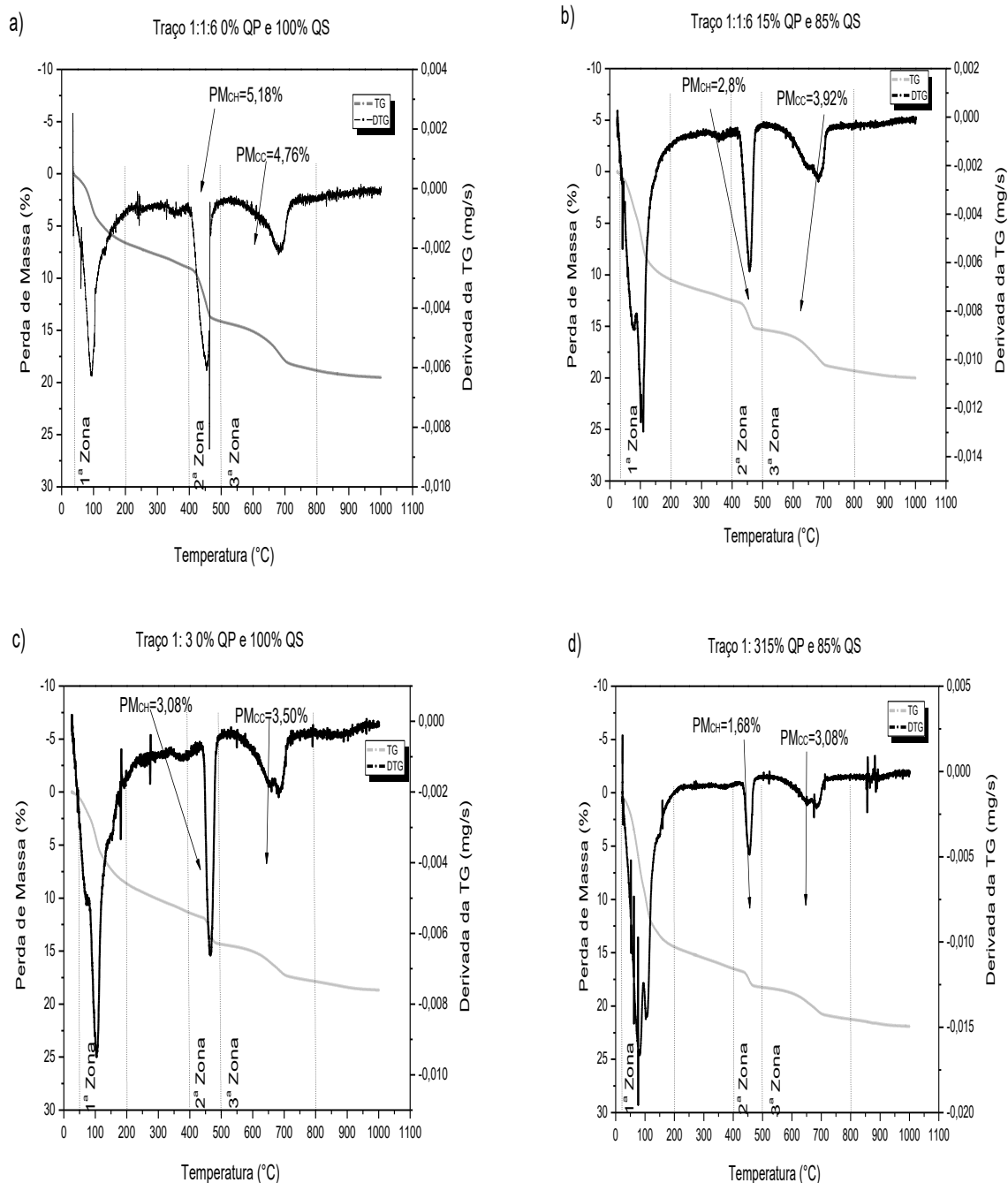


Figura 17 - Curvas TG e DTG das argamassas estudadas após 42d de imersão em solução de sulfato de sódio.

As curvas da Figura 17 demonstraram para todas as argamassas incorporadas com resíduos de quartzito comportamento semelhante, caracterizado por picos endotérmicos distribuídos em três zonas bem definidas de acordo com as faixas de temperatura. A primeira zona compreendeu a faixa entre 25°C e 200°C na qual ocorreu a perda de massa devido a eliminação de água livre e desidratação parcial do C-S-H. A segunda zona abrangeu a faixa entre 200°C e 500°C na qual aconteceu a perda de massa referente as hidroxilas (OH-) que demonstrou a presença de portlandita (hidróxido de cálcio) nas argamassas estudadas e o seu consumo que foi responsável pela formação da etringita e a terceira zona compreendeu a faixa entre 500 °C e 800 °C na qual ocorreu a perda de CO₂, demonstrando que aconteceu a formação da calcita (carbonato de cálcio).

Vale ressaltar que a perda de massa referente ao consumo da portlandita e formação da etringita foi maior nas misturas que não apresentaram na sua constituição QP, isto ocorreu porque as argamassas que apresentaram QP na sua constituição são mais densas à medida que o QP funciona como material de preenchimento melhorando o empacotamento da mistura, diminuindo a porosidade das argamassas que passaram a ter uma menor quantidade de poros para formação da etringita.

4.1.10 Envelhecimento Natural

As Figuras 18a e 18b ilustram a evolução ao longo de 1 ano da resistência à compressão simples das argamassas nos traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP) e 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP).

Verificou-se (Figura 18) que o valor máximo da RCS ocorreu aos 90d, sendo a taxa de aumento da RCS entre 28 e 90dias de envelhecimento na ordem de 1,29% para o traço 1:3 com 0% de QP e de 2,97% para o traço 1:3 com 15 % de QP, de 3,65% para o traço 1:3 de referência, de 10,97% para o traço1:1:6 com 0% de QP, de 10,95% para o traço1:1:6 com 15% de QP e de 13,92% para o traço 1:1:6 de referência.

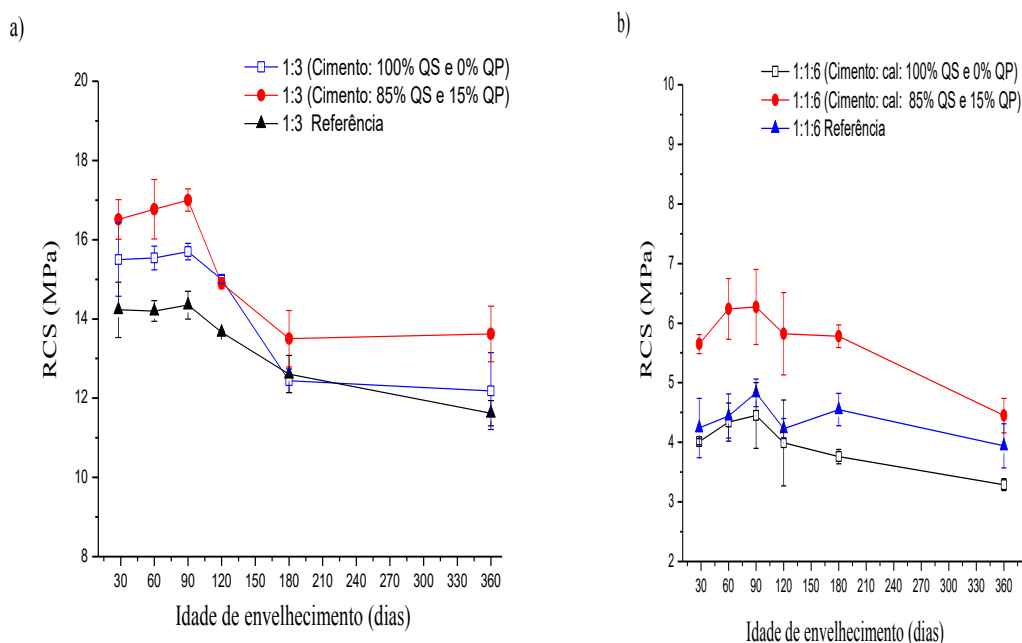


Figura 18 - RCS ao longo de 1 ano de envelhecimento das argamassas estudadas.

Os acréscimos nos valores da RCS ocorridos nas argamassas estudadas podem ser atribuídos as reações pozolânicas desenvolvidas durante o processo de hidratação do cimento e de carbonatação que aconteceram devido o dióxido de carbono do ar reagir com o hidróxido de cálcio presente nas argamassas, pois essas reações contribuem para o refinamento da microestrutura e aumento da resistência mecânica. A carbonatação só prejudica a RCS, de acordo com Mota *et al.* (2016), quando se trata de argamassa armada porque pode atingir a zona das armaduras, fazendo com que o ferro fique em risco imediato de corrosão, e cause aumento de volume, iniciando a degradação desta.

Após 90d de envelhecimento natural o valor da RCS começou a sofrer decréscimos ao longo do tempo (Figura 18), sendo a taxa de decréscimo entre 90 e 360 dias de exposição as condições ambientais de 22,42% para o traço 1:3 com 0% de QP, de 19,88% para o traço 1:3 com 15% de QP, de 21,22% para o traço 1:3 de referência, de 26,1% para o traço 1:1:6 com 0% de QP, de 29% para o traço 1:1:6 com 15% de QP e de 18,43% para o traço 1:1:6 de referência.

Os decréscimos da RCS das argamassas estudadas, provavelmente, aconteceram devido às variações da temperatura e umidade relativa do ar que podem ter provocado a retração térmica, ocasionando desagregação interna dos componentes e conseqüentemente redução no valor da RCS no intervalo entre 90 e

360d de envelhecimento em que os corpos de prova externamente não apresentaram fissuras antes de serem submetidas ao ensaio da determinação da RCS.

Os resultados obtidos para RCS dos corpos de prova submetidos ao envelhecimento natural (Figura 18) indicaram que as argamassas adicionadas com resíduos de quartzito tiveram comportamento da RCS semelhante ao longo do processo de envelhecimento ao das respectivas argamassas de referência. Pontualmente em cada idade de ruptura, notou-se que os valores obtidos para RCS das argamassas alternativas foram mais elevados do que os das respectivas argamassas de referência, com exceção do traço 1:1:6 com 100% QS e 0% QP. Assim como, os traços 1:3 e 1:1:6 com 85% QS e 15% QP obtiveram melhores valores para RCS do que os traços 1:3 e 1:1:6 com 100% QS e 0% QP. Demonstrando que a adição de 15% de QP nas argamassas promoveu um melhor comportamento da RCS em função de melhorar o empacotamento da mistura.

O desempenho da RCS obtido pelas argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito (Figura 18) não comprometeu a substituição da areia natural pela oriunda do resíduo de quartzito porque os valores da RCS destas após os decréscimos ocorridos durante processo de envelhecimento para o traço 1:3 com 0% e 15% de QP e para o traço 1:1:6 com 0% e 15% de QP se encontraram de acordo com os valores sugeridos pela norma da ABNT NBR 13281 (2005) para argamassas de assentamento e revestimento, sendo classificadas como pertencentes as classes P6 e P4, respectivamente.

Os resultados obtidos no DRX aos 28d de cura e 360d de envelhecimento (Figuras 19a, 19b, 19c, 20a, 20b e 20c) corroboraram com os valores da RCS alcançados por esses traços, pois, verificou-se picos característicos de portlandita que demonstraram a ocorrência das reações pozolânicas e de calcita que evidenciaram a ocorrência da carbonatação. Comportamento mineralógico e mecânico semelhantes foram encontrados por Farias Filho et. al. (2011).

