



Ministério da Educação

**Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura**

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE EM ARGAMASSA

CAROLINE MATEUS BANDEIRA

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2017



Ministério da Educação

**Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura**

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE EM ARGAMASSA

CAROLINE MATEUS BANDEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a Ana Carolina P. dos Santos.

Coorientador: Prof^o. Dr^o Marcelo G. Honnicke.

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me permitido chegar até aqui, ter me ajudado a encontrar e manter a fé e esperança em meu coração.

Meu enorme agradecimento à minha orientadora, a Professora Doutora Ana Carolina Parapinski dos Santos, por todos os anos de aprendizagem, não apenas orientação científica, mas também pessoal. Pela motivação, carinho e ensinamentos transmitidos.

Ao meu coorientador, o Professor Doutor Marcelo Gonçalves Honnicke, por toda paciência, gentileza, seriedade e dedicação, que me guiou durante muitas etapas até então desconhecidas durante a elaboração deste trabalho.

Gostaria de agradecer à minha família pelo apoio, amor e carinho. Meus pais, Celio e Auzinete, que venceram as dificuldades da vida, e nunca permitiram que nada faltasse às suas filhas, minha eterna gratidão a vocês. Minha irmã Karine, por ser minha melhor amiga desde os 4 anos.

De igual forma, ao meu amado Andrey, pela paciência, suporte, companheirismo, amor e carinho ao longo destes anos.

Minhas amigas de longa data Karina, Marli e Nathalia, apesar das eventuais distâncias, muito obrigada por se manterem presentes na minha vida.

Os colegas de curso, desde a turma de 2010 até os companheiros de finalização do curso, em especial Aleksey, Bruna, Eduardo, Fernando e Meire, obrigada pelas memórias. Aos companheiros João Lucas e Paulo que auxiliaram nos ensaios deste trabalho. Minha admiração e respeito aos colegas estrangeiros que enfrentaram essa jornada em conjunto, pela superação linguística, distância de casa, e todas as dificuldades enfrentadas, em especial Edgar, Elber, Jairo, Jaime, Jeniffer, Jorge, Liz, M^a Alejandra, Paula e Victor.

Obrigada à turma de Engenharia Civil de 2014 da *Waterford Institute of Technology*, que me fizeram sentir parte da turma, em especial à Clodiagh e família, por terem me acolhido diversas vezes, pelos finais de semana em Carrick-on-Suir, pelo respeito e pelas trocas culturais.

Gratidão aos meus *roomates* durante todo o intercâmbio, Camila e Roque, e às temporárias Gabriele e Nara, pelas conversas, risadas, comidas e passeios, a sorte não poderia ter sido maior. Todos os meus colegas de intercâmbio que fizeram parte da minha convivência durante aquele ano, e os que ainda mantemos contato.

Também um agradecimento especial à Embraer pela oportunidade de estágio de verão em Villepinte, à todos os envolvidos para que esse sonho fosse realizado, em especial ao meu chefe, Paulo Sabbadin e todo setor de *Material and Logistics Support*.

Meu enorme agradecimento à Rebeca e seus tios, Elisangela e Dario, por terem me acolhido e amparado durante os primeiros dias na França.

À Peace Construtora de Obras pela oportunidade de estágio, em especial aos Engenheiros Pedro e Semi, aos mestres de obra Francisco e José Maria, e à Liliane.

Ao Laboratório de Tecnologia de Concreto de Itaipu, por permitir que utilizasse seu espaço para a elaboração deste trabalho, em especial ao Engenheiro Fábio, e os técnicos, Claudinei, João Bernardino, Maurício e Nilo, pela ajuda e suporte.

À todos os professores que fizeram parte da minha formação, em especial aos que contribuíram, seja com sugestões ou auxiliando na execução, para que este trabalho fosse realizado com sucesso. São eles os professores Aref, Edna, Gislaine, Rafael, Rodrigo Basso e Rodrigo Lameiras. Sem vossas contribuições este trabalho não seria possível.

Meu agradecimento à CAPES pela concessão de bolsa de estudos para a realização do intercâmbio; à Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica; ao CEASB pelo aprendizado; à Unila pela oportunidade de estudos.

Ao longo destes anos, contei com o apoio e colaboração de muitas pessoas, à todos aqueles que de alguma forma contribuíram ou fizeram parte desta jornada, meu muito obrigada.

RESUMO

O resíduo de corte de mármore é um grande problema ambiental devido a deposição inapropriada ao redor das jazidas. Isso ocorre com frequência, por exemplo na região da Comarca Lagunera, México. Assim, este trabalho tem por objetivo analisar a incorporação de resíduos de mármore na produção de argamassas, assegurando as propriedades necessárias para sua posterior utilização em concretos. Para isso foram estudados diferentes traços de argamassa com a incorporação de frações de 0%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo em relação ao peso da areia. Foram analisadas a micro e macroestrutura das amostras de acordo com os seguintes ensaios: i) Microestrutura: Difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX); ii) Macroestrutura: ensaio de mesa de consistência para estado fresco, e resistência à compressão, para estado endurecido. Para as análises, foram produzidas amostras com dois tipos de cimento, CPV (cimento de alta resistência inicial) e CPIV (cimento com adições pozolânicas). O acompanhamento no DRX se deu de forma contínua nas primeiras 24 horas, para observar o surgimento de diferentes estruturas cristalinas, e posteriormente nas idades de 3, 7 e 28 dias. Estas mesmas idades foram utilizadas para determinar as propriedades mecânicas das argamassas. Através dos resultados foi possível observar que a adição do resíduo diminuiu inicialmente a trabalhabilidade da argamassa na adição da primeira proporção, porém a argamassa se torna mais trabalhável conforme aumentou-se a proporção de resíduo. Foi possível ainda, verificar que a resistência à compressão da argamassa aumentou cerca de 30% utilizando cimento CPV. Com isso pode-se concluir que a incorporação de resíduo é benéfica nas proporções analisadas.

Palavras-chave: Argamassa, resíduo de corte de mármore, DRX, MEV.

ABSTRACT

The marble cutting residue is a major environmental issue due to improper deposition around the deposits. This occurs frequently, for example in the region of Comarca Lagunera, Mexico. Thus, this work has the objective to analyze the marble residues' incorporation in the mortars' production, assuring the necessary properties for its later use in concretes. Different mortars' mixes were studied with the residue fractions of 0%, 5%, 7.5% and 10% incorporation in relation to the sand's weight. The samples micro and macrostructure were analyzed according the following tests: i) Microstructure: X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF); ii) Macrostructure: consistency table test for fresh concrete condition, and compressive strength, for hardened condition. The analyzed samples were produced with two types of cement: CPV (high early strength Portland cement) and CPIV (cement with pozzolanic additions). The XRD measures occurred continuously in the first 24 hours, to observe the appearance of different crystalline structures, and later at the ages of 3, 7 and 28 days. These same ages were used to determine the mortars' mechanical properties. The results showed that the residue's addition initially reduced the mortar's workability when the 5% of sand was replaced for the residue, but the mortar became more workable as the residue's proportion was increased. It was also possible to verify that the compressive mortar's strength increased by 30% using CPV cement. It can be concluded that the residue incorporation is beneficial in the proportions analyzed.

Keywords: Mortar; marble residue; XDR; SEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Volume de produção de rochas dimensionáveis no México	15
Figura 3.2. Consumo mexicano de mármore	15
Figura 3.3. Cores do mármore	18
Figura 3.4. Principais afloramentos rochas carbonatadas com ao menos uma carste	19
Figura 3.5. Mapa de jazidas de mármore no México	20
Figura 3.6. Processo de fabricação do Mármore	21
Figura 3.7. Difração do pó de mármore	22
Figura 3.8. Microscopia eletrônica de varredura contendo pó de mármore como substitutivo do cimento (E = etringitas; CH = Hidróxido de cálcio; CSH = Silicato de cálcio hidratado; V = vazios)	24
Figura 4.1. Fluxograma da metodologia aplicada à caracterização dos materiais	27
Figura 4.2. Equipamento utilizados para realizar a granulometria do resíduo a) Autopícnômetro Quantachrome Ultrapyc 1200e b) Bancada automatizada Polyperm 100 e c) Analista de dimensão de partículas Cilas 1090	27
Figura 4.3. Difrátômetro de raios-X Panalytical Empyre e porta amostras	28
Figura 4.4. Aparelho de fluorescência de raios-X Leybold.....	29
Figura 4.5. Fluxograma da metodologia aplicada à caracterização da argamassa	30
Figura 4.6. Molde, soquete e espátula	30
Figura 4.7. Misturador de argamassa e mesa de consistência.....	31
Figura 4.8. Fitas condutivas e Sputter coater quorum SC7620 com o plasma sendo aplicado sobre as amostras.....	32
Figura 4.9. Microscópio eletrônico de Varredura Zeiss EVO MA10	32
Figura 5.1. Granulometria da areia	35
Figura 5.2. Granulometria do RCM	36
Figura 5.3. Elementos encontrados no RCM	36
Figura 5.4. Difração de raios-X da amostra de resíduo de corte de mármore	37
Figura 5.5. Índices de consistência	38
Figura 5.6. Compostos encontrados na amostra CPV-0.....	39
Figura 5.7. Compostos encontrados na amostra CPIV-0.....	40
Figura 5.8. Compostos encontrados na amostra CPV-5.....	41
Figura 5.9. Compostos encontrados na amostra CPIV-5.....	42
Figura 5.10. Compostos encontrados na amostra CPV-7.5.....	43
Figura 5.11. Compostos encontrados na amostra CPIV-7.5.....	43
Figura 5.12. Compostos encontrados na amostra CPV-10.....	44
Figura 5.13. Compostos encontrados na amostra CPIV-10.....	45

Figura 5.14. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-0 com aproximações de 100 e 1500 vezes	46
Figura 5.15. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-0 com aproximações de 100 e 1500 vezes	46
Figura 5.16. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-5 com aproximações de 100 e 1500 vezes	47
Figura 5.17. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-5 com aproximações de 100 e 1500 vezes	47
Figura 5.18. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-7.5 com aproximações de 100 e 1500 vezes	48
Figura 5.19. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-7.5 com aproximações de 100 e 1500 vezes	48
Figura 5.20. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-10 com aproximações de 100 e 1500 vezes	49
Figura 5.21. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-10 com aproximações de 100 e 1500 vezes	49
Figura 5.22. Etringitas secundárias formadas na amostra CPIV-10	50
Figura 5.23. Resistência à compressão ao longo do tempo utilizando cimento CPIV com diferentes adições de resíduo	51
Figura 5.24. Resistência à compressão ao longo do tempo utilizando cimento CPV com diferentes adições de resíduo	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Densidade aparente, composição química (%), área específica superficial e porosidade dos componentes	22
Tabela 4.1. Dosagens utilizadas	29
Tabela 4.2 Ensaio realizados	33
Tabela 5.1. Porcentagem retida acumulada da areia	35
Tabela 5.2. Índice de consistência das argamassas.....	37
Tabela 5.3. Resistência média e desvio padrão das amostras	50

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo Geral	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. Impacto Ambiental	14
3.2. Resíduo de Mármore	18
3.2.1. Distribuição Geográfica dos Depósitos.....	18
3.2.2. Processo de Produção do Mármore	20
3.3. Ensaio de Caracterização dos Resíduos de Mármore.....	21
3.4. O uso do resíduo de mármore em argamassas e concretos	22
4. METODOLOGIA.....	26
4.1. Introdução	26
4.2. Caracterização dos Materiais	26
4.3. Dosagens Empregadas	29
4.4. Caracterização da Argamassa.....	30
4.5. Resumo dos Ensaio	32
5. RESULTADOS	34
5.1. Introdução	34
5.2. Caracterização dos Materiais	34
5.2.1. Caracterização da Areia	34
5.2.2. Caracterização do Resíduo de Corte de Mármore (RCM)	35
5.3. Consistência no Estado Fresco	37
5.4. Difração de Raios-X (DRX).....	38
5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	45
5.6. Resistência à Compressão no Estado Endurecido.....	50
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

A extração de minério gera elevadas quantidades de resíduos depositados ao redor de suas jazidas. Muitos desses minérios são extraídos para utilização na construção civil, como é o caso de algumas rochas como o granito, gnaisse e o mármore. Estas rochas são muito utilizadas, devido à grande quantidade de jazidas, encontradas em Portugal, Espanha, Turquia, Brasil e México, por exemplo.

A quantidade de resíduo poderia ser reduzida, caso novas tecnologias para extração fossem implementadas, de modo a gerar um menor impacto ambiental. Como tais soluções ainda não foram implantadas, o único caminho viável para reduzir esse problema é através de tratamento, reciclagem e reaproveitamento deste excesso. Leis e diretrizes ambientais foram elaboradas em vários países com o propósito de orientar os responsáveis pela extração de rochas minerais sobre como tratar e destinar esse material (UN, 1998).

Para tratar esse material, é necessário classificá-lo como perigoso ou não perigoso, identificando possíveis metais pesados. Estes metais podem ainda ser classificados de acordo com a sua origem, em resíduos de pós-consumo ou resíduos industriais (JOHN, 2000).

O resíduo proveniente da região La Lagunera, no México, será classificado para que seja avaliada a possibilidade de utilizá-lo, como material fino em argamassa e concreto. A princípio, por se tratar de sobras relativas apenas ao processo de corte de blocos de mármore na jazida, não existe contaminação por metais pesados, sendo classificado como resíduo industrial não perigoso.

O processo de corte de mármore em jazidas é responsável por gerar grandes quantidades de resíduos, que ainda não possuem contaminação química, diferente dos processos posteriores, que incluem o polimento e a transformação de blocos de mármore em placas utilizando compostos químicos com metais pesados. Os resíduos gerados a partir do processo de corte, por não possuírem elementos contaminantes, são depositados ao redor dessas jazidas, causando um problema ambiental para região, pois não existe finalidade para esse material. Assim, esse trabalho busca estudar uma utilização para esse resíduo, de forma a diminuir o seu impacto ambiental gerado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar os efeitos da incorporação de resíduos de mármore na produção de argamassas, como etapa inicial para a incorporação deste resíduo no concreto.

2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar tal objetivo, foram necessários atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a microestrutura do resíduo de corte de mármore e, posteriormente, da argamassa com ele produzida.
- b) Realizar ensaios no estado fresco e endurecido para obter as propriedades mecânicas características da argamassa sem adição de resíduo e com adição de diferentes proporções.
- c) Estudar a influência da adição de diferentes proporções de resíduo de corte de mármore, tanto em relação à sua microestrutura, quanto à sua macroestrutura, com diferentes tipos de cimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentada a pesquisa bibliográfica realizada para servir como referencial e motivação desse estudo. Assim, essa revisão foi subdividida através de três principais aspectos, o impacto ambiental gerado pela extração de mármore, o resíduo de mármore, e ensaios para caracterização desse resíduo.

O mármore é uma das rochas mais empregadas na construção civil (MACIEL FILHO, 2007) e (QUEIROZ, 2009), assim, é de suma importância para esse trabalho ter conhecimento da localização geográfica das jazidas de exploração, bem como o processo de beneficiamento do mármore, e ainda, os ensaios empregados para caracterizar os resíduos gerados por esse processo.

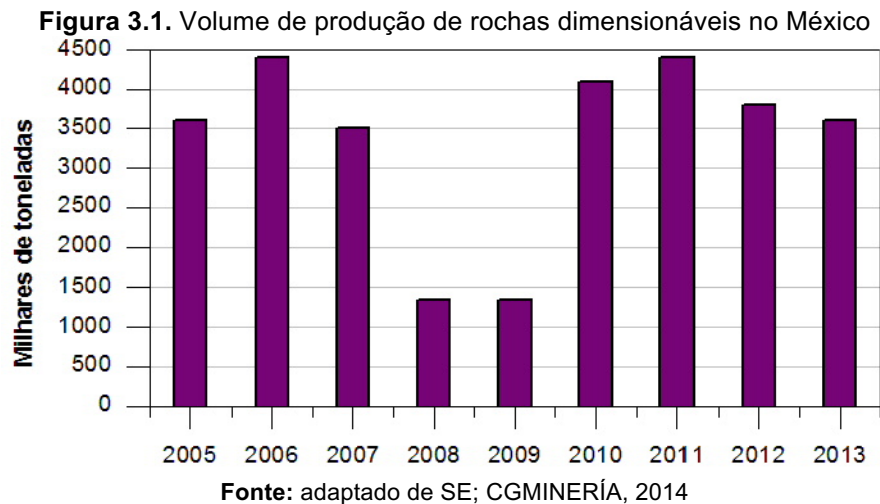
3.1. Impacto Ambiental

A produção de minério gera depósitos de resíduos de rochas, que são frequentemente localizados próximos à escavação para mineração, e, conforme a mineração se expande, mais espaço é necessário para o armazenamento de resíduo do corte das rochas (TRUSONIC, 2012).

Dentre as rochas exploradas em jazidas encontra-se o mármore, que de acordo com a Lei Mineira Mexicana, não é necessária concessão de licença para sua extração, e sua retirada é de responsabilidade do proprietário do terreno, seja através de poço ou pedreira. Essa forma de extração é chamada de mineração social, por se tratar de mineiras de pequeno e médio porte, e ainda por ser a única fonte possível de renda de certas comunidades e regiões (SE; CGMINERIA, 2015).

