

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**INTERAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MISTURAS DE SOLO-  
CIMENTO COM ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE A BASE DE  
POLICARBOXILATOS**

**CAROLINA INÁCIO DA SILVA**

**CAMPO GRANDE**

**2016**

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**INTERAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MISTURAS DE SOLO-  
CIMENTO COM ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE A BASE DE  
POLICARBOXILATOS**

**CAROLINA INÁCIO DA SILVA**

Trabalho de Conclusão Final de Curso do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração: Sustentabilidade.

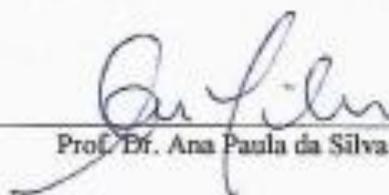
**Orientador: Prof. Dr. Ana Paula da Silva Milani**

**CAMPO GRANDE**

**AGOSTO / 2016**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão Final de Curso defendida por **CAROLINA INÁCIO DA SILVA**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de Junho de 2016, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



Prof. Dr. Ana Paula da Silva Milani – Orientador  
FAENG/UFMS



Prof. Dr. Odilmar Costa Rondon – Membro Titular  
FAENG/UFMS



Prof. Dr. Sérgio Carvalho de Araujo – Membro Titular  
INQUI/UFMS

Dedico este trabalho:

Ao Silvio, que tanto me apoia sempre;

Aos meus pais,

José e Ruth;

Aos meus irmãos,

Silvia, Tony, Ruth e Marisa,

com todo carinho.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar força e saúde para viver.

À Prof. Dra. Ana Paula pela paciência e pela orientação deste trabalho.

Aos professores, funcionários e alunos do Departamento de Engenharia Civil da UFMS de Campo Grande.

A Liz Regiane Vizolli Favarin, Persiely Pires Rosa, Guilherme Brum, Gabriel Nunes, Marco Utrera, Flavia Dias, João Gabriel Paz, Enilda Freitas e Sandra Bertocini pelo enorme apoio e grande auxílio na realização dos ensaios.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho trata de avaliação das interações físico-químicas entre os componentes da mistura solo, cimento, água e aditivos superplastificantes, avaliando a influência dos argilominerais presentes no solo, assim como os compostos presentes no aditivo e no cimento. Os ensaios aplicados nas misturas de solo-cimento autoadensável (SCAA) foram calorimetria, termogravimetria, espectroscopia FT-infravermelho, microscopia eletrônica por varredura, espectroscopia por dispersão de energia de raios-X, difração de raios-X. Os resultados obtidos demonstraram que o uso de aditivos químicos superplastificantes no sistema solo-cimento é interessante quando se deseja eficiência de fluidez na mistura. No entanto, não houve constatação de formação microestrutural diferente dos produtos da hidratação do cimento e de reações pozolânicas, quando se comparam misturas de solo-cimento com e sem aditivos superplastificantes. Isso indica que o aditivo superplastificantes a base de policarboxilatos não exerce influência nas reações cimentantes do sistema solo-cimento autoadensável. Além disso, a presença dos argilominerais na mistura solo-cimento e aditivo não interfere na formação de produtos cimentícios, como também não obstrui a ação dispersiva do aditivo na mistura.

Palavras chave: solo-cimento autoadensável; policarboxilatos; argilominerais.

## ABSTRACT

The present study is the evaluation of the physical-chemical interactions between the components of the mixture of soil, cement, water and superplasticizer additives, evaluating the influence of clay minerals present in the soil, as well as the compounds present in the additive and the cement. The tests applied in self-compacting soil-cement (SCSC) mixtures were calorimetry, thermogravimetric analysis, FT-infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy X-ray and diffraction X-ray. The results showed that the use of superplasticizer chemical additives in the soil-cement system is interesting when it is desired flow efficiency in the mixture. However there was no formation of micro structural observation different from hydration of cement and pozzolanic reaction product, when comparing soil-cement mixtures with or without superplasticizers additives. This indicates that the superplasticizers additives does not exercise influence in cementing reactions of SCSC. Furthermore, the presence of soil and additive soil-cement mixture does not interfere with the formation of cementing products and also does not stop the dispersive action of the additive in the mixture.

Keywords: self-compacting soil cement; polycarboxylates; clay minerals.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Monômero de lignossulfonato. ....	24
Figura 2 - Monômeros de (a) Poli-naftaleno sulfonato de sódio linear; (b) Polimelanina sulfonato de sódio. ....	24
Figura 3 - Monômero de um copolímero de poliacrilato. ....	25
Figura 4 - Repulsão eletrostática e estérica na superfície das partículas de cimento. ....	26
Figura 5 - Argamassadeira. ....	34
Figura 6 - Mistura após homogeneização na argamassadeira. ....	34
Figura 7 - Corpos de prova após 28 dias. ....	35
Figura 8 - Corpo de prova rompido. ....	35
Figura 9 - Conjunto montado com amostras, sensores, placa de leitura, e computador para armazenamento de dados. ....	37
Figura 10 – Sistema de aquisição de dados ligados as amostras. ....	37
Figura 11 - Equipamento Netzsch para termogravimento. ....	38
Figura 12 - Porta amostra do equipamento. ....	39
Figura 13 - Tratamento das amostras com ouro para passagem no microscópio de varredura. ....	40
Figura 14 – Microscópio eletrônico de varredura aberto para inserção das amostras. ....	41
Figura 15 - Difrátômetro de Raios-X aberto para inserção das amostras. ....	41
Figura 16 - Estrutura hidratada de cimento, com cristais de etringita e monossulfato hidratado. ....	54
Figura 17 - Imagens do MEV para T1 (cimento, água e aditivo). ....	55
Figura 18 - Imagens do MEV para T2 (solo argiloso, água e aditivo). ....	55
Figura 19 - Imagens do MEV para T3 (cimento, solo argiloso e água). ....	56
Figura 20 - Imagens do MEV para T4 (cimento, solo argiloso água e aditivo). ....	56
Figura 21 - Imagens do MEV para T5 (cimento, água e aditivo). ....	56
Figura 22 - Imagens do MEV para T6 (solo arenoso, água, e aditivo). ....	56
Figura 23 - Imagens do MEV para T7 (cimento, solo arenoso e água). ....	57
Figura 24 - Imagens do MEV para T8 (cimento, solo arenoso, água e aditivo). ....	57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Difração de raio-X para o solo argiloso usado neste trabalho. ....	43
Gráfico 2 – Difração de raio-X para o solo arenoso usado neste trabalho. ....	44
Gráfico 3 - Curva calorimétrica para amostras com solo argiloso. ....	47
Gráfico 4 - Curva calorimétrica para amostras com solo arenoso. ....	47
Gráfico 5 - TGA para Solo Argiloso ....	49
Gráfico 6 - TGA para Solo Arenoso ....	49
Gráfico 7 - Espectro de Infravermelho de T1 (cimento, água e aditivo). ....	51
Gráfico 8 - Espectro de Infravermelho de T2 (solo argiloso, água e aditivo). ....	51
Gráfico 9 - Espectro de Infravermelho de T3 (solo argiloso, cimento e água). ....	51
Gráfico 10 - Espectro de Infravermelho de T4 (solo argiloso, cimento, água e aditivo). ....	51
Gráfico 11 - Espectro de Infravermelho de T5 (cimento, água e aditivo). ....	53
Gráfico 12 - Espectro de Infravermelho de T6 (solo arenoso, água e aditivo). ....	53
Gráfico 13 - Espectro de Infravermelho da amostra T7 (solo arenoso, cimento e água). ....	53
Gráfico 14 - Espectro de Infravermelho da amostra T8 (solo arenoso, cimento, água e aditivo). ....	53
Gráfico 15 - EDS de T1 (cimento, água e aditivo). ....	59
Gráfico 16 - EDS de T2 (solo argiloso, água e aditivo). ....	59
Gráfico 17 - EDS de T3 (cimento, solo argiloso e água). ....	59
Gráfico 18 - EDS de T4 (cimento, solo argiloso, água e aditivo). ....	59
Gráfico 19 - EDS de T5 (cimento, água e aditivo). ....	60
Gráfico 20 - EDS de T6 (solo arenoso, água e aditivo). ....	60
Gráfico 21 - EDS de T7 (solo arenoso, cimento e água). ....	60
Gráfico 22 - EDS de T8 (cimento, solo arenoso, água e aditivo). ....	60
Gráfico 23 - DRX de T1 (cimento, água e aditivo). ....	62
Gráfico 24 - DRX de T2 (solo argiloso, água e aditivo). ....	62
Gráfico 25 - DRX de T3 (cimento, solo argiloso e água). ....	62
Gráfico 26 - DRX de T4 (cimento, solo argiloso, água e aditivo). ....	62
Gráfico 27 - DRX de T5 (cimento, água e aditivo). ....	64
Gráfico 28 - DRX de T6 (solo arenoso, água e aditivo). ....	64
Gráfico 29 - DRX de T7 (cimento, solo arenoso e água). ....	64
Gráfico 30 - DRX de T8 (cimento, solo arenoso, água e aditivo). ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio químico do cimento Portland CP V ARI Max da Cimento Nacional.....	29
Tabela 2 - Ensaio físico cimento Portland CP V ARI Max da Cimento Nacional.....	29
Tabela 3 - Ensaio físico cimento Portland CP V ARI Max da Cimento Nacional.....	29
Tabela 4 - Relatório sobre a qualidade da água.....	30
Tabela 5 - Dados do aditivo MasterGlenium 51 da empresa BASF S.A. ....	30
Tabela 6 – Traços das misturas de solo-cimento de referência neste trabalho. .....	32
Tabela 7 - Caracterização do solo.....	43
Tabela 8 - Perda de peso (%) das misturas nas faixas de temperatura 110 – 500°C e 600 – 800°C. ....	48
Tabela 9 – Relação das bandas e seus possíveis componentes de acordo com a banda. ....	50

## LISTAS DE ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C<sub>3</sub>S – Silicato tricálcio

C<sub>2</sub>S – Silicato bicálcio

C<sub>3</sub>A – Aluminato tricálcio

C<sub>4</sub>AF – Ferroaluminato tetracálcio

DRX - Difração de raios-X

EDS - Espectroscopia por dispersão de energia de raios-X

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho Transformada de Fourier

MEV - Microscopia eletrônica por varredura

PCE - Superplastificante a base de policarboxilato

PCA - Portland Cement Association

PEG - Polietileno glicol

PVC – Policloreto de vinila

SCAA - solo-cimento autoadensável

SCC – solo-cimento compactado

SCP – solo-cimento plástico

SP - superplastificante

TGA – Termogravimétrica

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo geral .....	15
1.2	Objetivos específicos .....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1	Alternativas de sistemas construtivos: solo-cimento .....	16
2.2	O solo.....	20
2.3	O solo-cimento .....	21
2.4	Os aditivos superplastificantes e o cimento .....	22
2.4.1	Lignossulfonatos .....	23
2.4.2	Melanina sulfonato e naftaleno sulfonato.....	24
2.4.3	Polímeros policarboxilatos .....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
3.1	Materiais.....	28
3.1.1	O Solo .....	28
3.1.2	Cimento.....	28
3.1.3	Água.....	29
3.1.4	Aditivo .....	30
3.1.5	Utensílios e Equipamentos Utilizados .....	31
3.2	Métodos .....	31
3.2.1	Estudo de Dosagem.....	31
3.2.2	Experimentos .....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	Caracterização dos materiais.....	43
4.2	Análise de hidratação.....	44
4.2.1	Análise qualitativa das amostras em estado fresco .....	44
4.2.2	Calorimetria.....	45
4.2.3	Análise termogravimétrica (TGA) .....	48

4.3	Análise mineralógica e estudos micro estruturais .....	50
4.3.1	Espectroscopia FT-infravermelho (FTIR) .....	50
4.3.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	54
4.3.3	Espectroscopia por dispersão de energia de raio-X (EDS)..	57
4.3.4	Difração de Raios-X - DRX .....	61
5	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
7	BIBLIOGRAFIA.....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma atividade intrínseca a natureza humana, sendo uma ciência desenvolvida e intensamente praticada desde as civilizações mais antigas até hoje. Por ser de tão grande importância, a construção civil passou e ainda passa por constante desenvolvimento e evolução, em que a busca por alternativas em materiais e sistemas construtivos são ações de grande importância para a melhoria da produtividade e eficiência dessa atividade.

Na busca por alternativas por diferentes materiais construtivos, o uso do solo-cimento como material de construção alternativo tem se apresentado como foco de inúmeras pesquisas pelo mundo como material de construção alternativo.

O solo-cimento é um produto endurecido, resultado da mistura entre solo, cimento e água, em dosagens adequadas e estabelecidas de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo (ABCP, 2004).

O solo-cimento fluido, ou também chamado solo-cimento autoadensável é uma mistura de solo, cimento, água e aditivos. Estes aditivos contribuem com a fluidez da mistura, de maneira que não se exija gasto de energia física dos operadores, ou de uso de prensas automatizadas para preenchimento de formas ou cavidades (ALCANTARA e BERTÉ, 2013).

Os aditivos são produtos utilizados para melhorar ou ajustar propriedades dos materiais construtivos, sejam ainda no estado fresco ou já em estado endurecido. Tem importância na influência de propriedades mecânicas, físicas e químicas nas argamassas, nos concretos e também no solo-cimento. A eficácia do aditivo depende também de suas características e dosagem, mas também de sua interação com o cimento (CATARINO, 2012).

Os mecanismos e reações de hidratação do cimento são conhecidos e apresentam aplicações clássicas, como a produção do concreto pela mistura de cimento, água, brita e areia. Assim como, a interação do cimento e aditivos é conhecida e largamente estudada na construção civil, sendo os mecanismos de ação de dispersão de partículas de cimento causados pelas moléculas dos aditivos já serem entendidos e melhorados com a evolução dos superplastificantes.

No caso do solo-cimento, as relações entre os argilominerais presentes no solo e a interação que apresentam nas reações de hidratação em conjunto com o cimento são também previstas. Bryan (1988) apresenta critérios para solos para

estabilização com cimentos; Abiko (1980) relaciona a formação de materiais de cimentação primários e secundários no processo de estabilização do solo-cimento; Williamson e Cortes (2014) relacionam a dimensão das partículas de argila e cimento com a interação solo-cimento.

Para o solo-cimento autoadensável (SCAA) a interação entre solo-cimento e aditivos é pouco detalhada. O trabalho realizado por Lei e Plank (2014) avaliou a presença de 3 tipos de argilominerais diferentes (montmorilonita, caulinita e moscovita) em quantidades muito pequenas adicionados a pasta de cimento aditivada, e avaliou a influencia da presença desses argilominerais sobre a força de dispersão de aditivos superplastificantes policarboxilatos a base de éter-vinil. Verificou-se que o aditivo superplastificante a base de policarboxilato (PCE) com presença de polietileno glicol (PEG) é negativamente afetado pelas argilas na ordem: montmorilonita > caulinita > moscovita. O estudo sugere que PCEs convencionais contendo PEG toleram todos os tipos de argilominerais exceto montmorilonita. Quando montmorilonita está presente como um contaminante em uma mistura cimentante (argamassa ou concreto), a sugestão dada pelo autor é o uso de um PCE livre de PEG.

Muitos estudos são dirigidos para a verificação do estado fresco da mistura água, solo, cimento e aditivo, e também buscando a avaliação do comportamento físico da mistura em relação a suas capacidades de carga, resistência mecânica e durabilidade. Nacano (2006) avaliou a aplicação do solo-cimento plástico em elementos de fundação como estacas para obras de pequeno e médio porte; Aio et al. (2011) avaliou o uso de cimento ARI e sua influência nas propriedades do SCAA; Alcantara e Berté (2013) variaram as proporções dos componentes da mistura SSCA e avaliaram o comportamento das suas propriedades físicas e mecânicas.

A relevância do tema é verificada devido a muitos estudos serem direcionados a avaliação do comportamento físico-químico das misturas de solo-cimento, sendo que essa pesquisa buscou entender as interações do conjunto solo, cimento, aditivo superplastificante e água, avaliando as interações na hidratação do conjunto e ação do aditivo nos mecanismos de dispersão de partículas do cimento e dos argilominerais. Assim, o presente estudo busca contribuir no entendimento das propriedades físico-químicas do SCAA para melhoramento das dosagens e comportamento mecânico final do produto.

## **1.1 Objetivo geral**

O objetivo desse trabalho foi avaliar as interações físico-químicas entre os componentes da mistura solo, cimento, água e aditivo superplastificante a base de policarboxilatos.

## **1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Avaliar a influência dos argilominerais presentes em dois tipos de solos sobre a ação de fluidez do aditivo superplastificante a base de policarboxilatos nas misturas de solo-cimento autoadensável;
- Avaliar a influência dos argilominerais presentes em dois tipos de solos sobre as reações de hidratação das misturas de solo-cimento autoadensável;
- Avaliar a influência do aditivo superplastificante a base de policarboxilatos sobre as reações cimentantes das misturas de solo-cimento autoadensável.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Alternativas de sistemas construtivos: solo-cimento**

O uso do solo como material construtivo é milenar. Algumas culturas utilizavam o solo como material construtivo desde o período pré-histórico. Construções em terra apiloada ou moldada foram encontradas na Turquia, na Assíria e em regiões do Oriente Médio, datando entre 9000 e 5000 a.C. (MINKE, 2001 apud PISANI, 2004, p.9).

O termo taipa é usado genericamente para indicar a utilização de solo ou argila como matéria prima básica para construção. No Brasil, cidades históricas como Ouro Preto possuem construções do tipo taipa-de-pilão, adobes e taipa-de-sopapo ou pau-a-pique, sendo esses métodos construtivos uma herança cultural. No entanto, o solo passou a ser considerado um material de segunda categoria no início do século XIX, com o aumento do uso do cimento (AIO et al., 2011).

De acordo com a ABCP (2004), a experiência com solo-cimento teve importante crescimento, principalmente pelo fruto de pesquisas da Portland Cement Association (PCA), nos EUA, que desenvolveu trabalhos de pesquisa ao longo das décadas de 1930 e 1950. Além disso, diversas obras foram executadas com o uso do solo-cimento em diferentes regiões do mundo com diversos tipos de solo, e também no Brasil, a partir de 1939.

A aplicação do solo-cimento foi amplamente difundida como base de pavimentos, como estradas, em áreas de ruas residenciais, estacionamentos e aeroportos. Seu baixo custo, juntamente com grande resistência e durabilidade são suas maiores vantagens (PCA, 2014).