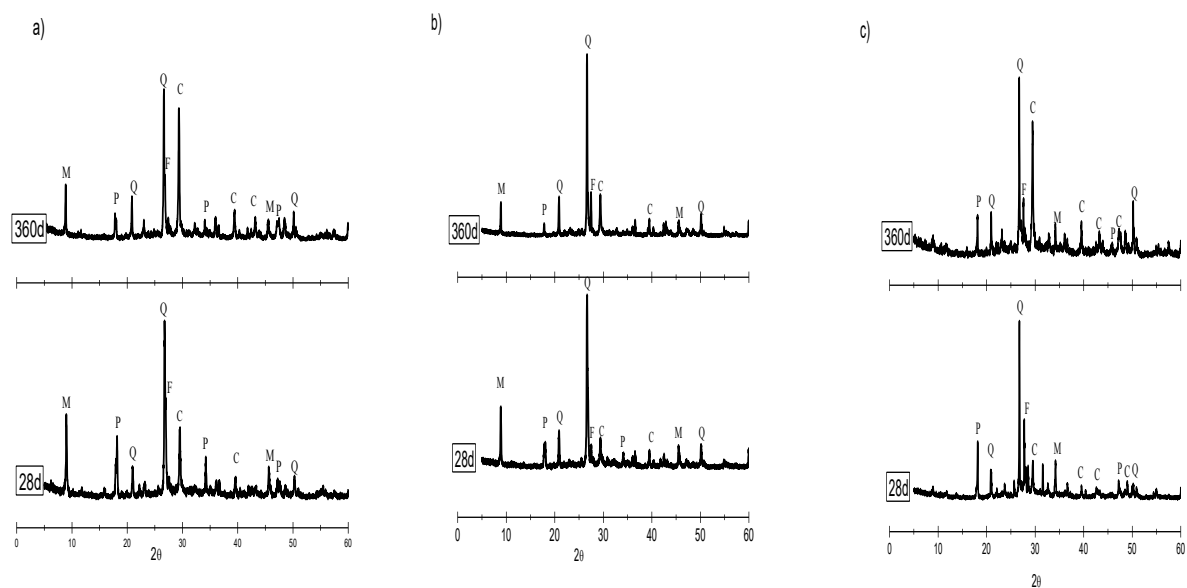


Figura 19 - DRX das argamassas estudadas após 28d de cura e 360d de envelhecimento natural. Onde: C-calcita, F-feldspato, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.

As Figuras 20a, 20b e 20c apresentam os DRX dos corpos de prova após 28d de cura e 360d de envelhecimento para o traço 1:1:6 (cimento: cal: 0% de QP), 1:1:6 (cimento:cal:15% de QP) e 1:1:6 de referência (cimento: cal: areia normal).

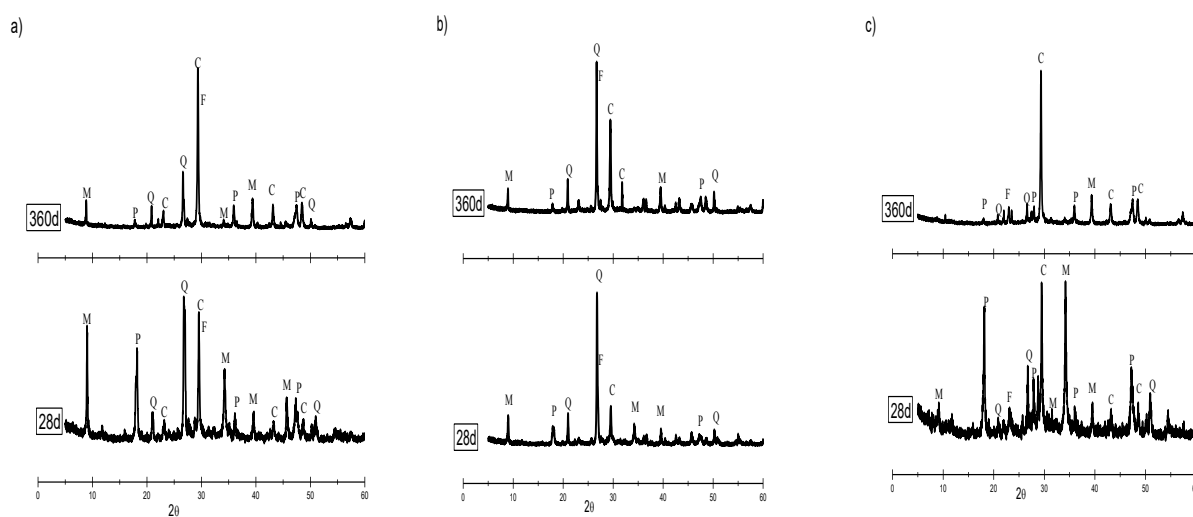


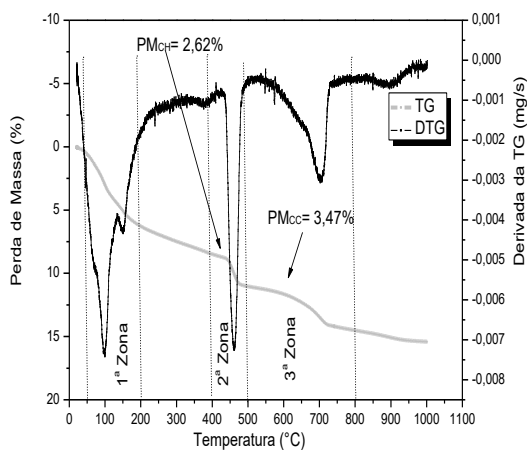
Figura 20 - DRX das argamassas estudadas após 28d de cura e 360d de envelhecimento natural. Onde: C-calcita, F-feldspato, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.

Observou-se as seguintes fases mineralógicas (Figuras 19a, 19b, 19c, 20a, 20b e 20c): calcita (CaCO_3 , JCPDS file: 72-1937,); feldspato ($\text{K}_5\text{Na}_5\text{AlSi}_3\text{O}_8$, JCPDS file:84-0710); quartzo (SiO_2 , JCPDS file: 46-1045); mica ($\text{K}(\text{Mg}_{2.665}\text{LiO}_{.225}\text{NaO}_{.110}\text{Si}_3.312\text{FeO})$, JCPDS file:88-0791) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, JCPDS file: 72-0156). Esses resultados foram similares aos encontrados por Balasubramanian *et al.* (2016) e Mármol *et al.* (2010) em seus estudos sobre resíduos de rochas ornamentais para uso em argamassas.

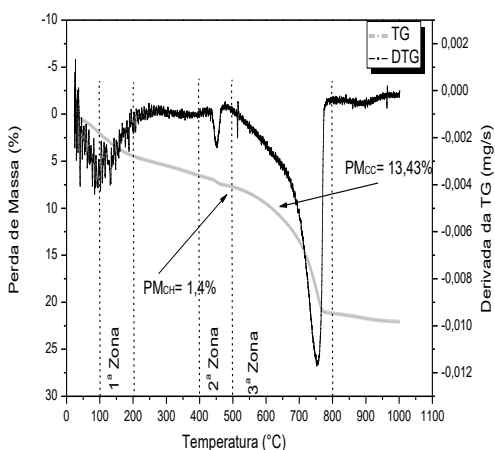
Comparando as curvas de DRX das Figuras 19a, 19b, 19c, 20a, 20b e 20c, verificou-se que as argamassas incorporadas com resíduos de quartzito apresentaram as mesmas fases mineralógicas que suas respectivas argamassas de referência ao longo do processo de envelhecimento. Ademais, o comportamento mineralógico na evolução do envelhecimento entre as idades de 28d de cura e 360d de exposição as condições ambientais das argamassas alternativas se repetiu para as argamassas de referência, sendo caracterizado por picos de portlandita mais intensos aos 28d e menos intensos aos 360d enquanto para os picos de calcita ocorreu o inverso, demonstrando que as reações pozolânicas ocorreram com maior intensidade nas idades iniciais enquanto as reações de carbonatação aconteceram com maior intensidade nas idades mais avançadas do envelhecimento.

As Figuras 21a, 21b, 21c, 21d, 21e e 21f ilustram as curvas de TG e DTG após 28d de cura e 360d de envelhecimento para os traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP) e 1:3 de referência (cimento: areia normal), respectivamente.

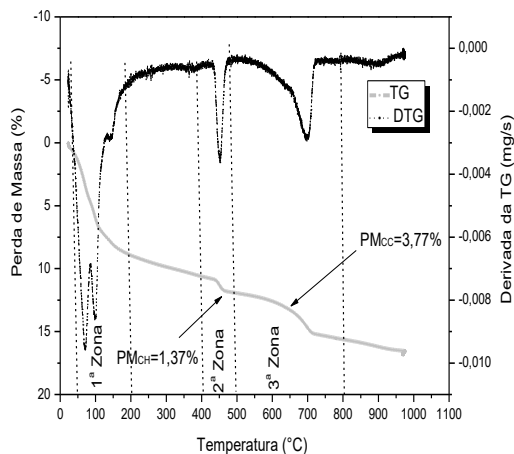
a) Traço 1:3 0% QP e 100% QS - 28d de EN



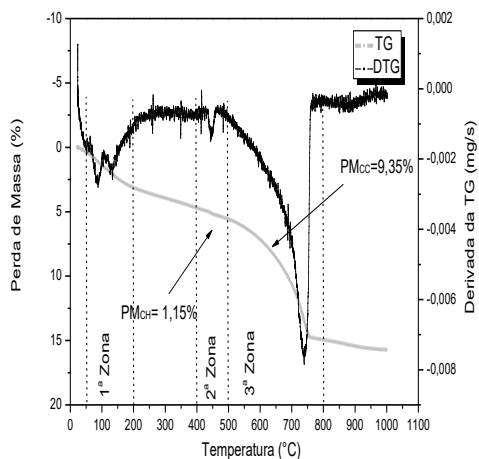
b) Traço 1:3 0% QP e 100% QS - 360d de EN



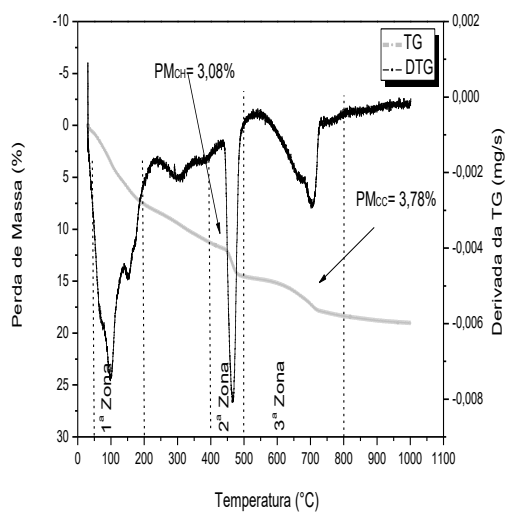
c) Traço 1:3 15%QP e 85% QS - 28d de EN



d) Traço 1:3 15%QP e 85% QS - 360d de EN



e) Traço 1:3 referência - 28d de EN



f) Traço 1:3 referência - 360d de EN

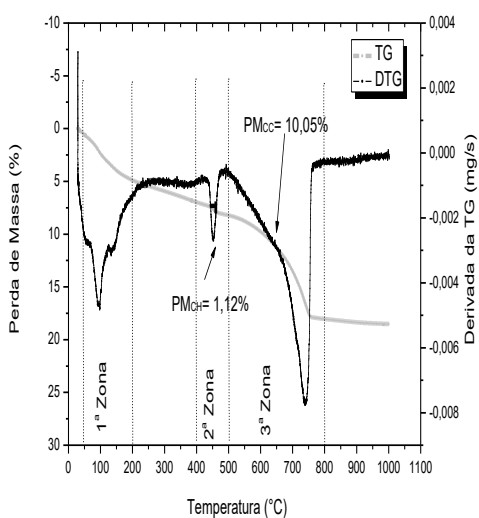


Figura 21 - TG e DTG após 28d de cura e após 360d de envelhecimento.

As Figuras 22a, 22b, 22c, 22d, 22e e 22f ilustram as curvas de TG e DTG após 28d de cura e 360d de envelhecimento para os traços 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP) e 1:1:6 de referência (cimento: cal: areia normal), respectivamente.

Analisando as curvas da TG e da DTG (Figuras 21 e 22), averiguou-se comportamento semelhante entre os traços das argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito e os respectivos traços de referência. Observou-se, ainda, a ocorrência de três zonas bem definidas de acordo com as faixas de temperatura, e com a evolução do tempo de exposição as condições climáticas ambientais os picos endotérmicos revelaram que as reações pozolânicas diminuem (se completam) e se iniciam as reações por carbonatação. Corroborando com os resultados alcançados no DRX dessas argamassas.