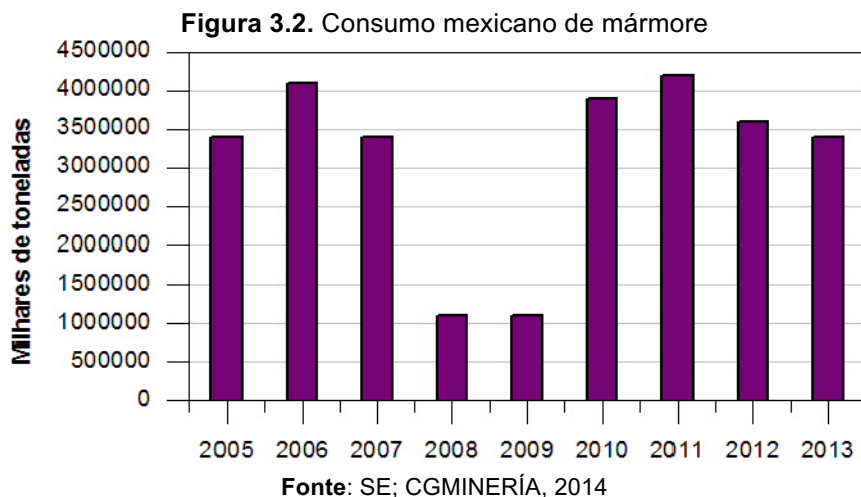
Como resultado, muitos depósitos de resíduo acabam sendo encontrados não apenas em grandes pedreiras, mas também em zonas residenciais, visto que qualquer dono de terras que possua uma jazida de mármore pode fazer sua extração, ainda que não possua técnicas e ferramentas apropriadas. Isso pode gerar ainda mais desperdício de material.

De acordo com SE e CGMINERÍA (2014), foi estimado em 2013 uma produção de rochas dimensionáveis no México de 3,5 milhões de toneladas, um valor 6,72% menor em relação ao ano anterior, porém ainda altamente significativo, pois no mesmo ano, os Estados Unidos, comercializaram cerca de 2,17 milhões de toneladas das mesmas rochas. Na Figura 3.1, é possível observar a variação de produção de rochas dimensionáveis desde 2005 até 2013.



Essas rochas dimensionáveis, são uma classe de rochas, cuja composição e constituição permitem o corte e/ou a laminação em figuras geométricas determinadas (SGM; CGMINERÍA; SE, 2008).

Quase toda a produção de rochas dimensionáveis foi destinada ao consumo mexicano (aproximadamente 3,3 milhões de toneladas), enquanto apenas 252 mil toneladas foram utilizadas como produtos de exportação (6,68%). Deste valor, a maior parte da exportação, cerca de 67% corresponde à exportação de mármore (SE; CGMINERÍA, 2014). Na Figura 3.2 é apresentado os valores em milhões de toneladas do consumo mexicano de mármore.



Informações sobre quantidades geradas de resíduo a partir do processo de produção de mármore são muito incertas e difíceis de serem encontradas nas bibliografias, especialmente às relacionadas ao México. Muitos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) elaborados pelas mineradoras, apresentam formas de armazenamento ou de diminuir o impacto gerado pelo resíduo, mas não apresentam quantidades depositadas no ambiente.

No entanto, no México a estimativa é que o setor de mineração produza um grande volume de resíduos, sendo geradas até 10 vezes mais a unidade de minério extraída. Além disso, esses minérios podem conter itens potencialmente perigosos que representam um elevado risco para a população, o ambiente e recursos naturais, pois a composição desses resíduos pode variar de acordo com a mineralogia do depósito e o processo de retirada empregado (SEMARNAT, 2011).

Todavia, estudos realizados na Espanha, mostram valores mais aproximados em relação à quantidade de resíduo gerado. Por exemplo, o corte de 3000 m³ produzem mais de 600 toneladas de resíduo. Anualmente, estima-se que sejam geradas cerca de 28000 toneladas, ou seja, 100 toneladas por dia (RUIZ, 2004).

Tendo em vista que em 2013 apenas o estado de Durango extraiu cerca de 1700 toneladas de rochas ornamentais, dentre as quais estão o granito e o mármore (SE; SGM, 2014), é possível mensurar quantas toneladas de resíduo são gerados por ano. Ademais, o estado está incluso nas principais regiões produtoras na República Mexicana, localizadas ao longo da encosta norte do eixo vulcânico (SE; CGMINERIA, 2015).

Essa grande geração de resíduos no setor de extração de mármore, acaba causando uma forte degradação do meio ambiente urbano, principalmente quando se trata da extração 'caseira'. Já as explosões utilizadas pelas grandes mineradoras, causam alterações geomorfológicas, indução de processos erosivos e importantes alterações na rede de drenagem (SÁNCHEZ, 2002).

De acordo com Sánchez (2002), boa parte dos problemas ambientais gerados em relação à atividade de mineração, derivam das dificuldades técnicas que o próprio setor padece. Os principais impactos ambientais que podem ser detectados são a contaminação atmosférica por pós e gases, a contaminação de águas superficiais, a contaminação de aquíferos, a eliminação ou destruição de habitats, a eliminação da cobertura vegetal, a alteração dos processos ecológicos, a indução de riscos de deslizamento e a aceleração de processos erosivos.

Assim, na tentativa de reduzir a quantidade de resíduos gerados na extração de mármore, leis e pesquisas científicas tomaram esse aspecto como objetivo principal, dando orientações e tentando achar finalidades para tais resíduos na construção civil.

Como exemplo de lei, têm-se os planos de gestão de resíduos, descritos na norma mexicana NOM-157, que são instrumentos que promovem o aproveitamento dos resíduos por sua utilização como insumos nas atividades produtivas, e limitando a disposição para aqueles cuja recuperação ou tratamento não é economicamente viável, tecnologicamente factível e ambientalmente saudável (SEMARNAT, 2011).

Em outros países além do México, como é o caso da Turquia, foi observado que a proporção de desperdício de mármore nas pedreiras durante a extração está entre 40 e 60%, sobre a produção em volume, sendo que o índice de produtividade por bloco está entre 10% e 20%. Ainda que essa produtividade seja muito baixa, a extração é feita, pois existe demanda, por menor que seja a peça (ÇELIK; SABAH, 2007).

Em síntese, é importante observar que a indústria de mineração em todo o mundo é responsável por uma grande produção de resíduos a céu aberto, e muitas vezes sem tratamento específico, por não ter manejo correto e sequer mão-de-obra especializada. O México, possui um agravante, pois, como já previamente mencionado a lei permite que a exploração do minério seja feita por qualquer pessoa que seja dona do terreno onde esteja localizada uma jazida de mármore.

O tempo de vida útil de um ponto de exploração mineiro, é de apenas 10 anos, visto que tal projeto se tem em função da disponibilidade e qualidade do material, bem como o preço em mercado (Compañía Minera de Atocha, 2006), enquanto que uma planta de extração de mármore possui cerca de 50 anos (TECNOBRICK, 2004).

Como, na maioria das vezes a empresa é proprietária do terreno onde irá ser explorada a jazida de mármore, não se contemplam mecanismos para restituição da área depois de alcançado o tempo de vida útil do projeto. Ainda existe um sério problema sobre as emissões de partículas de pó na atmosfera no canteiro. Este pó não é emitido apenas à atmosfera, mas também é catalogado como resíduo sólido industrial, uma vez que os depósitos dos restos dos processos de extração não possuem finalidade (TECNOBRICK, 2004).

De acordo com a exploradora de minério TECNOBRICK (2004), localizada na cidade de Gómez Palacio, estado de Durango, região Lagunera, cerca de 1600 toneladas de mármore são extraídas por mês, em uma área de 7 hectares. A lei ambiental mexicana exige que um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) seja feito pelas mineradoras, de forma a identificar possíveis indicadores de impactos, e as medidas que serão tomadas para mitigar tais impactos. Dessa forma, a empresa propôs soluções como, por exemplo, em relação ao pó emitido na atmosfera: devem ser instalados equipamentos adequados para conter o excesso de pó provenientes do processo de exploração, bem como cobrir com lonas ou materiais resistentes o material triturado localizado nos pátios da empresa, para evitar que, em épocas de vento, o pó se dissipe no ar.

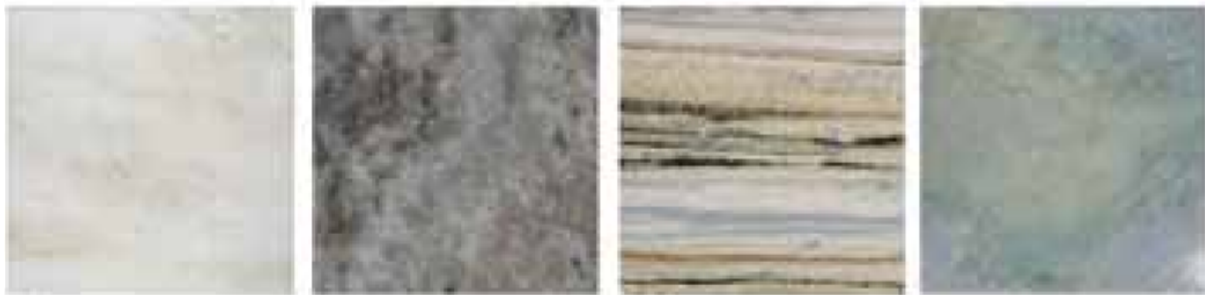
Apesar de medidas para evitar contaminação do meio ambiente serem tomadas pelas mineradoras, tais ações não determinam finalidade para o resíduo proveniente da extração, senão apenas, uma forma de evitar maior contaminação, principalmente do ar.

3.2. Resíduo de Mármore

O mármore é uma rocha metamórfica, constituída basicamente por calcita. Rochas metamórficas são criadas quando submetidas ao aumento de pressão, temperatura e ação de fluídos mineralizantes, também conhecidos como agentes de metamorfismo. Nesse caso, o calcário sofre tal processo, de tal maneira que se forma o mármore. Como se trata de uma rocha que ocupa grandes volumes, é ideal que o material esteja disponível na região da obra a ser utilizada com fins ornamentais, diminuindo o custo de transporte, e evitando problemas que possam comprometer a peça (MACIEL FILHO, 2007).

Esse tipo de rocha quando em processo de metamorfismo, sofre mudanças na forma, estrutura física e química dos materiais existentes, ainda que não haja mudança na composição química, mas sim em sua estrutura cristalina. As cores do mármore são bastante variáveis, podendo ser encontradas nas cores branca, cinza, rósea, preta ou esverdeadas, conforme apresentado na Figura 3.3 (QUEIROZ, 2009).

Figura 3.3. Cores do mármore



Fonte: CPRM, 2013

Com o objeto deste estudo definido, será apresentada na próxima seção, a distribuição geográfica do material tanto no mundo e especificamente no México. Em seguida, será explicado como é feito o processo de extração do mármore. Para finalizar esse tópico apresenta-se a utilização do resíduo de mármore na produção de argamassa.

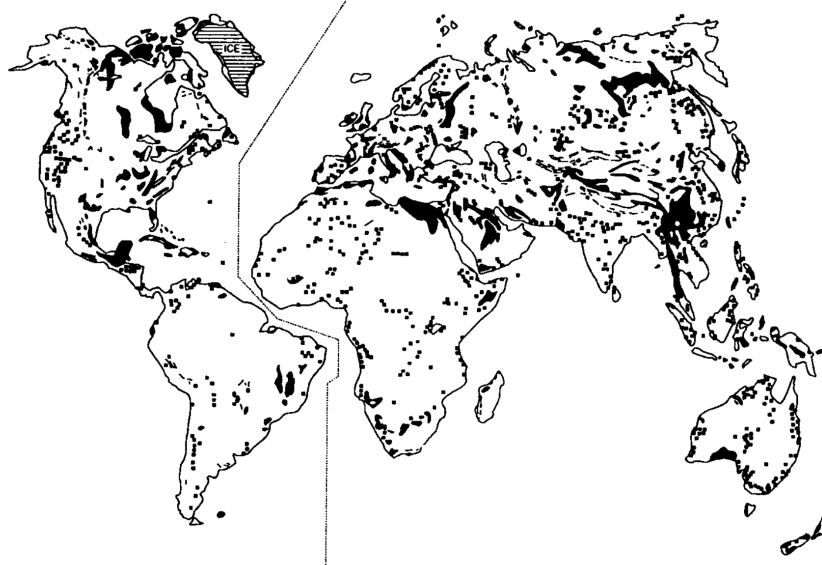
3.2.1. Distribuição Geográfica dos Depósitos

Calcário, dolomita e mármore são rochas carbonáticas, as principais formadoras de carste, que são um tipo de formação rochosa, formada por calcário, gesso e dissolução de outras rochas. Os minerais associados com esse carste, tem sido explorados no mundo há muitos anos, sendo muitas vezes explorada no próprio carste (LANGER, 2001).

Apresenta-se na Figura 3.4, os principais afloramentos de rochas carbonáticas com ao menos um carste. Apesar de não ter sido mostrado exatamente o objeto de estudo dessa pesquisa, que são as jazidas de extração de mármore, é possível ter uma noção da

dimensão da exploração do mármore no mundo, visto que jazidas de mármore não necessariamente possuem a formação de carste em sua região.

Figura 3.4. Principais afloramentos rochas carbonatadas com ao menos uma carste

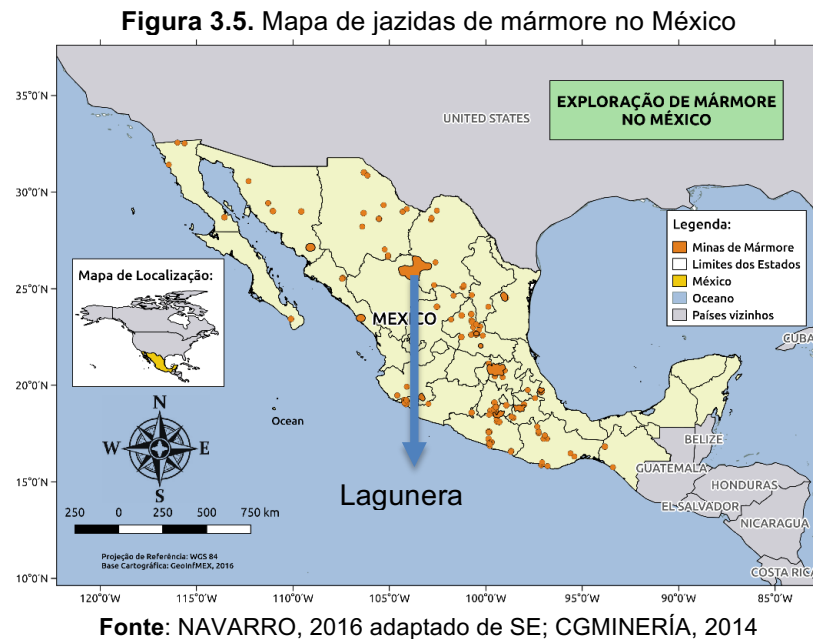


Fonte: LANGER, 2001

Na região onde está localizado o México, é possível observar que existe uma grande superfície de afloramentos rochosos compostos por rochas carbonatadas que são potencialmente rochas dimensionáveis para a exploração. Nessa região existem zonas produtoras de alta importância, nas quais realizam-se desde os processos de exploração até a finalização do produto (SE; CGMINERÍA, 2014).

As principais regiões produtoras de mármore no México se localizam ao longo da vertente norte do eixo vulcânico, se tratando de uma enorme extensão territorial que abrange essa área, refletindo assim o grande potencial produtivo do país. Essa região é dividida em duas zonas, sendo a primeira que compreende a região chamada La Laguna, que se localiza no limite do estado de Durango, Coahuila y Zacatecas, e a segunda região compreende a grande parte do estado de Puebla (SE; CGMINERIA, 2014).

Tais zonas são apresentadas na Figura 3.5, além de regiões com potencial desses materiais, a partir de informações geológicas regionais disponíveis. Na região de La Laguna, especificamente nas serras Campana e Tlahualilo, localizam-se a maior parte das rochas dimensionáveis, onde são extraídos bloco de cor creme claro, com estratos de até 3 metros (SE; CGMINERÍA, 2014).



Existem outras zonas além das duas zonas principais. Essas regiões estão localizadas nos estados de Querétaro, Hidalgo, Oaxaca, San Luis Potosí e Guerrero (SE; CGMINERÍA, 2014).

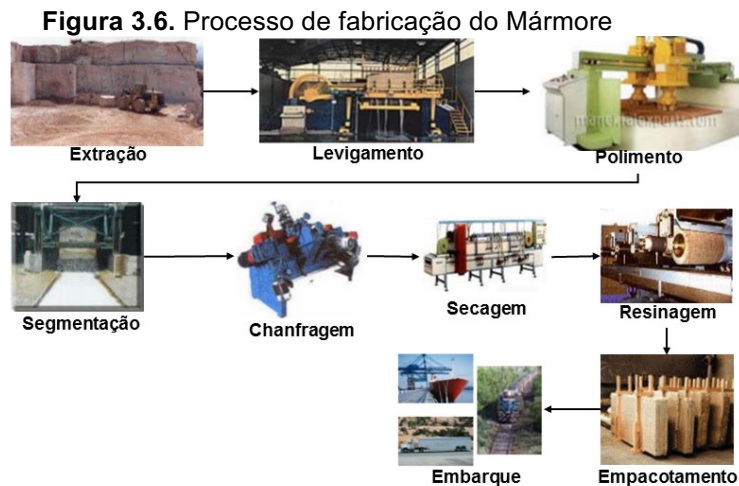
Conforme descrito na seção 3.1, o México produziu em 2013, aproximadamente 3500 toneladas de mármore. De acordo com SE e SGM (2014), o estado de Durango, foi o principal estado colaborador para que a produção anual atingisse tais valores. Foram produzidas 1757,816 toneladas, pouco mais de 50% da produção nacional total.

Dessa forma, é possível entender que a região da La Lagunera, em especial o estado de Durango, são os locais que mais sofrem com o impacto ambiental gerado pelo depósito de resíduos, bem como a sua dissipação na atmosfera, em toda a república mexicana.

3.2.2. Processo de Produção do Mármore

O método de extração de minério é definido a partir de diversos fatores, que incluem as características físicas e geológicas da jazida de minério; condições sociais e ambientais; condições financeiras; condições técnicas de lavra; tipo e espessura do capeamento, que é o conjunto de solos e rochas que cobrem a jazida de minério (BELO SUN MINERAÇÃO LTDA., 2012).

O processo produtivo mais usual no México se subdivide em sete etapas: a extração, laminação, polimento, cortes, retificação, secagem, enceramento, empacotamento e embarque para o consumidor final (SE; CEMINERÍA, 2014). Esse processo de fabricação do mármore é apresentado na Figura 3.6, onde as etapas de retificação, secagem e enceramento estão em destaque, pois podem ou não ter necessidade.