No Brasil, as aplicações de solo-cimento também são realizadas como base de pavimentos, e edificações também já foram realizadas com solo-cimento. É o exemplo do Hospital Jorge Adriano em Manaus, com uma área de 10.800 m<sup>2</sup>, construído em 1950 em solo-cimento, inclusive suas bases (THOMAZ, 1984, apud MARTINS et al., 2012, p. 2).

De acordo com a ABCP (2004), o solo-cimento é um produto endurecido, que é o resultado da mistura compactada de solo, cimento e água. As proporções de cada um dos três materiais são estabelecidas de acordo com as normas do solo em estudo.

Os solos-cimento são classificados em três categorias: SCC – solo-cimento compactado, SCP – solo-cimento plástico e SCAA - solo-cimento autoadensável. Todos possuem em suas composições os componentes: solo, cimento e água. Para o solo-cimento compactado, a adição de água é feita de modo que ocorram, além de uma máxima compactação, as reações de hidratação do cimento. Já o solo-cimento plástico, além dos três componentes, a adição de água deve ser feita até que se obtenha a consistência plástica da mistura, com características similares a de uma argamassa de emboço (SEGANTINI, 2000). Já Berté (2012), apresenta o solo-cimento fluido ou solo cimento autoadensável possuindo ainda outro componente, que é o aditivo químico.

O baixo custo do solo-cimento é associado ao menor volume de cimento aplicado, além do menor custo de produção da mistura. De acordo com Segantini (1994), os custos de produção do solo-cimento, considerando materiais, mão-de-obra e encargos sociais são em torno de 30 a 40% comparados aos custos de produção do concreto. O solo-cimento plástico e solo-cimento autoadensável também apresentam vantagens de custos, e tem sido tema de estudos devido ao interesse em uso de misturas que tenham baixo gasto de energia no processo de moldagem, de modo que a compactação seja dispensada (ALCANTARA e BERTÉ, 2013). As aplicações para um SCAA são ideais para locais em que não é possível realizar compactação, ou por dificuldade de acesso ou por uso de estruturas armadas em que o auto-adensamento é necessário. Os custos de aplicação seriam reduzidos, certamente, pelo menor consumo de cimento, e por não serem necessários meios mecânicos de compactação da mistura.

Com a necessidade de autocompactação, o uso de superplastificantes pode trazer mais fluidez a mistura SCAA. Desenvolvidos para concretos, os superplastificantes permitem a redução da quantidade de água a ser usada na mistura, promovendo a manutenção da trabalhabilidade, e melhoram outras características do produto final, como resistência e compressão (CATARINO, 2012).

Alguns trabalhos apresentam o bom desempenho do uso de superplastificantes em solo-cimento, como afirmam Alcantara e Berté (2013), que obtiveram valores para densidade aparente e resistência mecânica significativos para as misturas, de modo que a eficácia nos ensaios e qualificaram o material resultante como autoadensável, sendo que o aditivo teve papel importante na mistura, favorecendo uma melhor homogeneização da mesma.

Nacano (2006) propõem o estudo da aplicação do SCP em estacas apiloadas, para avaliar o comportamento dessa mistura aplicado a elementos de fundação. Foram testadas misturas com 14% de cimento em relação a massa de solo, 27% de água em relação a massa de solo, e em relação a massa de cimento 2% de aditivo redutor de água “Rheobuild” 1203 da marca “Master Builders Technologies”. Os resultados de desempenho mecânico foram adequados para idades de 56 dias, com cargas admissíveis de 24 kN. Os custos de emprego do SCP foram 49% menores em relação a estacas somente de concreto.

Berté (2012) realizou estudo com uso de solo argiloso, cimento e aditivo a base de policarboxilatos, buscando criar uma mistura otimizada de solo-cimento autoadensável. São realizadas análises comparativas entre propriedades das misturas como densidade aparente, retração, absorção de água, resistência a compressão axial e diâmetros médios. As variações das misturas são de 20, 25 e 30% de cimento em relação a massa de solo, 36, 39 e 42% de água em relação a massa de solo-cimento, e 0,4, 0,6 e 0,8% de aditivo em relação a massa de cimento. É, então, eleita a mistura otimizada com proporções 30% de cimento em relação ao solo, 42% água, 0,8% de aditivo em relação ao aditivo, sendo o fator água/solo de 0,42, fator água/cimento de 1,68 e fator água/cimento + solo seco de 0,34. Essa mistura apresentou os melhores resultados, além de desempenho satisfatório em relação a testes posteriores somente com esse traço de escoamento por gravidade, diâmetro de espalhamento e resistência a compressão axial de 2,91 MPa aos 28 dias.

Barboza (2014), com uso de solo arenoso, obteve bons resultados em misturas com proporções de cimento/solo de 1/8 e 1/12 em massa, com adições de 0,8 e 1,2% de aditivo químico a base de policarboxilatos (em relação a massa de cimento). Para essas quantidades, a mistura apresentou o maior índice de variação com relação ao ganho de fluidez das misturas. Obteve resultados satisfatórios para os traços estudados, com índice de absorção de água abaixo de 20%, conforme recomendado pela NBR 13553 (2013). Os resultados de densidade aparente e teor de ar incorporado foram melhores para a proporção 1/8 cimento/solo e 0,8% de aditivo. Ambos os traços avaliados obtiveram resultados aceitáveis de resistência a compressão superiores a 1,0MPa aos 7 dias. O superplastificante usado a base de policarboxilato apresentou grande diminuição da quantidade de água das misturas e

resistências adequadas para aplicação como material de construção para vedações verticais.

Milani e Paz (2015) realizaram um estudo sobre as características físico-mecânicas do solo-cimento autoadensável com adições de resíduos de pneus e de microfibras de polipropileno. Foi realizado um estudo de otimização de dosagens, e os traços que apresentaram melhores desempenhos nos ensaios físico-mecânicos foram aqueles com teores de consumo de cimento entre 20% a 25% em relação a massa seca de solo, 21% de água em relação a massa solo+cimento, e 0,8% de aditivo superplastificante em relação a massa de cimento. Foram determinadas as características de resistência à compressão simples, à compressão diametral, à tração na flexão, e a capacidade de absorção de água, retração linear, retração livre e fissuração. Os resultados mostraram que o compósito solo-cimento autoadensável apresenta potencialidade para aplicação como paredes monolíticas, sendo que os usos de fibras artificiais melhoram o comportamento frente a fissuração, além de apresentar resistências compatíveis com as exigidas para construção de paredes monolíticas.

Martins et al. (2015) realizaram estudo sobre caracterização mecânica de compósitos de solo-cimento com aditivo superplastificante, e com a incorporação de cinzas volantes, metacaulim e fibras de sisal. O solo utilizado foi um solo tipo areno-argiloso e as quantidades de aditivo em relação ao cimento variaram de acordo com a quantidade de fibras adicionadas nas amostras, sendo a quantidade mínima de aditivo foi de 2,5% para 0% de fibras, e quantidade máxima de aditivo de 5% para 1,5% de fibras. As amostras com solo-cimento, aditivo, cinzas volantes e metacaulim apresentaram resistência a compressão axial de 3,3 MPa aos 28 dias de cura. Após 240 dias de cura foi notado um aumento na resistência a compressão de 7,5 MPa. Esse ganho de resistência de acordo com o autor foi devido as reações pozolânicas promovidas por cinzas volantes e metacaulim que foram processadas mais lentamente do que as reações de hidratação do cimento. O aumento na resistência ao longo do tempo também foi acompanhado por um aumento de rigidez (aumento do módulo de elasticidade) e uma redução na deformação no rompimento.

Algumas ponderações devem ser feitas para uso do solo como material construtivo, como o tipo de solo a ser utilizado. Pela grande variedade de solos, um cuidado a ser tomado é o tipo de solo a ser escolhido para a mistura solo-cimento. De acordo com Aio et al. (2014), as propriedades do tipo de solo influenciam a

qualidade e os custos do solo-cimento, sendo os mais indicados os solos arenosos bem graduados com silte e argila, pois exigem uma menor quantidade de cimento para estabilizá-los.

## 2.2O solo

Solo é um nome comum, que podemos entender como a superfície da crosta terrestre. Para a Engenharia, solo é o termo utilizado para denominar materiais da crosta terrestre que podem ser perfurados, deslocados e escavados para aplicação em obras da Engenharia Civil, servindo tanto como base para uma edificação, quanto material construtivo a ser aplicado (VARGAS, 1977).

As propriedades do solo que apresentam grande importância no processo de estabilização e aplicação como material de construção são: tamanho dos grãos em função da quantidade de grãos de determinados tamanhos, que reflete na classificação em pedregulhos, areias, siltes e argilas; a estrutura morfológica dos grãos e sua composição química, e por sua vez, reflete na constituição dos solos quanto a presença e quantidade de minerais que influenciam nas propriedades dos solos como coesão, plasticidade, troca catiônica, atividade do solo e contração de resistência seca.

Os solos na maioria das vezes apresentam a fração argila, que é um material fino, de textura terrosa, e que apresenta plasticidade quando misturado com uma quantidade limitada de água (ABIKO, 1980).

De acordo com NBR 6502 (1995), as partículas de pedregulho e areia são elementos inertes. A areia e o silte são elementos sem coesão. Já as argilas possuem forte coesão, não apresentam estabilidade volumétrica, expandindo na presença de água. Podem apresentar variações de propriedades físicas e químicas dependendo de sua origem (FARIA et. al., 2010).

A argila é considerada a parte coloidal do solo, e é formada principalmente por argilominerais (caulinita  $[Al_4Si_4O_{10}.8H_2O]$ , montmorilonita  $[Al_2 Mg_4Si_2O_{10}.2H_2O]$ , illita  $[(OH)_4 K_y (Al_4Fe_4Mg_4Mg_6).(Si_{8-y} Al_y)O_{20}]$ , clorita, vermiculita), e outros minerais do tipo calcita, quartzo, dolomita, gipsita, piritita e alumina. (ABIKO, 1980; SANTOS, 1998).

Quanto a coesão e plasticidade, caolinitas apresentam menores plasticidade e coesão. As montmorilonitas apresentam maiores plasticidade e coesão, além disso

apresentam variações de dimensões conforme teor de água agregada a molécula (VARGAS, 1977).

As trocas iônicas durante a hidratação das argilas influenciam as propriedades físicas e comprometem as propriedades mecânicas da mistura. Isso ocorre, pois durante a hidratação do solo, as argilas tem propriedade de realizar trocas iônicas entre os íons adsorvidos. As montmorolinitas tem capacidade de troca iônica maior que as caolinitas, e as illitas tem capacidade intermediária. Dependendo da natureza da argila, um argilomineral pode estar mais presente que outro, influenciando assim as propriedades da mistura. No entanto, a super atividade das argilas também pode ser um ponto de cuidado, pois a evaporação da água intersticial traria como consequência a retração da estrutura (VARGAS, 1977).

### **2.3 O solo-cimento**

Cimento é um material finamente pulverizado, seco, que por si só não é aglomerante, mas quando hidratado, desenvolve propriedade aglomerante e adquire resistência. O cimento Portland é um tipo comum de cimento hidráulico, produzido pela mistura de clínquer constituído por diversos compostos, sendo principalmente formado por silicatos de cálcio. Os principais compostos do clínquer são:  $C_3S$  – Silicato tricálcio;  $C_2S$  – Silicato bicálcio;  $C_3A$  – Aluminato tricálcio;  $C_4AF$  – Ferroaluminato tetracálcio, sendo as proporções encontradas em cimentos Portland comuns são:  $C_3S$  = de 45 a 60%;  $C_2S$  = de 15 a 30 %;  $C_3A$  = 6 a 12%;  $C_4AF$  = 6 a 8%. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As reações de hidratação dos grãos de cimento são iniciadas desde a adição de água, ocorrendo imediatamente reações entre o sulfato de cálcio e a superfície dos grãos de aluminato tricálcio, formando um gel de compostos hidratados insolúveis. O gel aquoso formado promove a adesão de partículas de água em sua superfície, criando forças capilares, adsorvendo partículas de cimento. Essa adesão de partículas resulta em pequena resistência inicial, sendo que as reações posteriores responsáveis pelo endurecimento e aumento de resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ao longo das duas primeiras horas de hidratação, os grãos do cimento são envolvidos por uma membrana de gel de material hidratado. Os contatos entre as várias membranas formadas geram uma rede, uma estrutura de compostos que

unidos diminuem a plasticidade inicial da mistura cimento-água, sendo este o ponto de início da chamada pega. O endurecimento do cimento se inicia de três a cinco horas, quando são formadas protuberâncias na membrana gelatinosa que envolve os grãos do cimento, que após algum tempo são transformadas em fibrilas empacotadas saindo dos grãos de cimento. Conforme a hidratação vai se desenvolvendo, as fibrilas crescem agregando mais e mais grãos de cimento, com a formação de uma estrutura, abrangendo resíduos de grãos que não reagiram, produtos da hidratação, e outros agregados como partículas de areia e pedra (ABIKO, 1980).

De acordo com Williamson e Cortes (2014), durante a hidratação do solo-cimento, o  $\text{Ca}^{2+}$  liberado das reações de hidratação do cimento contido na mistura interage com a superfície da argila, através de substituição de cátions. A liberação de íons  $\text{OH}^-$  provoca aumento de pH, e também aumenta a densidade de carga elétrica negativa na superfície das partículas de argila. O pH alto provoca a dissolução de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na argila, alterando a superfície dos grãos de cimento.

De acordo com Bahmani et al. (2014), em uma mistura de solo-cimento, as reações de hidratação do cimento ocorrem imediatamente, com a hidratação de silicatos ( $\text{C}_2\text{SH}_x$ ,  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$ ), aluminatos de cálcio ( $\text{C}_3\text{AH}_x$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_x$ ), e formação de cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Reações pozolânicas ditas secundárias, entre cal hidratada, sílica e alumina a partir dos minerais de argila, conduz à formação de hidratos de silicato de cálcio adicionais e hidratos de aluminato de cálcio. Esta reação do solo-cimento constitui uma base para explicar a melhora da força de solo estabilizado.

## **2.4 Os aditivos superplastificantes e o cimento**

De acordo com a NBR 11768 (2011), aditivo é o produto adicionado durante a preparação do concreto, com dosagem não maior que 5% da massa de material cimentício contida na mistura para concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

Os aditivos são incorporados durante a mistura cimento-água ainda no estado fresco, e podem influenciar as características físicas, químicas e mecânicas do concreto. Algumas das propriedades que podem ser alteradas com o uso de aditivos

são: trabalhabilidade, homogeneidade, tempo de pega, incorporação de ar e reduz retração (CATARINO, 2012).

As adições de compostos para melhoramento do cimento tiveram início a partir de 1873, com adições de gesso cru ou cloreto de cálcio para regulação do tempo de pega. Ainda no século XIX, certos tipos de graxas eram usadas como plastificantes hidrofugantes de argamassas e concretos. A partir de 1910, teve início a produção industrial de aditivos, com formulação específica para efeitos de plastificantes, aceleradores, retardadores e impermeabilizantes (CORRÊA, 2010).

Os primeiros aditivos com propriedades redutoras de água foram desenvolvidos a partir das primeiras décadas do século XX, apresentando uma capacidade de redução de água um pouco maior que 5% em relação ao concreto sem adições químicas. Com as melhorias de pesquisas e processos, surgiram aditivos com poder de redução cada vez maiores, altamente eficientes (IBI, 2013).

As classificações para superplastificantes são diversas, mas as mais usadas são as seguintes, de acordo com (Catarino, 2012; Mehta e Monteiro, 2008; Hartmann e Helene, 2003; Corrêa, 2010):

- Lignossulfonatos, que podem ser de cálcio ou de sódio, também chamados de superplastificantes da primeira geração;

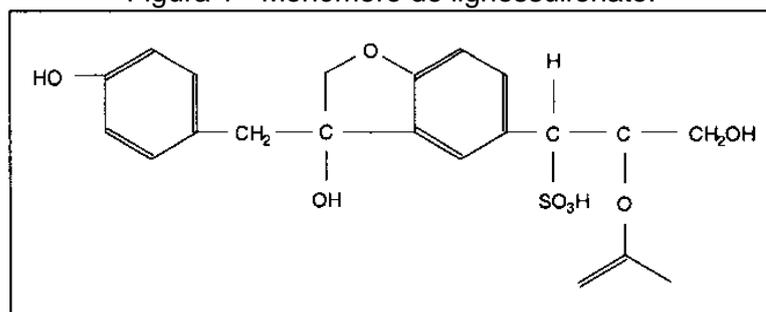
- Polímeros sintéticos sulfonatados: que podem ser os policondensados de sulfonato de melanina, também chamado de melanina sulfonato, ou podem ser os policondensados de ácido naftaleno-2-sulfônicos, também chamados de naftaleno sulfonato. São denominados os superplastificantes de segunda geração;

- Polímeros poliacrilatos, policarboxilatos e copolímeros com base polietilenos que tem uma estrutura molecular tipo pente. São os chamados superplastificantes da terceira geração ou da nova geração.

#### **2.4.1 Lignossulfonatos**

São grandes moléculas, obtidas a partir de um rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira (HARTMANN e HELENE, 2003). São chamados de a primeira geração de aditivos químicos, redutores de água de alta eficiência, e permitem uma redução de 12% na quantidade de água da mistura. Sua estrutura molecular é apresentada na figura 1 a seguir.

Figura 1 - Monômero de lignossulfonato.

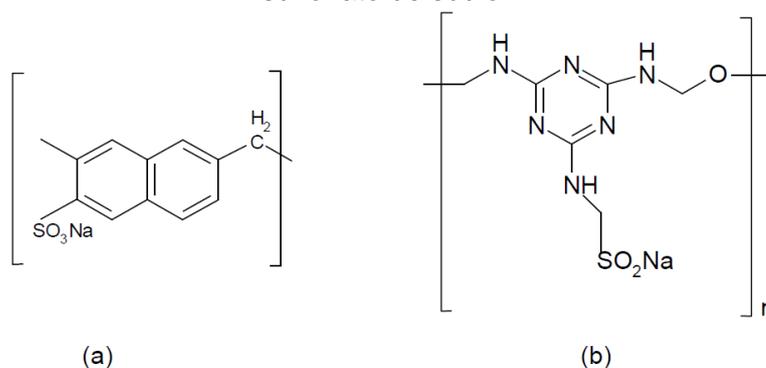


Fonte: Hartmann e Helene (2003).