A primeira zona compreendeu a faixa entre 90°C e 200°C e apresentou picos endotérmicos característicos da eliminação da água livre e desidratação parcial do C-S-H; a segunda zona ficou entre 400°C e 500°C e correspondeu ao pico endotérmico típico da desidroxilação da portlandita (CH), e a terceira zona entre 500 °C e 800 °C característica da descarbonatação da calcita (CC). A identificação dos picos endotérmicos nas respectivas faixas de temperatura ocorreu de acordo com Gameiro *et al.* (2012), Gameiro *et al.* (2014) e Rocha *et al.* (2013).

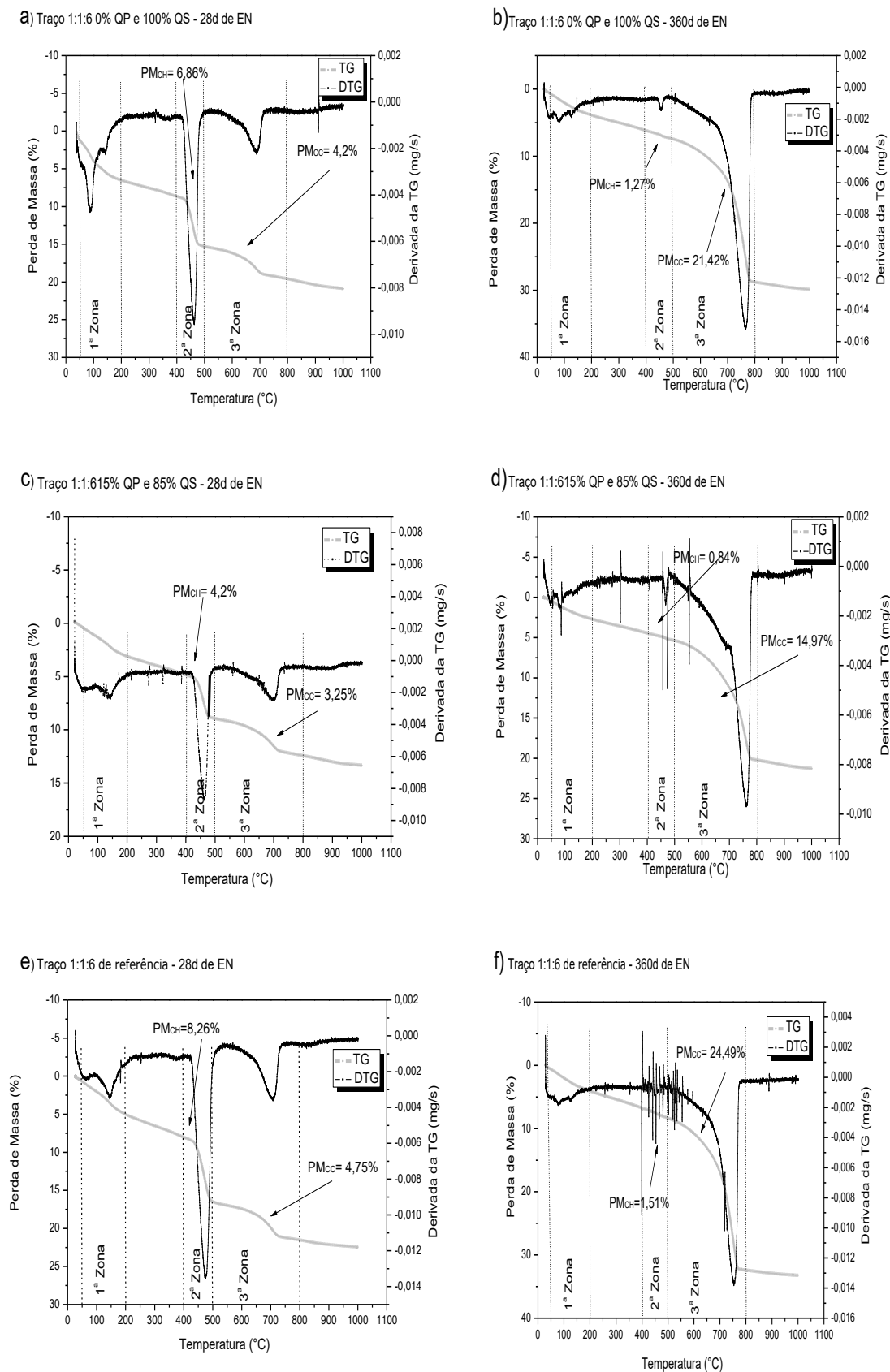


Figura 22 - TG e DTG após 28d e após 360d de envelhecimento.

A quantificação do consumo de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e a formação da calcita (CaCO_3) nas idades de 28 e 360d foram realizadas fazendo uso da metodologia desenvolvida por Gameiro *et al.* (2012), Gameiro *et al.* (2014). A Tabela 15 apresenta o percentual do consumo de portlandita e da formação de calcita conforme a equação desenvolvida por Gameiro *et al.* (2012) e Gameiro *et al.* (2014).

Tabela 15 - Consumo de portlandita e formação da calcita após 28d de cura e 360d de envelhecimento das argamassas alternativas e convencionais.

Traço	Idade	CH poz (%)	CC carb (%)
1:3(cimento: 0%QP e 100%QS)	28	10,68	7,54
	360	5,66	30,15
1:3(cimento: 15%QP e 85%QS)	28	5,54	8,22
	360	4,64	20,88
Referência 1:3 (cimento: areia natural)	28	12,56	8,58
	360	4,51	22,47
1:1:6 (cimento: cal: 0%QP e 100%QS)	28	16,07	8,35
	360	0,09	29,94
1:1:6 (cimento: cal : 15%QP e 85%QS)	28	12,13	6,20
	360	1,68	32,80
Referência 1:1:6 (cimento: cal: areia natural)	28	28,82	9,60
	360	1,08	36,16

^aCH poz – porcentagem de portlandita consumida nas reações pozolânicas e ^bCC carb – porcentagem de calcita formada nas reações de carbonatação.

Percebeu-se (Tabela 15) durante o processo de envelhecimento natural das argamassas incorporadas com resíduos de quartzito e das suas respectivas argamassas de referência que ocorreram reações pozolânicas (indicadas pelo consumo do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou portlandita ou hidróxido de cálcio) e de carbonatação (indicada pela CaCO_3 ou calcita ou carbonato de cálcio). Estes resultados

corroboram com os encontrados no DRX, na TG, na DTG e com o comportamento mecânico ocorrido nas argamassas estudadas.

4.1.11 Envelhecimento Acelerado

As Figuras 23a e 23b ilustram evolução do primeiro ao vigésimo ciclo de exposição à chuva dirigida da resistência à compressão simples das argamassas nos traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP) e 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP) curados por 60d.

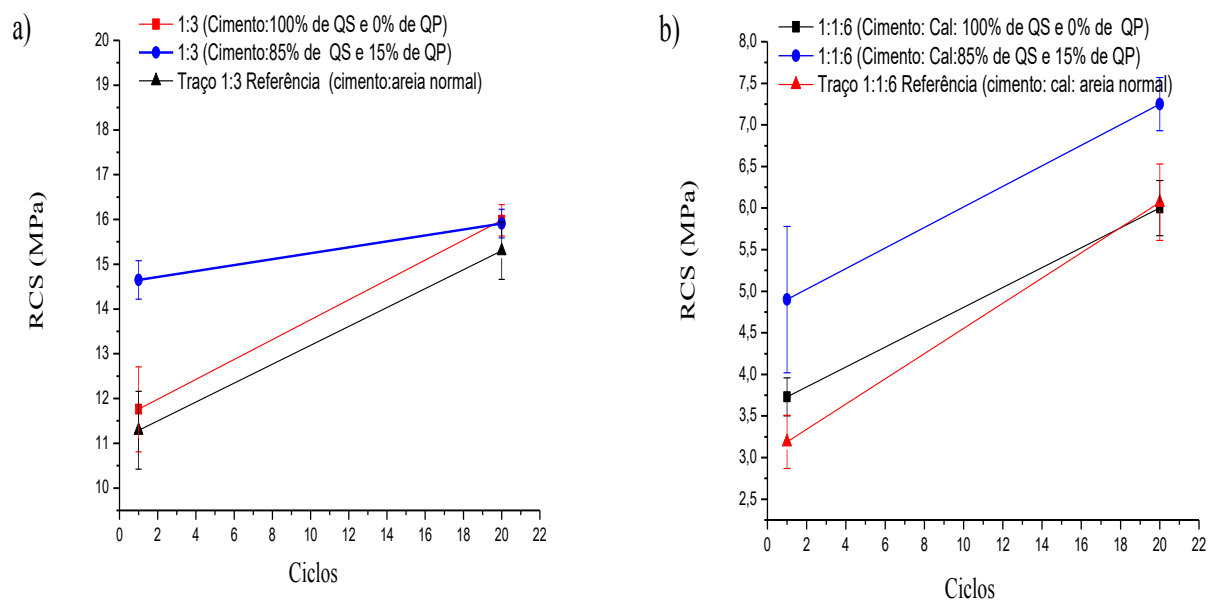


Figura 23 - RCS das argamassas curadas por 60d após exposição a chuva dirigida.

As Figuras 24a e 24b ilustram evolução do primeiro ao vigésimo ciclo de exposição à chuva dirigida da resistência à compressão simples das argamassas nos traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP) e 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP) curados por 90d.

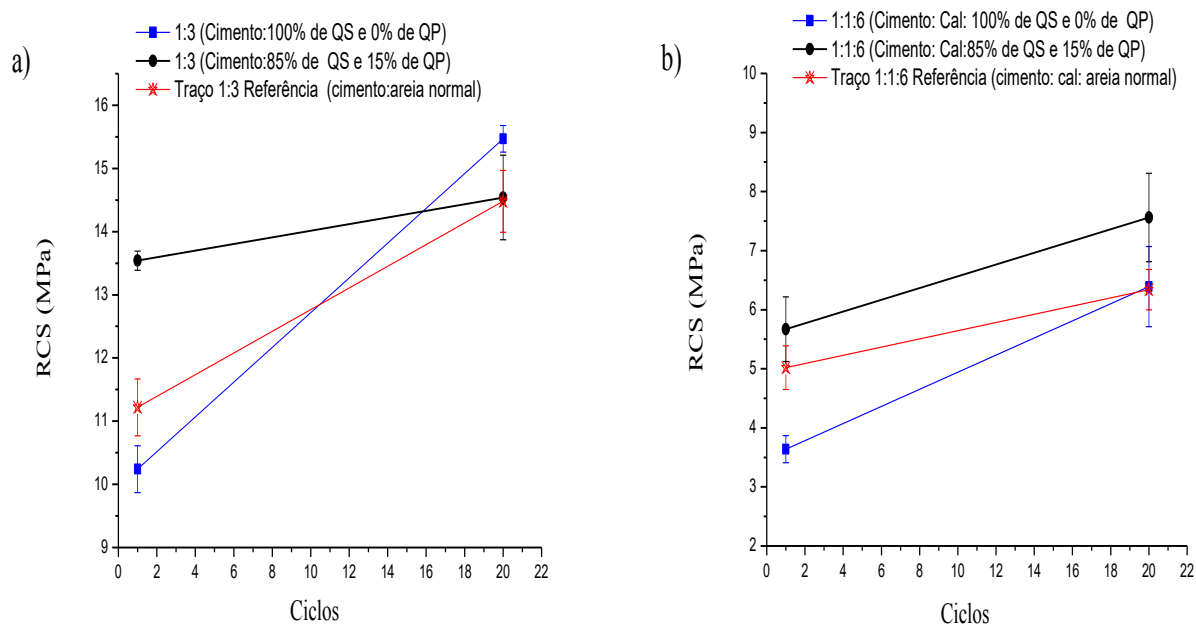


Figura 24 - RCS das argamassas curadas por 90d após exposição a chuva dirigida.

Verificou-se (Figuras 23 e 24) que os valores da RCS sofreram um acréscimo entre o primeiro e o vigésimo ciclo de exposição à chuva dirigida tanto para os traços curados por 60d quanto os curados por 90d, sendo a taxa de aumento da RCS para os curados por 60d na ordem de 35,88% para o traço 1:3 com 0% de QP e de 8,60% para o traço 1:3 com 15 % de QP, de 35,52% para o traço 1:3 de referência, de 60,85% para o traço 1:1:6 com 0% de QP, de 47,95% para o traço 1:1:6 com 15% de QP e de 90,28% para o traço 1:1:6 de referência.