Fonte: Adaptado de SE; CGMINERÍA, 2014

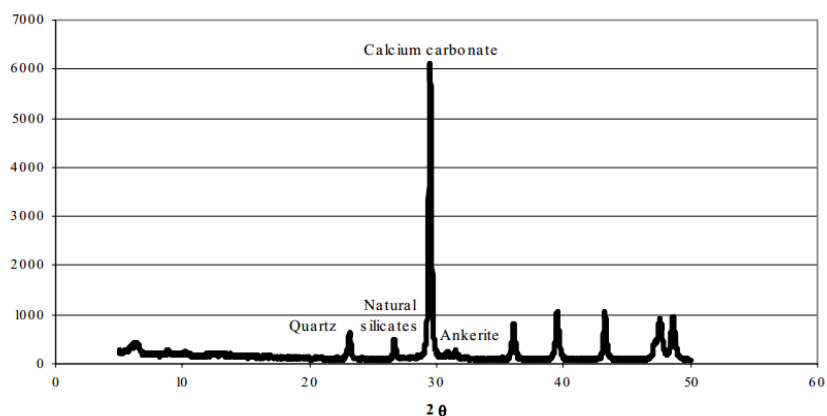
A primeira etapa da exploração, a extração, é feita cortando um bloco a partir da jazida, com auxílio de serras com disco diamantado. Em seguida, o bloco é enviado para que seja feito o levigamento, ou seja, que sejam feitos os cortes para que a rocha já possua dimensões comerciais. Posteriormente, as lâminas são polidas com a finalidade de abrihantá-las, utilizando abrasivos e água. Em seguida a rocha é segmentada de acordo com as dimensões solicitadas pelo cliente. As etapas de chanfragem, secagem e resinagem serão feitas apenas quando solicitadas. Por fim, o mármore é empacotado e enviado para o comércio (SE; CGMINERÍA, 2014).

Das etapas apresentadas no parágrafo anterior, a mais importante para esse estudo é a de extração. Isso porque, a partir desse processo, é obtido o resíduo utilizado para essa pesquisa. Esta é uma das únicas etapas em que produtos químicos não são utilizados para transformar a rocha.

3.3. Ensaios de Caracterização dos Resíduos de Mármore

A possibilidade de utilização do resíduo na construção civil, depende diretamente da caracterização do material. A caracterização tem por objetivo determinar as propriedades do material que será utilizado, por exemplo, sua composição química, periculosidade, granulometria e área superficial.

No estudo de Carinaldesi et al (2005), foram realizadas medidas de difração de raios-X, pelo pó de mármore. Como pode ser observado na Figura 3.7, foram encontrados carbonato de cálcio, quartzo e sílica natural.

Figura 3.7. Difração do pó de mármore


Fonte. CORINALDESI et al, 2005

De acordo com estudos realizados por Salavessa et al (2013), medidas de difração de raios-X foram realizadas para definir a composição química de diferentes materiais, entre eles o pó de mármore, apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Densidade aparente, composição química (%), área específica superficial e porosidade dos componentes

	Areia fina	Pó de mármore	Fino de calcário
Densidade (kg/cm ³)	1422	771	1518
CaCO ₃	-	99.00	85.70
CaSO ₄	-	-	-
SO ₃	-	-	0.70
CaO	-	-	-
MgO	-	0.40	1.40
SiO ₂	94.70	0.30	5.60
Al ₂ O ₃	4.20	0.10	2.40
Fe ₂ O ₃	-	-	3.00
CO ₂	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-
K ₂ O	-	-	-
TiO ₂	0.90	-	0.50

Fonte: Adaptado de SALAVESSA et al, 2013

3.4. O uso do resíduo de mármore em argamassas e concretos

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos podem ser classificados em duas classes, sendo a Classe I – Perigosos, e Classe II – Não Perigosos, e ainda esses não perigosos podem ser não inertes (A) ou inertes (B). No anexo H desta mesma norma, é possível observar que os resíduos de minerais não-metálicos são catalogados como resíduos não perigosos. No caso deste trabalho, o resíduo de corte de mármore, se trata de um resíduo não perigoso e inerte.

Por se tratar de um resíduo inerte, ele se torna passível de utilização na construção civil. Vários estudos foram realizados anteriormente utilizando resíduo de corte de mármore (RCM) aplicado a diversos produtos empregados na construção civil, como para produção de concreto (FELEKOGLU, 2007) (ALYAMAÇ; INCE, 2009) (SANTOS et al, 2012), ladrilhos (MONTERO et al, 2009) (SANTOS et al, 2012) (GUPTA et al, 2009), materiais asfálticos (AKBULUT; GÜRER, 2007) (KARASAHIN; TERZI, 2007) e argamassa (GÜNEYSI et al, 2009) (VARDHAN et al, 2015), utilizando-o como *filler* (ZHU; GIBBS, 2005) (TOPÇU et al, 2009) assim como na substituição de agregado (BINICI et al, 2008) (HAMEED; SEKAR, 2009) (HEBHOUB et al, 2011).

Um dos estudos mais antigos citados no parágrafo anterior é o de Zhu e Gibbs (2005), utilizaram calcários como filler em concreto auto adensável (CAA). Através dessa pesquisa foi notado que calcários poderiam ser utilizados satisfatoriamente na produção de CAA sem adição significativa de superplastificante, e ainda que em relação ao concreto vibrado convencionalmente. O mesmo foi encontrado por Felekoglu (2007), onde observou-se que a substituição de até 10% de cimento por RCM não afetaram a resistência à compressão do CAA.

Em contrapartida, Güneysi et al (2009) ao substituir cimento por pó de mármore e argamassas autocompactante, com proporções de 5, 10, 15 e 20%, notaram que quanto maior a adição de resíduo, maior a perda de resistência da argamassa, chegando a mais de 20% de perda de resistência em relação à argamassa sem adição de resíduo, feita com o propósito de comparativo de resultados. O mesmo foi observado por Topçu et al (2009), que inclusive sugere que seja feita uma substituição de no máximo 200 kg/m³ de cimento por resíduo de mármore.

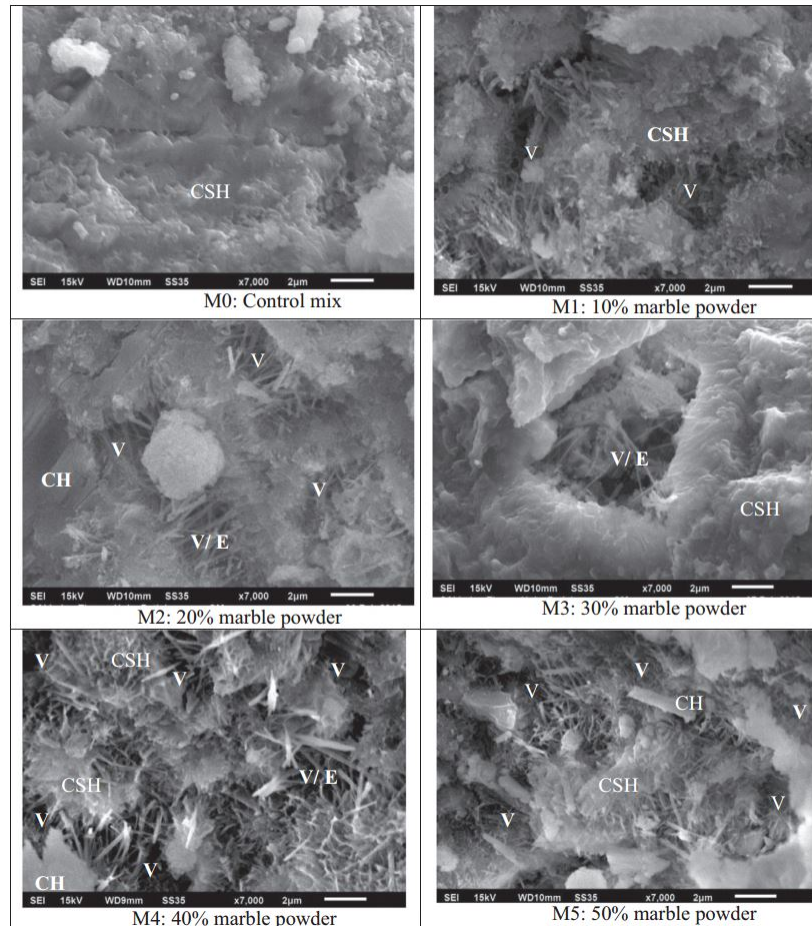
Já Corinaldesi et al (2010), produziu várias misturas de argamassa com a finalidade de avaliar o comportamento mecânico, e que foram testadas, utilizando relação cimento para areia 1:3, para a mesma relação água cimento, variando assim a trabalhabilidade. Resultados mostraram que a substituição de cerca de 10% da areia por pó de mármore, promove uma maior resistência à compressão com a mesma trabalhabilidade.

Hebhoub et al (2011) também observou o ganho de resistência em concretos com a substituição da areia por resíduo, porém a proporção de substituição avaliada como ideal nesse caso foi bem maior, chegando à 25%, porém havendo a necessidade de adição de água para melhorar a trabalhabilidade.

Estudos que levam em consideração além das propriedades mecânicas foram realizadas, como o feito por Vardhan et al (2015), onde é apresentada uma análise da microestrutura da argamassa com incorporação de pó de mármore como substitutivo do cimento. Os estudos indicaram que uma substituição de até 10% de resíduo de corte de mármore pode ser utilizada sem comprometer as características técnicas da argamassa.

Entretanto, proporções maiores indicam retardação na hidratação e uma microestrutura mais porosa, conforme pode ser observada na Figura 3.8, que apresenta as imagens obtidas a partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 3.8. Microscopia eletrônica de varredura contendo pó de mármore como substitutivo do cimento (E = etringitas; CH = Hidróxido de cálcio; CSH = Silicato de cálcio hidratado; V = vazios)



Fonte. VARDHAN et al, 2015

A partir dessa análise da microestrutura realizada por Vardhan et al (2015), foi possível observar que quanto maior a porcentagem de substituição de cimento por resíduo de corte de mármore, menos densa é a microestrutura da argamassa, apresentando mais vazios e cristais de etringita secundária se expandindo para preencher estes vazios. Na análise mecânica das argamassas, os autores obtiveram uma redução da resistência à compressão aos 28 dias de 45 MPa para 28 MPa, quando se aumenta a substituição de 10% para 50% de cimento por resíduo. Dessa forma o estudo afirmou que a formação de microestruturas menos densas podem ter afetado a resistência à compressão dessas argamassas.

A composição química do cimento é composta por C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF sendo essa nomenclatura uma forma abreviada, onde C= CaO, S= SiO_2 , A= Al_2O_3 , F= Fe_2O_3 e H= H_2O . A interação entre os íons de cálcio, sulfato, aluminato e hidroxila após alguns minutos do início

da hidratação do cimento dão origem às etringitas, que são cristais em forma de agulha. Algumas horas depois, surgem grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (CH) e pequenos cristais fribrosos de silicato de cálcio hidratado (CSH). Geralmente após alguns dias, a etringita se torna instável e se decompõe para formar o monossulfatoaluminato hidratado, porém, pode ocorrer a formação tardia de etringitas, e estas são chamadas de etringitas secundárias (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Assim, é possível ter embasamento para selecionar a metodologia a ser aplicada nesse trabalho, levando em consideração os trabalhos realizados anteriormente. Ensaio para caracterizar tanto o material quanto a argamassa foram selecionados levando em conta tanto a bibliografia, como também os equipamentos disponíveis para a utilização no decorrer do trabalho.

4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

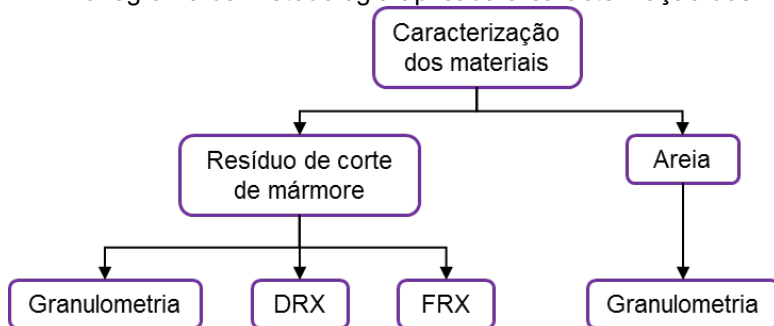
A metodologia utilizada para elaborar este trabalho envolveu duas etapas: a caracterização dos materiais a serem utilizados para a produção da argamassa, e a caracterização da própria argamassa. Para que isso fosse possível, foram realizadas as seguintes medidas: Difração de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), granulometria, consistência da argamassa para o estado fresco, e resistência à compressão para o estado endurecido.

4.2. Caracterização dos Materiais

Para a fabricação das argamassas foram utilizados dois tipos de cimento, areia comum e água, além do resíduo de corte de mármore. A seguir se especificam os materiais utilizados:

- Cimento Portland tipo CPIV de acordo com a NBR 5736 (ABNT,1991), composto com adição entre 15% e 50% de materiais pozolânicos, em relação a massa total de aglomerante, cuja resistência aos 28 dias é de 32 MPa.
- Cimento Portland tipo CPV segundo a NBR 5733 (ABNT,1991) de alta resistência inicial, composto por adição de até de 5% de material carbonático, cuja resistência à compressão é 34 MPa aos 7 dias.
- Resíduo de corte de mármore (RCM), proveniente da região da Lagunera, México, tendo sido retirado de depósitos localizados ao redor do ponto de extração.
- Agregado, constituído por areia média lavada extraída da região de Guaíra, noroeste do estado do Paraná. Sua composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).
- Água potável fornecida pela Sanepar, a concessionária local.

Com o propósito de classificar esses materiais utilizados para a produção das argamassas, foram realizadas medidas e ensaios de DRX, FRX e Granulometria.

Figura 4.1. Fluxograma da metodologia aplicada à caracterização dos materiais

O resíduo de corte de mármore, é um material muito pulverulento, por isso, é necessário empregar técnicas e equipamentos modernos para a determinação das propriedades granulométricas do material. Assim, foi solicitado à empresa Acil & Weber a análise do material, com utilização dos três equipamentos apresentados na Figura 4.2.

Inicialmente, foi determinado a densidade do material, utilizando o Autopicnômetro Ultrapyc 1200e da Quantachrome. (QUANTACHROME, 2016).

Foi realizada na bancada automatizada Polyperm 100, a determinação da finura pelo método de Blaine. O autopicnômetro obtém como resultado a densidade do material a ser analisado. Logo, é obtido como resposta a área da superfície específica, que se trata da área superficial de cada partícula do material, sendo que, quanto maior esse valor, mais fino o material (ACPINSTRUMENTS, 2016).

Por fim, para análise granulométrica do resíduo, foi utilizado o analista de dimensão de partículas Cilas 1090, desenvolvido para pesquisas que necessitam análise de alta resolução de micropartículas. As medidas podem ser realizadas no modo líquido ou seco, sendo que nesse caso foi utilizado o modo líquido, que identifica partículas de 0.02 até 500 μm . O resultado obtido através deste equipamento é a curva de distribuição granulométrica do material (CILAS, 2016).

Figura 4.2. Equipamento utilizados para realizar a granulometria do resíduo a) Autopicnômetro Quantachrome Ultrapyc 1200e b) Bancada automatizada Polyperm 100 e c) Analista de dimensão de partículas Cilas 1090

Fonte: QUANTACHROME, 2016; ACPINSTRUMENTS, 2016; CILAS, 2016

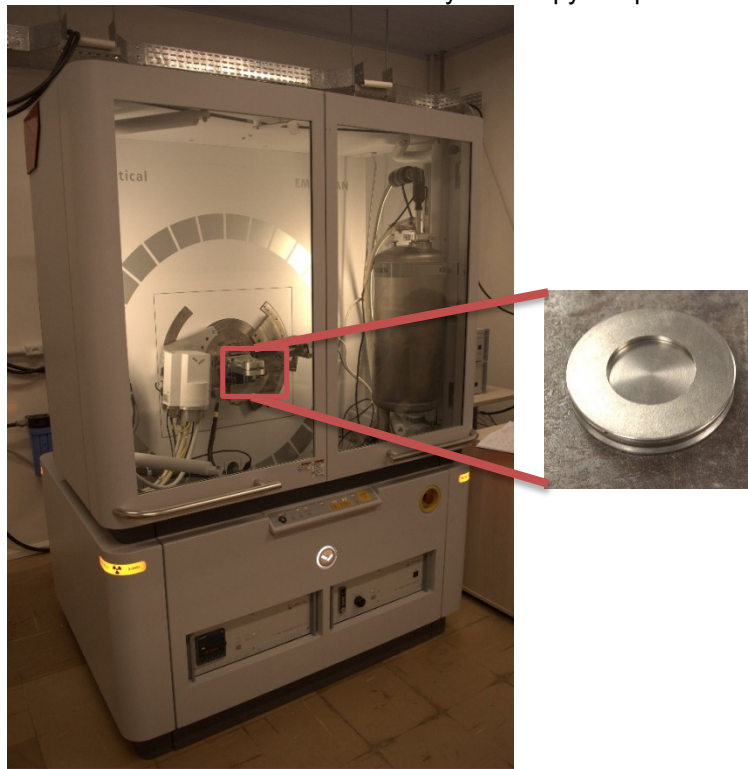
A composição granulométrica dos agregados miúdos da argamassa foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A fim de identificar a estrutura cristalina dos elementos constituintes do resíduo de corte de mármore, foi utilizado o Difratômetro de raios-X, da fabricante Panalytical, modelo Empyrean, com tubo de alvo de cobre (Cu), conforme mostrado na Figura 4.3. Esse equipamento foi utilizado também para identificar as mudanças de fase cristalina ao longo do tempo.

Esse equipamento é um difratômetro convencional, podendo ser utilizado para análise de materiais policristalinos, materiais monocristalinos e filmes finos. No caso dessa pesquisa serão analisados pós compactados (resíduo de corte de mármore) e sólido (argamassa). O resultado obtido através desse equipamento é um gráfico Intensidade x Ângulo (2Φ , onde Φ é o ângulo de difração). Com este equipamento é possível estimar a composição do material a partir dos picos de intensidade em determinado ângulo, e também ter uma ideia prévia dos componentes presentes nesse material, (PANALYTICAL, 2016).