#### 2.4.2 Melanina sulfonato e naftaleno sulfonato

São polímeros sintetizados com grupos sulfonatados, através de reações de policondensação: para a melanina sulfonato, são realizadas reações de policondensação da melanina com formaldeído; para o naftaleno sulfonato, são realizadas reações de naftaleno sulfonato com formaldeído (CATARINO, 2012). Permitem redução de água da mistura em até 25%. (HARTMANN e HELENE, 2003). A figura 2 apresenta a estrutura molecular dos superplastificantes.

Figura 2 - Monômeros de (a) Poli-naftaleno sulfonato de sódio linear; (b) Poli-melanina sulfonato de sódio.



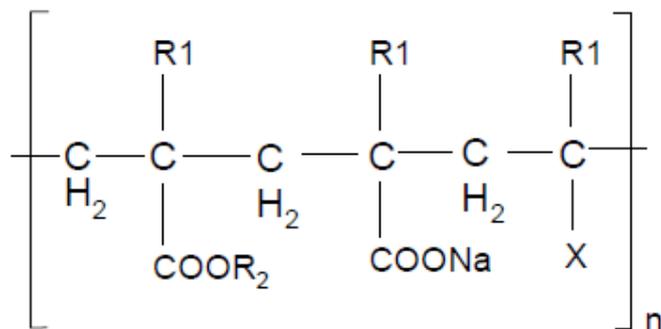
Fonte: Hartmann e Helene (2003).

#### 2.4.3 Polímeros policarboxilatos

São os chamados superplastificantes da nova geração ou também hiperplastificantes. São cadeias poliacrílicas obtidas por polimerização de radicais livres de diferentes monômeros de vinil (CATARINO, 2012). O uso desse tipo de superplastificantes possibilita a redução de até 40% de água da mistura, originando concretos de boa trabalhabilidade, alta performance e alta resistência (MEHTA e

MONTEIRO, 2008). Segue abaixo na figura 3, a estrutura molecular típica de um superplastificante poliacrilato.

Figura 3 - Monômero de um copolímero de poliacrilato.



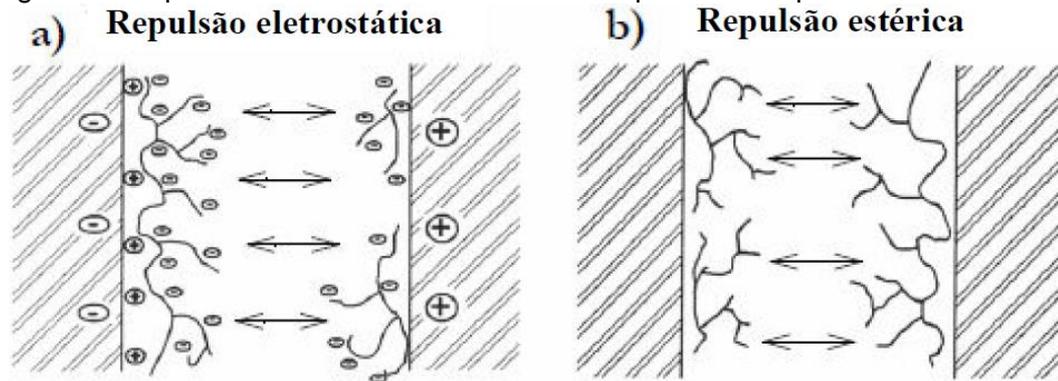
Fonte: Catarino (2012).

Durante a hidratação, pelas reações que ocorrem entre cimento e água, a superfície das partículas de cimento torna-se rica em íons  $Ca^{2+}$ , devido as reações entre silicatos e aluminatos presentes no cimento. Pela natureza polar da água, existe a tendência de floculação do cimento, pois certa quantidade de água fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo assim a disponibilidade de água e por consequência, a fluidez e a lubrificação da mistura diminuem. A área específica dos grãos de cimento também diminui, reduzindo a área para reações de hidratação (HARTMANN e HELENE, 2003).

Os mecanismos de ação dos superplastificantes atuam na superfície das partículas do cimento, que durante a hidratação apresentam camada elétrica positiva, permitindo a interação entre os grupos hidrofílicos dos superplastificantes carregados negativamente ( $SO_3^-$ ,  $COO^-$ ,  $OH^-$ ) (CATARINO, 2012).

Os superplastificantes a base de lignossulfonatos, melanina e naftaleno-sulfonatos atuam nas partículas do cimento por mecanismos de repulsão eletrostática, aumentando a fluidez e redução de água da mistura. Os PCEs também atuam por mecanismos de repulsão eletrostática, mas também atuam por repulsão estérica. Pelo mecanismo de repulsão estérica, as moléculas do superplastificante adsorvem nas superfícies das partículas de cimento, e devido as longas cadeias laterais das moléculas do PCE, ocorre o impedimento de aproximação das partículas de cimento (PUERTAS et al., 2005; HARTMANN e HELENE, 2003). A figura 4 abaixo ilustra os mecanismos de ação eletrostática e estérica.

Figura 4 - Repulsão eletrostática e estérica na superfície das partículas de cimento.



Fonte: Ramachandran (1998 apud Catarino, 2012, p. 38).

O clínquer quando posto em contato com uma solução aquosa são formados os produtos de hidratação amorfos e cristalinos, de acordo com o tempo de hidratação. Os compostos não reagem de modo igual sendo em geral o aluminato tricálcio  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  o componente mais reativo, e conforme andamento da reação (10-15 min), forma etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) e singenita ( $\text{K}_2\text{Ca} \cdot 2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). A formação desses cristais é um dos principais parâmetros que afetam a capacidade de trabalho do cimento, pois a forma alongada destes cristais aumenta a área de superfície das partículas de cimento, aumentando consequentemente, a demanda de água (ZINGG, 2009 apud, FERRARI et al, 2012, p. 2189).

Ferrari et al. (2012), em seu estudo sobre a ação das forças de adsorção e de interação entre PCE e diferentes fases do clínquer, observou que as regiões onde superplastificantes são depositados são compostos principalmente por potássio e enxofre, observando que o superplastificante interage com estas espécies iônicas em solução, e quando a amostra foi seca, sais de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  precipitaram. A forte interação entre superplastificante e sulfato reduz a quantidade real de íons sulfato disponíveis na solução dos poros. Essa ação do superplastificantes reduz a formação de etringita, resultando numa melhor capacidade de escoamento da pasta de cimento.

Plank e Hirsch (2007) avaliaram a influência do potencial zeta de produtos iniciais de hidratação do cimento, em particular etringita, monosulfatos, singenita, portlandita e gesso, na adsorção do superplastificantes policondensados a base de melanina e naftaleno, e policarboxilatos, e concluíram que para elevação da adsorção do plastificante é necessário um potencial zeta positivo, sendo que a

etringita é capaz de adsorver quantidades elevadas de superplastificantes carregados negativamente. O monossulfato apresenta potenciais menores, e a singenita, portlandita e gesso adsorvem superplastificantes em quantidades pouco significativas.

Plank e Hirsch (2007) também afirmam que o potencial zeta também varia em função da concentração de potenciais iônicos, que variam de acordo com a composição do cimento e durante o processo de hidratação.

Quando as partículas do cimento entram em contato com a água, ao redor delas é formada uma camada eletroquímica dupla, que possui carga elétrica que depende da natureza química das partículas hidratadas e dos íons na água dos poros do cimento. A adsorção do superplastificante é possível somente quando essa carga elétrica da partícula é positiva, ou quando a da molécula do superplastificante é desorvido um ânion que já foi adsorvido (por exemplo  $\text{OH}^-$  ou  $\text{SO}_4^{2-}$ ) (PLANK, 2005 apud, PLANK e HIRSCH, 2007, p. 538).

As dosagens dos superplastificantes podem variar dependendo da presença de argilominerais na pasta cimentante ou dependendo do tipo de superplastificante. Lei e Plank (2014) verificaram que as dosagens dos superplastificantes a base de etileno glicol (PEG) e naftaleno sulfonato tiveram de ser bem maiores comparados aos superplastificantes a base de maleatos de monoalquilas para aplicação em misturas de cimento com os argilominerais nas seguintes proporções: montmorilonita a 1%, caulinita a 3% e moscovita a 12 % (em relação a massa de cimento).

Lei e Plank (2014) também avaliaram a interação individual dos aditivos com os argilominerais. O superplastificante a base de etileno glicol (PEG) apresentou adsorção de maior quantidade de montmorilonita comparadas as quantidades adsorvidas de caulinita e a moscovita. Os outros superplastificantes utilizados no trabalho dos referidos autores, a base de maleatos de monoalquilas e a base de naftalenos sulfonatos, não apresentaram adsorção considerável nas superfícies das partículas dos argilominerais.

Os superplastificantes atuam nos primeiros produtos formados na hidratação do cimento, em especial na etringita. Na presença de pequenas quantidades ou contaminantes de argilominerais nas pastas cimentantes, os superplastificantes não atuam nas partículas dos argilominerais, mas preferencialmente atuam nas partículas de cimentos, salvo alguns tipos de superplastificantes que podem interagir, mas de maneira pouco expressiva.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresentará os materiais utilizados nos ensaios, assim como os equipamentos utilizados, e as metodologias aplicadas nos experimentos baseados na bibliografia relacionada ao tema.

#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 O Solo**

O estado de Mato Grosso do Sul apresenta na maior parte de sua área solo do tipo Latossolo Vermelho, com a ocorrência de aproximadamente 25 classes identificadas e catalogadas.

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de solos: um arenoso, de jazida da região da cidade de Campo Grande, e outro solo, do tipo argiloso, de jazida da região da cidade de Corumbá.

- Ensaios visuais e táteis (ABIKO, 1980);
- Ensaio de Análise Granulométrica (NBR 7181:1988);
- Ensaio de Massa Específica dos Sólidos (NBR 6508: 1984);
- Determinação do Limite de Liquidez (NBR 6459: 2016);
- Determinação do Limite de Plasticidade (NBR 7180: 2016);
- Difração de raios-X.

##### **3.1.2 Cimento**

O cimento Portland utilizado neste trabalho foi o cimento CP V ARI (NBR 5733:1991) da marca Cimento Nacional, fabricado na cidade de Sete Lagoas - MG. Durante todo o trabalho foi utilizado um único saco de cimento o qual foi mantido longe da umidade dentro de um recipiente forrado com saco plástico e fechado. Os ensaios químicos, físicos e mecânicos realizados pelo fabricante para conjunto de lotes fabricados nos períodos de Janeiro de 2016 são apresentados nas tabelas 1,2 e 3. Os dados dos laudos técnico do fabricante encontram-se no anexo deste trabalho.

Tabela 1 - Ensaio químicos do cimento Portland CP V ARI Max da Cimento Nacional.

<b>Ensaio químicos</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Resíduo Insolúvel – RI	ABNT NM 15/12	%	0,98	≤ 1,0
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	3,92	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 14/12	%	1,37	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NM 16/12	%	2,88	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	ABNT NM 20/12	%	2,25	≤ 3,0

Fonte: Relatório técnico (2016).

Tabela 2 - Ensaio físicos cimento Portland CP V ARI Max da Cimento Nacional.

<b>Ensaio físicos</b>	<b>Metodologia</b>	<b>UN.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	4.662	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,08	não aplicável
Índice de finura Peneira 75 µm (n <sup>o</sup> 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,05	≤ 6,0
Resíduo na peneira n <sup>o</sup> 325	ABNT NBR 9202/85	%	0,53	Não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,3	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	min	170	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	min	226	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,00	≤ 5,0

Fonte: Relatório técnico (2016).

Tabela 3 - Ensaio físicos cimento Portland CP V ARI Max da Cimento Nacional.

<b>Ensaio mecânicos ABNT NBR 7215/96</b>	<b>UN.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Resistência à Compressão - 1 Dia	MPa	30,20	14	1,13
Resistência à Compressão - 3 Dias	MPa	44,8	24	0,77
Resistência à Compressão - 7 Dias	MPa	50,7	34	2,04
Resistência à Compressão - 28 Dias	MPa	60,9	não aplicável	2,04

Fonte: Relatório técnico (2016).

### 3.1.3 Água

A água utilizada foi a água da rede de abastecimento urbano, que após chegar da rede de distribuição na UFMS, é armazenada em reservatório, e é distribuída na rede de tubulações pelo Campus. A UFMS não realizou análise de água de seu reservatório, mas considerou-se a análise de água da empresa de

abastecimento urbano da cidade de Campo Grande, a Águas Guariroba. As informações das análises estão na tabela 4, onde é apresentado laudo técnico da própria concessionária.

Tabela 4 - Relatório sobre a qualidade da água.

Informações sobre a qualidade da água - Janeiro 2016							
Parâmetros	Amostras realizadas	Amostras conformes	Amostras desconformes	Mín	Méd	Máx	Valor permitido
Turbidez (uT)	3039	3033	6	<0,2	0,4	4,3	5,0 uT na rede
Cloro residual livre	3039	3026	13	<0,2	0,7	0,7	Mín:0,2mg/L Máx:2,0mg/L
Cor	3039	3039	0	<4	<4	14,1	15mg/L Pt Co
pH	1920	1920	0	4,86	6,8	8,31	Recomenda-se 6,0 a 9,5
Coliformes	1768	1765	3	A	A	A	Ausência=A

Fonte: Águas Guariroba (2016).

#### 3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado nos experimentos deste trabalho foi o Master Glenium 51, a base de policarboxilatos, do fabricante BASF S.A. Sua escolha foi devido ao mesmo já ter sido utilizado em experimentos anteriores, como Barboza (2014), a qual obteve bom desempenho nos tratamentos estudados em seu trabalho com SCAA. Para este trabalho foi utilizado apenas um único frasco. De acordo com a ficha técnica elaborada pela BASF S.A, este aditivo pode ser descrito conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Dados do aditivo MasterGlenium 51 da empresa BASF S.A.

Dados Técnicos	
Base química	Éter Policarboxilato
Aspecto	Líquido branco turvo
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,055 a 1,085
PH	5 – 7
Sólidos	29 a 32
Dosagem	0,2% a 1,2% em relação ao peso do cimento

Fonte: Ficha técnica – BASF S.A.

### **3.1.5 Utensílios e Equipamentos Utilizados**

Durante o preparo das misturas foram utilizados os seguintes utensílios, disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da UFMS:

- Espátulas, formas, plástico filme de PVC;
- Peneiras série ABNT;
- Balança Tecnal Mark 1000;
- Provetas graduadas 10 e 500 ml;
- Argamassadeira Eletromecânica Solo Cap com capacidade de 5 litros e duas velocidades de rotação;
- Formas metálicas cilíndricas dimensões 50x100mm de acordo com a NBR 5738 (2015);
- Câmara úmida para cura de corpos de prova;
- Amofariz e pistilo para trituração das amostras secas para os ensaios.

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Estudo de Dosagem**

Para realização do estudo da interação do solo-cimento juntamente com aditivos superplastificantes foram adotados como referência as dosagens de trabalhos em que foram avaliados também o conjunto solo-cimento-aditivo e que apresentaram resultados positivos em relação ao desempenho físico-mecânico.

Milani e Paz (2015) e Berté (2012), em seus trabalhos sobre solo-cimento com uso de aditivo superplastificantes a base de policarboxilatos, realizaram ensaios físico-mecânicos com as misturas de SCAA otimizadas e obtiveram bons resultados de desempenho físico-mecânico com as dosagens a seguir. Milani e Paz (2015) utilizou 20% de cimento em relação a massa seca de solo arenoso, 21% de água em relação a massa seca de solo-cimento, e 0,8% de aditivo superplastificante a base de policarboxilato em relação a massa seca de cimento. Berté (2012) utilizou 30% de cimento em relação a massa seca de solo argiloso, 42% de água em relação a

massa seca de solo-cimento, e 0,8% de aditivo superplastificante em relação a massa seca de cimento.

Logo, neste presente estudo foram adotados os traços (as proporções) eleitos como os que apresentaram os melhores resultados nos trabalhos de Milani e Paz (2015), que utilizou solo tipo arenoso, e Berté (2012), que utilizou solo tipo argiloso. Os traços utilizados para o presente trabalho estão apresentados na tabela 6:

Tabela 6 – Traços das misturas de solo-cimento de referência neste trabalho.

<b>Compostos</b> <b>Autores</b>	<b>Solo</b>	<b>Cimento</b>	<b>Água</b>	<b>Aditivo</b>
<b>Berté (2012) – Solo argiloso</b>	1	0,3	0,42	0,8/(massa cimento)
<b>Milani e Paz (2015) – Solo arenoso</b>	1	0,2	0,21	0,8/(massa cimento)

Fonte: Autor do trabalho (2016).

Para ambos os solos, foram preparadas misturas com base em duas análises:

a) Para comparação de substituição do cimento pelo solo na presença de aditivo, foram preparadas as seguintes misturas:

- Cimento + Água + Aditivo
- Solo + Água + Aditivo

Por meio dessa substituição foi possível comparar a ação do aditivo na mistura sem a presença de cimento, e se o solo poderia apresentar comportamento de interação com o aditivo superplastificante.

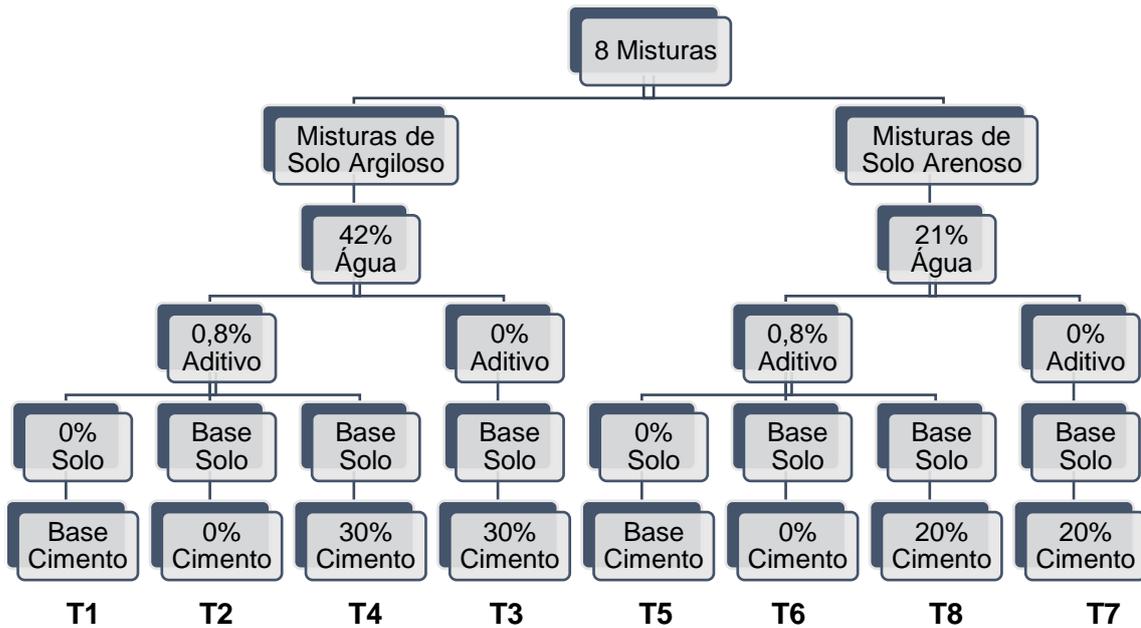
b) Para comparação sobre a ação do superplastificante no solo-cimento foram preparadas as seguintes misturas:

- Solo + Cimento + Água
- Solo + Cimento + Água + Aditivo

Por meio dessa adição de superplastificante foi possível verificar a ação do aditivo na mistura solo-cimento.