Enquanto os traços curados por 90d obtiveram um aumento de 51,07% para o traço 1:3 com 0% de QP e de 7,38% para o traço 1:3 com 15 % de QP, de 28,95% para o traço 1:3 de referência, de 75,54% para o traço 1:1:6 com 0% de QP, de 33,33% para o traço 1:1:6 com 15% de QP e de 26,29% para o traço 1:1:6 de referência.

O comportamento dos valores obtidos para RCS das argamassas adicionadas com resíduos de quartzito curadas por 60 e 90d após ciclos de exposição à chuva dirigida e secagem em estufa foi semelhante ao das respectivas argamassas de referência demonstrando que a substituição da areia natural pela oriunda do resíduo de quartzito foi viável. Vale ressaltar que todos os valores obtidos após o vigésimo ciclo de envelhecimento acelerado se encontraram de acordo com os valores sugeridos pela norma da ABNT NBR 13281 (2005) para argamassas de

assentamento e revestimento, sendo classificadas como pertencente as classes P6 e P4, respectivamente.

Os resultados obtidos no DRX após o primeiro e o vigésimo ciclo de envelhecimento acelerado para os traços curados por 60d e para os traços curados por 90d (Figuras 25a, 25b, 25c, 26a, 26b e 26c) corroboraram com o comportamento mecânico alcançado por esses traços, pois, verificou-se picos característicos de portlandita que demonstraram a ocorrência das reações pozolânicas e de calcita que evidenciaram a ocorrência da carbonatação.

As Figuras 25a, 25b e 25c ilustram as curvas do DRX obtidas após o primeiro e o vigésimo ciclo de exposição à chuva dirigida das argamassas nos traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP); 1:3 (cimento: areia normal) curadas por 60d.

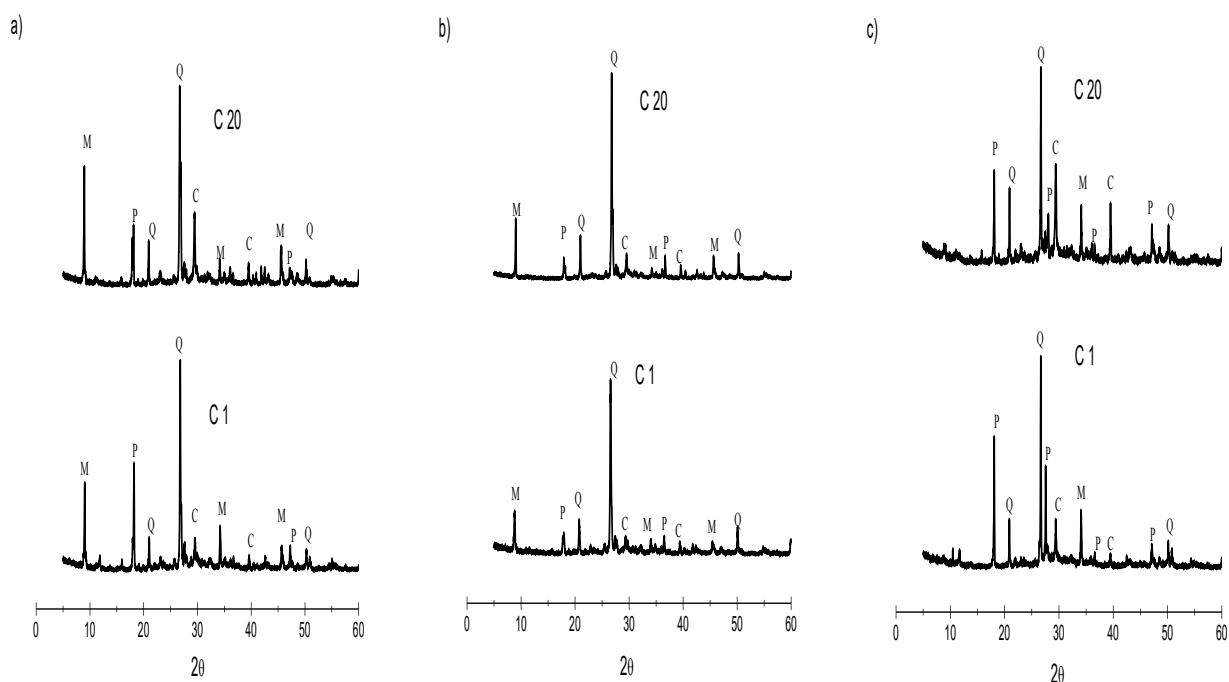


Figura 25 - (a) Traço 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP) (b) Traço 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP) (c) Traço 1:3 de referência (cimento: areia normal). Onde: C-calcita, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.

As Figuras 26a, 26b e 26c ilustram as curvas do DRX obtidas após o primeiro e o vigésimo ciclo de exposição à chuva dirigida das argamassas nos traços 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP); 1:1:6 (cimento: cal :85% QS e 15% QP); 1:1:6 (cimento: cal: areia normal) curadas por 90d.

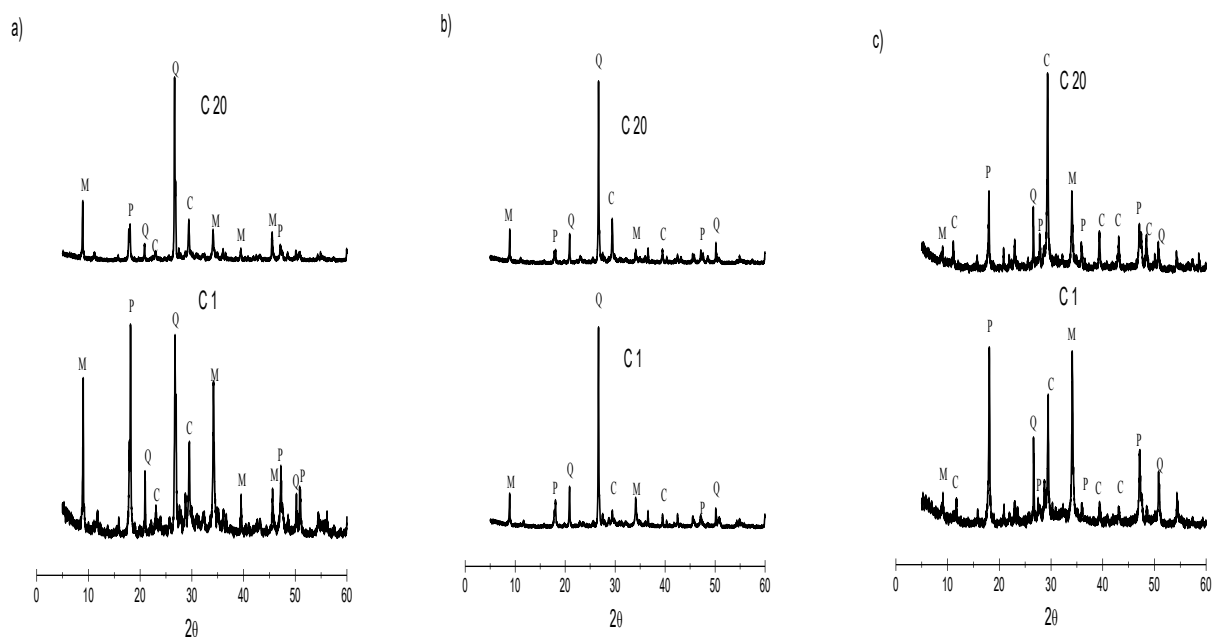


Figura 26 - (a) Traço 1:1:6 (cimento: cal: 0% de QP) (b) Traço 1:1:6 (cimento:cal:15% de QP) (c) Traço1:1:6 de referência (cimento: cal: areia normal). Onde: C-calcita, M-mica, P-portlandita, Q-quartzo.

Observou-se as seguintes fases mineralógicas (Figuras 25a, 25b, 25c, 26a, 26b e 26c): calcita (CaCO_3 , JCPDS file: 72-1937); quartzo (SiO_2 , JCPDS file: 46-1045); mica ($\text{K}(\text{Mg}_{2.665}\text{LiO}_{.225}\text{NaO}_{.110}\text{Si}_{3.312}\text{FeO})$, JCPDS file:88-0791,) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, JCPDS file: 72-0156). Esses resultados foram similares aos encontrados por Farias Filho (2007) usando a metodologia de ciclos de molhagem e secagem com resíduos de granito em argamassas.

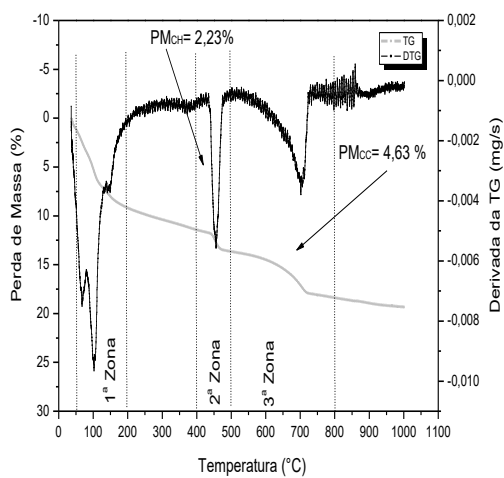
Comparando as curvas de DRX das Figuras 25a, 25b, 25c, 26a, 26b e 26c, verificou-se que as argamassas incorporadas com resíduos de quartzito apresentaram as mesmas fases mineralógicas que suas respectivas argamassas de referência ao longo do processo de envelhecimento. Ademais, o comportamento

mineralógico na evolução do envelhecimento entre o primeiro e o vigésimo ciclo das argamassas alternativas se repetiu para as argamassas de referência, sendo caracterizado por picos de portlandita mais intensos após o primeiro ciclo e menos intensos após o vigésimo ciclo enquanto para os picos de calcita ocorreu o inverso.

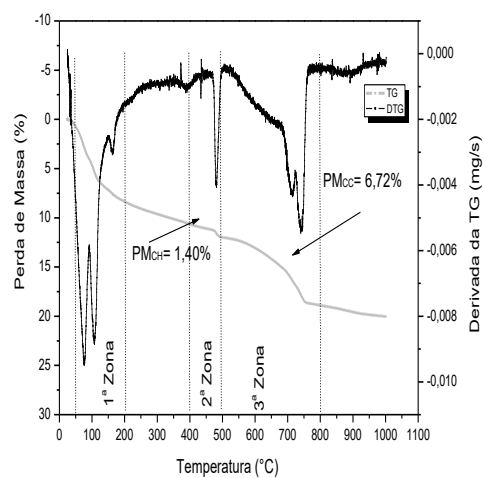
As Figuras 27a, 27b, 27c, 27d, 27e e 27f ilustram as curvas de TG e DTG após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento para os traços 1:3 (cimento: 100% QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP) e 1:3 de referência (cimento: areia normal) curados por 60d, respectivamente.

As Figuras 28a, 28b, 28c, 28d, 28e e 28f ilustram as curvas de TG e DTG após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento para os traços 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP) e 1:1:6 de referência (cimento: cal: areia normal) curados por 60d, respectivamente.