As medidas de difração de raios-X (DRX) são realizadas por meio da inserção de uma pequena amostra do material a ser analisado no porta amostras, apresentado na Figura 4.3. O equipamento realiza a leitura dos ângulos difratados no software do equipamento instalado no computador para uso específico.

Figura 4.3. Difratômetro de raios-X Panalytical Empyre e porta amostras



Para realizar as medidas de fluorescência de raios-X foi utilizado um equipamento

Leybold, conforme Figura 4.4. Esse equipamento realiza a medida por fluorescência de raios-x, pelo método de energia dispersiva. O feixe de raios-X proveniente de um tubo de raios-X com alvo de Molibdênio (Mo), excitado em 30 kV, incide sobre a amostra. Um detector do tipo Si-PIN sensível à energia é utilizado para a medida das intensidades espalhadas pela amostra em diferentes energias (raios-X) característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra (NASCIMENTO FILHO, 1999).

Figura 4.4. Aparelho de fluorescência de raios-X Leybold



Uma vez caracterizados os materiais a serem utilizados para essa pesquisa, iniciou-se os ensaios de caracterização das argamassas.

4.3. Dosagens Empregadas

A dosagem principal utilizada para esse estudo é de 1:3 (uma parte de cimento, para três partes de areia), utilizando dois tipos de cimento diferentes: CPV e CPIV. Assim sendo, foram feitas substituições da areia, material inerte da composição, pelo resíduo de corte de mármore. As proporções substituídas são de 5, 7,5 e 10%. As proporções atribuídas a cada material de acordo com a dosagem para um litro de argamassa, é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Dosagens utilizadas

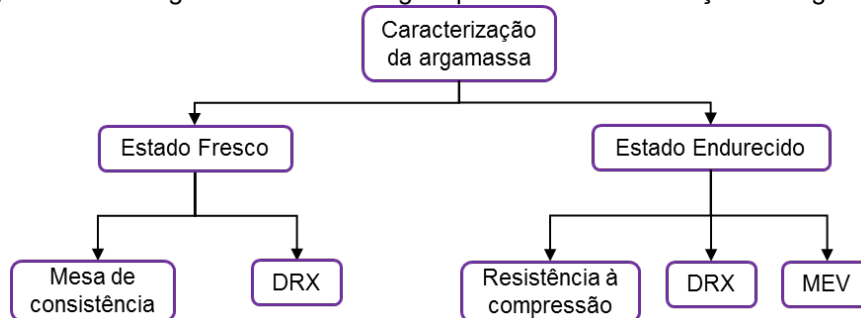
Amostra	CPV-0	CPIV-0	CPV-5	CPIV-5	CPV-7.5	CPIV-7.5	CPV-10	CPIV-10
Cimento (g)	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00
Areia (g)	1575,00	1575,00	1496,25	1496,25	1456,88	1456,88	1417,50	1417,50
Água (g)	288,75	288,75	288,75	288,75	288,75	288,75	288,75	288,75
RCM (g)	0,00	0,00	78,75	78,75	118,13	118,13	157,50	157,50

Com a definição dos traços utilizados nesse trabalho, foi possível avançar para o seguinte passo, que se trata da caracterização das argamassas.

4.4. Caracterização da Argamassa

Assim como para a caracterização dos materiais, para a caracterização da argamassa, foi realizado o ensaio de DRX tanto para o estado fresco, quanto para o endurecido. Além desse, foi feito ainda para o estado fresco o ensaio de mesa de consistência, e para o estado endurecido os ensaios de resistência à compressão e MEV, conforme mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5. Fluxograma da metodologia aplicada à caracterização da argamassa



Para realização do ensaio de resistência à compressão, seguiram-se as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007), com corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6. Molde, soquete e espátula



A argamassa preparada foi utilizada tanto para os ensaios de mesa de consistência quanto para o ensaio de compressão. A argamassa foi preparada em um misturador de eixo vertical, exibido na Figura 4.7. A moldagem para o ensaio de mesa de consistência foi realizada em três camadas de mesma altura, com a aplicação de 15, 10 e 5 golpes para cada camada, com nivelamento do topo. Para os ensaios de resistência de compressão, as amostras foram compactadas manualmente com soquete, sendo 15 golpes a cada um terço de camada. Os moldes foram conservados inicialmente em ambiente úmido durante 24 horas, e em seguida foram desmoldados e submergidos em um tanque de água com cal, até

que as idades de ensaios (3, 7 e 28 dias) fossem alcançadas. Para cada uma dessas idades foram produzidos três corpos-de-prova.

Foi realizado o ensaio de mesa de consistência de acordo com a NBR13276 (ABNT, 2016), para determinar a consistência normal da argamassa. O aparelho é composto por uma mesa horizontal lisa que recebe um movimento excêntrico, e ainda por um molde rígido troncônico e o soquete para compactação. Aplicam-se 30 golpes com o movimento da manivela do aparelho, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em 30 segundos. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais, após o abatimento. A mesa de consistência utilizada é apresentada na Figura 4.7.

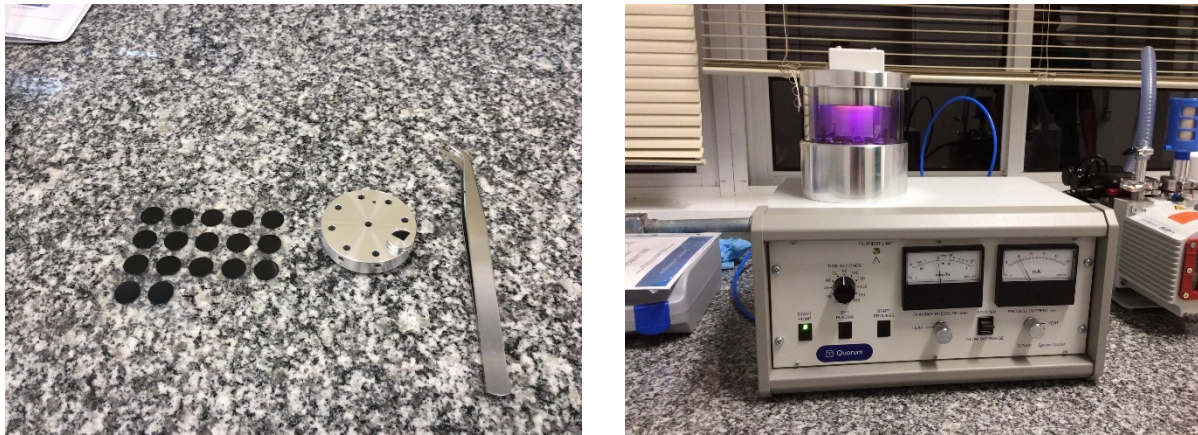
Figura 4.7. Misturador de argamassa e mesa de consistência



Por fim, foi realizado a microscopia eletrônica de varredura, que se trata de uma técnica capaz de produzir imagens em alta resolução de uma dada superfície. Para que as fotos sejam realizadas de forma adequada, as amostras devem ser condutivas. Como o objeto de estudo desse trabalho são materiais não condutivos, existem duas formas de torna-las condutivas. A primeira, é colando a amostra com uma fita condutiva no porta amostras, conforme apresentado na primeira imagem da Figura 4.8.

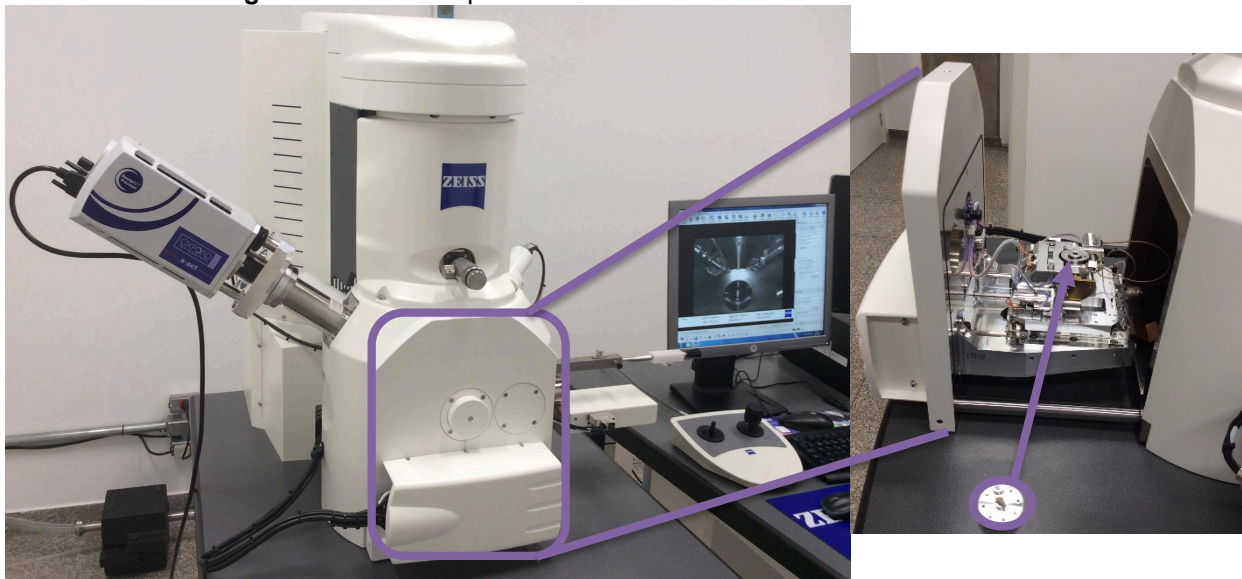
A utilização da fita condutiva se mostrou insuficiente, sendo necessário que um material condutivo fosse depositado nas amostras. Assim, foi feito a deposição de ouro/paládio nas amostras utilizando o Sputter coater quorum SC7620, que cria fortes campos elétricos e magnéticos a fim de confinar partículas de plasma carregadas na superfície da amostra, como é apresentado também na Figura 4.8.

Figura 4.8. Fitas condutivas e Sputter coater quorum SC7620 com o plasma sendo aplicado sobre as amostras



Com as amostras condutivas, foi possível realizar o MEV. Para isso foi utilizado o equipamento apresentado na Figura 4.9. As amostras são inseridas na câmara à vácuo, e quando o vácuo é atingido, é possível retirar as fotos com diversas aproximações, conforme exista a possibilidade de foco.

Figura 4.9. Microscópio eletrônico de Varredura Zeiss EVO MA10



Conforme apresentado acima, o equipamento possui uma câmara à vácuo onde o porta amostras, que pode conter até nove amostras, é encaixado para que as imagens foram obtidas.

4.5. Resumo dos Ensaios

Finalmente, nesse tópico é apresentado uma tabela resumo de todos os ensaios realizados para caracterizar tanto os materiais quanto as argamassas, de forma que seja

possível entender qual a influência da adição de diferentes proporções de resíduo na argamassa, conforme é mostrado na Tabela 4.2

Tabela 4.2 Ensaio realizados

	Granulometria	DRX	FRX	MEV	Mesa de Consistência	Resistência à Compressão
RCM	x	x	x			
Areia	x					
Argamassa		x		x	x	x

Tendo a metodologia estabelecida, e os ensaios realizados, no capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos, e a discussão sobre tais resultados.

5. RESULTADOS

5.1. Introdução

Uma vez realizada a metodologia proposta no capítulo 4, nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados correspondentes ao estudo de caracterização dos materiais utilizados na argamassa, através de ensaios de granulometria, medidas de fluorescência de raios-X (FRX), medidas de difração de raios-X (DRX) e imagens microscopia eletrônica de varredura (MEV). As medidas de FRX, DRX e MEV também foram executadas nas argamassas, além de consistência no estado fresco e resistência à compressão no estado endurecido. Em particular, foram analisadas as estruturas cristalinas e seus componentes nas diferentes amostras, assim como a variação da resistência ao longo do tempo.

Para que os objetivos sejam alcançados, em primeiro lugar, são apresentados os resultados dos estudos de caracterização dos materiais com o propósito de analisar a granulometria da areia, assim como do Resíduo de Corte de Mármore (RCM) e a sua área superficial e densidade. Nesse estudo foi observado o módulo de finura dos materiais.

Posteriormente, será apresentada a análise quantitativa da composição química do resíduo, através das medidas de FRX. A partir dos elementos químicos obtidos no ensaio anterior, foi analisado a presença das estruturas cristalinas, através das medidas de DRX, que foram realizados com as diversas amostras ao longo do tempo.

Finalmente, são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de consistência no estado fresco, e ainda a resistência à compressão no estado endurecido. A partir dos resultados obtidos nos ensaios aqui citados, é possível analisar a influência da adição de resíduo na macro e microestrutura da argamassa.

5.2. Caracterização dos Materiais

Nessa seção são apresentados e analisados os resultados referentes aos ensaios de caracterização dos materiais, que são eles a areia e o RCM. Para a caracterização da areia foi realizado o ensaio de granulometria. O RCM teve a sua granulometria, superfície específica e densidade determinados.

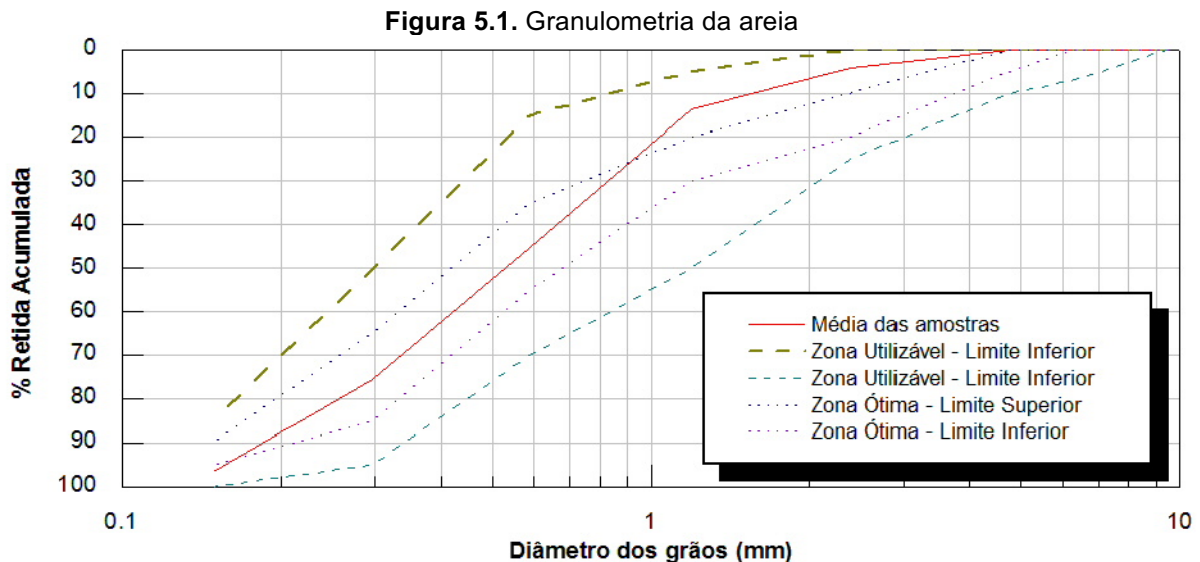
5.2.1. Caracterização da Areia

Os resultados do ensaio de granulometria da areia utilizada para a produção das argamassas estudadas são apresentados abaixo. Na Tabela 5.1 pode ser observado os valores médios de porcentagem retida acumulada por peneira da série normal.

Tabela 5.1. Porcentagem retida acumulada da areia

Peneira	% Retida Acumulada
4,75 mm	0.20
2,36 mm	4.14
1.18 mm	13.75
600 μm	45.12
300 μm	75.65
150 μm	96.67
75 μm	99.83
Fundo	100.00

A partir dos dados obtidos através do ensaio de granulometria, foi possível traçar a curva granulométrica, conforme apresentado na Figura 5.1. Na figura abaixo é possível visualizar ainda os limites determinados em norma para classificar a areia como utilizável ou ótima.

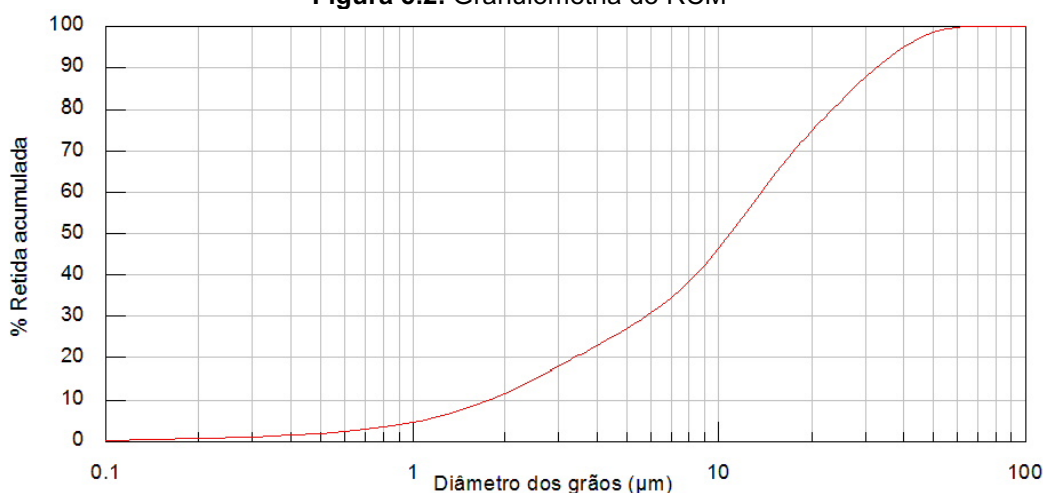


A dimensão máxima característica do agregado é de 600 μm , e o módulo de finura é de 2,36. A partir do gráfico anterior, é possível observar que pouco mais de 70% da granulometria da areia está inserida na zona ótima de distribuição granulométrica, e os 30% restantes estão localizados na zona utilizável.