Através das misturas propostas também foi possível realizar a comparação da ação do superplastificante nos dois tipos de solo: arenoso e argiloso. Segue no quadro 1 as proporções utilizadas em cada mistura.

Quadro 1 - Estudo de dosagem do solo-cimento-aditivo superplastificante.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Todas as misturas foram realizadas em argamassadeira com capacidade de 5 litros, de acordo com procedimento do misturador mecânico NBR 7215 (1996). Antes do início das misturas, todos os materiais foram separados e pesados. As amostras foram preparadas em laboratório ( $T=23^{\circ}\text{C}$ ), sendo que para homogeneização foi seguido a norma NBR 7215 (1997), descrita no procedimento a seguir:

- A água foi adicionada na cuba da argamassadeira, e o aditivo superplastificante foi diluído na água nesse momento;
- Após foi adicionado o cimento, foi ligada a argamassadeira, e foi feita a mistura a baixa velocidade durante 30 segundos;
- Em seguida, sem parar a argamassadeira, durante 30 segundos era adicionado o solo, e depois por mais 30 segundos em alta velocidade a mistura era homogeneizada;
- Após esse tempo, o equipamento era desligado, e a mistura ficava em repouso por 1 min e 30 s, com um pano úmido cobrindo a cuba;
- Passado esse tempo, a argamassadeira era ligada novamente, e a mistura era novamente homogeneizada durante 1 min em alta velocidade.
- Em seguida, as misturas eram adicionadas as formas.

A figura 5 apresenta o equipamento utilizado para mistura, e a figura 6 apresenta o aspecto de uma das misturas de solo cimento enquanto homogeneizava-se.

Figura 5 - Argamassadeira.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Figura 6 - Mistura após homogeneização na argamassadeira.



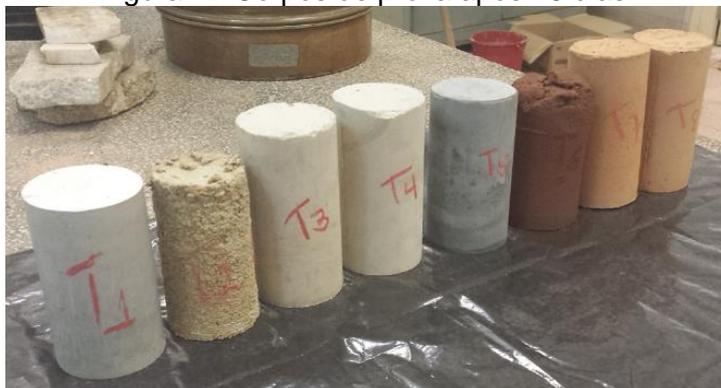
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Para as amostras que não tivessem solo ou cimento, o tempo de descanso ou de agitação foram seguidos como no procedimento, mesmo sem a adição do componente. Por exemplo: mistura T2 (solo, aditivo e água), era feita a diluição do aditivo na água, o solo era adicionado, misturado primeiro por 30 s em baixa velocidade, depois por mais 30 s em baixa velocidade, depois mais 30 s em alta velocidade, e depois era dada a continuidade de homogeneização.

As misturas prontas foram colocadas nas formas cilíndricas, e foram cobertas por filme de PVC. Os corpos de prova foram retirados das formas com 15 dias de idade após cura em câmara úmida (com exceção das amostras T2 e T6), e foram

analisadas com idade após 28 dias. As amostras T2 e T6 foram retiradas das formas com 28 dias e colocadas para secagem em estufa a 100°C por 1 dia. Os corpos de prova são apresentados na figura 7.

Figura 7 - Corpos de prova após 28 dias.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Após os 28 dias, as amostras foram rompidas, preferencialmente no centro dos corpos de prova, sendo trituradas com amofariz e pirlito para posteriormente serem aplicados os ensaios químicos. Na figura 8 é apresentado um dos corpos de prova rompido ao centro.

Figura 8 - Corpo de prova rompido.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

### 3.2.2 Experimentos

As misturas foram analisadas em estado fresco, durante a moldagem, e no estado endurecido após 28 dias de cura em câmara úmida. Os experimentos foram realizados somente uma vez por amostra, devido a disponibilidade dos equipamentos e aos custos elevados para realização dos mesmos.

Para a análise de hidratação do cimento nas misturas do solo-cimento autoadensável foram realizados os seguintes experimentos: análise qualitativa das amostras em estado fresco, análise calorimétrica e análise termogravimétrica. Já para análise microestrutural e mineralógica foram realizados os seguintes experimentos no estado endurecido: espectroscopia FT-infravermelho (FTIR), microscopia eletrônica por varredura (MEV), espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS) e difração de raios-X.

#### *3.2.2.1 Análise qualitativa das amostras em estado fresco*

Foram feitas avaliações de cada amostra no estado fresco, avaliando seu comportamento, aumento ou não de fluidez das misturas na presença ou não de aditivo superplastificante, e o comportamento físico das misturas com a variação do tipo de solo.

#### *3.2.2.2 Curva calorimétrica das misturas em estado fresco*

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a quantidade de calor liberado durante as reações de hidratação do cimento é analisada para uso como índice da reatividade das amostras. As informações sobre o calor liberado são usadas para caracterização dos comportamentos de pega e endurecimento de cimentos, as chamadas curvas de hidratação.

Assim, ensaio de calorimetria buscou avaliar através da medição da variação de temperatura das amostras em função do tempo, o comportamento inicial das amostras na presença de solo avaliando se há alguma variação de temperatura nas primeiras horas de reações (curvas calorimétricas). Também se buscou avaliar se a presença de solo e aditivo junto às amostras com cimento provoca algum tipo de mudança de comportamento nas curvas típicas de hidratação do cimento.

Foram preparadas 8 amostras e adicionadas a recipientes de isopor. Em cada recipiente foi acoplado um sensor de temperatura modelo Temperature Sensor – Waterproof DS18B2 com range de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Na outra extremidade os sensores estavam conectados a uma placa de prototipagem Arduino modelo Mega 2560. A placa, por sua vez, estava conectada ao computador, que com um programa em linguagem C++ desenvolvido pelo aluno da graduação da

UFMS, onde as leituras eram coletadas e gravadas. Segue nas figuras 9 e 10 o esquema de montagem das amostras.

Figura 9 - Conjunto montado com amostras, sensores, placa de leitura, e computador para armazenamento de dados.



Fonte: Autor de trabalho (2016).

Figura 10 – Sistema de aquisição de dados ligados as amostras.



Fonte: Autor de trabalho (2016).

Todas as amostras foram acompanhadas em torno de 4 a 4,5 horas, e foi considerado esse período pois de acordo com Mehta e Monteiro (2008), para um cimento tipo CP V ARI o tempo de início de pega mínimo é de 45 min, e o fim de pega máximo é de 375 min. No entanto, Mehta e Monteiro (2008) também menciona que a ação dos superplastificantes no cimento é de aceleração da hidratação, e por sua vez aceleração da pega e do endurecimento. Dessa forma o período de 4,5 h de avaliação das variações de temperatura seriam suficientes para avaliação das hidratação inicial das amostras.

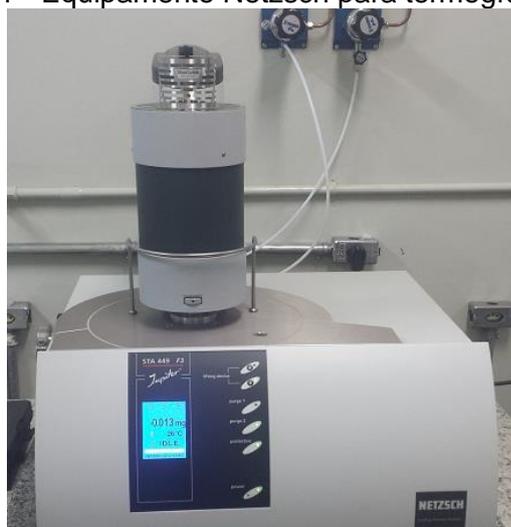
Para as amostras sem cimento, foi considerado o mesmo período de experimento para comparação de variações de temperatura. Os dados foram tratados em software editor de gráficos Origin e são apresentados nos gráficos no capítulo posterior.

### 3.2.2.3 *Análise termogravimétrica (TGA)*

A análise termogravimétrica foi realizada com amostras aos 28 dias de idade no equipamento da marca Netzsch, modelo STA 449 F3 Jupiter, onde as amostras com massa variando de 35 a 40 mg foram submetidas a aquecimento da temperatura ambiente até 800°C, com medições de temperatura a cada segundo, e com aumento de temperatura 10°C/min.

Esse experimento foi aplicado para avaliação da perda de massa das amostras conforme a variação de temperatura em que essa amostra é exposta, em uma atmosfera interna do equipamento de Nitrogênio. A amostra a ser analisada está finamente moída, e é colocada em um recipiente dentro do equipamento de medição. O equipamento submete o aquecimento da amostra, e faz as medições de temperatura, que são gravadas em um computador conectado ao equipamento. Nas figuras 11 e 12 é apresentado o equipamento em que foi feito o experimento de TGA.

Figura 11 - Equipamento Netzsch para termogravimetria.



Fonte: Autor de trabalho (2016).

Figura 12 - Porta amostra do equipamento.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

#### 3.2.2.4 Espectroscopia FT-infravermelho (FTIR)

A espectroscopia FT-infravermelho é uma técnica em que o espectrofotômetro utilizado emite um feixe de radiação, e os compostos presentes absorvem energia, que é registrado em “números de onda”. Através dos números de onda registrados, é possível identificar as substâncias presentes nas amostras (GONÇALVES et. al. 2006). Este experimento é qualitativo, e possibilita a verificação da formação de compostos de hidratação do solo-cimento em cada amostra.

O equipamento utilizado é um Espectrofotômetro UV/VIS Perkin Elmer, modelo Lambda 650, acoplado a um microcomputador com registro de faixa espectral de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . Após 28 dias de cura, e após rompimento dos corpos de prova, pequenas quantidades de material foram trituradas e separadas para posterior análise. Foram utilizadas pequenas porções de cada uma das amostras T1 a T8 misturadas com brometo de potássio (KBr) como dispersante, formando uma matriz homogênea. Com esta mistura foram confeccionadas pequenas pastilhas com uma prensa, aplicando-se uma pressão de 8 toneladas, que em seguida foi submetida à análise no espectrofotômetro. Os dados obtidos foram lançados no software de edição de gráficos Origin, onde foram gerados gráficos para discussão dos resultados, que serão apresentados no próximo capítulo.

### 3.2.2.5 Microscopia eletrônica por varredura (MEV) e Espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS)

O experimento com o microscópio eletrônico de varredura foi utilizado para avaliação das estruturas cristalinas formadas pelas reações entre os compostos das misturas, além da comparação das estruturas formadas com estruturas cristalinas conhecidas na literatura. A alta resolução do microscópio permite a visualização das microestruturas formadas nas primeiras idades das misturas, permitindo avaliar os produtos formados entre solo, cimento, água e aditivos. O EDS será utilizado para determinação de elementos químicos presentes nas amostras, sendo as amostras utilizadas com 28 dias de preparo.

O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JEOL e um aparelho de espectroscopia por dispersão de energia de raio-X (EDS) da marca Thermo, um Sputter de ouro e uma evaporadora de Grafite, ambos da marca Denton Vacuum Desk III.

As amostras aos 28 dias de idade foram rompidas em pequenos fragmentos com cerca de 4 mm de largura e altura, e foram tratados com pulverização de fina camada de ouro, conforme figura 13.

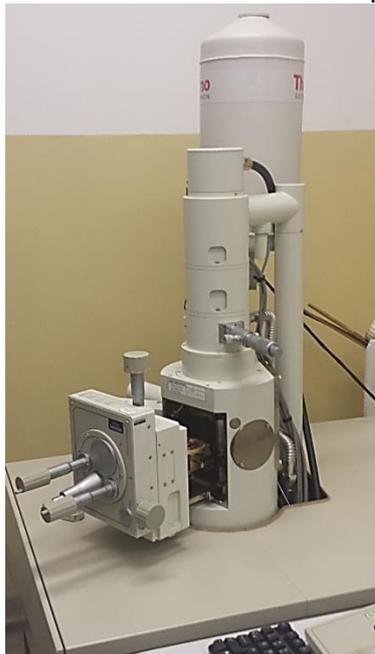
Figura 13 - Tratamento das amostras com ouro para passagem no microscópio de varredura.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Após esse tratamento, as amostras foram inseridas no microscópio de varredura e analisadas, conforme figura 14.

Figura 14 – Microscópio eletrônico de varredura aberto para inserção das amostras.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

#### 3.2.2.6 Difração de Raios-X (DRX)

Empregou-se a difração de raios-X com o objetivo de identificar as fases cristalinas contidas nas misturas confeccionadas com solo, cimento e aditivo. Foi utilizado o equipamento Difrátômetro de Raios-X D2 Phaser da Bruker, com computador integrado e software Diffracplus EVA. O Banco de dados utilizado para tratamento dos resultados foi o Diffrac.EVA. A figura 15 apresenta o equipamento.

Figura 15 - Difrátômetro de Raios-X aberto para inserção das amostras.



Fonte: Autor do trabalho.

Na técnica empregada utilizou-se radiação do  $\text{Cu}\alpha$ , varredura angular de  $2\theta$ , tensão em torno de 30 kV, e corrente de 10mA. A técnica de Difração de Raios-X proporciona a análise mineralógica dos sólidos cristalinos. Um mineral ao ser exposto a raios X de comprimentos de onda específico, as camadas dos átomos difratam os raios e produzem um padrão de picos que é característico do mineral. Os resultados gráficos apresentam na escala horizontal (ângulo de difração), o espaçamento do arranjo cristalino, e na escala vertical (altura do pico), a intensidade do raio difratado. Se a amostra tem mais de um mineral, a intensidade de picos é proporcional as suas quantidades dos minerais individuais (VERBECK, 1968 apud, GALVÃO, 2003, p. 49).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos materiais

Na tabela 7 são apresentados os resultados de caracterização dos solos utilizados neste trabalho.

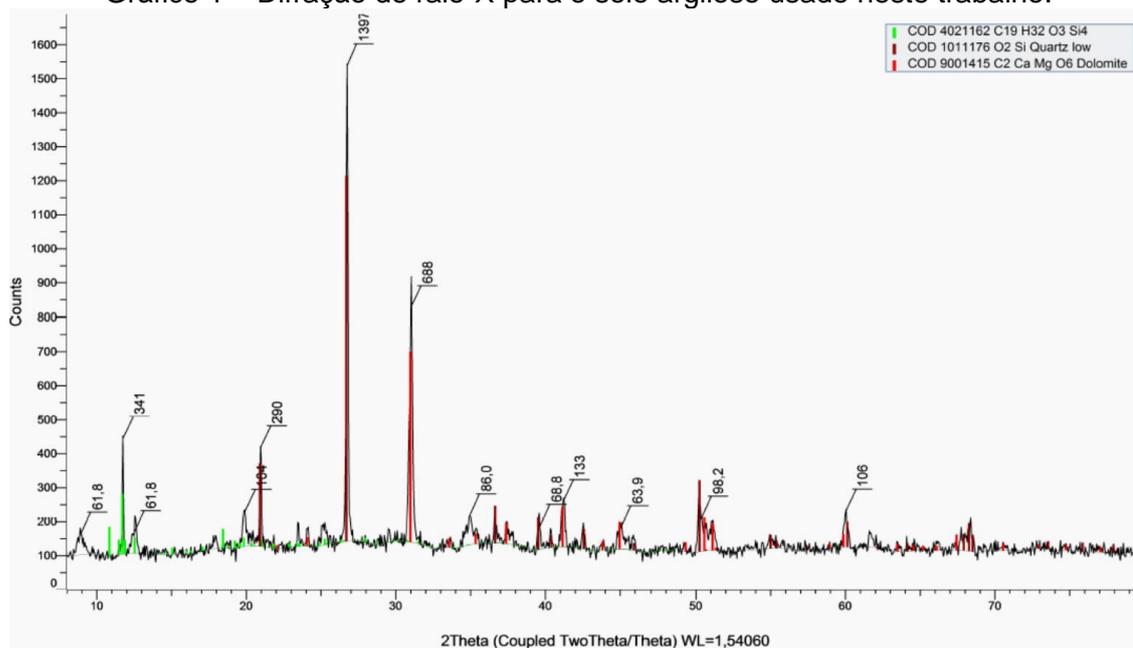
Tabela 7 - Caracterização do solo.

Características solo	Solo de jazida da região de Campo Grande	Solo de jazida da região de Corumbá
Massa específica dos solos (g/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,03
Coloração	Vermelho	Branco
Material que passa na peneira de 4,8mm (%)	100	100
Material que passa na peneira de 0,075mm (%)	20	16
Classificação AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials	A-2-4	A-4

Fonte: Autor do trabalho.