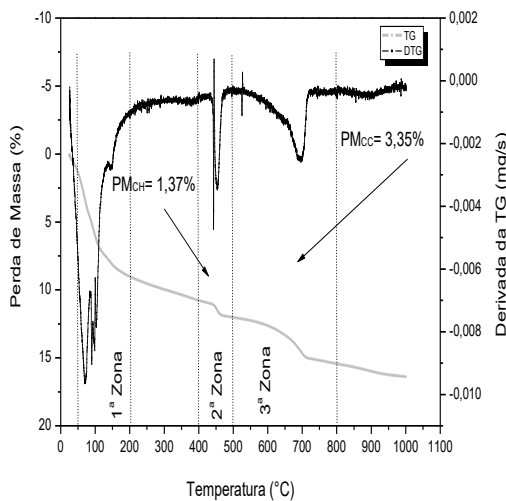
a) Traço 1:3 com 0% de QP - 60d de cura - Ciclo 1



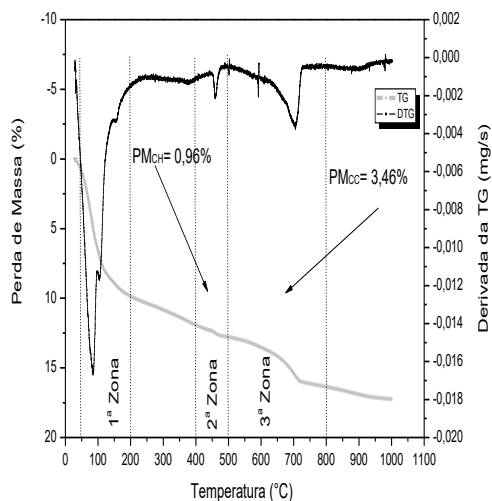
b) Traço 1:3 com 0% de QP - 60d de cura - Ciclo 20



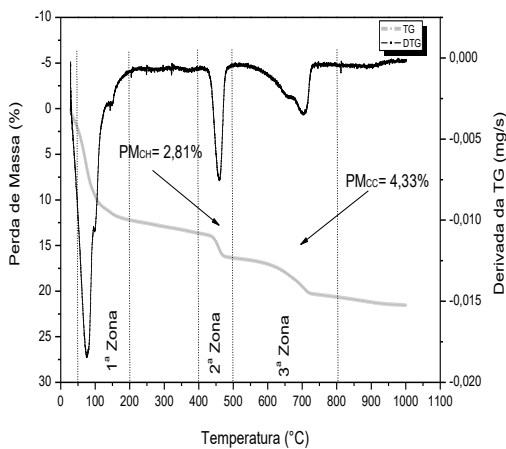
c) Traço 1:3 com 15% de QP - 60d de cura - Ciclo 1



d) Traço 1:3 com 15% de QP - 60d de cura - Ciclo 20



e) Traço 1:3 de referência - 60d de cura - Ciclo 1



f) Traço 1:3 de referência - 60d de cura - Ciclo 20

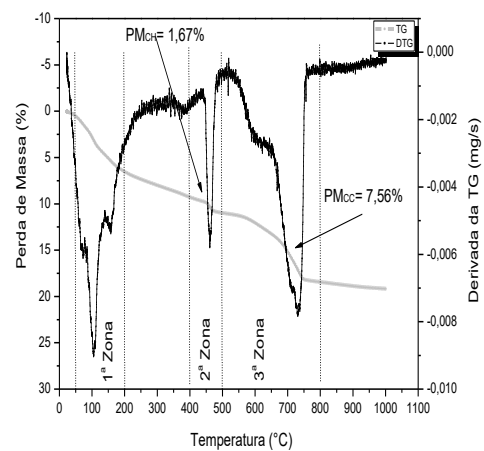
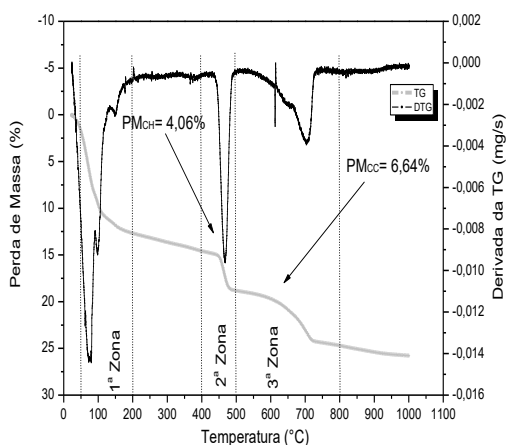
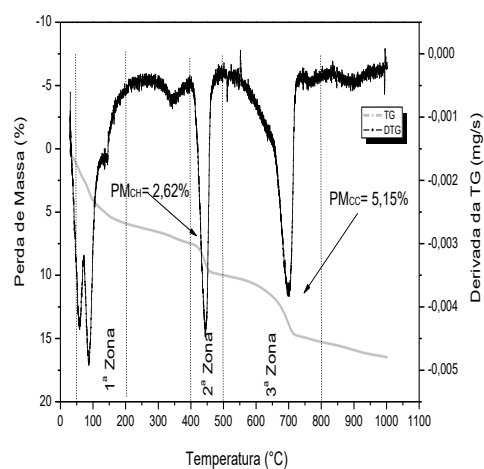


Figura 27 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo de envelhecimento.

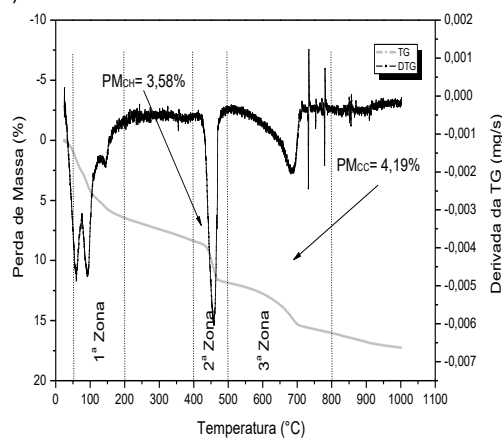
a) Traço 1:1:6 com 0% de QP - 60d de cura - Ciclo 1



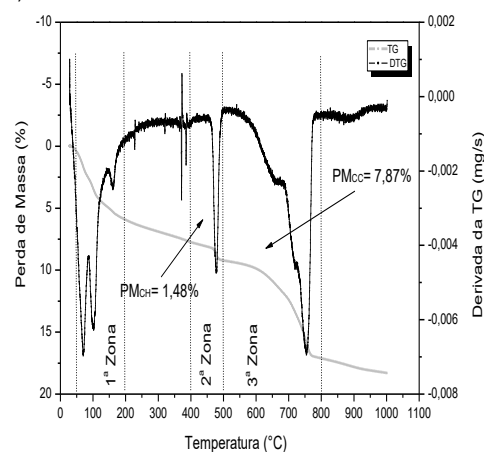
b) Traço 1:1:6 com 0% de QP - 60d de cura - Ciclo 20



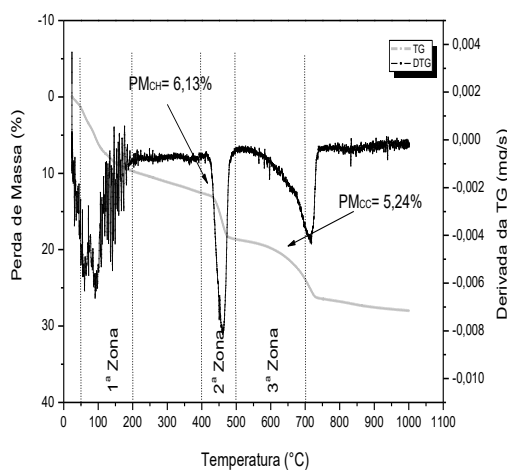
c) Traço 1:1:6 com 15% de QP - 60d de cura - Ciclo 1



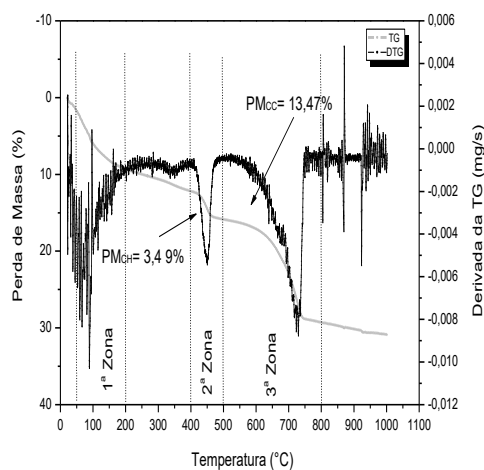
d) Traço 1:1:6 com 15% de QP - 60d de cura - Ciclo 20



e) Traço 1:1:6 de referência - 60d de cura - Ciclo 1



f) Traço 1:1:6 de referência - 60d de cura - Ciclo 20

**Figura 28** - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo de envelhecimento

As Figuras 29a, 29b, 29c, 29d, 29e e 29f ilustram as curvas de TG e DTG após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento para os traços 1:3 (cimento: 100%

QS e 0% QP); 1:3 (cimento: 85% QS e 15% QP) e 1:3 de referência (cimento: areia normal) curados por 90d, respectivamente.

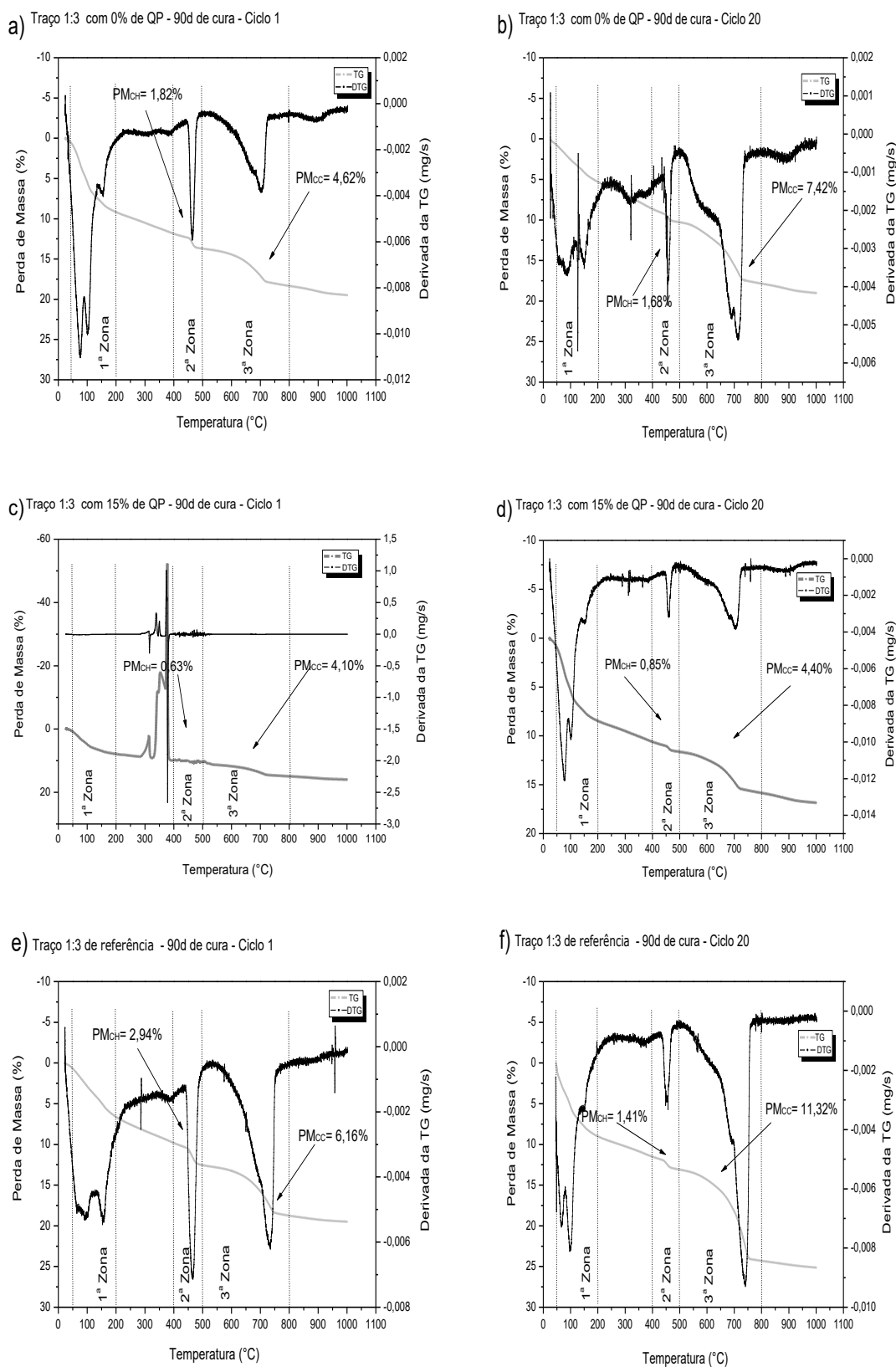
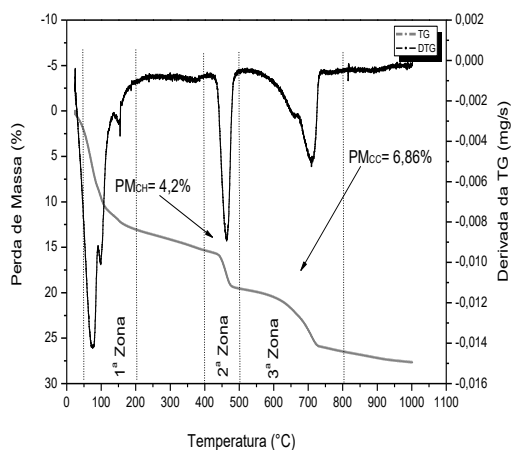


Figura 29 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo do envelhecimento.