Assim, é possível afirmar que a areia fornecida na região de Foz do Iguaçu é classificada como “utilizável”, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) para a produção de argamassas e concretos.

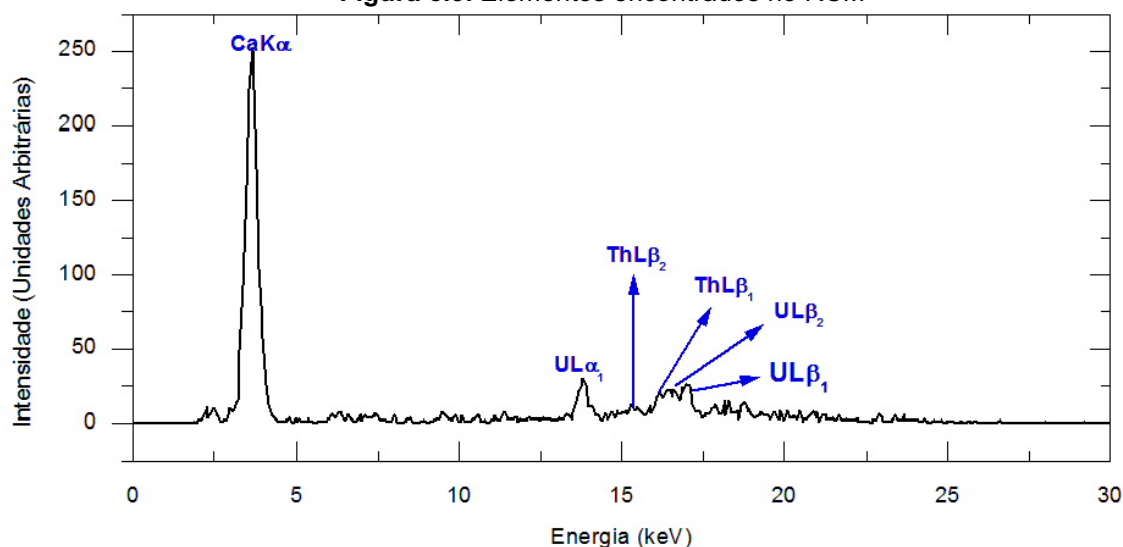
5.2.2. Caracterização do Resíduo de Corte de Mármore (RCM)

Na Figura 5.2 é possível observar a curva granulométrica que compõe o RCM.

Figura 5.2. Granulometria do RCM

Como todo RCM é passante pela peneira 75 μm , o material é classificado como pulverolento. Ainda foram obtidos através dos ensaios o diâmetro médio do resíduo, sendo esse 14,26 μm , e a dimensão máxima característica do agregado, que é 32,68 μm . A densidade média do material é 2,7133 g/cm^3 , e sua superfície específica é 6,425 cm^2/g .

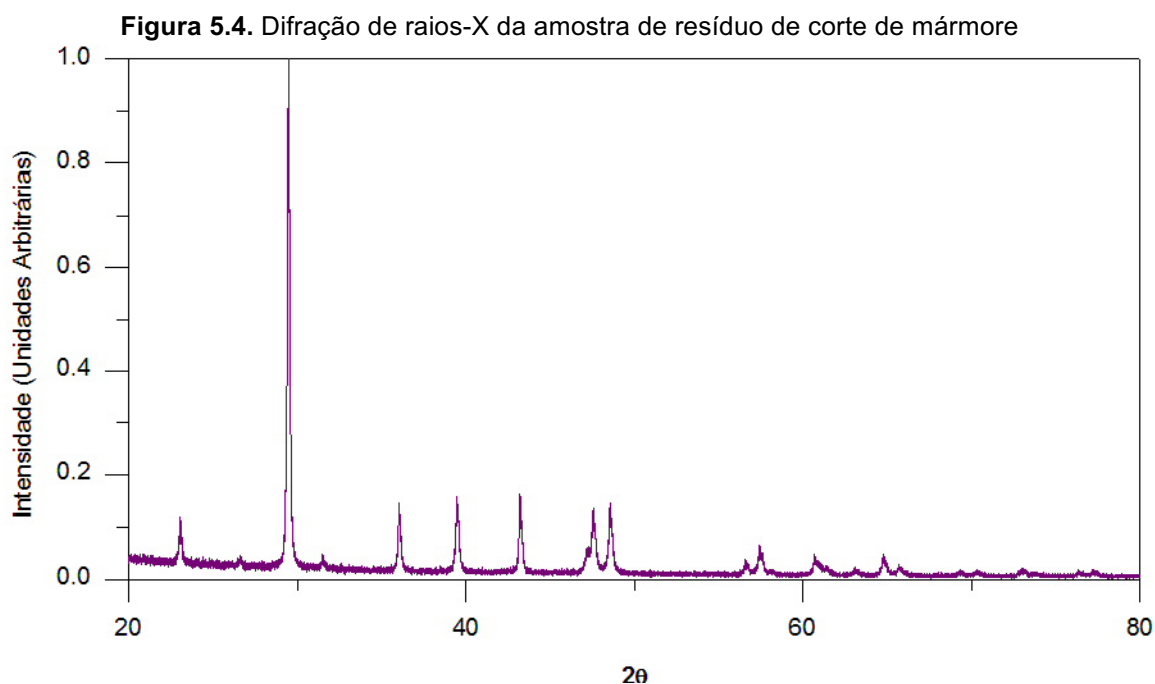
Através das medidas de fluorescência de raios-X por dispersão de energia realizada no RCM, foi possível observar a presença dos elementos apresentados na Figura 5.3.

Figura 5.3. Elementos encontrados no RCM

A partir dos resultados obtidos pelo espectrograma, é possível observar a presença de Cálcio (Ca), Urânio (U) e Tório (Th). As proporções quantitativas de cada elemento foram determinadas por meio da normalização pelo espectro de emissão do tubo de raios-X com alvo de Molibdênio (Mo) operando em 30 kV e pela eficiência do detector SiPIN em cada energia. Dessa forma, na amostra de RCM analisada, obteve-se que 96% do resíduo é Cálcio, 0,4% Urânio e 0,2% Tório. As porcentagens de urânio e tório não de mostraram

reativas, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004). O restante da porcentagem é referente aos picos menores apresentados no gráfico e, principalmente ao carbono (C) que é difícil de ser detectado com medidas de fluorescência de raios-X convencionais.

Porém, antes de realizar as medidas de difração das argamassas, foi realizado a leitura de difração de raios-X para resíduo, conforme apresentado na Figura 5.4.



O gráfico da difração de raios-X da amostra de resíduo de corte de mármore não apresenta indexação nos picos pois essa amostra obteve medidas iguais à calcita (CaCO_3) de acordo com a ficha 98-004-0107. Nessa ficha, é possível observar que a estrutura do sistema da calcita é hexagonal.

5.3. Consistência no Estado Fresco

Os índices de consistência médio de todas as argamassas fabricadas são apresentadas na Tabela 5.2. A argamassa pode ser classificada quanto à sua consistência, podendo ser seca, plástica ou fluída. No caso deste trabalho, o índice de consistência foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da adição do RCM.

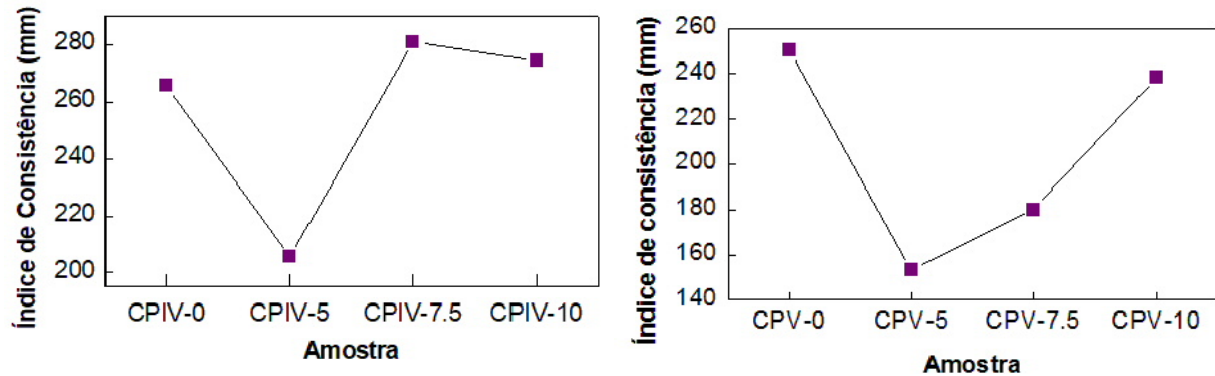
Tabela 5.2. Índice de consistência das argamassas

	CPIV-0	CPIV-5	CPIV-7.5	CPIV-10	CPV-0	CPV-5	CPV-7.5	CPV-10
lc (mm)	265.9	205.45	280.75	274.45	250.35	153.3	180.05	238.3

A consistência de ambas argamassas reduziram quando foi adicionado a primeira proporção do RCM (5%), e posteriormente foram sendo incrementadas até que ao adicionar

10% do resíduo, a consistência apresentou valores próximos à consistência da argamassa de controle. Tal variação de consistência pode ser melhor observada na Figura 5.5.

Figura 5.5. Índices de consistência



Enquanto que para a argamassa produzida com cimento CPIV e substituição de 5% gerou uma redução de cerca de 23% no índice de consistência, já para a argamassa produzida com o cimento CPV, a redução foi de 38%. Para as argamassas produzidas com cimento CPIV observa-se que, com exceção da amostra CPIV-5, o índice de consistência não apresentou alterações significativas, enquanto para argamassas produzidas com cimento CPV observa-se uma redução do índice de consistência ao adicionar o resíduo. Uma vez incrementado os teores de resíduo de corte de mármore, o índice de consistência também é incrementado.

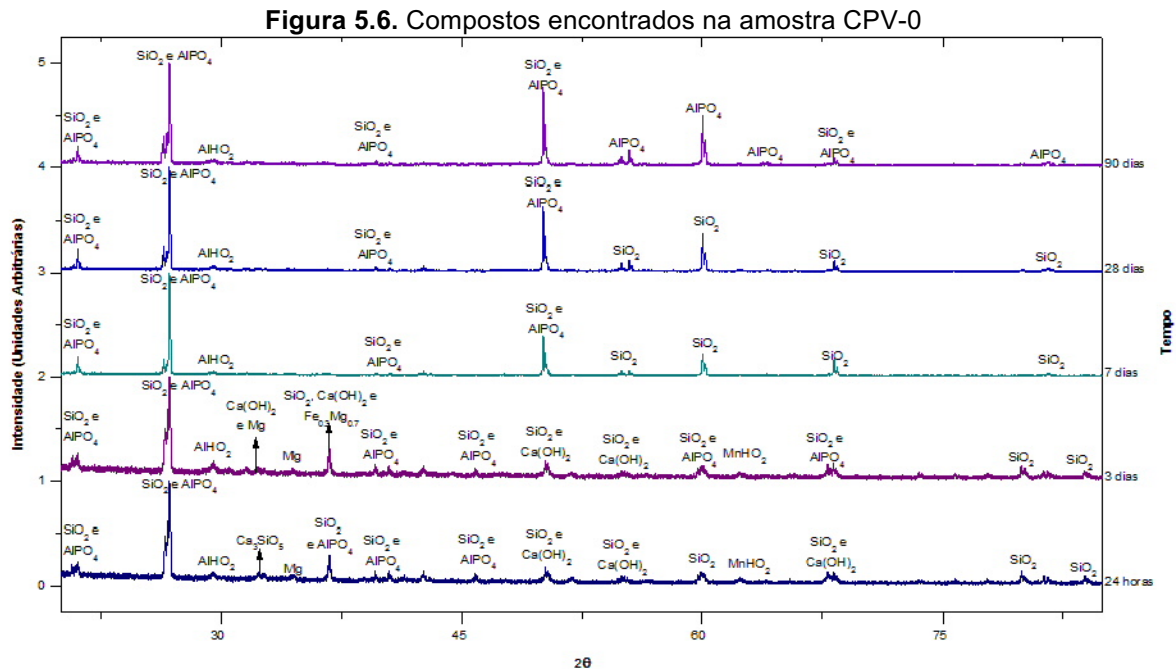
5.4. Difração de Raios-X (DRX)

Para cada amostra de argamassa produzida, foram realizadas medidas de difração de raios-X ao longo do tempo, observando a formação ou desaparecimento de estruturas cristalinas em uma mesma amostra, durante o período de 90 dias. Nesse trabalho, as amostras foram avaliadas no momento de sua fabricação, em 3 dias, em 7 dias, em 28 dias e em 90 dias.

Deve-se salientar que para as medidas realizadas no momento da fabricação da argamassa, houve um tempo de transporte do local da argamassadeira até o local difratômetro de raios-X. Assim, não é possível avaliar se existe a formação de alguma estrutura cristalina nos seus primeiros minutos. Avaliou-se então a formação de componentes químicos ao longo de suas primeiras 24 horas, sendo realizada uma medida de difração de raios-X a cada 20 minutos, para as amostras CPV-0, CPIV-0, CPV-5, CPIV-5 e CPV-7.5. Com os resultados obtidos nas primeiras 24 horas das amostras supracitadas, foi possível observar que não havia alteração na estrutura cristalina no período avaliado. Assim, para as amostras CPIV-7.5, CPV-10 e CPIV-7.5 dispensou-se a leitura periódica, e

nos resultados a seguir são apresentados somente a primeira difração de cada amostra para o período relativo às 24 horas.

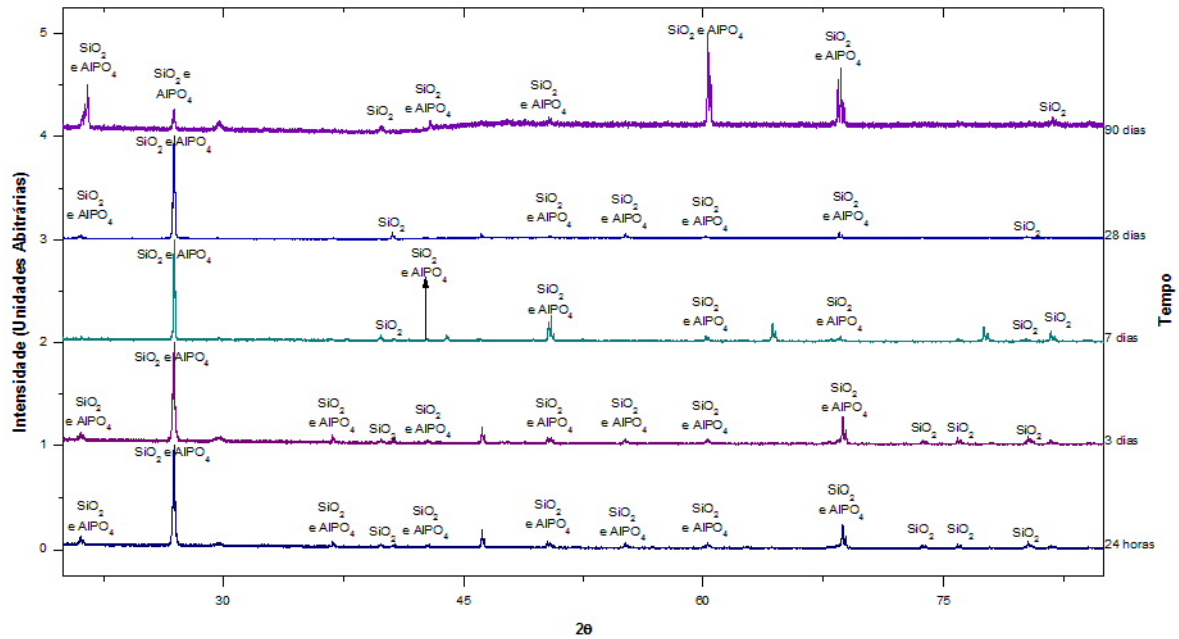
Os resultados obtidos através da difração de raios-X para a amostra utilizando o cimento CPV sem a adição de resíduos, podem ser observados na Figura 5.6.



Nesta primeira amostra, composta basicamente por cimento do tipo CPV de alta resistência inicial e areia, as medidas de difração de raios-X apresentam estruturas cristalinas típicas do cimento. Ao longo do tempo é possível observar a presença constante de sílica (SiO₂), a conhecida areia, e da berlinite (AlPO₄). Existe pouca variação da composição química ao longo de tempo, sendo os compostos de sílica e berlinite os mais representativos desta amostra.

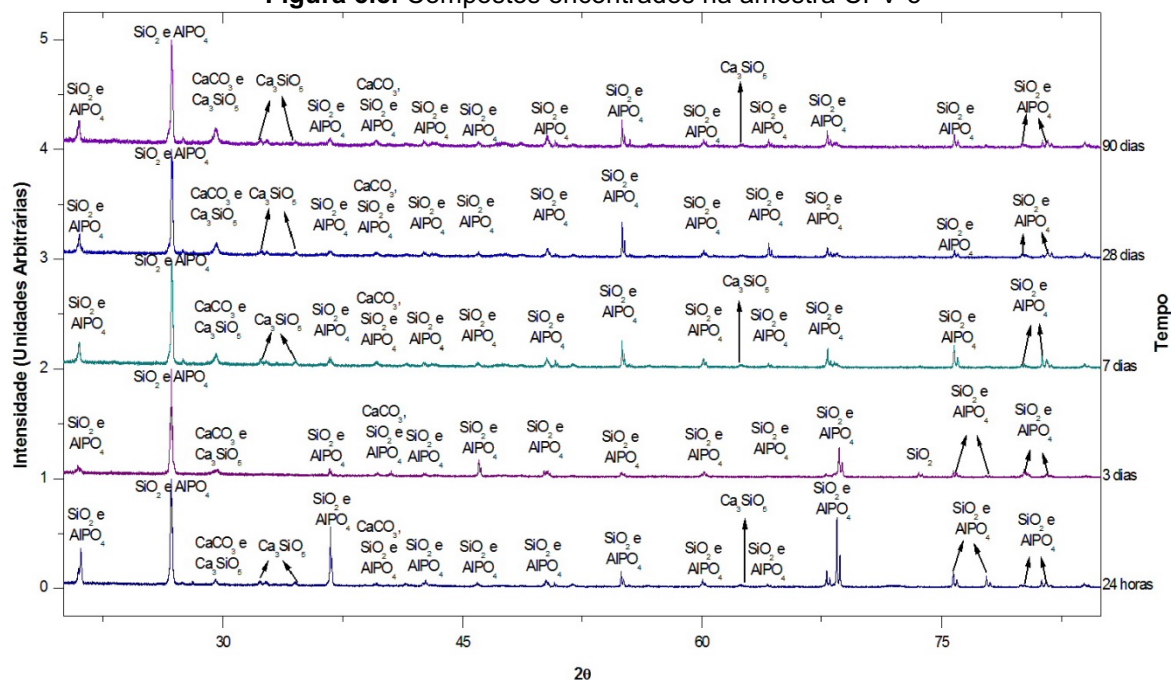
A seguir, na Figura 5.7 são apresentados os resultados obtidos para a amostra CPV-0, que ainda não possui adição de resíduo, variando apenas o tipo de cimento.