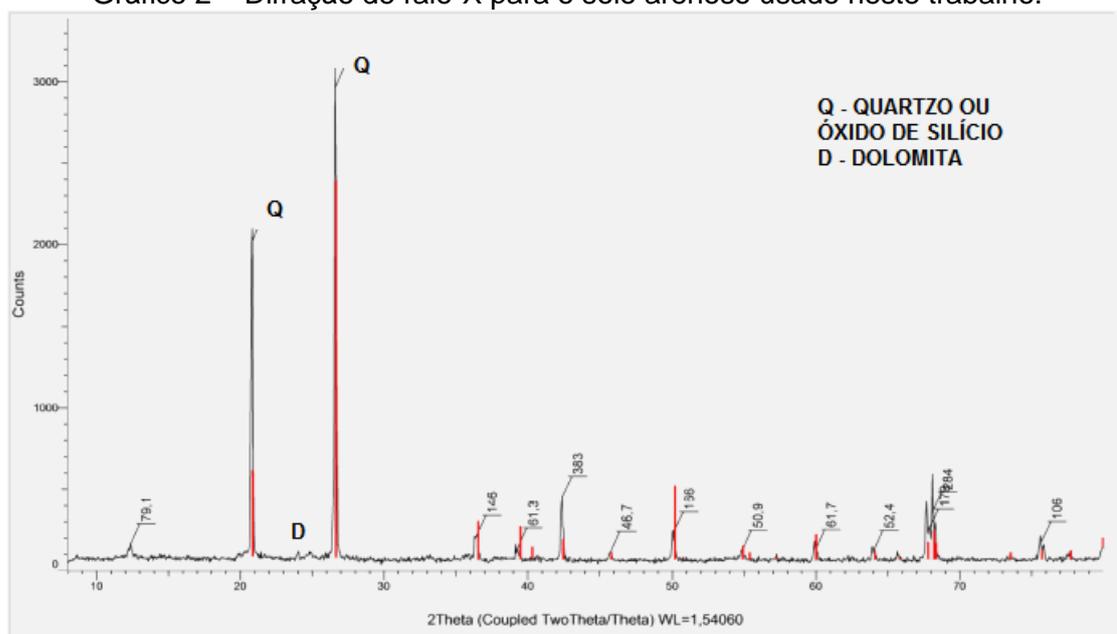
Segundo o gráfico 1, o solo apresenta na sua composição os argilominerais dolomita e quartzo, com proporções maiores de dolomita, caracterizando como solo argiloso. O gráfico 2 apresenta a composição do solo com os argilominerais quartzo e dolomita, com proporções superiores de quartzo em relação a dolomita, caracterizando-o como solo arenoso.

Gráfico 1 – Difração de raio-X para o solo argiloso usado neste trabalho.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 2 – Difração de raio-X para o solo arenoso usado neste trabalho.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

## 4.2 Análise de hidratação

### 4.2.1 Análise qualitativa das amostras em estado fresco

As amostras somente com cimento (T1 e T5) apresentaram comportamento já conhecido, sendo a ação do aditivo percebida no estado fresco através da boa fluidez das misturas, e tempo de hidratação do cimento (início e fim de pega) em torno de 4 horas.

Já as amostras contendo solo, água e aditivo (T2 e T6), apresentaram maior fluidez que as demais misturas que tinham presença de solo e cimento juntos. No entanto, não puderam ser desenformadas aos 15 dias, somente aos 28 dias por terem aspecto visual plástica e úmido e não apresentarem nenhuma resistência tátil. Essas duas amostras foram submetidas a secagem em estufa, e somente após 1 dia na secagem em estufa puderam ser retiradas das formas, porém não apresentaram estabilidade de formato, apresentando visualmente grande retração e fissuramento.

As amostras contendo solo, cimento e água (T3 e T7) apresentaram consistência plástica apresentando facilidade no manuseio durante homogeneização e confecção dos corpos de prova.

Já as amostras T4 e T8, que contem solo, cimento, água e aditivo, apresentaram fluidez adequada para SCAA, no entanto, o solo proporcionou uma

diminuição na fluidez quando comparada as misturas somente com cimento, água e aditivo (T1 e T5). Lei e Plank (2014) também notaram que a presença de argilominerais na mistura de cimento+água+aditivo proporciona a diminuição da fluidez do conjunto, mesmo que ainda seja um contaminante na pasta cimentante, ou seja, mesmo que os argilominerais estejam em pequenas quantidades na mistura cimento-aditivo.

Todas as amostras contendo solo, cimento e água, com ou sem aditivo (T3, T4, T7 e T8) apresentaram completo preenchimento das formas, sem vazios e sem aparecimento visual de fissuras quando retiradas das formas.

#### **4.2.2 Calorimetria**

De acordo com Benini e Sandberg (2008), o cimento após imediato contato com a água, tem rápida dissolução dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , dependendo na natureza do cimento. O cimento é dissolvido e reage com os íons de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  presentes na fase líquida, formando a etringita, que também se precipita na superfície das partículas de cimento. A dissolução e a formação de novos produtos resulta em liberação de calor que pode ser medido. No gráfico 3 são apresentadas variações de temperatura das amostras T1 a T4, e no gráfico 4 são apresentadas as variações de temperatura das amostras T5 a T8.

As amostras T2, T3 e T4 foram iniciadas com temperatura ambiente em cerca de 24°C e umidade a 43%. As amostras T1 e T5 foram iniciadas com temperatura ambiente em cerca de 23°C e umidade a 44%. E as amostras T6, T7 e T8 foram iniciadas com temperatura ambiente em cerca de 23°C e umidade a 42%.

No gráfico 3 são apresentadas as curvas referentes as amostras que contem solo argiloso. Curva T1 é a única que não contém solo, é a única no gráfico 3 que apresenta nos primeiros instantes um aumento de temperatura maior, chamado pico exotérmico. De acordo com Mazza et al. (2014) esse pico exotérmico é causado principalmente pela hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  com sulfato de cálcio dihidratado, formando etringita sobre as partículas do cimento. Depois dessa fase, há uma fase de dormência, onde a hidratação é mínima.

A curva T2 que representa amostra de solo, água e aditivo tem variação de cerca de 1°C durante 4 horas de acompanhamento da temperatura, demonstrando que não ocorrem reações com liberação de calor entre os componentes da mistura.

As curvas T3 e T4 iniciam juntas as variações de temperatura nos primeiros minutos de hidratação, no entanto, após 1 hora, a curva T3 que não possui aditivo, inicia um aumento de temperatura maior, o que sugere o aumento de temperatura devido a hidratação do cimento.

Apesar das curvas T3 e T4 conterem cimento, elas não apresentam o mesmo comportamento inicial, como a curva T1, mesmo com a presença de cimento na mistura. A presença do solo interfere no comportamento inicial da hidratação do cimento, pois as curvas T3 e T4 seguem o comportamento inicial da curva T2 que contém somente solo argiloso, água e aditivo.

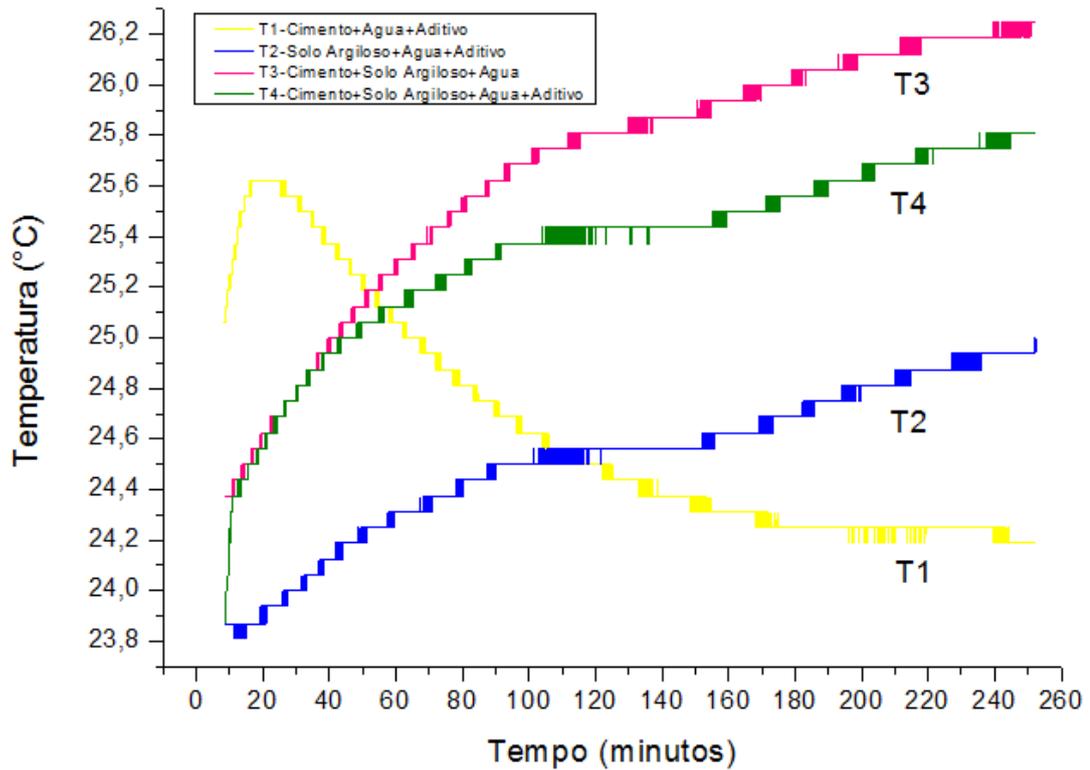
No gráfico 4, apresentam-se as misturas com solo arenoso, sendo que a curva T5 também apresenta comportamento típico de curva de hidratação de pastas de cimento, assim como apresentado no gráfico 3 com a curva T1.

A curva T6 que representa mistura com solo arenoso, água e aditivo, no início apresenta queda de temperatura de 0,7°C, e depois tem aumento de cerca de 1°C. Entende-se que essa variação não é representativa, e não demonstra que ocorreram reações que proporcionam liberação de calor entre os componentes da mistura.

As curvas de T7 e T8 são praticamente iguais, e apresentam variação de temperaturas parecidas com as amostras com representadas pelas curvas T5 e T6. no entanto a curva T8 levou mais tempo para apresentar variação de temperatura, possivelmente pela presença de aditivo superplastificante, comparada a curva T7.

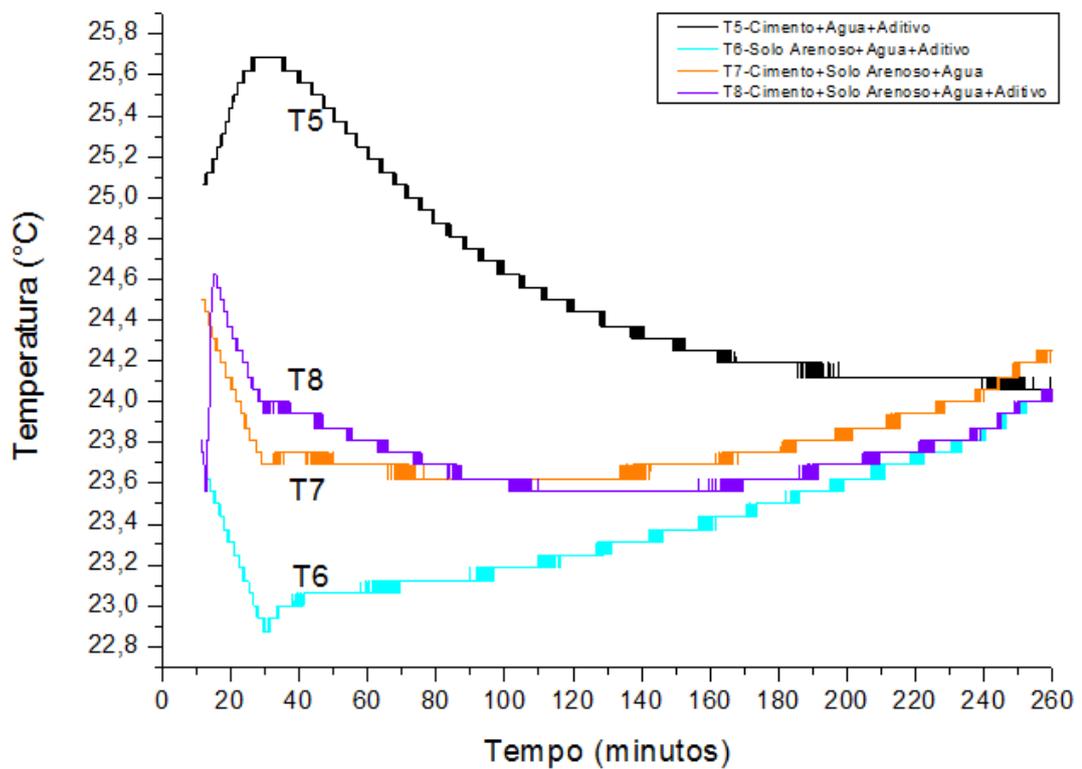
As amostras contendo solo argiloso (T2, T3 e T4) apresentaram maiores variações de temperatura e temperaturas mais altas se comparadas as amostras contendo solo arenoso (T6, T7 e T8). Com isso, os tratamentos com solo arenoso demonstraram semelhança de comportamento com as curvas de hidratação da pasta de cimento, resultando em uma maior influencia do solo argiloso na hidratação do cimento nas misturas SCAA.

Gráfico 3 - Curva calorimétrica para amostras com solo argiloso.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 4 - Curva calorimétrica para amostras com solo arenoso.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

### 4.2.3 Análise termogravimétrica (TGA)

Para as amostras T1 e T5, que não contem solo, as perdas de massa são mais acentuadas nas primeiras faixas de temperaturas até cerca de 200°C em função da decomposição dos principais produtos da hidratação do cimento como silicato de cálcio hidratado (115 a 125°C), fases de aluminatos de cálcio hidratado, e etringita (135 a 140°C) e monossulfaaluminato (185° a 200°C) (ROJAS e CINCOTTO, 2013).

Para as amostras T2, T3 e T4, com presença de solo argiloso, após 550°C ocorre perda acentuada de massa, em função da desidroxilação, onde argilominerais com presença de grupo (OH) perdem suas hidroxilas, como a caulinita e a motmorilonita (BARBOSA, 2013).

Verifica-se também que a presença de aditivo não interfere na perda de massa das amostras, pois a perda de massa entre T3 e T4, e entre T7 e T8 não apresentam significância de valores entre si. Nas amostras T6, T7 e T8, com presença de solo arenoso, as perdas de massa se concentram nas temperaturas iniciais em função da perda de umidade superficial. Além disso, a quantidade de água adicionada nas amostras de T5 a T8 foi em menor volume, e conseqüentemente, as perdas de massa iniciais em relação a água superficial dos tratamentos com solo argiloso foram menores.

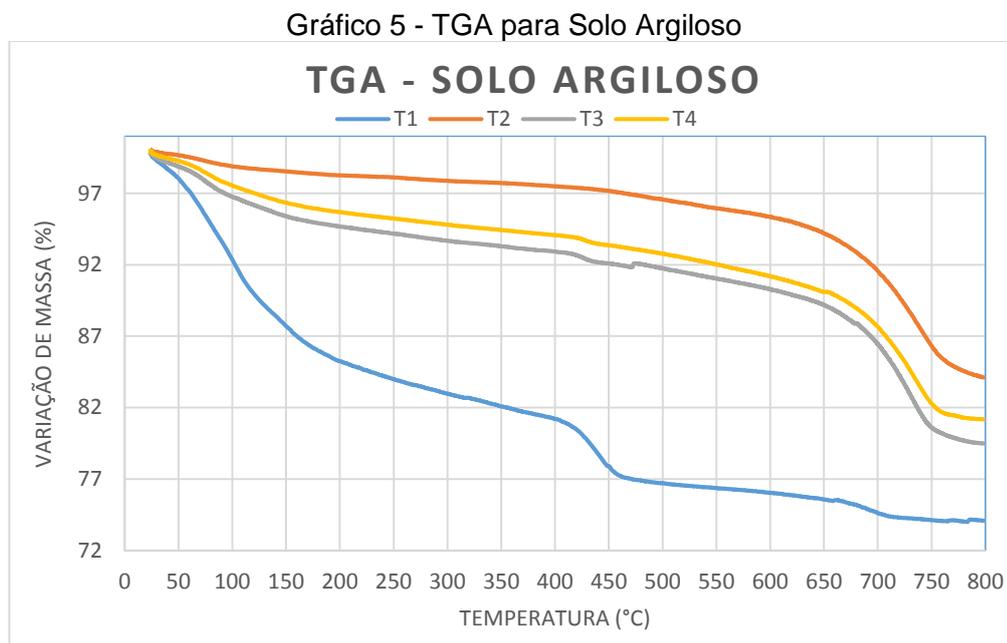
Na tabela 8 são apresentados os resultados em valores percentuais de perda de massa.

Tabela 8 - Perda de peso (%) das misturas nas faixas de temperatura 110 – 500°C e 600 – 800°C.

<b>Amostra</b>	<b>100 - 550°C</b>	<b>550 - 800°C</b>
T1	15,99%	2,28%
T2	3,94%	11,84%
T3	5,73%	11,54%
T4	5,59%	10,78%
T5	11,64%	3,17%
T6	2,24%	0,09%
T7	4,47%	1,96%
T8	4,38%	2,16%

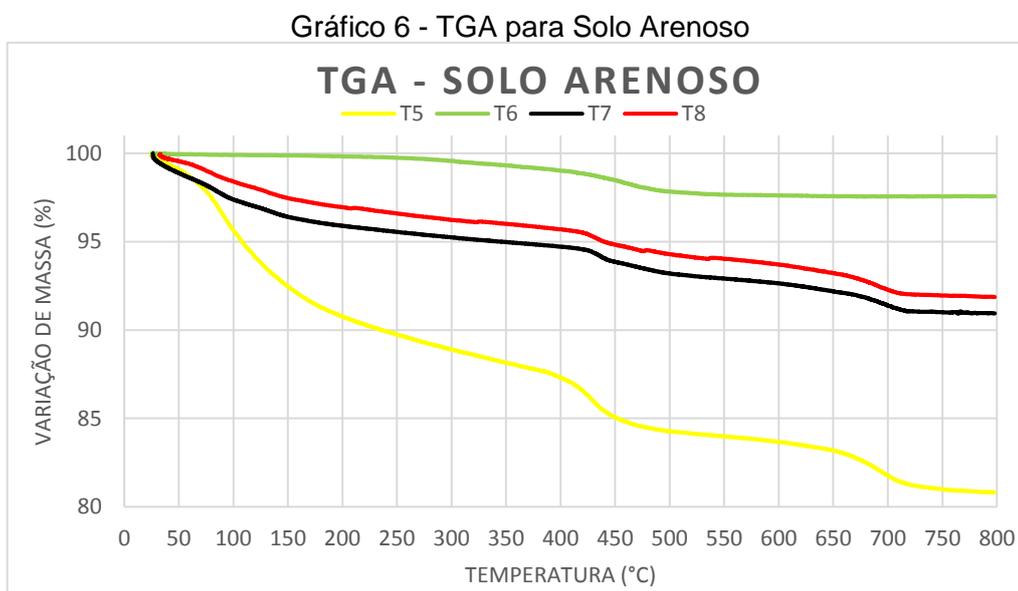
Fonte: Autor do trabalho (2016).