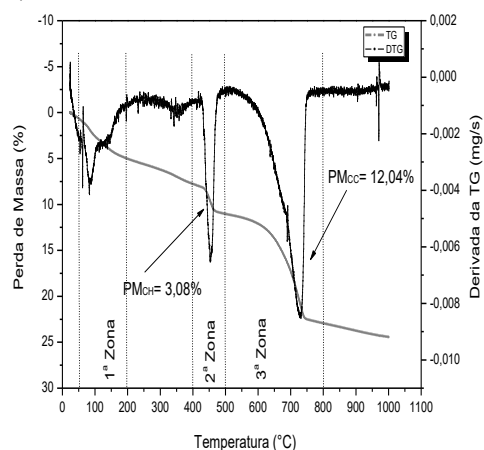
As Figuras 30a, 30b, 30c, 30d, 30e e 30f ilustram as curvas de TG e DTG após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento para os traços 1:1:6 (cimento: cal: 100% QS e 0% QP); 1:1:6 (cimento: cal: 85% QS e 15% QP) e 1:1:6 de referência (cimento: cal: areia normal) curados por 90d, respectivamente.

Analisando as curvas da TG e da DTG (Figuras 27, 28, 29 e 30), averiguou-se comportamento semelhante entre os traços das argamassas incorporadas com os resíduos de quartzito e os respectivos traços de referência. Observou-se, ainda, as mesmas zonas de temperatura ocorridas no envelhecimento natural que caracterizaram a ocorrência da eliminação da água livre e desidratação parcial do C-S-H, de reações pozolânicas e de reações de carbonatação.

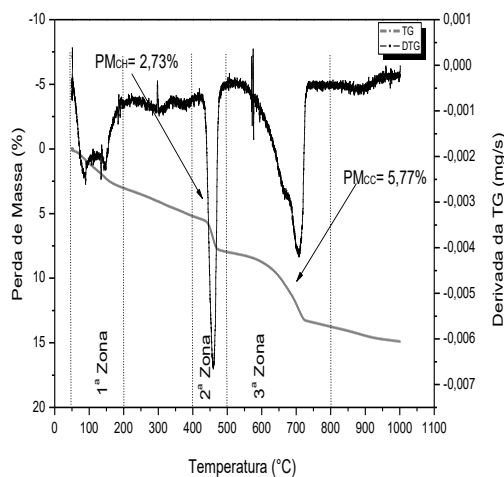
a) Traço 1:1:6 com 0% de QP - 90d de cura - Ciclo 1



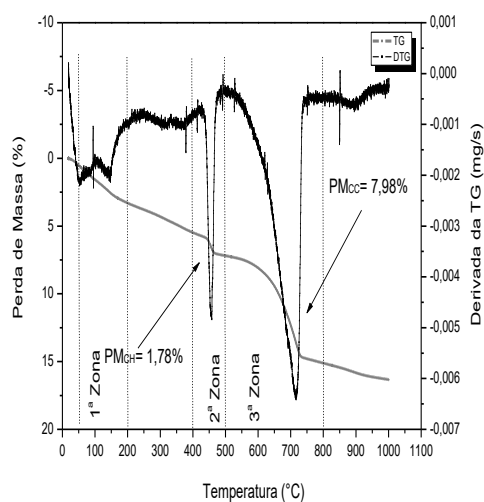
b) Traço 1:1:6 com 0% de QP - 90d de cura - Ciclo 20



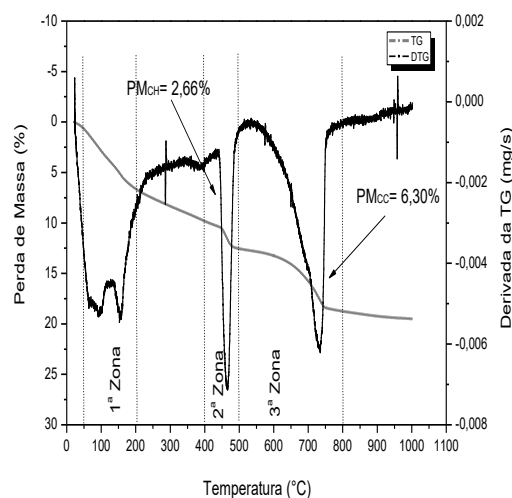
c) Traço 1:1:6 com 15% de QP - 90d de cura - Ciclo 1



d) Traço 1:1:6 com 15% de QP - 90d de cura - Ciclo 20



e) Traço 1:1:6 de referência - 90d de cura - Ciclo 1



f) Traço 1:1:6 de referência - 90d de cura - Ciclo 20

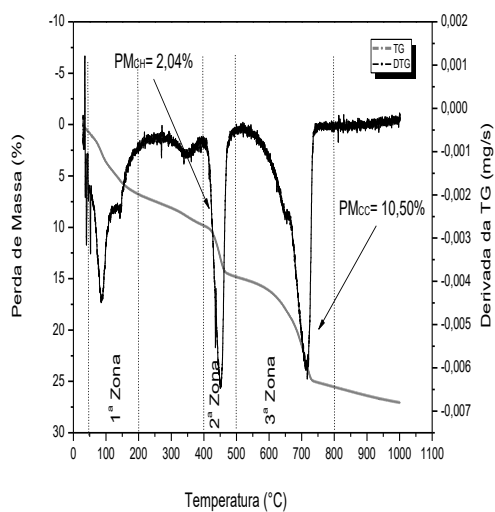


Figura 30 - TG e DTG após primeiro ciclo e após vigésimo ciclo do envelhecimento.

A Tabela 16 apresenta o percentual do consumo de portlandita e da formação de calcita após primeiro e vigésimo ciclo do envelhecimento acelerado conforme a equação desenvolvida por Gameiro *et al.* (2012) e Gameiro *et al.* (2014) para as argamassas curadas por 60d.

Tabela 16 - Consumo de portlandita e formação da calcita após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento acelerado das argamassas alternativas e convencionais curadas por 60d.

Traço	Ciclo	CH poz (%)	CC carb (%)
1:3(cimento: 0%QP e 100%QS)	1	9,07	10,17
	20	5,66	13,84
1:3(cimento: 15%QP e 85%QS)	1	5,54	7,26
	20	3,85	7,51
Referência 1:3 (cimento: areia natural)	1	11,50	10,62
	20	6,77	16,82
1:1:6 (cimento: cal: 0%QP e 100%QS)	1	11,56	13,89
	20	5,64	10,51
1:1:6 (cimento: cal : 15%QP e 85%QS)	1	9,50	8,33
	20	0,95	10,68
Referência 1:1:6 (cimento: cal: areia natural)	1	20,06	10,71
	20	9,21	29,40

^aCH poz – porcentagem de portlandita consumida nas reações pozolânicas e ^bCC carb – porcentagem de calcita formada nas reações de carbonatação.

A Tabela 17 apresenta o percentual do consumo de portlandita e da formação de calcita após primeiro e vigésimo ciclo do envelhecimento acelerado conforme a equação desenvolvida por Gameiro *et al.* (2012) e Gameiro *et al.* (2014) para as argamassas curadas por 90d.

Tabela 17 - Consumo de portlandita e formação da calcita após primeiro e vigésimo ciclo de envelhecimento acelerado das argamassas alternativas e convencionais curadas por 90d.

Traço	Ciclo	CH poz (%)	CC carb (%)
1:3(cimento: 0%QP e 100%QS)	1	7,39	10,15
	20	6,13	16,50
1:3(cimento: 15%QP e 85%QS)	1	2,50	8,96
	20	3,4	9,65
Referência 1:3 (cimento: areia natural)	1	11,99	13,64
	20	5,71	25,36
1:1:6 (cimento: cal: 0%QP e 100%QS)	1	12,13	14,39
	20	7,53	26,15
1:1:6 (cimento: cal : 15%QP e 85%QS)	1	6,09	11,02
	20	2,19	16,93
Referência 1:1:6 (cimento: cal: areia natural)	1	5,12	13,12
	20	3,25	22,66

^aCH poz – porcentagem de portlandita consumida nas reações pozolânicas e ^bCC carb – porcentagem de calcita formada nas reações de carbonatação.

Percebeu-se nas Tabelas 16 e 17 que ocorreram reações pozolânicas e de carbonatação tanto nas argamassas incorporadas com resíduos de quartzito quanto nas suas respectivas argamassas de referência durante processo de envelhecimento acelerado por ciclos de exposição à chuva dirigida e a secagem em estufa para as argamassas curadas por 60d e 90d. A ocorrência dessas reações corroborou com o comportamento apresentado pelos valores da RCS das argamassas estudadas, pois as reações pozolânicas e de carbonatação favoreceram a ocorrência do aumento da resistência à compressão simples entre o primeiro e o vigésimo ciclo de envelhecimento. Ademais, observou-se que as

reações pozolânicas ocorreram com maior intensidade no primeiro ciclo e as de carbonatação após o vigésimo ciclo.

As Figuras 31a e 31b mostram a perda de massa ocorrida para os corpos de prova das argamassas incorporadas com resíduos de quartzito e das de referência curadas por 60 e 90d.

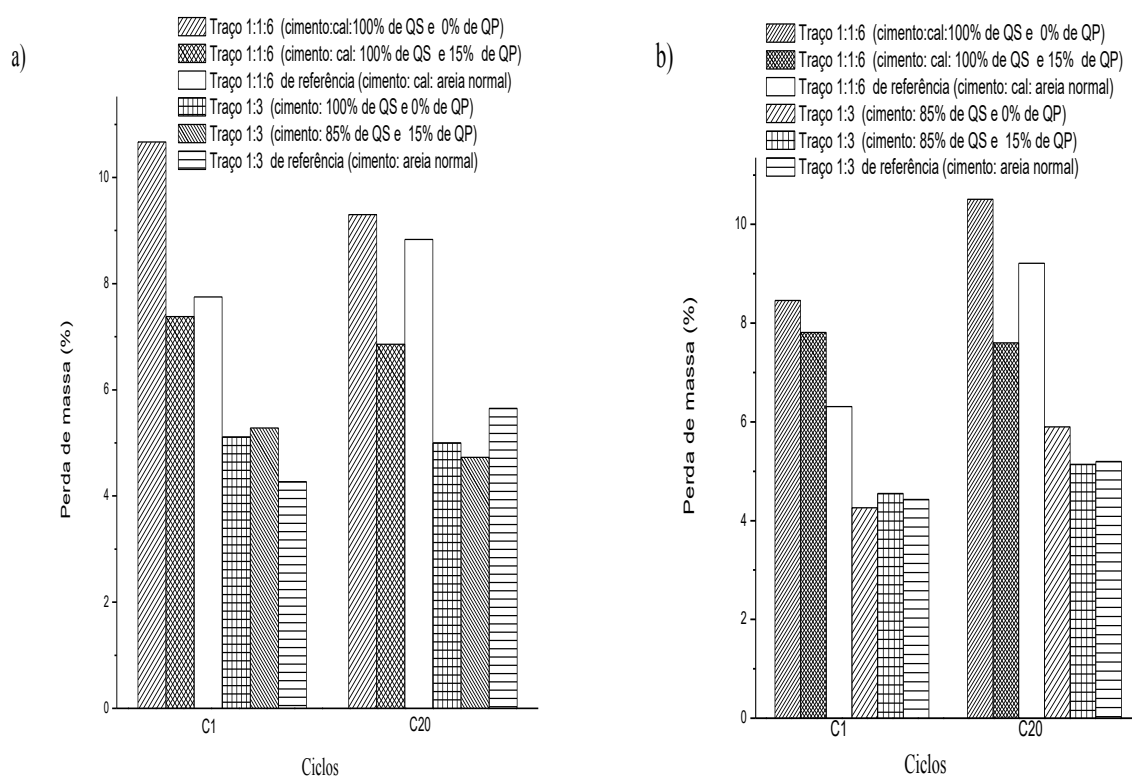


Figura 31 - (a) argamassas curadas por 60d

(b) argamassas curadas por 90d.