Figura 5.7. Compostos encontrados na amostra CPIV-0



Assim como na amostra CPV-0, na amostra CPIV-0 é possível observar a presença de sílica e berlinite na amostra ao longo do tempo, sem haver mudança significativas. Na medida realizada aos 7 dias, é possível observar o surgimento de um pico no ângulo de difração, de aproximadamente 65 graus, que não aparece nos demais tempos. Tal fenômeno pode ter ocorrido ao retirar a amostra do porta amostras, que se quebrou, e ao fazer uma nova leitura posteriormente, com um pedaço da amostra original, houve o surgimento de um novo pico, sendo esse muito provavelmente uma difração da parte do fundo do porta amostras.

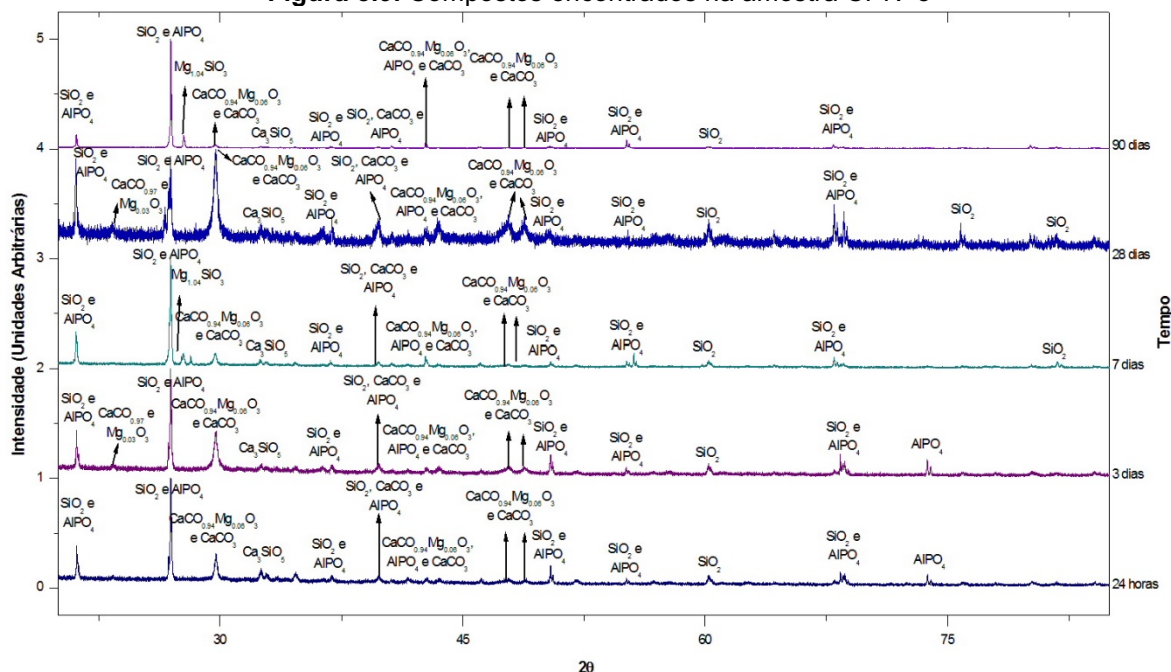
A Figura 5.8, apresenta os resultados das medidas realizadas por DRX com a argamassa fabricada com cimento CPV e 5% de substituição de areia por RCM.

Figura 5.8. Compostos encontrados na amostra CPV-5

As estruturas observadas nesta amostra são as mesmas observadas nas amostras apresentadas anteriormente, porém nesta amostra é possível observar o surgimento do carbonato de cálcio (CaCO_3), que coincide com a adição do resíduo. Ademais, é possível observar ainda a formação da estrutura hatrurite (Ca_3SiO_5), uma importante fase do composto do cimento chamado de silicato tricálcico (C_3S) que possui a mesma composição química (TAYLOR, 1990).

Observa-se a seguir as estruturas encontradas na amostra CPIV-5, conforme apresentado na Figura 5.9.

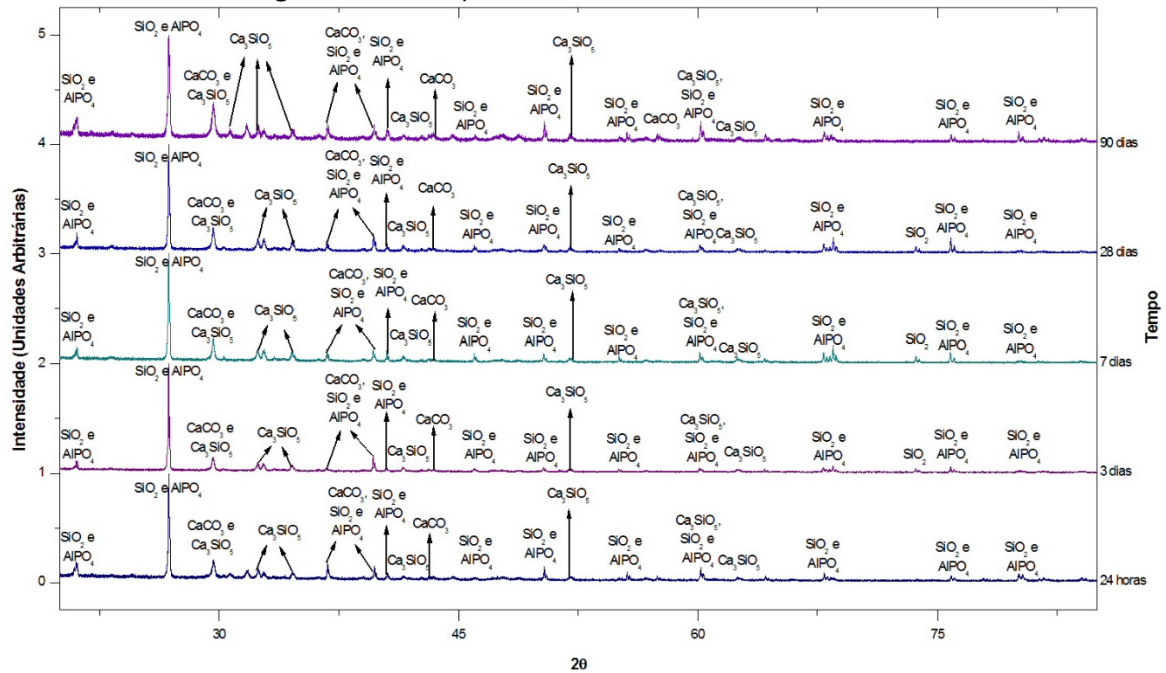
Figura 5.9. Compostos encontrados na amostra CPIV-5



Ao contrário do que ocorreu na amostra CPV-5, nesta amostra é possível observar a presença de óxido magnésio em conjunto com carbonato de cálcio, formando a estrutura $\text{CaCO}_{0.94}\text{Mg}_{0.06}\text{O}_3$. Aos 28 dias, é notável a presença de um “ruído” na leitura realizada para a amostra, tal fenômeno ocorre, pois, como a amostra não preenche mais o porta amostra por completo, os raios-X espalham no porta amostras. Para que tais ruídos não aparecessem novamente nas leituras posteriores, foi utilizado um porta amostras com fundo vazado, de forma a reduzir a possibilidade de recorrência desses ruídos. Vale salientar que esse ruído não interfere na interpretação dos resultados obtidos.

Os resultados obtidos para a amostra utilizando cimento CPV com 7,5% de adição de resíduo pode ser observado na Figura 5.10.

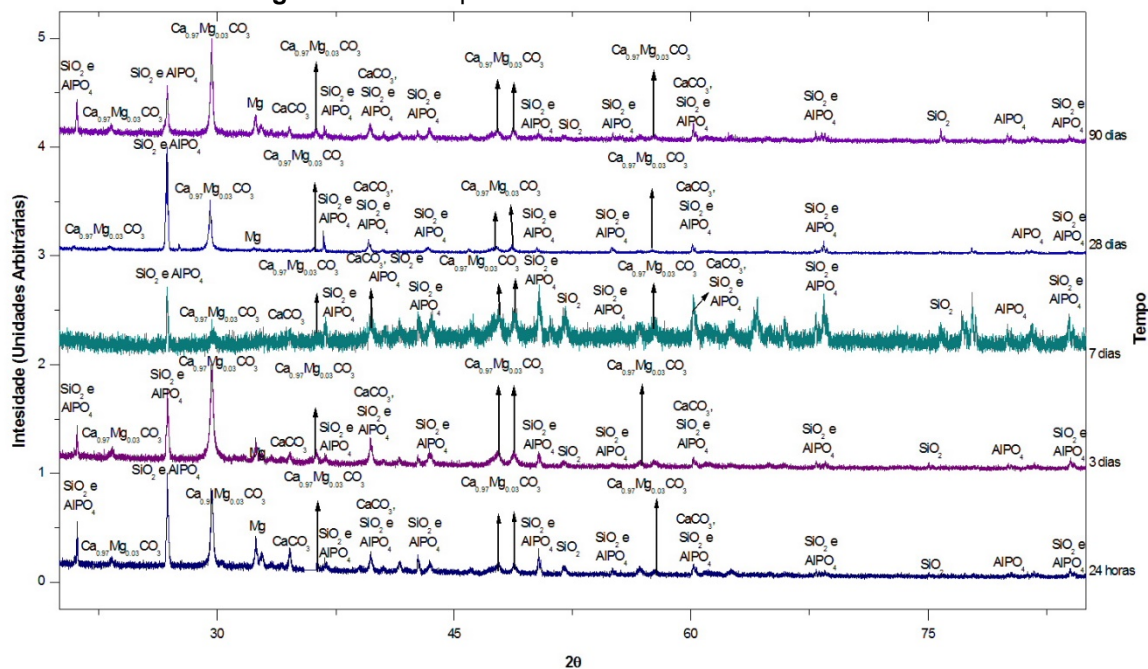
Figura 5.10. Compostos encontrados na amostra CPV-7.5



Nesta amostra é possível observar a formação da estrutura hatrurite (Ca_3SiO_5) e a presença de CaCO_3 , assim como na amostra CPV-5.

Posteriormente, são apresentados os resultados das medidas de difração de raio-X na amostra CPIV-7.5, na Figura 5.11.

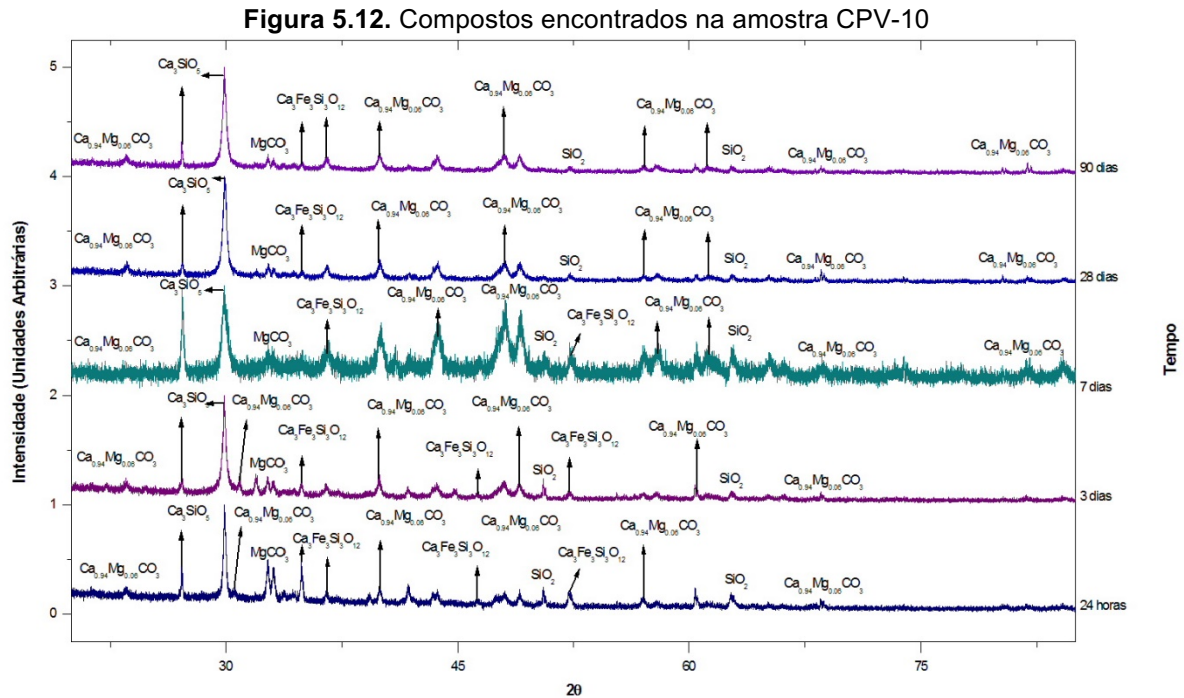
Figura 5.11. Compostos encontrados na amostra CPIV-7.5



Da mesma forma que ocorreu na amostra CPIV-5 é possível observar o surgimento da estrutura $\text{CaCO}_{0.94}\text{Mg}_{0.06}\text{O}_3$. Não foram observadas variações na composição química ao substituir 7,5% de RCM em relação à substituição de 5%. Assim como ocorreu para a

amostra CPIV-5, o gráfico referente ao tempo de 7 dias apresenta ruídos em sua leitura, pela mesma razão apresentada anteriormente.

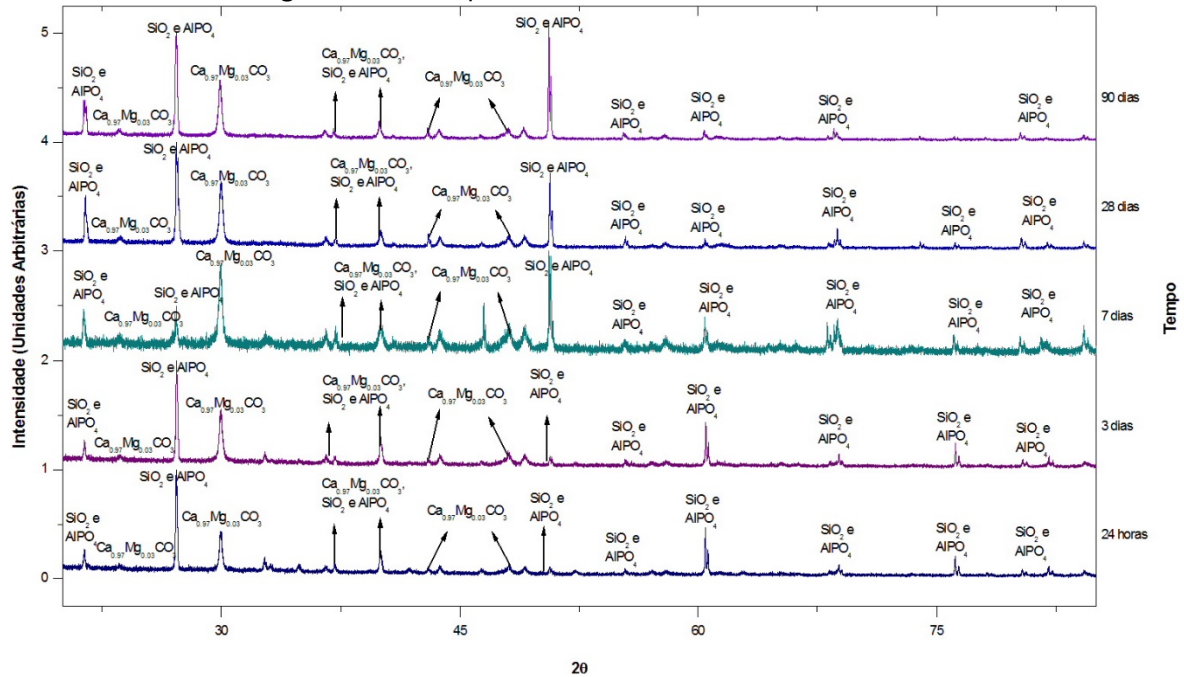
Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para a amostra CPV-10, na Figura 5.12.



Assim como na amostra CPV-5 e CPV-7.5, é possível observar a presença da estrutura hatrurite nessa amostra, bem como o surgimento da estrutura $\text{CaCO}_{0.94}\text{Mg}_{0.06}\text{O}_3$ que, até então eram vistos apenas nas amostras onde utilizou-se o cimento CPIV. Ainda ocorreu o aparecimento de uma nova estrutura, a $\text{Ca}_3\text{Fe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$.

Por fim, na Figura 5.13 são apresentados os resultados obtidos a partir da análise para a mostra CPIV-10.

Figura 5.13. Compostos encontrados na amostra CPIV-10



Nessa última amostra é possível observar que não houve variação na composição química da amostra CPIV-10 em relação à amostra CPIV-7.5, bem como CPIV-5.