No gráfico 5 são apresentados os resultados de TGA para amostras T1, T2, T3 e T4.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

No gráfico 6 são apresentados os resultados de TGA para amostras T5, T6, T7 e T8.



Fonte: Autor do trabalho (2016).

### 4.3 Análise mineralógica e estudos micro estruturais

#### 4.3.1 Espectroscopia FT-infravermelho (FTIR)

Os espectros de infravermelho das misturas estudadas após 28 dias de idade são apresentados nos gráficos 7 a 14. A tabela 9 apresenta as principais bandas encontradas nos resultados de FTIR, e pode ser o parâmetro para entendimento dos resultados apresentados nos gráficos.

Tabela 9 – Relação das bandas e seus possíveis componentes de acordo com a banda.

<b>Bandas (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Grupo</b>	<b>Possível componentes presente</b>	<b>Bibliografia</b>
3643	O-H	portlandita	PUERTAS et al., 2005; PANZERA et al, 2010
3453	C-S-H	silicato de cálcio	PANZERA et al., 2010
1426	CaCO <sub>3</sub>	carbonatos de cálcio	PUERTAS et al., 2005; SILVA e ROMAN et al., 2002
3703, 3622, 911 e 470	-	caulinita	FERRARESI, 2012)
1087	-	barita	FERRARESI, 2012)
1026	-	ilita	FERRARESI, 2012)
1419	-	carbonatos	PUERTAS et al., 2005; SILVA e ROMAN, 2002
1087, 800, 782, 694	Si-O	silicatos	FERRARESI, 2012
1030 e 1006	SiO <sub>2</sub>	quartzo	Hidebrando et al. (2009)

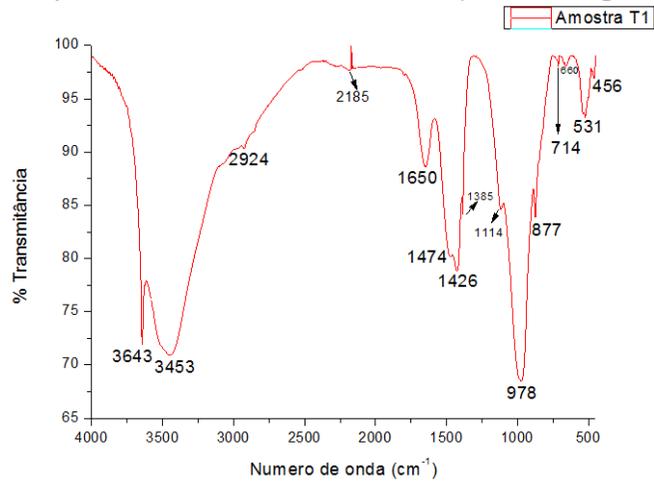
Fonte: Autor do trabalho.

Utilizando a tabela 9, verificou-se que a amostras T1, que contem cimento, água e aditivo, são apresentadas bandas de frequências típicas referentes a produtos da hidratação do cimento, como valores característicos da portlandita (O-H), silicato de cálcio (C-S-H), e carbonatos de cálcio.

No gráfico 8 para T2, e com o uso da tabela 9, é possível supor a presença de caulinita, e nas bandas 1087 cm<sup>-1</sup>, a barita, e a 1026 cm<sup>-1</sup> a ilita.

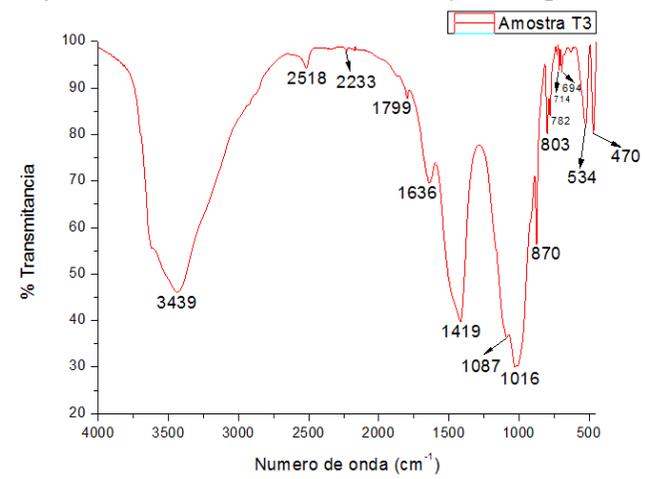
Também verificou-se que as amostras T3 e T4 apresentam um misto dos gráficos das amostras T1 e T2, no entanto, em T3 não são observadas as bandas referentes aos aditivos, visto que os mesmos não foram adicionados na mistura. Verifica-se que produtos da hidratação do cimento como em 1419 cm<sup>-1</sup>, indicando a presença de carbonatos. Mas, também, é grande a indicação de presença de silicatos (Si-O) indicados nas bandas de comprimentos de onda 1087, 800, 782, 694 cm<sup>-1</sup>.

Gráfico 7 - Espectro de Infravermelho de T1 (cimento, água e aditivo).



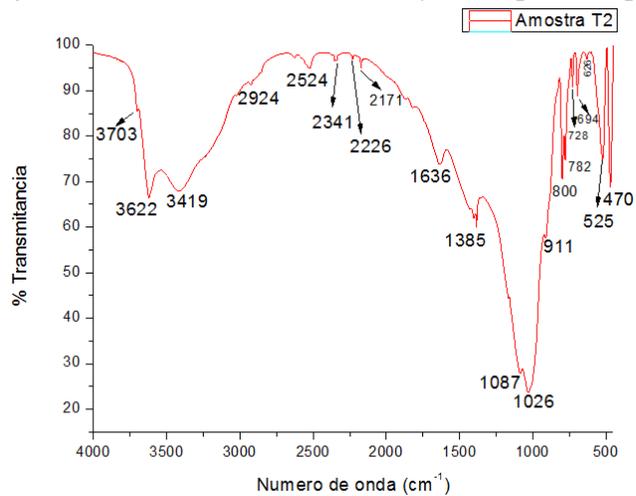
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 9 - Espectro de Infravermelho de T3 (solo argiloso, cimento e água).



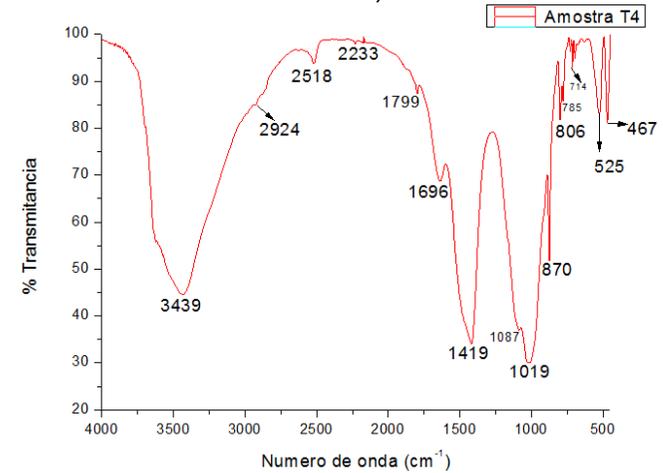
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 8 - Espectro de Infravermelho de T2 (solo argiloso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 10 - Espectro de Infravermelho de T4 (solo argiloso, cimento, água e aditivo).



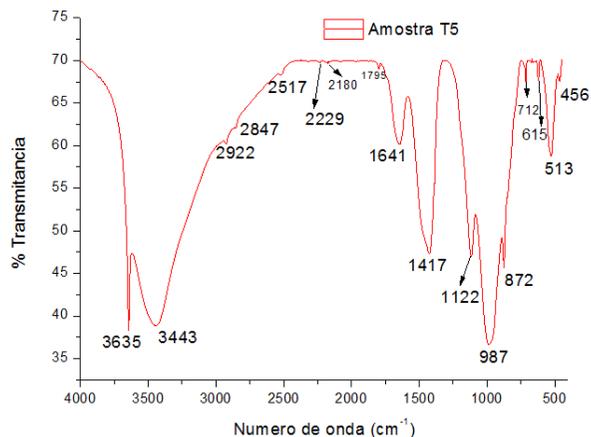
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Usando também a tabela 9 como indicação das referências das bandas, no gráfico 11 são apresentados os resultados para a amostra T5, que contém cimento, água e aditivo superplastificante, onde não são verificadas grandes variações dos espectros de infravermelho em relação a amostra T1. Para as outras bandas de frequência indicadas em T5 são apresentados a formação dos mesmos produtos de hidratação do cimento.

No gráfico 12 estão os resultados da amostra T6, com solo arenoso, água e aditivo. Na amostra T6, T7 e T8 é possível identificar através das bandas de frequências 1030 e 1006  $\text{cm}^{-1}$  a presença de  $\text{SiO}_2$  quartzo. Nas amostras T5, T7 e T8 são identificadas frequências a 1419 e 1417  $\text{cm}^{-1}$  indicam a presença de  $(\text{CO}_3)$ , carbonatos de cálcio, devido a presença do cimento na amostra.

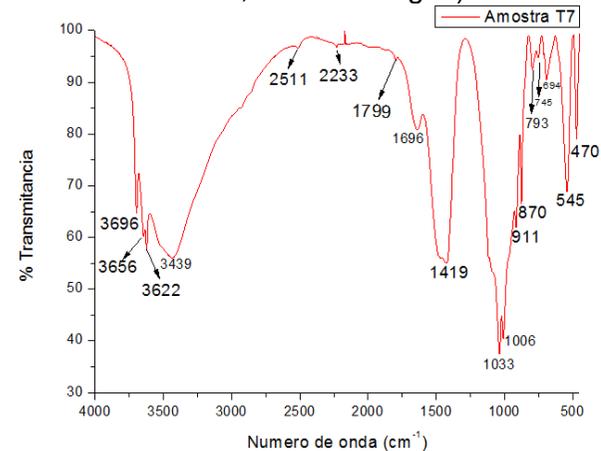
Em todas as amostras com cimento, mostrou-se a formação de produtos cimentícios, e nas amostras contendo solo verificou-se que os argilominerais não interfere na formação dos produtos cimentícios, quando a mistura contém cimento. Verificou-se ainda que a presença ou não do superplastificante na mistura não influenciou a formação de produtos da hidratação nas misturas.

Gráfico 11 - Espectro de Infravermelho de T5 (cimento, água e aditivo).



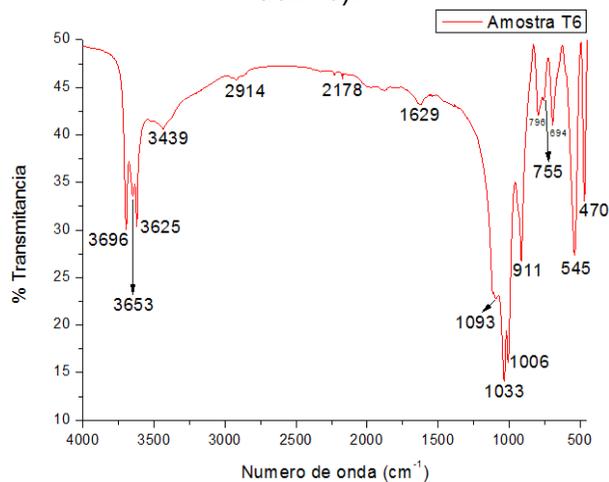
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 13 - Espectro de Infravermelho da amostra T7 (solo arenoso, cimento e água).



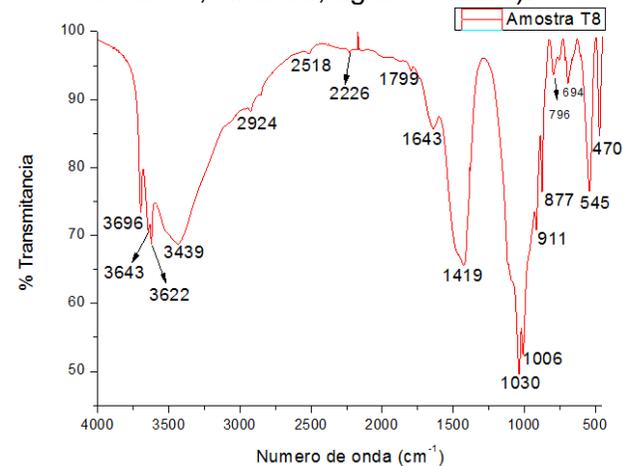
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 12 - Espectro de Infravermelho de T6 (solo arenoso, água e aditivo).



Fonte: Auto do trabalho (2016).

Gráfico 14 - Espectro de Infravermelho da amostra T8 (solo arenoso, cimento, água e aditivo).

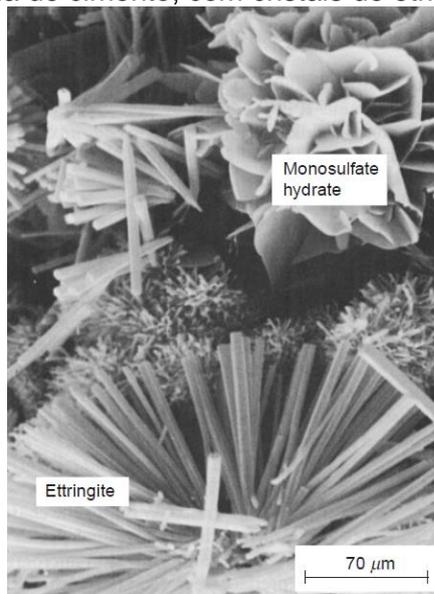


Fonte: Autor do trabalho (2016).

### 4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio de MEV teve como objetivo verificar se as estruturas cristalinas formadas das reações cimentantes são as mesmas que as formadas em referências bibliográficas, como por exemplo a figura 16 de Mehta e Monteiro (2008).

Figura 16 - Estrutura hidratada de cimento, com cristais de etringita e monossulfato hidratado.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

O resultado para MEV da amostra T1 é apresentado na figura 17. A imagem mostra a formação bem fechada das placas cristalizadas, sem espaços entre si, apresentando a estrutura esperada para uma mistura contendo somente cimento, água e aditivo.

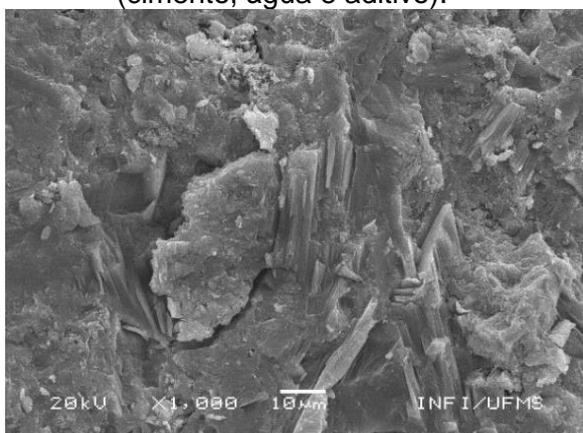
Na idade de 28 dias de secagem da amostra, não se verificou a formação de estrutura ou aglomeração específica referente a ação do aditivo superplastificante. Essa não visualização de estrutura deve-se possivelmente a ação do aditivo nos primeiros momentos em que a mistura é homogeneizada, em que o efeito de aumento de fluidez na mistura foi alcançado. Mas, após sua ação, a formação dos cristais dos produtos da hidratação cresce ao redor das partículas de cimento, e o efeito de separação, além de não ser mais necessário na mistura, não se torna perceptível.

A figura 18 apresenta imagem do MEV da amostra T2, que contém solo argiloso, água e aditivo. É possível identificar a formação de estrutura lamelar, com

folhetos sobrepostos típicos de solos argilosos. Pela imagem da figura 18 percebesse a formação de cristais de silício, com forte evidência da presença de caulinitas pela presença de Si e Al, e com presença de motmorilonita, devido a presença de Mg, e vermiculita, devido a presença de Fe, sendo todos argilominerais lamelares (Abiko, 1980, Metha e Monteiro, 2008).

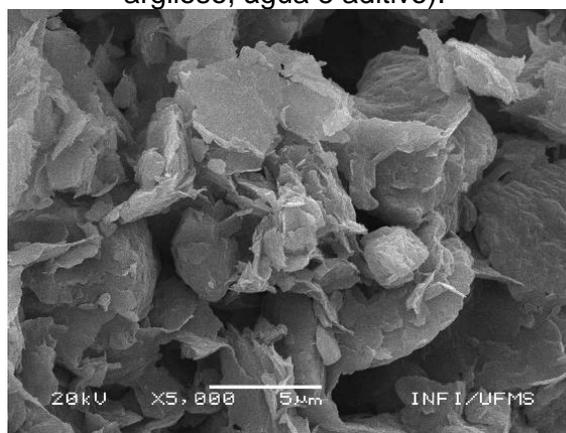
Nas imagens do MEV não se verificou interação mais significativa entre o solo e o aditivo superplastificante, pela aglomeração dos cristais formados.

Figura 17 - Imagens do MEV para T1 (cimento, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Figura 18 - Imagens do MEV para T2 (solo argiloso, água e aditivo).



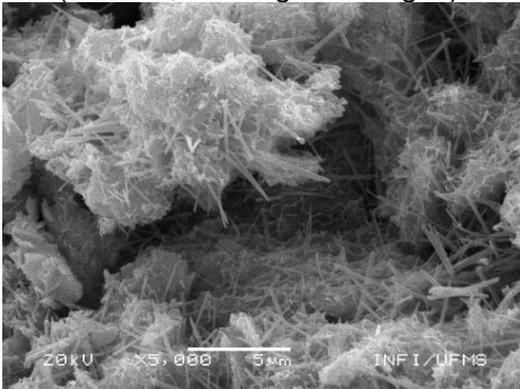
Fonte: Autor do trabalho (2016)

Na amostra T3, pela imagem do MEV da figura 19, existe a formação de cristais de etringita, além de cristais de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Devido a natureza das partículas do solo argiloso, a formação dos cristais é bem espaçada, com grandes vazios entre os grãos.