Verificou-se que os corpos de prova curados por 60d apresentaram para os traços incorporados com resíduos de quartzito uma redução no valor da perda de massa do primeiro para o vigésimo ciclo (Figura 31a). Enquanto para seus respectivos traços de referência houve um aumento no valor da perda de massa do primeiro para o vigésimo ciclo, demonstrando que ocorre uma maior suscetibilidade à erosão causada pela ação da chuva, logo as argamassas alternativas apresentaram melhor desempenho que suas respectivas argamassas de referência.

Já para os corpos de prova curados por 90d (Figura 31b), observou-se que os traços incorporados com resíduos de quartzito e os seus respectivos traços de referência apresentaram aumento no valor da perda de massa do primeiro para o vigésimo ciclo, logo possuem maior suscetibilidade à erosão causada pela ação da chuva.

Com base nos valores apresentados na Figura 31, verificou-se que as argamassas curadas por 60d obtiveram melhor comportamento em relação à erosão causada pela ação da chuva.

Enfim, a substituição do agregado natural pelos agregados oriundos dos resíduos de quartzito apresentou viabilidade técnica para uso em argamassa ao analisar o processo de envelhecimento acelerado utilizando a metodologia da chuva dirigida.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O QS apresenta propriedades físicas, químicas e mineralógicas adequadas para uso em argamassa.
- O QP não apresenta propriedades pozolânicas, porém, pode ser usado como filler nas misturas.
- O QS e o QP são classificados como resíduos ambientalmente perigosos.
- A incorporação do QS e do QP em argamassas promove a imobilização dos metais pesados presentes nesses resíduos.
- O QS e o QP são classificados como potencialmente inócuo em relação à reação álcali-agregado quando se usa o cimento Portland CP IV 32 RS.
- As argamassas incorporadas com QS, QP e cimento sem adição de pozolana apresentam expansões dimensionais quando submetidas ao ataque por sulfato de sódio.
- Os valores da RCS atingiram valor máximo aos 90 dias de exposição as condições climáticas ambientais.
- Os traços que incorporam 15% de QP apresentam melhor comportamento mecânico nos processos estudados.
- Os valores da RCS atingiram valor máximo ao final do vigésimo ciclo de exposição a chuva dirigida e secagem em estufa.
- As argamassas incorporadas com QS e QP curadas por 60d obtiveram melhor comportamento em relação a erosão do que as curadas por 90d.
- As argamassas contendo QS e QP apresentam resistência mecânica adequada para uso na engenharia civil.

Portanto, diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que os resíduos de quartzito apresentam durabilidade à reação álcali-agregado, e ao processo de envelhecimento natural e acelerado quando se usa cimento Portland CP IV 32 RS. Pois, o comportamento mecânico das argamassas incorporadas com QS e QP demonstra após período de exposição aos ataques químicos e ambientais que não ocorreu degradação dos corpos de prova.

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Investigar a reatividade dos agregados oriundos dos resíduos de quartzito à reação álcali-agregado com outros cimentos e aumentar o período de imersão em solução NaOH 1N.
- Estudar a reatividade dos agregados oriundos dos resíduos de quartzito ao ataque por sulfatos para um maior tempo de ataques por íons de sulfato, intercalando ciclos de ataque com ciclos sem ataques.
- Investigar novas metodologias para análise da durabilidade de argamassas adicionadas com resíduos de quartzito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção extrato de lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland Comum – Determinação do módulo de finura. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Exigências químicas e físicas. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13583**: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfato. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6474:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7200:** Revestimentos de paredes e tetos com argamassas. Materiais, preparo, aplicação e manutenção – Procedimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método da permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Determinação de composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

_____. **ASTM C 452**: Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate, 2002.

_____. **ASTM C 780**: Standard Test Method Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry, 2006.

_____. **ASTM C 1260**: Standard Test Method for Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), 2007.

AFSHINNIA, K.; POURSAEE A. The potential of ground clay brick to mitigate alkali-silica reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate, **Construction and Building Materials**. V. 95, p. 164 -170, 2015.

AL-AMOUDI, O. S. B.; MASLEHUDDIN, M.; SAADI, M. M. Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability of plain and blended cements, **ACI Materials Journal**. V. 92, p. 15 - 24, 1995.

AMB - ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. **Publicação anual que consolida estatística do Setor Mineral Brasileiro**, 2010. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=2005>>. Acesso em outubro de 2013.

ANDRÉ, A.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste, **Journal of Cleaner Production**, V. 65, p. 389-396, 2014.

ANJOS, C. M. **Utilização de resíduos de caulim em tijolos de solo-cal**. 2011. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal Federal de Campina Grande-UFCG, Campina Grande-Paraíba.

BABISK, M. P.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, W. S.; AGUIAR, M. C.; GADIOLI, M. C. B.; VIEIRA, C. M. F. Incorporação de resíduo de quartzitos em cerâmica vermelha. **HOLOS-ISSN 1807-1600**, V. 6, p. 169-177, 2012. Disponível:

<<http://www.cefetrn.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1104>>. Acesso em outubro de 2013.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers, **Construction and Building Materials**. V. 45, p. 1-10, 2013.

BALASUBRAMANIAN, J.; GOPAL, E.; PERIAKARUPPAN, P. Strength and microstructure of mortar with sand substitutes. **Grãdevinar**. V. 68, p. 29-37, 2016

BARDINI, V. S. DOS S.; KLINSKY, L. M. G.; JÚNIOR, J. L. F.; ROQUE, R. Influência do Filler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. **Revista transportes**. V. 20, p. 1-8, 2012. Disponível: <<http://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/603/451>>. Acesso em setembro de 2014.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Volume 1. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

BELTRÃO, S. L. D. **Comportamento mecânico e durabilidade de argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado**. 2014. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande – Paraíba.

BENICI, H.; SHAH, T.; AKSOGAN, O.; KAPLAN, H. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. **Journal of materials processing technology**, V. 208, p. 299-308, 2008.

BEZERRA, I. M. T. **Desenvolvimento de corpos cerâmicos utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha**. 2014. 107f. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Campina Grande-Paraíba.

BEZERRA, M. S. **Relatório Técnico do Perfil do Setor mineral do Nordeste e análise das possibilidades de incremento da atividade mineral na região.** Nº 81, 65p, 2009.

BRAGA, M. B. da C. **Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do Betão Efeito de filler e pozolânico.** 2010. 156f Dissertação (Mestrado em Construção), Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa-Portugal.

BRASIL. Lei n º 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. 3 de agosto de 2010.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 001. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. 17 de fevereiro de 1986.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 237. **Dispõe sobre licenciamento ambiental; competência da União, Estados e Municípios; listagem de atividades sujeitas ao licenciamento; Estudos Ambientais, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. 02 de dezembro de 1997.

BRASILEIRO, M. I.; RODRIGUES, A. W. B.; FERREIRA, H. S.; OLIVEIRA, D. F.; NEVES, G. A.; PATICIO, S. M. R.; SILVA, M. C.; FERREIRA, H. C. Envelhecimento de argamassas alternativas. **Anais do 44 Congresso Brasileiro de Cerâmica.** 2000.

BOX, G. E. P.; WETZ, J. **Criteria for judging adequacy of estimation by na approximate response funtion.** University of Wisconsin Technical Report. 9, 1973.

BROWN, P. W. Evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment, **Cement and Concrete Research**. V. 11, p. 719-727, 1981.

CARREIRO, M. E. A.; SANTOS, R. C.; SILVA, V. J.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L. Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural. **Cerâmica**. V. 62, p. 170 - 178, 2016.

CHEN, Q. Y.; TYREr, M.; HILLS, C. D.; YANG, X. M.; CAREY, P. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review. **Waste Management**. V. 29, p. 390–403, 2009.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**. V. 24, p. 113 – 117, 2010.

COSTA, A. G.; CAMPELO, M. S.; PIMENTA, V. B., Rochas ornamentais de revestimento de Minas Gerais - Principais ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. **GEONOMOS**. V. 8 (1), p. 9-13, 2001. Disponível em: <<http://igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/143/122>>. Acesso em outubro de 2013.

DA SILVA, A. A. A. Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva. **Anais do VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. 2011.

DA SILVA; N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e Areia britada de rocha calcária**. 2013. 180f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná- UFPR, Curitiba - Paraná. Disponível em: < <http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0070.pdf> >. Acesso em outubro de 2013.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia mineral do Brasil**, 2009. Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em maio de 2013.

DUXSON, P.; PROVIS, J.; LUCKEY, G.; VAN DEVENTER, J. The role of inorganic polymer technology in the development of “Green Concrete”. **Cement Concrete Research**. V. 37, p. 1590 – 1597, 2007.

ERCIKDI, B.; KULEKCI, G.; YILMAZ, T. Utilization of granulated marble wastes and waste bricks as mineral admixture in cemented paste backfill of sulphide-rich tailings. **Construction and Building Materials**. V. 93, p. 573-583, 2015.

FALEIRO, F. F.; LOPES, L. M. Aspectos da mineração e impactos da exploração de quartzito em Pirenópolis-GO. **Revista Eletrônica Ateliê Geográfico**. V. 4, p. 148-162, 2010. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/publique/media/art_quartzito_Faleiro.pdf >. Acesso em: 19 de novembro de 2012.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito**. 2007. 118f. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Campina Grande-Paraíba.

FARIAS FILHO, J.; MENEZES, R.; FERREIRA, H. S.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. **Revista Cerâmica**. V. 57, p. 395-403, 2011.

GAMEIRO, A.; SANTOS SILVA, A.; FARIA, P.; GRILO, J.; BRANCO, T.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. **Cement & Concrete Composites**. V. 45, p. 264-271, 2014.

GAMEIRO, A.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. **Thermochemica Acta**. V. 535, p. 36 -41, 2012.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. **Cement And Concrete Research**. V. 37, p. 175-183, 2006.

GERVEN, T. VAN; BAELEN, D. VAN; DUTRÉ, V.; VANDECASTEELE, C. Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. **Cement and Concrete Research**. V. 34, p. 149 -156,2004.

GOMES, A. DE O. Argamassas para revestimentos de edificações. In: **II Seminário de pesquisa e pós-graduação da UFBA**. Bahia, 2002. Disponível em: <http://www.reciclar.ufba.br/palestras/sppg/adailton/argamassas_revestimentos.htm> Acesso em: 07 de novembro de 2013.

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

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F., Concrete attack by sodium sulfate: mineral additions as a mitigation tool. **Cerâmica**. V. 61, p. 168 - 177, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 07 de maio de 2013.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações**. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017

JIMÉNEZ; J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**. V. 40, p. 679-690, 2013.

KUNTHER, W.; LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K. Influence of bicarbonate ions on the deterioration of mortar bars in sulfate solutions. **Cement and Concrete Research**. V. 44, p. 77 - 86, 2013

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MARMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONROS, G.; MORALES, J.; SANCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**. V. 32, p. 617-622, 2010.

MARTÍNEZ, I.; DÍAZ, N.; PAVÓN, E.; ETXEBERRIA, M. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials**. V. 49, p. 384-392, 2013.

MATTA, V. R. P.; APOLINÁRIO, E. C. de A.; SANTOS, G. R. S.; RIBEIRO, D. V. Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore E granito (RCMG) no desempenho das argamassas de Cimento Portland no estado endurecido. **Periódico Eletrônico "Fórum Ambiental da Alta Paulista"**. V. 9, p. 87-104, 2013. Disponível em: <http://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/597/620> . Acesso em: 05 de setembro de 2014.