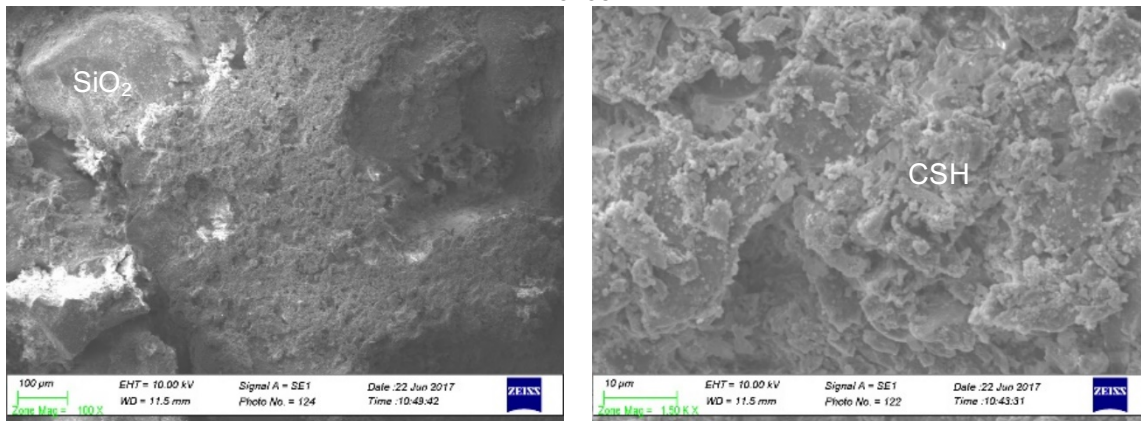
Através das medidas obtidas utilizando o difratômetro de raios-X, foi possível observar a evolução da microestrutura das argamassas ao substituir areia por resíduo de corte de mármore. Não houveram mudanças significativas ao longo dos períodos analisados (24 horas, 3, 7, 28 e 90 dias), porém pode-se observar a mudança em sua estrutura cristalina conforme houve substituição por resíduo. Em suma, argamassas produzidas com cimento CPV apresentaram estruturas de Ca_3SiO_5 , enquanto que nas argamassas produzidas com CPIV, o mesmo não pode ser observado.

5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A seguir, são apresentadas as imagens retiradas a partir do método de microscopia eletrônica de varredura. Para cada uma das amostras foram feitas fotos em alta resolução com aproximações de 100 e 1500 vezes. As amostras utilizadas neste ensaio são as mesmas que foram utilizadas para o ensaio no DRX. Nesta etapa do trabalho não é cabível realizar a análise da compactação da argamassa, uma vez que essas amostras não são representativas em relação ao seu processo de fabricação. Todas as amostras já haviam finalizado o seu processo de cura, então neste trabalho não é apresentado o desenvolvimento da estrutura cristalina da argamassa.

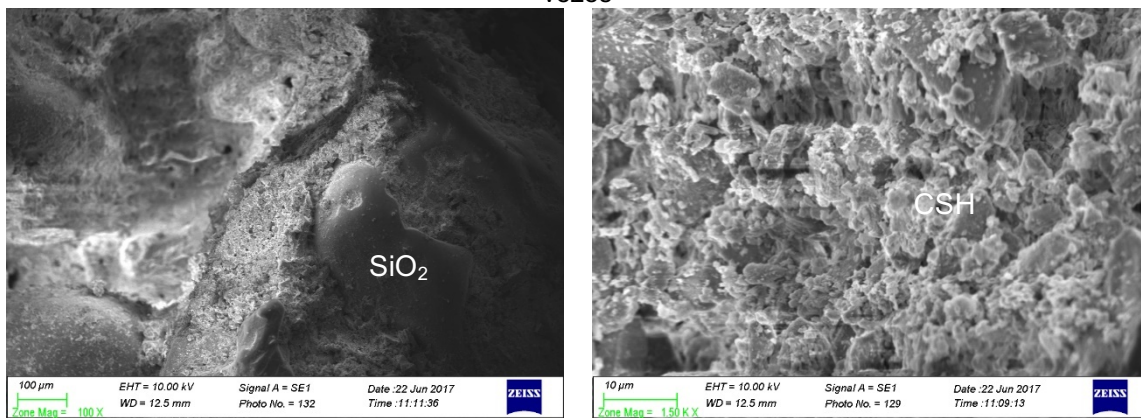
Abaixo, na Figura 5.14, é apresentado as imagens obtidas para a amostra CPV-0.

Figura 5.14. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-0 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Através da imagem obtida com a aproximação de 100 vezes, é possível observar a presença de uma partícula de areia, identificada como SiO₂. Na aproximação de 1500 vezes, é possível observar a presença de silicato de cálcio hidratado (CSH).

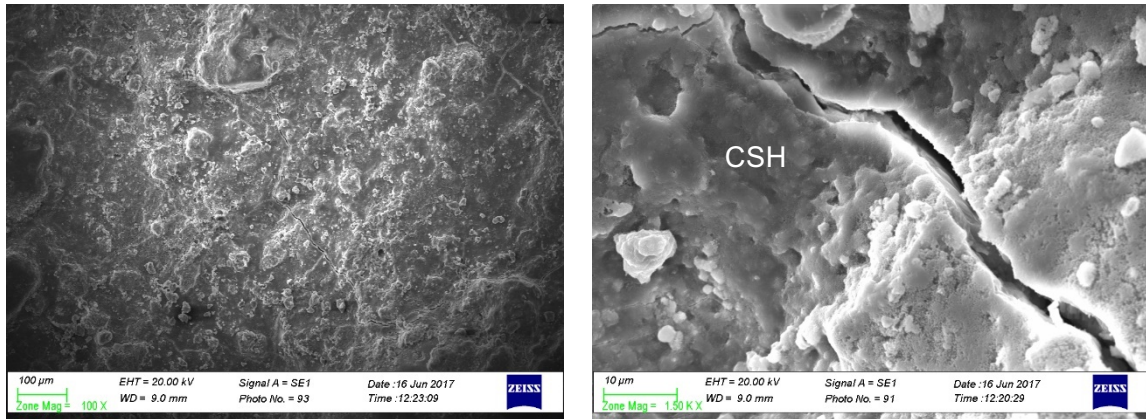
Figura 5.15. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-0 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Assim como na amostra CPV-0, as estruturas possíveis de serem observadas são a sílica e o silicato de cálcio hidratado. Na aproximação de 1500 vezes desta amostra, a imagem obtida se apresenta um pouco desfocada, isso ocorreu, pois, a amostra apesar de estar com o adesivo condutor e com deposição de ouro/paládio se apresentou instável.

Nas imagens a seguir são apresentadas ambas aproximações para a amostra CPV-5.

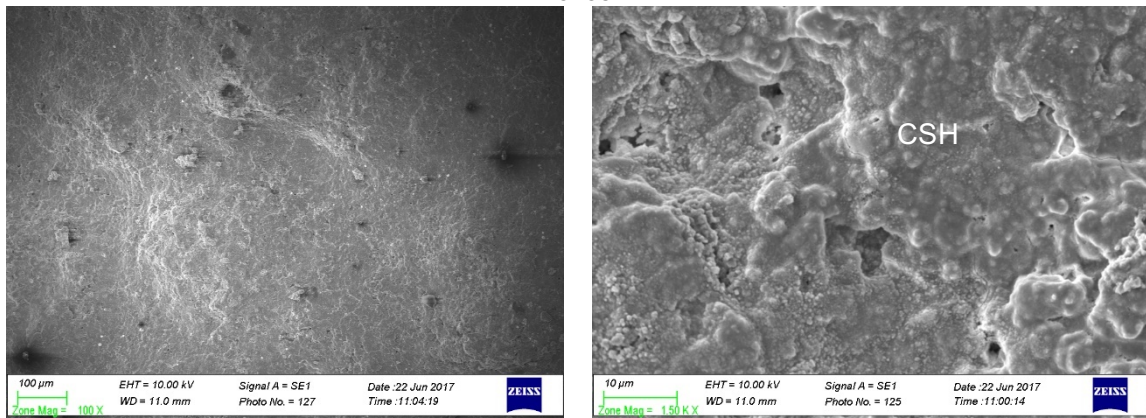
Figura 5.16. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-5 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Esta é a primeira amostra com adição de resíduo de corte de mármore, sendo que com uma aproximação de 1500 é possível observar o surgimento e novas estruturas esbranquiçadas, provavelmente devido à adição de RCM.

Posteriormente são apresentadas as imagens para o cimento CPIV com substituição de 5% de areia por resíduo.

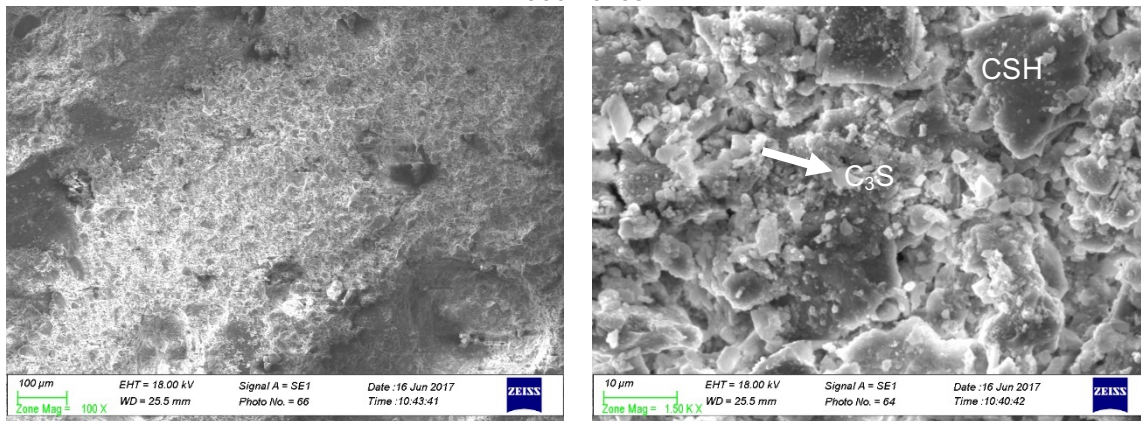
Figura 5.17. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-5 com aproximações de 100 e 1500 vezes



A amostra apresentada com aproximação de 100 vezes aparenta ser mais homogênea, e na aproximação de 1500 vezes, assim como as amostras anteriores, é possível observar a presença de silicato de cálcio hidratado.

A seguir são apresentadas as imagens obtidas para a amostra CPV-7.5.

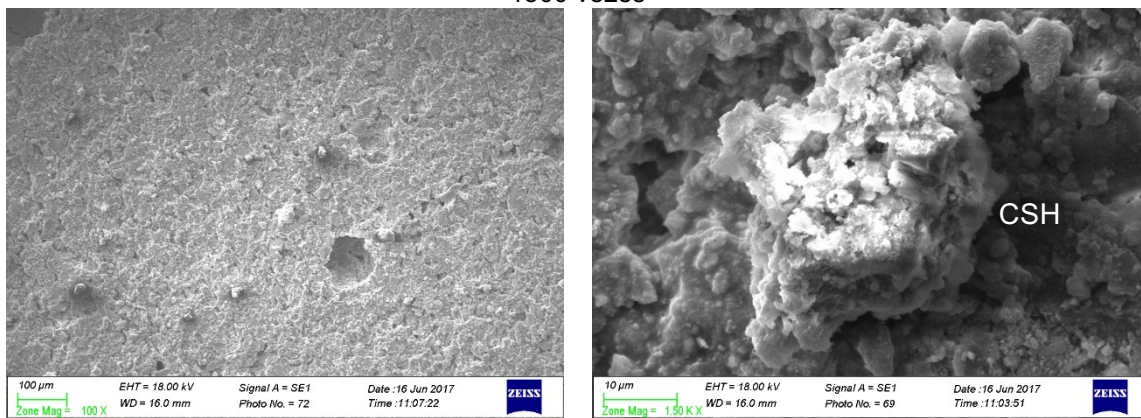
Figura 5.18. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-7.5 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Na amostra CPV-7.5, com aproximação de 1500 vezes é possível observar que a estrutura é mais porosa em relação às amostras apresentadas anteriormente.

Abaixo é apresentado as imagens obtidas para a amostra CPIV-7.5.

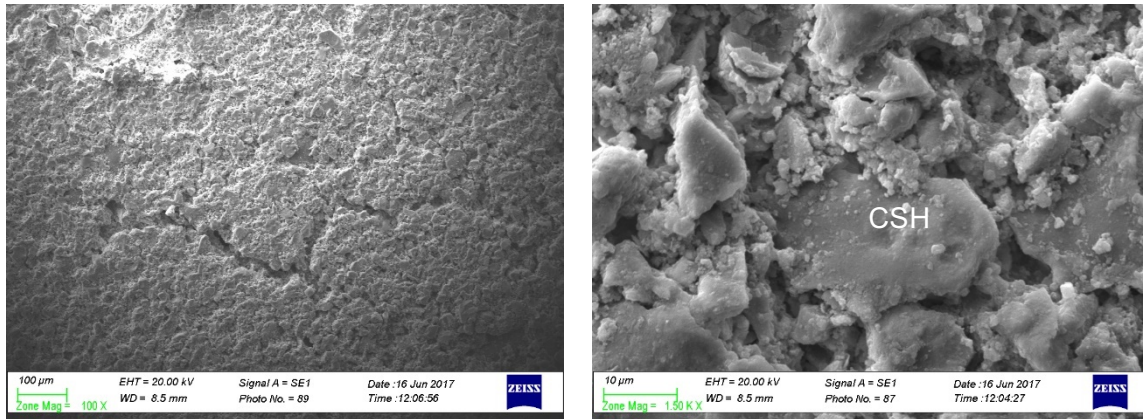
Figura 5.19. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-7.5 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Nesta amostra, o silicato de cálcio hidratado também se faz presente, e estrutura microcristalina mais porosa.

Adiante é apresentado a microestrutura da amostra CPV-10.

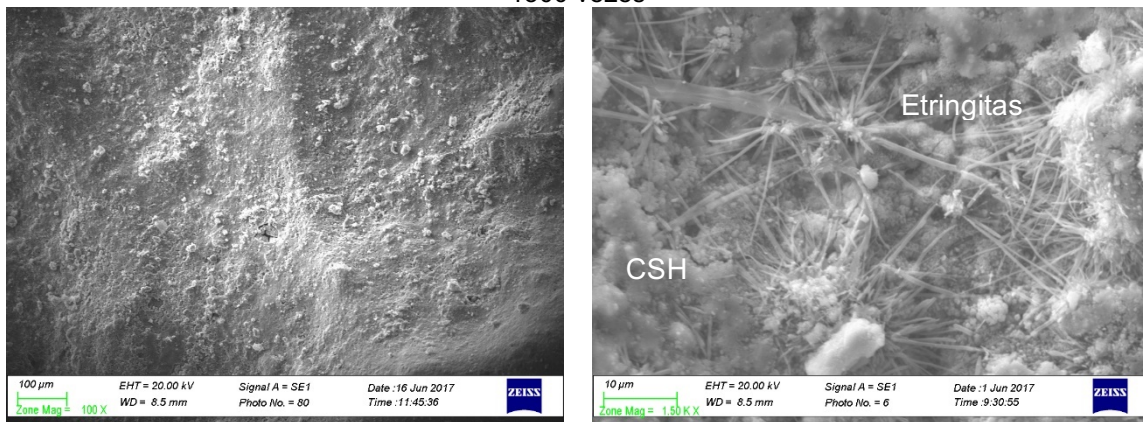
Figura 5.20. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPV-10 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Na microestrutura da amostra que utilizando cimento CPV e 10% de resíduo, é possível observar que se trata da amostra com maior porosidade em sua microestrutura. Assim como em todas as amostras apresentadas, é possível observar a presença do cristal de CSH.

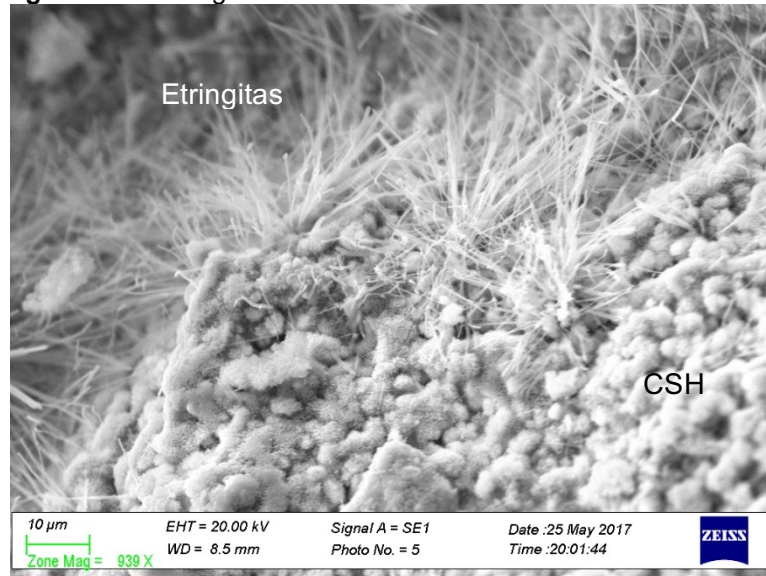
Por fim, são apresentadas a seguir as imagens obtidas através do MEV para a amostra CPIV-10.

Figura 5.21. Fotos obtidas através do MEV para a amostra CPIV-10 com aproximações de 100 e 1500 vezes



Ao contrário do que foi observado nas amostras anteriores, na amostra produzida com cimento CPIV e 10% de substituição de areia por resíduo, houve o surgimento de estruturas etringitas.

Uma aproximação mais detalhada pode ser observada na Figura 5.22.

Figura 5.22. Etringitas secundárias formadas na amostra CPIV-10


As etringitas apresentadas na imagem acima tentam preencher os vazios da microestrutura da amostra, que se apresentou mais porosa que as demais. Assim como em todas as amostras anteriores.

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão no estado endurecido para que seja feita uma melhor análise dos resultados obtidos através das medidas do DRX e das imagens do MEV.