Na amostra T4, pela imagem do MEV da figura 20, existe a formação de cristais de etringita, além de cristais de C-S-H. A amostra T4 em relação a amostra T3 pela imagem do MEV, não apresentam diferenças significativas. Comparando a imagem do MEV da amostra T3 com a amostra T4 não se verificou diferença significativa na formação dos cristais, e a organização dos mesmos.

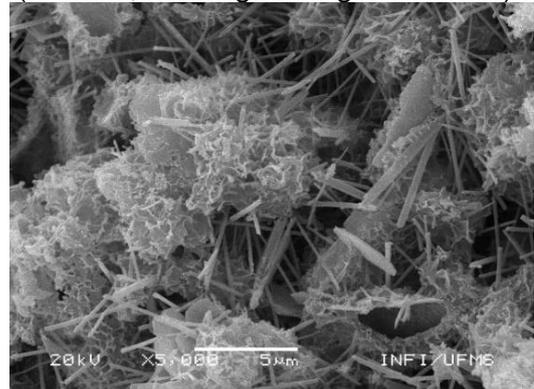
Dessa forma entende-se que a ação do aditivo não é visível em uma amostra aos 28 dias de secagem, mas somente nos momentos ou horas iniciais de misturas dos componentes do solo, cimento, água e aditivo.

Figura 19 - Imagens do MEV para T3 (cimento, solo argiloso e água).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Figura 20 - Imagens do MEV para T4 (cimento, solo argiloso água e aditivo).



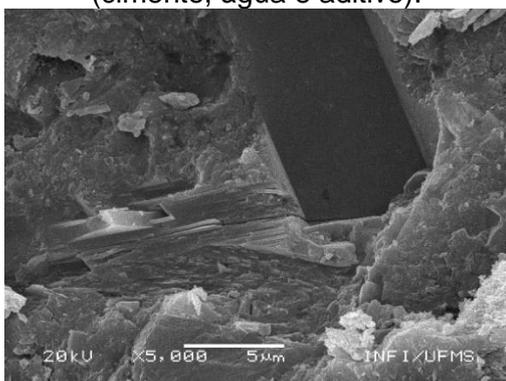
Fonte: Autor do trabalho (2016).

A amostra T5, representada na figura 21 do MEV apresenta formação de cristais de etringita, hidróxidos de cálcio e silicatos de cálcio. As proporções de água na mistura para amostra T1 e T5 são diferentes, mas não há diferença significativa nas imagens do MEV para ambas as amostras. Na figura 22 são apresentados os resultados do MEV para a amostra T6.

Pela natureza do solo utilizado na amostra T6, o solo arenoso apresenta na figura 22 grãos empacotados muito pequenos, todos aglomerados, sendo quase inexistente a presença de na estrutura apresentada na imagem do MEV.

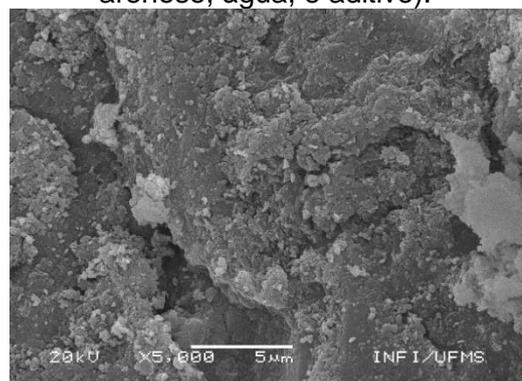
Não é observada organização da estrutura, devido a ação do aditivo. Assim como nas amostras T2 e T4, entende-se que ação do aditivo é verificada através do aumento da fluidez da mistura, mas depois de submetida à secagem da amostra após 28 dias, não é visível diferenças de organização dos grãos do solo e/ou sua segregação.

Figura 21 - Imagens do MEV para T5 (cimento, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Figura 22 - Imagens do MEV para T6 (solo arenoso, água, e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Na figura 23 são apresentados os resultados do MEV para a amostra T7. A mistura do cimento com o solo arenoso apresentada na imagem do MEV na figura 23 apresenta a formação de cristais de etringita e C-S-H. Os cristais são menores, e entende-se que há essa diferença em função da presença do solo arenoso na mistura, que apresenta produtos de hidratação cimentante mais significativos quando comparados com as amostras com solo argiloso (T3 e T4). Por essa mesma razão, os espaços entre os cristais parecem menores, apresentando uma estrutura mais fechada.

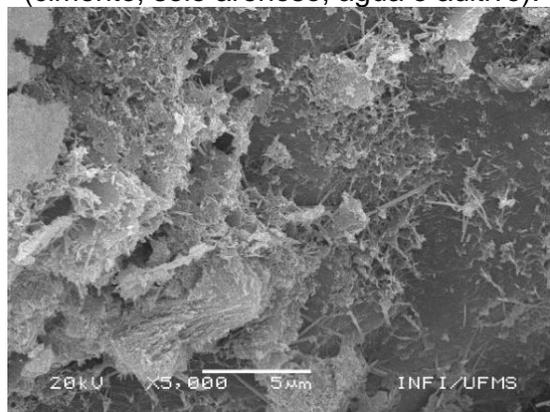
A mistura do cimento com o solo arenoso apresentada na imagem do MEV na figura 24 apresenta a formação de cristais de etringita, e C-S-H. Da mesma forma que os cristais se apresentaram na amostra T7, na amostra T8 os cristais são menores, e entende-se que há essa diferença em função da interferência do solo arenoso na mistura. Não foi verificada diferença significativa na amostra T8 em relação a organização dos cristais em relação a amostra T7, evidenciando que não há interferência na formação dos cristais na presença de aditivo superplastificante.

Figura 23 - Imagens do MEV para T7 (cimento, solo arenoso e água).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Figura 24 - Imagens do MEV para T8 (cimento, solo arenoso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

#### 4.3.3 Espectroscopia por dispersão de energia de raio-X (EDS)

O gráfico de EDS quantitativo de elementos apresentado no gráfico 15 apresentam os componentes presentes na amostra T1, que estão de acordo com os produtos de hidratação um cimento ARI, com a presença de grandes quantidades de

Ca e Si, que estão de acordo com a formação de etringitas, silicatos de cálcio hidratados, hidróxido de cálcio e pequenas quantidades de monossulfatos hidratados.

No gráfico 16 são apresentados os resultados do EDS para a amostra T2. O solo apresenta grandes quantidades de silício, cálcio, carbono e oxigênio. A presença de Ti pode ocorrer em alguns argilominerais, em pequenas quantidades, conforme Santos (1989).

O gráfico 17 apresenta o EDS para amostra T3, em que é possível verificar que os elementos que aparecem em T1 e T2 também aparecem em T3 e T4 em proporções muito parecidas.

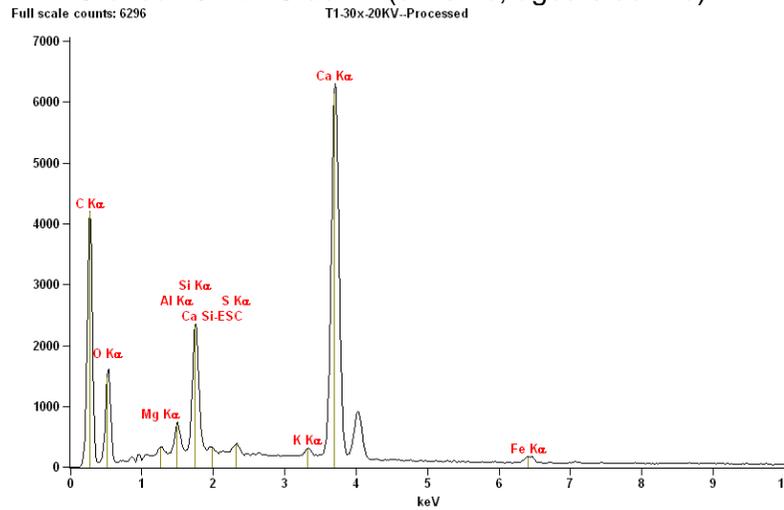
Em relação as proporções em porcentagem dos elementos presentes, não são verificadas diferenças significativas, apresentando pequenas variações de porcentagem, mas muito pequenas, comparando –se os resultados de T3 e T4 que aparecem nos gráficos 17 e 18, respectivamente.

No gráfico 19 com resultado de EDS para amostra T5 é verificada uma pequena porcentagem do elemento cloro, com porcentagem de 0,38%, sendo que o existe a possibilidade de que a amostra tenha sido contaminada durante o preparo da mistura.

Pela análise dos componentes da amostra via EDS, apresentado no gráfico 20, a composição é compatível com a presença de grandes quantidades de silício, sendo possível a presença de argilominerais como montmorilonita, quartzo, illita e vermiculita (Abiko, 1970; Mehta e Monteiro, 2008).

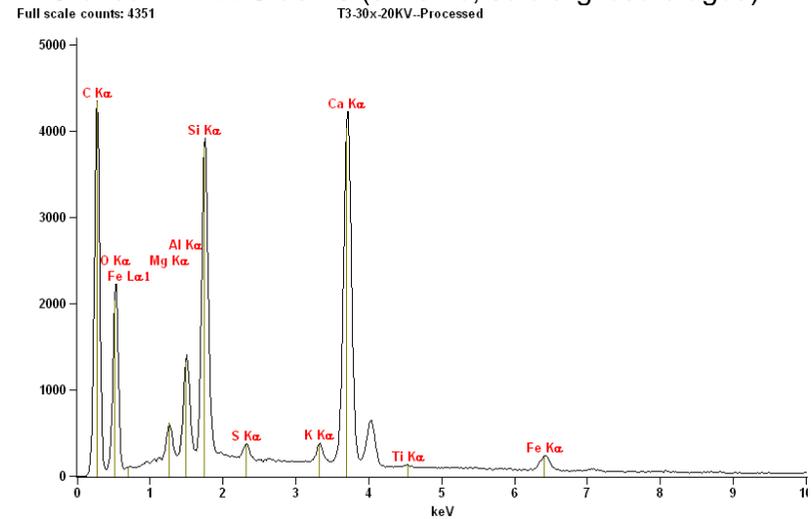
Assim, como ocorrido para as amostras de solo argiloso, para as amostras de solo arenoso, os EDSs para T7 e T8 (misturas como presença de solo e cimento), os gráficos apresentam mesmos elementos químicos presentes em T5 e T6, em proporções muito próximas, indicando que a presença ou não do superplastificante não interfere na mistura em relação aos elementos presentes na mistura.

Gráfico 15 - EDS de T1 (cimento, água e aditivo).



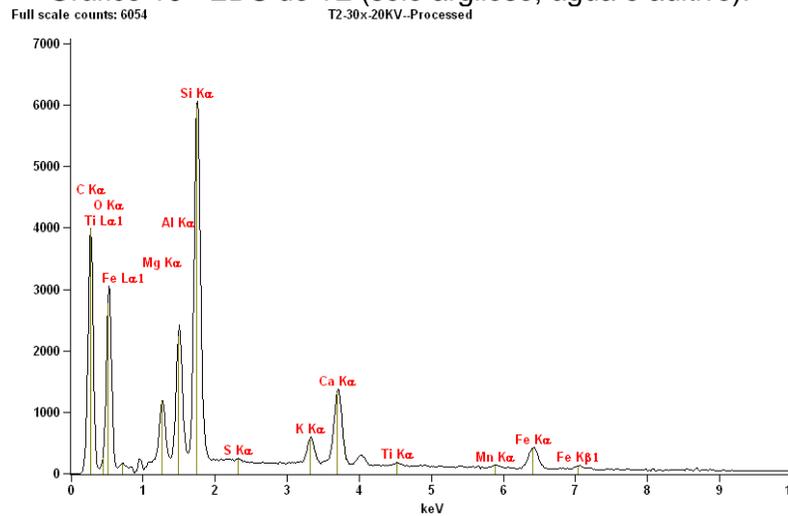
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 17 - EDS de T3 (cimento, solo argiloso e água).



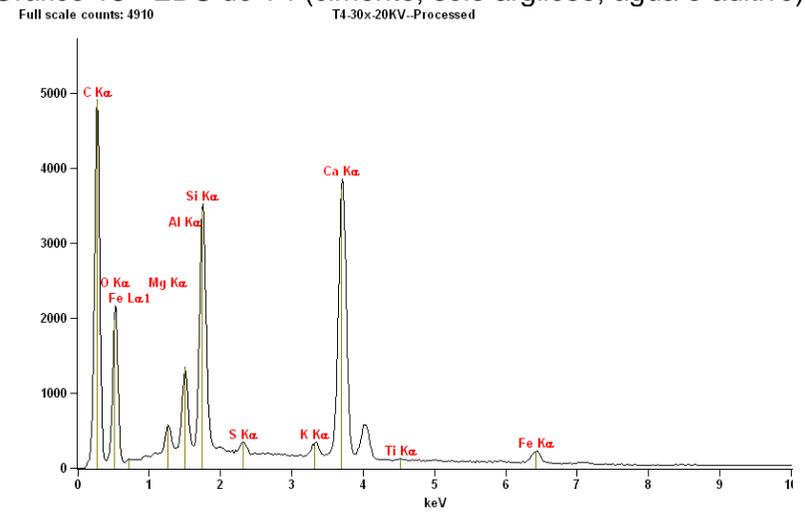
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 16 - EDS de T2 (solo argiloso, água e aditivo).



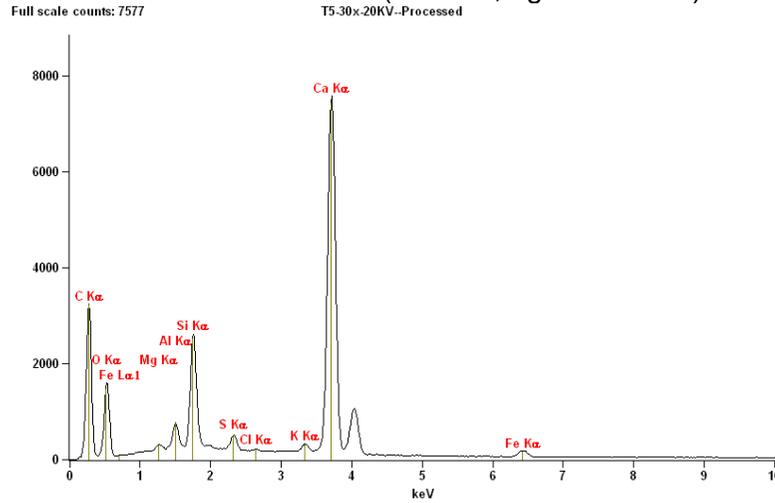
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 18 - EDS de T4 (cimento, solo argiloso, água e aditivo).



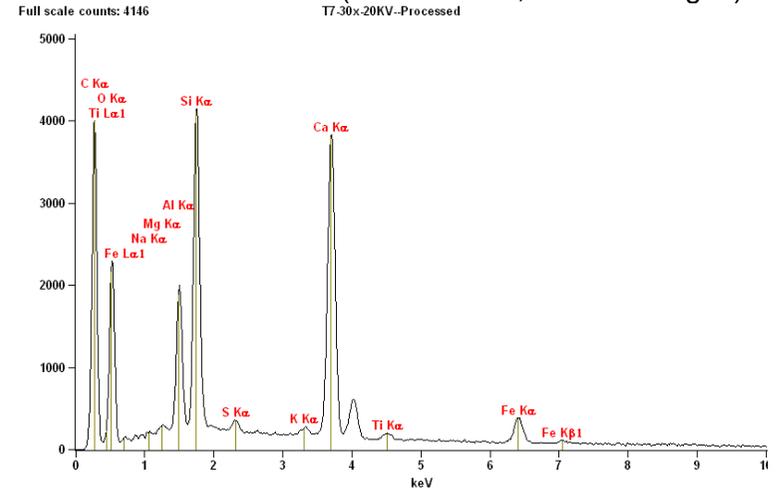
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 19 - EDS de T5 (cimento, água e aditivo).



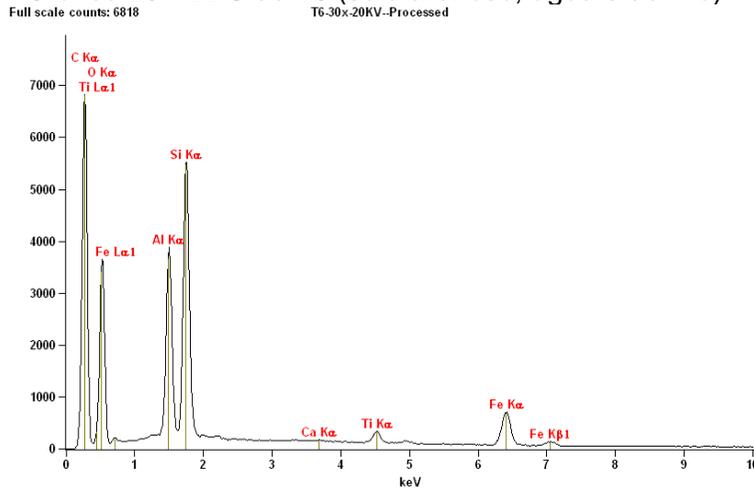
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 21 - EDS de T7 (solo arenoso, cimento e água).



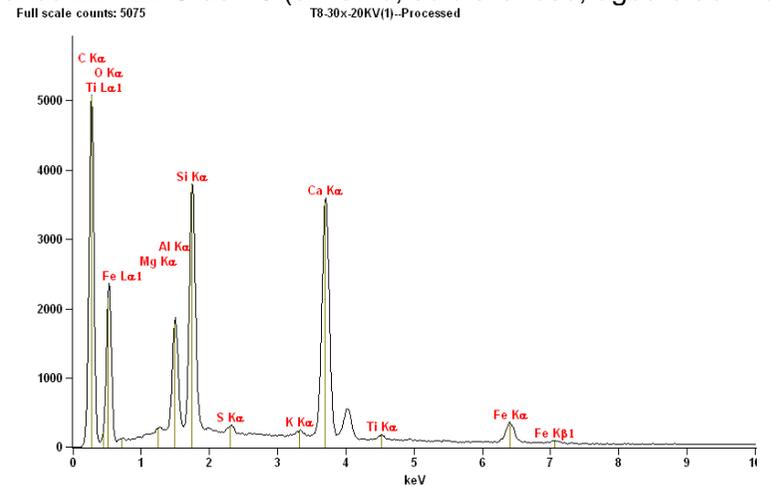
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 20 - EDS de T6 (solo arenoso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 22 - EDS de T8 (cimento, solo arenoso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016)

#### 4.3.4 Difração de Raios-X - DRX

A amostra T1, que é uma mistura de cimento, água e aditivo, apresentada no gráfico 23, indica a formação de produtos de hidratação portlandita e também se verificou a presença de calcita, em função da presença de óxidos de magnésio no cimento CP V ARI utilizado para confecção das amostras.