MEDIC - Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio. Disponível em: <<http://correiodaparaiba.com.br/economia/pb-e-o-5o-do-pais-em-exportacao-de-rochas-ornamentais/>>. Acesso em: 05 de abril de 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª Edição. São Paulo: **IBRACON**, 2008.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 6, p. 303-313, 2002.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica**. V. 55, p. 263-270, 2009.

MERIDA, A.; KHARCHI, F. Pozzolan concrete durability on sulphate attack. **Procedia Engineering**. . V. 114, p. 832-837, 2015.

MONTEIRO, P. J. M; MEHTA, P. K., The transition zone between aggregate and type K expansive cement. **Cement and Concrete Research**. V. 16, p. 111-114, 1986.

MOTA, J. M. F.; de OLIVEIRA, R. A.; CARNEIRO, A. M. P. Durability of mortar with addition metakaolin of reinforcement for masonry. **Revista Matéria**. V. 21, p. 1105-1116, 2016.

MOREIRA, M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 196, p. 88-93, 2008.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Revista Escola de Minas**. V. 64, p. 147-154, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NOGAMI, L.; PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E. Estudo da influência mineralógica e dos componentes da argamassa na fixação de "Granitos". **Revista de Geologia**. V. 22, p. 176-185, 2009.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SCHMIDT, B.; RIO, J. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**. V. 47, p. 1001 -1009, 2013.

REZENDE, M. L. S. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade**. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). 2013. Campina Grande-PB.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. M. S.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Estudo das reações álcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Cerâmica**. V. 58, p. 90 - 98, 2012.

ROCHA, C. A. A.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de resíduos de corte de rochas e de blocos cerâmicos moídos na hidratação e no empacotamento de pastas cimentícias. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. V. 6, 661-680, 2013.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; EL HACHEM, R.; GRONDIN, F. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. **Cement and Concrete Research**. V. 39, p. 1188 - 1198, 2009.

RUSSO, M. L. C. **Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito**. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2011. Belo Horizonte – MG.

SAJEDI, F.; HASHIM, A. H. Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. **HOLOS**. V. 5, p. 125 – 1355, 2012.

SANTOS, R. A.; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **Construction and Building Materials**. V. 25, p. 2036 – 2045, 2011

SEVERO, C. G. S. **Reciclagem de resíduos de granito e caulim através da ativação alcalina para fins de construção civil**. 2014. 117f. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande – Paraíba.

SHUQIANG XU; JULIN WANG ; QINGLIN MA; XIN ZHAO; TAO ZHANG. Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial

replacement of natural hydraulic lime and masonry waste as aggregate. **Construction and Building Materials**. V. 73, p. 33-40, 2014.

SILVA NETO, R.; SILVESTRE, B. dos S. Inovação tecnológica como agente de redução de impactos ambientais da indústria de rochas ornamentais no estado do Rio de Janeiro. **Ambiente Construído**. V. 13, p. 235-252, 2013.

SOUZA, M.M, FELIPE, L.C.O, VIERA, E.V, NEVES, G.A, SOUZA, J.B.M. Caracterização Tecnológica de Resíduos de Quartzitos da Paraíba e Rio Grande do Norte Visando seu Aproveitamento na Indústria Cerâmica. **Anais do 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 29 de maio a 01 de junho, Porto de Galinhas - PE, 2011.

SOUZA, J. de. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz**. 2008. 161f. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande-Paraíba.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2º Ed; São Paulo: Edgard Blücher. v. 2, 1992.

TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. B. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**. V. 91, p. 65 -67, 2015.

TRINDADE, I. M. B. **Desenvolvimento de corpos cerâmicos utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha**. 2014. 107f. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande – Paraíba.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. V. 29, p. 23-30, 2009.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulhos da construção civil.** 2004. 218f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Paraíba.

OLIVEIRA, E. M. **Impacto ambiental na exploração de pedra: Contribuição para uma prática sustentável.** 2006. 138f. Dissertação. Universidade do Porto. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/publique/media/diss_elvis.pdf>. Acesso em: 07 de setembro de 2014.

OUYANG, W., CHEN, J. K., JIANG, M. Q. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. **Construction and Building Materials.** V. 53, p. 419-424, 2014.

PENACHO, P.; de BRITO, J.; VEIGA, M. R. Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate. **Cement & Concrete Composites.** V. 50, p. 47 - 59, 2014.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; BÖHM, M. Competition of Several Carbonation Reactions in Concrete: a parametric study. **Cement and Concrete Research,** V. 38, p. 1385-1393, 2008.

PONTES, I. F.; CARDOSO, F. W. H. **Valorização de Resíduos de Serrarias de Mármore e Granito e sua Aplicação na Construção Civil.** In: V Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-101-00.pdf> >. Acesso em: 07 de novembro de 2013.

US EPA. **TCPL 1311:** test methods for evaluating solid waste, toxicity characteristics leaching procedure. Physical/Chemical methods. SW -846, 1992.

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. Influence of alkali on sulfate resistance in ordinary Portland cement mortars. **Cement and Concrete Research.** V. 15, p. 485-494, 1985.

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; GANESH PRABHU, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials**. V. 46, p. 1 - 7, 2013.

VIDAL, F. W. H.; PEREIRA, R. A.; CASTRO, N. F.; MENDES, V. A.; COSTA, J. C. A. Aprimoramento das técnicas de extração de Quartzito do Seridó paraibano. Ambiente Mineral - **Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente**. V. 3, n. 2, 2013 – ISSN 2179-6203.

WERITZ, F.; TAFFE, A.; SCHAURICH, D.; WILSCH, G. Detailed depth profiles of sulphate ingress into concrete measured with laser-induced break-down spectroscopy. **Construction and Building Materials**. V. 23, p. 275 - 283, 2009.

ZERBENIO, R.; GIACCIO, G.; MARFIL, S. Evaluation of alkali-silica reaction in concretes with natural rice husk ash using optical microscopy, **Construction and Building Materials**. V. 7, p. 132 -140, 2014.

ANEXO

Anexo A - Resultados da análise por absorção atômica realizada pela FUNMINERAL do extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos de quartzito.

BOLETIM DE ANÁLISE

Nº BOLETIM	23267 / 2015	TIPO AMOSTRA	SOLUÇÃO
CLIENTE	UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE	PREPARAÇÃO	
RESPONSÁVEL	André L. F. de Brito	ATAQUE	
TIPO SERVIÇO	Particular	LABORATÓRIO	<input type="checkbox"/> PA <input type="checkbox"/> AA <input type="checkbox"/> EO <input type="checkbox"/> FA <input checked="" type="checkbox"/> VU <input type="checkbox"/> RX

Data de Recebimento 1/9/2015

Identificação	As	SiO ₂					
	mg/l	mg/l					
Am-02	38,5	< 0,10					
Am-04	29,8	< 0,10					
Am-06	26,7	< 0,10					
Am-08	19,8	< 0,10					

Total de Amostras 4 Obs.

Amostras não procuradas
serão descartadas em: 03/05/2015

Silvio Divino Carolina
Químico Industrial
Campina, 02/02/2015

QUÍMICO RESPONSÁVEL

Anexo A - Resultados da análise por absorção atômica realizada pela FUNMINERAL do extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos de quartzito.

1

BOLETIM DE ANÁLISE

Nº BOLETIM 23148 / 2015 TIPO AMOSTRA SOLUÇÃO
 CLIENTE UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE PREPARAÇÃO
 RESPONSÁVEL André F. Figueira ATAQUE
 TIPO SERVIÇO Particular LABORATÓRIO PA X AA EO FA VU RX

Data de Recebimento 12/3/2014

Identificação	Fe mg/l	Mn mg/l	Cr mg/l	Cd mg/l	Ba mg/l	Cu mg/l	Ni mg/l	Zn mg/l	Al mg/l
1	5,34	3,87	0,05	0,010	1,20	2,54	1,17	0,53	39,7
3	1,67	1,47	0,22	0,134	0,45	0,05	0,03	0,23	4,84
5	0,01	0,01	0,01	< 0,005	0,08	0,02	< 0,010	0,02	0,20
7	1,67	1,46	0,22	0,135	0,37	0,05	0,03	0,19	4,70
Total de Amostras	4								

Obs.

Amostras não procuradas
serão descartadas em: 11/03/2015

Divino Carolina
 Químico Industrial
 CRQ XII 12200012

Goiânia, 11/12/2014
 QUÍMICO RESPONSÁVEL

Anexo A - Resultados da análise por absorção atômica realizada pela FUNMINERAL do extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos de quartzito.

1

BOLETIM DE ANÁLISE

Nº BOLETIM	23196 / 2015	TIPO AMOSTRA	SOLUÇÃO
CLIENTE	UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE	PREPARAÇÃO	
RESPONSÁVEL	Andre L. F. de Brito	ATAQUE	
TIPO SERVIÇO	Particular	LABORATÓRIO	<input type="checkbox"/> PA <input checked="" type="checkbox"/> AA <input type="checkbox"/> EO <input type="checkbox"/> FA <input type="checkbox"/> VU <input type="checkbox"/> RX

Data de Recebimento 12/15/2014

Identificação	Cr						
	mg/l						
T1	0,54						
T2	1,17						
T3	0,50						
T4	1,34						
T5	1,09						
T6	0,73						
T7	1,00						
T8	1,07						
T9	0,22						

Total de Amostras 9 Obs.

Silvio Divino Carolina
Químico Industrial
CRO XII 12200012

Goiânia, 16/12/2014


QUÍMICO RESPONSÁVEL

Amostras não procuradas
serão descartadas em: 16/03/2015

Anexo B - Resultados da análise por absorção atômica realizada pela FUNMINERAL do extrato lixiviado e do extrato solubilizado das argamassas incorporadas com resíduos de quartzo.

Nº BOLETIM	23626 / 2015	TIPO AMOSTRA	SOLUÇÃO
CLIENTE	UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE	PREPARAÇÃO	
RESPONSÁVEL	André L. Figueire de Brito	ATAQUE	
TIPO SERVIÇO	Particular	LABORATÓRIO	<input type="checkbox"/> PA <input checked="" type="checkbox"/> AA <input type="checkbox"/> EO <input type="checkbox"/> FA <input checked="" type="checkbox"/> VU <input type="checkbox"/> RX

Data de Recebimento 29/04/2015

Identificação	Fe	Mn	Cr	Cd	Ba	Cu	Ni	Zn
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Am-01-Lixiviação	0,11	0,26	0,54	0,046	*	0,037	0,15	0,038
Am-02-Lixiviação	0,13	0,28	0,21	0,063	*	0,033	0,19	0,047
Am-03-Solubilização	0,010	0,058	0,060	0,016	1,01	0,011	0,014	0,016
Am-04-Solubilização	< 0,010	0,029	0,019	< 0,010	< 0,10	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Total de Amostras	4							

Obs:

e-mail: samaevalensca@yahoo.com.br
*interferência

Amostras não procuradas
serão descartadas em: 10/08/2015

Goiania, 12/05/2015

QUÍMICO RESPONSÁVEL

Anexo c - Resultados da análise por absorção atômica realizada pela FUNMINERAL do extrato lixiviado e do extrato solubilizado das argamassas incorporadas com resíduos de quartzito.

BOLETIM DE ANÁLISE

Nº BOLETIM	23646 / 2015	TIPO AMOSTRA	SOLUÇÃO
CLIENTE	UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE	PREPARAÇÃO	
RESPONSÁVEL	André L. Fiquene de Brito	ATAQUE	
TIPO SERVIÇO	Particular	LABORATÓRIO	<input type="checkbox"/> PA <input type="checkbox"/> AA <input type="checkbox"/> EO <input type="checkbox"/> FA <input checked="" type="checkbox"/> VU <input type="checkbox"/> RX

Data de Recebimento 05/05/2015

Identificação	As	SiO2					
	mg/l	mg/l					
Am-01-Lixiviação	< 0,010	12,3					
Am-02-Lixiviação	< 0,010	0,88					
Am-03-Solubilização	< 0,010	0,66					
Am-04-Solubilização	< 0,010	1,88					

Total de Amostras

4

Obs.

sameavalensca@yahoo.com.br