5.6. Resistência à Compressão no Estado Endurecido

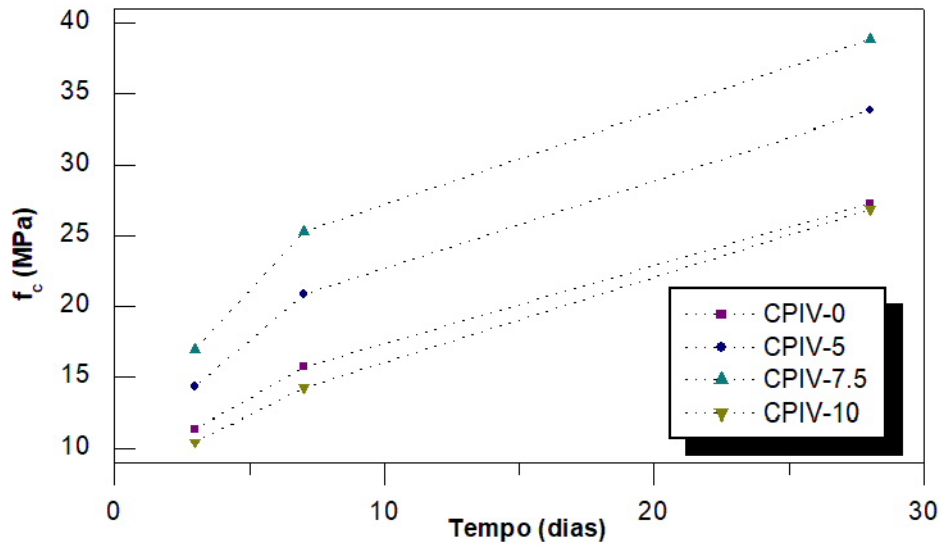
O ensaio de resistência à compressão foi realizado para as argamassas produzidas, conforme é apresentado na Tabela 5.3. Junto à resistência média, é apresentado o desvio padrão para cada argamassa, que foi ensaiada em três idades diferentes.

Tabela 5.3. Resistência média e desvio padrão das amostras

fc (MPa)	CPIV-0	CPIV-5	CPIV-7.5	CPIV-10	CPV-0	CPV-5	CPV-7.5	CPV-10
3 dias (sd)	11.31	14.32	16.95	10.46	22.73	32.10	35.13	38.50
	0.55	1.35	2.67	0.61	0.57	1.13	0.28	0.15
7 dias (sd)	15.67	20.84	25.28	14.20	25.21	33.81	36.33	43.18
	1.95	0.57	0.69	0.74	0.71	1.87	0.09	0.21
28 dias (sd)	27.29	33.77	38.79	26.86	30.62	40.05	40.54	44.37
	0.86	1.17	1.52	1.06	0.62	1.11	1.05	0.29

A partir dos resultados apresentados na tabela anterior, é possível traçar os gráficos apresentados na Figura 5.23 e Figura 5.24, referente às argamassas produzidas com cimento CPIV e CPV, respectivamente. Com esses dados é possível construir uma curva através de regressão linear, para que seja melhor observado como ocorre a variação da resistência.

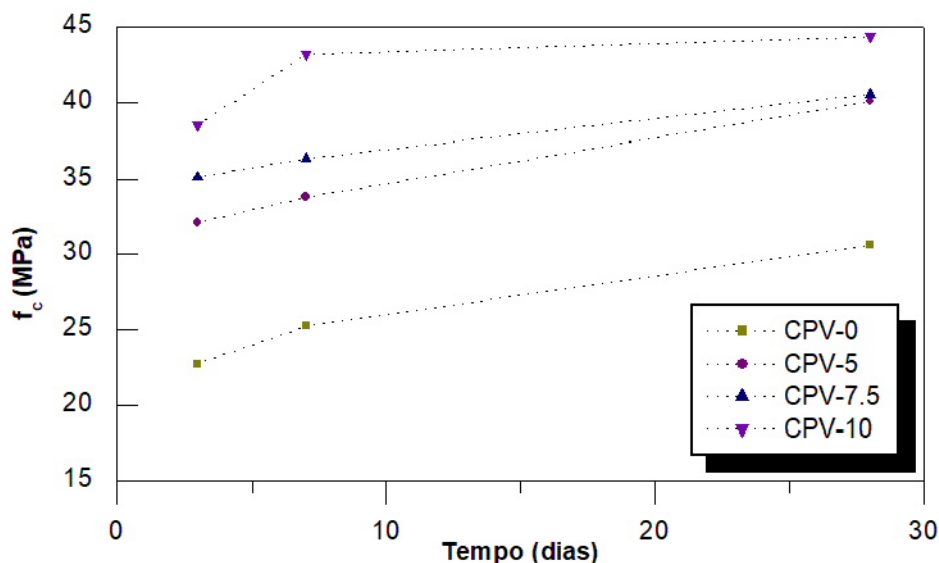
Figura 5.23. Resistência à compressão ao longo do tempo utilizando cimento CPIV com diferentes adições de resíduo



No gráfico anterior é possível observar o ganho de resistência ao longo do tempo, conforme aumenta-se a quantidade de RCM substituído no traço da argamassa, a sua resistência é aumentada também. Porém, ao adicionar 10% de RCM a resistência sofre uma decaída, sendo ainda menor que a resistência da argamassa de controle. A perda de resistência pode ser justificada devido à formação de etringitas secundárias, que foram observadas nas imagens obtidas através do MEV.

Por fim, utilizando ainda os resultados apresentados na Tabela 5.3, foi obtido o gráfico de ganho de resistência ao longo do tempo, que pode ser observado na Figura 5.24, que como explicado anteriormente, se obteve através de regressão linear.

Figura 5.24. Resistência à compressão ao longo do tempo utilizando cimento CPV com diferentes adições de resíduo



Observando o gráfico anterior, percebe-se o ganho de resistência obtido com a substituição da areia pelo RCM, sendo que o ganho de resistência final ao adicionar 10% de resíduo, é de pouco mais de 30% em relação à resistência apresentada pela argamassa sem adição de resíduo. Este ganho de resistência pode ser relacionado à formação estruturas cristalinas de hatrurite (Ca_3SiO_5), que foi observado nas medidas realizadas através do DRX.

6. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho mostrou-se possível a utilização de resíduo de corte de mármore como substitutivo parcial da areia, pois com exceção da amostra CPIV-10, todas apresentaram ganho de resistência à compressão e trabalhabilidade aceitável. Pode-se observar também, que a microestrutura possui influência na análise dos resultados mecânicos obtidos, mostrando a importância de que ambas análises sejam feitas em conjunto. Assim, pode-se afirmar que o resíduo de corte de mármore poderá ser empregado em estudos futuros a fim de analisar a comportamento mecânico e microestrutural quando incorporado em dosagens de concreto.

As conclusões específicas foram as seguintes:

- Ao realizar a caracterização dos materiais foi possível afirmar que a areia utilizada no traço da argamassa é uma areia classificada como utilizável, de acordo com a sua curva granulométrica, enquanto que o resíduo é classificado como material pulverolento.
- Quanto a consistência da argamassa, houve uma redução no índice de consistência quando adicionado 5% de resíduo nas argamassas produzidas quando foi utilizado tanto o cimento CPIV quanto o CPV. Para argamassas produzidas com o cimento CPIV não houveram mudanças significativas quando substituídos 7,5% e 10% de resíduo em relação à argamassa sem resíduo, enquanto que para o cimento CPV os índices de consistência foram aumentando gradativamente a partir do índice de consistência mínimo, que foi da amostra CPV-5.
- Através da análise de fluorescência de raios-X observou-se que o resíduo de corte de mármore é formado basicamente de cálcio (Ca), com proporções insignificantes de urânio (U) e tório (Th). Quanto a análise de difração de raios-X, referente à amostra de resíduo, apresentou-se picos de difração nos mesmos ângulos que o componente de calcita (CaCO_3) de acordo com a ficha 98-004-0107, encontrado no software HighScore Plus, utilizado para a indexação de compostos químicos observado na difração de raios-X.
- As medidas de difração de raios-X mostraram que os principais compostos presentes nas argamassas sem adição de resíduo são a sílica (SiO_2) e o berlinite (AlPO_4). Com a adição de diferentes proporções de resíduo, as amostras que utilizam o cimento CPV, apresentam a formação da estrutura de hatrurite (Ca_3SiO_5), sendo esta uma fase diferente do silicato tricálcico (C_3S), composto presente no cimento. Observou-se ainda a presença de

estruturas de carbonato de cálcio (CaCO_3) nas amostras produzidas com CPV e de $\text{CaCO}_{0.94}\text{Mg}_{0.06}\text{O}_3$ utilizando o cimento CPIV. A estrutura de $\text{CaCO}_{0.94}\text{Mg}_{0.06}\text{O}_3$ observou-se na amostra utilizando CPV apenas quando adicionado 10% de resíduo, assim como surgiu também a estrutura de $\text{Ca}_3\text{Fe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$.

- Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostraram que a adição de resíduo de corte de mármore foi benéfica em relação ao ganho de resistência das argamassas, pois com exceção da amostra CPIV-10, todas as argamassas apresentaram ganho de resistência que justificariam a substituição de parte da areia por resíduo. O ganho de resistência da argamassa utilizando cimento CPV e 10% de resíduo chegou a ser pouco mais de 30% maior que a argamassa produzida com o mesmo cimento sem adição de resíduo.
- A perda de resistência da amostra CPIV-10 pode ser atribuída à presença de etringitas secundárias em sua microestrutura, conforme apresentado pelas imagens obtidas através do MEV. Por outro lado, o ganho elevado de resistência das argamassas produzidas com cimento CPV e diferentes proporções de adição de resíduo pode ser explicado pela presença de estruturas cristalinas de Ca_3SiO_5 .

Para estudos futuros, sugere-se que a análise da microestrutura com a utilização da microscopia eletrônica de varredura seja feita desde o princípio da hidratação da argamassa ou concreto, e que seja feito ainda uma espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) utilizando as imagens obtidas através do MEV, para que cada partícula observada seja identificada de acordo com o elemento químico encontrado no ponto específico analisado.

Substituições de proporções intermediárias entre 7,5% e 10% de resíduo de corte de mármore em argamassas utilizando cimento CPIV seriam interessantes para que fosse possível observar a partir de qual porcentagem de substituição começam a surgir as etringitas secundárias na microestrutura da argamassa.

Em relação às argamassas produzidas com o cimento CPV, substituições superiores a 10% poderiam ser realizadas a fim de identificar o ganho de resistência máximo sem comprometer a trabalhabilidade.

O resíduo de corte de mármore poderia ser substituído posteriormente em dosagens de concreto, com a finalidade de analisar a interação que ocorreria na microestrutura, e qual a influência de tais substituições nas propriedades mecânicas do concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACPINSTRUMENTS. **Blaine – Área Específica – Permeabilidade**. Disponível em: <<http://acpinstruments.com.br/blaine.html>> Acesso em: 20 de Out. de 2016.

AKBULUT, H; GÜRER, C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**. V.42, p.1921-1930, Jan. 2007.

ALYAMAÇ, E; INCE, R. Preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction and Building Materials**. V.23, p.1201-1210, Feb. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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

BELO SUN MINERAÇÃO LTDA. **Rima – relatório de impacto ambiental**. Projeto Volta Grande. Senador José Porfírio, 2012. Disponível em: <http://www.sema.pa.gov.br/download/2BSML001-1-EA-RIM-0002_RIMA_REVISADO.pdf> Acesso em: 20 de Nov. de 2016.

BINICI, H.; SHAH, T.; AKSOGAN, O; KAPLAN, H. Durability of concrete made with granite and marble recycle aggregates. **Journal of Materials Processing Technology**. V.208, p.199-308, Nov. 2008.

ÇELIK, M. Y.; SABAH, E. Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. **Journal of Environmental Management**. V.87, p.106-116, Mar. 2007.

CILAS. **Particle Size Analyzers**. Disponível em: <<https://www.cilas.com/en/particle-size-analyzer>> Acesso em: 20 de Out. 2016.

Compañía Minera de Atocha. **Manifestación de impacto ambiental modalidad particular**. Sector Minero, Proyecto Minero “Atocha”. 2006. Disponível em: <<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/dgo/estudios/2006/10DU2006MD026.pdf>> Acesso em 20 de Nov. de 2016.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. **Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete**. Presentation and Publication at the CANMET/ACI Three-day International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete. Toronto, 2005.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo**. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/atlas_rochas_ES.pdf> Acesso em 20 de Nov. de 2016.

FELEKOGLU, B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). **Resources, Conservation and Recycling**. V.51, p.770-791, Feb. 2007.

HAMMED, M. S.; SEKAR, A. S. S. Propertir of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge poder as fine aggregate. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. V. 4, P. 83-89, Jun. 2009.

HEBHOUB, H; AOUN, H.; BELACHIA, M.; HOUARI, H.; GHORBEL, E. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**. V.25, p.1167-1171, Juan. 2011.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Livre Docência – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

KARASAHIN, M; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. **Construction and Building Materials**. V.21, p.616-620, Jun. 2007.

LANGER, W. H. **Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst – A literature Review**. United States Geological Survey (USGS). Disponível em: <<http://geology.cr.usgs.gov/pub/ofrs/OFR-01-0484/>> Acesso em: 20 de Nov. de 2016.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 3 ed. Ed UFSM: Santa Maria, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3 ed. Ed McGraw-Hill: New York, 2006.

MONTERO, M. A.; JORDÁN, M. M.; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; SANFELIU, T.; HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S. The use of a calcium carbonate residue from the stone industry in manufacturing ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**. V.43, p.186-189, Jan. 2009.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Departamento de Ciências Exatas/ESALQ – Laboratório de Instrumentação Nuclear/CENA. São Paulo, 1999. Disponível em: < <http://www.fem.unicamp.br/~giorgia/fluorescencia.pdf> > Acesso em: 20 de Nov. de 2016.

NAVARRO, K. C. **Mapa de Exploração de Mármore no México** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <carolmbandeira@gmail.com> em 8 nov. 2016.

PANALYTICAL. **Empyreon**. Disponível em: <<http://www.panalytical.com/Empyreon.htm>> Acesso em: 20 de Out. de 2016.

QUANTACHROME. **Autopycnometer – Density Analysis by Gas Picnometer**. Disponível em: <http://www.quantachrome.com/density/auto_pycnometer.html> Acesso em: 20 de Out. de 2016.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil**. Ed RiMa: São Carlos, 2009.

RUIZ, J. S. **Estudio para trata de identificar posibles aplicaciones industriales para los residuos generados en el proceso de corte y elaboración de piedra natural, en concreto del mármol, analizando su viabilidad técnica y económica**. 2004. 61 p. Master Thesis (E. T. de Mines, especialitat en Explotaió de Mines) – Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2004. Disponível em: < <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3877/34033-3.pdf> > Acesso em: 20 de Out. de 2016.

SALAVESSA, E.; JALALI, S.; SOUSA, L. M. O.; FERNANDES, L.; DUARTE, A. M. Historical plastework techniques inspire new formulations. **Construction and Building Materials**. V. 48, p. 858-867. Ago. 2013.

SÁNCHEZ; S. C. **Aprovechamiento de los residuos del mármol para la fabricación de materiales compuestos**. 2002. 254 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química, Ambiental e de Materiais) - Escuela Universitaria Politécnica de Linares, Universidade de Jaén, Jaén, 2002.

SANTOS, A.; VILLEGAS, N.; BETANCOURT, J. Residuo de mármol como insumo en la construcción civil – diagnóstico de la Comarca Lagunera. **Revista de la Construcción**. V.12, p.17-26, 2012.

Secretaría de Economía (SE); Coordinación General de Minería (CGMINERÍA). **Perfil de Mercado del Mármol**. Documento de Análisis. México, Distrito Federal, Diciembre 2014. Disponible em: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5553/pm_marmol_2014.pdf Acesso em: 27 de Set. 2016.

Secretaría de Economía (SE); Coordinación General de Minería (CGMINERÍA). **Estudio de la Cadena Productiva del Mármol**. Documento de Análisis. México, Distrito Federal, Agosto 2015. Disponible em: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/51926/cp_marmol.pdf Acesso em: 27 de Set. 2016.

Servicio Geológico Mexicano (SGM); Coordinación General de Minería (CGMINERÍA); Secretaría de Economía (SE). **Reglas de Operación del Programa de Apoyo a la Exploración**. México, Distrito Federal, Febrero 2008. Disponible em: http://www.sgm.gob.mx/acerca/pdf/Reglas_Operacion.pdf Acesso em: 27 de Nov. 2016.

Secretaría de Economía (SE); Servicio Geológico Mexicano (SGM). **Panorama Minero del Estado de Durango**. Documento de Análisis. México, Distrito Federal, Diciembre 2014. Disponible em: <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/DURANGO.pdf> Acesso em: 27 de Set. 2016.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). **Norma Oficial Mexicana NOM-157**. Diario Oficial: Segunda Sección Poder Ejecutivo. México, Distrito Federal, Agosto 2011. Disponible em: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6665/1/nom-157-semarnat-2009.pdf> Acesso em: 27 de Set. 2016.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academic Press: London, 1990.

TECNOBRICK, S. A. de C.V. **Manifiesto de Impacto Ambiental (Modalidad Particular)**. 2004. Disponível em: <<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/dgo/estudios/2004/10DU2004MD006.pdf>> Acesso em 20 de Nov. de 2016.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOGLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Material**. V.23, p.1947-1953, Feb. 2009.

TRUSONIC – a case study. **Mining World**. V.9, n.5, p.46-47, Out. 2012. Disponível em: <<http://www.boartlongyear.com/wp-content/uploads/Article-Mining-World-Oct-2012.pdf>> Acesso em: 27 de Set. 2016.

United Nations (UN). **Environmental Guidelines for Mining Operations**. United Nations Departement of Economic and Social Affairs (UNDESA) and United Nations Environment Programme Industry and Environment (UNEP). January 1998. Disponível em : <https://commdev.org/userfiles/files/814_file_UNEP_UNDESA_EnvGuidelines.pdf> Acesso em 9 de Jun. 2017.

VARDHAN, K.; GOYAL, S.; SIDDIQUE, R; SINGH, M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Material**. V.96, p.615-621, Oct. 2015.

ZHU, W.; GIBBS, J. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**. V.35, p.1457-1462, May. 2005.