A amostra T2 que apresenta uma mistura de solo argiloso, água e aditivo, apresenta em seu DRX a presença de argilominerais como dolomita e quartzo. O resultado apresentado no gráfico 24, também indica a não formação de produtos cimentícios, como por exemplo, etringita, singenita, portlandita e monossulfoaluminatos. Logo, confirma-se a conclusão de Plank e Hirsch (2007), de que a afinidade de adsorção do superplastificante é maior em produtos da hidratação do cimento, como etringita e monossulfatos.

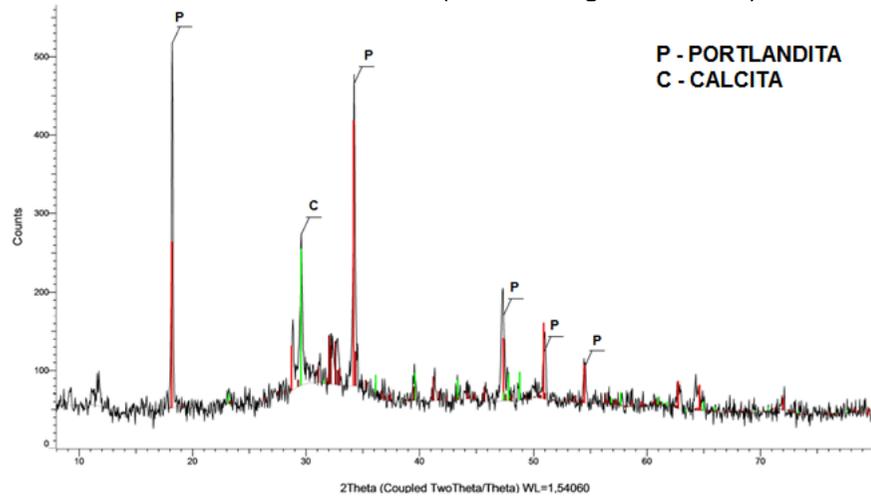
O DRX da amostra T3 apresenta presença de compostos presentes no solo como dolomita e quartzo, encontrados nas amostras no solo argiloso sem adição (gráfico 1). A presença de calcita e portlandita são referentes ao cimento adicionado na mistura.

O gráfico 26 do DRX da amostra T4, que possui em sua composição de mistura a presença de cimento, solo argiloso, água e aditivo, não apresenta diferença em relação ao gráfico 24 referente a amostra T3, em relação aos produtos encontrados Quartzo, Calcita, Portlandita e Dolomita.

Esse é indicativo da não interação dos argilominerais presentes na amostra junto ao cimento ou junto ao aditivo. Além disso, a presença do aditivo não alterou a formação de produtos da hidratação do cimento, mesmo com a presença de argilominerais na amostra. Lei e Plank (2014) indicam que os argilominerais como caulinita e moscovita não interagem com os superplastificantes a base de éter policarboxilatos na presença dos argilominerais em quantidades muito pequenas.

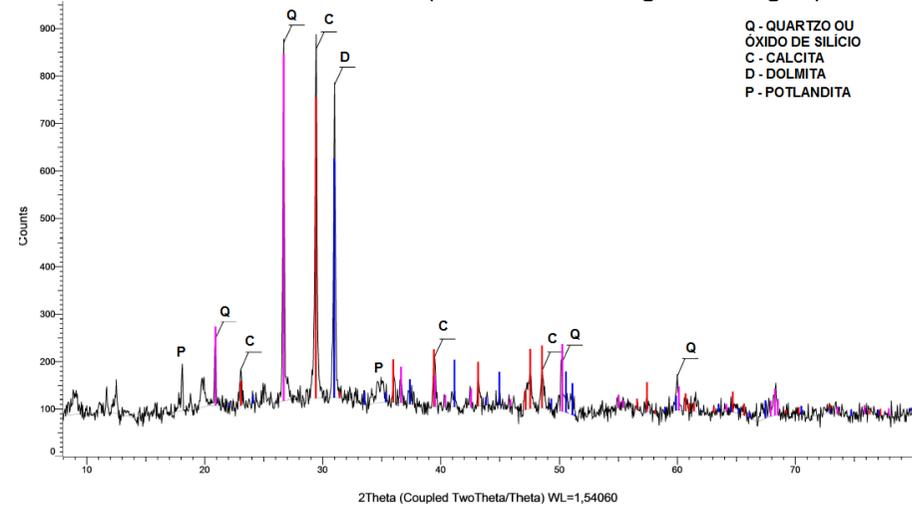
Logo, a presença dos argilominerais em quantidades maiores em massa do que o cimento não impediram a hidratação do mesmo, e também não impediram a ação do superplastificante, pois a fluidez da mistura T4 foi alcançada no estado fresco, conforme comentários dos resultados das amostras no estado fresco.

Gráfico 23 - DRX de T1 (cimento, água e aditivo).



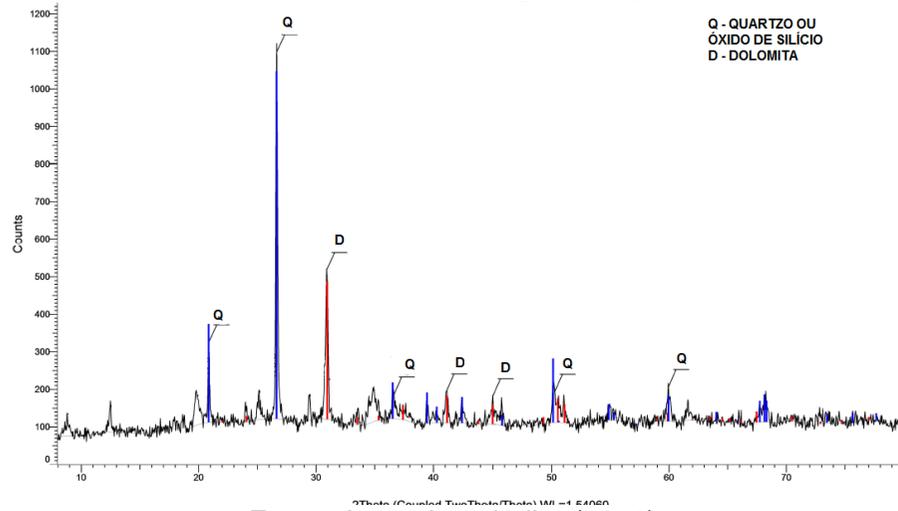
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 25 - DRX de T3 (cimento, solo argiloso e água).



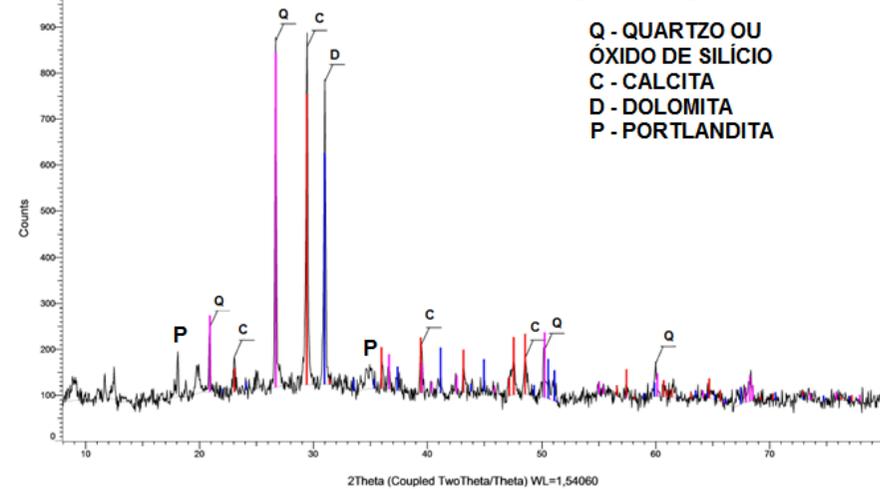
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 24 - DRX de T2 (solo argiloso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 26 - DRX de T4 (cimento, solo argiloso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

O gráfico 27 apresenta os resultados para a amostra T5. Observando o gráfico 27, e o comparando com o gráfico 23 da amostra T1, verifica-se que ambos apresentam a mesma formação de produtos de hidratação do cimento.

A amostra T6 que contém solo arenoso, água e aditivo apresenta a presença de dolomita e óxido de silício em sua composição, refletindo a natureza do solo arenoso, pela presença em maior quantidade de óxido de silício, conforme gráfico 2. Demonstra também a confirmação da não formação de nenhum produto de hidratação do solo ou produto de reação junto ao aditivo superplastificante adicionado a mistura.

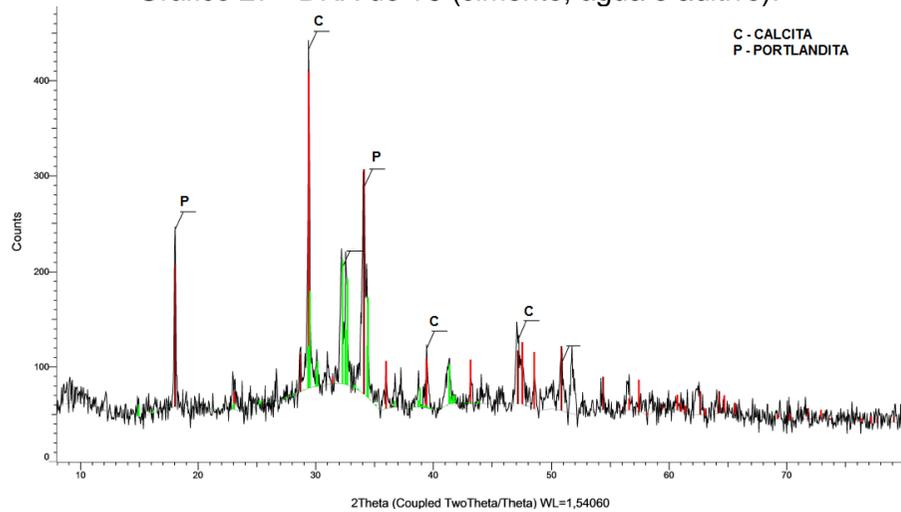
O resultado do gráfico 29 do DRX é referente a amostra T7, que contém solo arenoso, cimento e água. Há a presença do óxido de silício em função da presença do solo arenoso. E apresenta a formação de produtos da hidratação do cimento como portlandita e a calcita.

O resultado do DRX da amostra T8 com presença de cimento, solo arenoso, água e aditivo superplastificante demonstra a presença de produtos da hidratação do cimento, como portlandita e calcita, e apresenta a presença de quartzo, ou óxido de silício, devido a presença do solo arenoso. Logo, a formação de produtos da hidratação do cimento é verificada, e a semelhança dos gráficos 29 e 30 confirmam a interação química do aditivo e cimento somente no estado fresco da mistura de SCAA.

Comparando os dois tipos de solo em relação às interações com o cimento e o aditivo, pode-se comparar o gráfico 26 da amostra T4 e o gráfico 30 da amostra T8. Sobre as misturas T4 (solo argiloso, cimento, aditivo e água) e a mistura T8 (solo arenoso, cimento, aditivo e água): T4 proporcionou a formação de produtos de hidratação do cimento em maior intensidade e quantidade em relação a mistura T8. No entanto, mesmo em menores proporções de picos, a mistura com solo arenoso T8 apresentou menores quantidades de calcita.

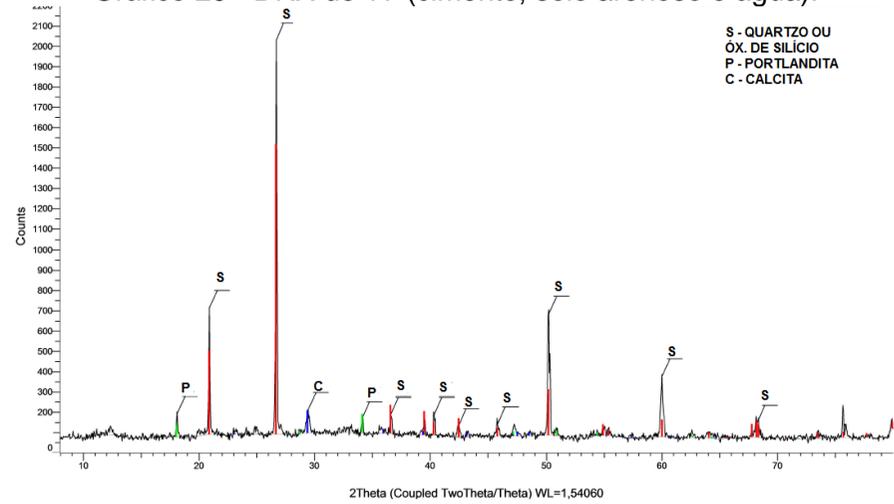
Esta presença maior de calcita na mistura T4 possa ser devido às reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas dos argilominerais (dolomita) do solo argiloso com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento na mistura. Essas reações podem ter ocorrido, mas de forma não-significativa em comparação com o solo arenoso, corroborando na literatura a maior facilidade de estabilização química dos solos granulares com cimento.

Gráfico 27 - DRX de T5 (cimento, água e aditivo).



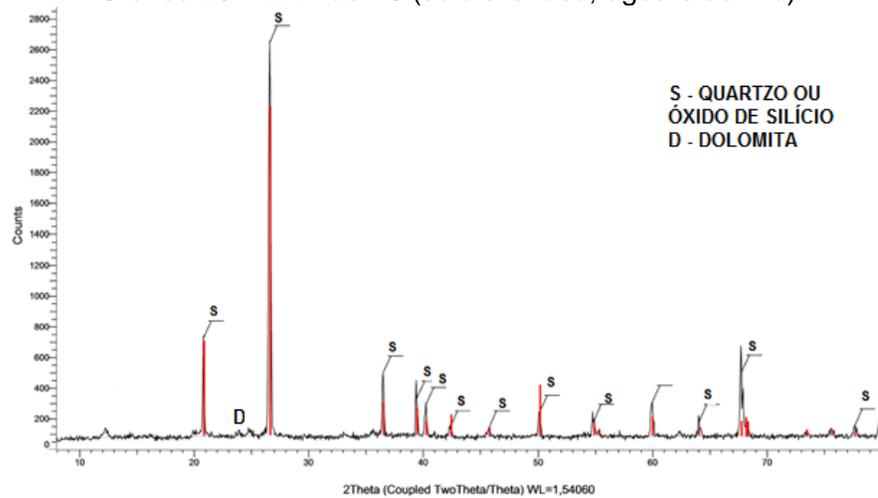
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 29 - DRX de T7 (cimento, solo arenoso e água).



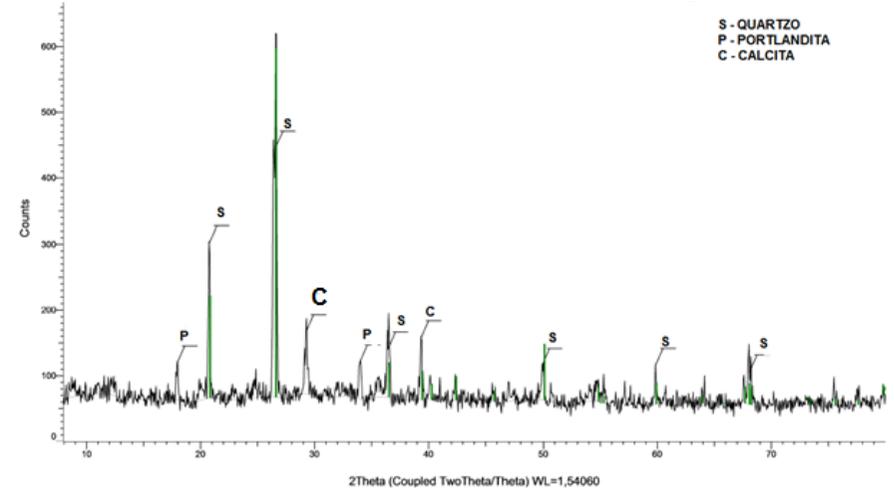
Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 28 - DRX de T6 (solo arenoso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

Gráfico 30 - DRX de T8 (cimento, solo arenoso, água e aditivo).



Fonte: Autor do trabalho (2016).

## 5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Amostras	Resultados	Resultados comparativos das amostras
T1 - Cimento, água e aditivo	Amostra fresca apresentou ótima fluidez inicial; <b>Comportamento</b> típico de massas cimentícias na hidratação; <b>Formação</b> de possíveis produtos de hidratação; <b>Estrutura</b> cristalina típica de concretos; <b>Formação</b> de produtos como portlandita e calcita.	T1 apresenta comportamento típico de amostra de cimento hidratado na presença de aditivo superplastificante. O solo argiloso não apresenta interação físico-química alguma na presença do aditivo.
T2 - Solo argiloso, água e aditivo	Amostra fresca com fluidez, mas aos 28 dias apresentou aspecto visual ainda plástico e sem resistência tátil; <b>Quase</b> nenhuma variação de temperatura na hidratação em 4h; <b>Perda</b> acentuada de massa após 500°C devido perda de OH; <b>Presença</b> de argilominerais, sem produtos da hidratação do cimento; <b>Estrutura</b> cristalina lamelar típica de argilominerais; <b>DRX</b> apresentou presença de argilominerais, sem formação de produtos da hidratação do cimento.	
T3 - Solo argiloso, cimento e água	Amostra fresca com consistência plástica; <b>Maior</b> incremento de temperatura na hidratação após 1h, em comparação com T4; <b>Perda</b> acentuada de massa após 500°C devido perda de OH; <b>Possível</b> presença de carbonatos e silicatos na amostra; <b>Visualização</b> de formação de produtos da hidratação do cimento, com grande espaçamento em função da presença de solo argiloso com grandes vazios entre grãos; <b>Formação</b> de produtos da hidratação do cimento (portlandita, calcita), além de presença de argilominerais presentes no solo (quartzo e dolomita).	T3 e T4 apresentam resultados semelhantes com exceção da calorimetria, em que o incremento de temperatura para T3 é maior após 1 hora de hidratação do cimento na mistura.
T4 - Solo argiloso, cimento, água e aditivo	Amostra fresca com fluidez adequada para SCAA, mas solo proporcionou diminuição de fluidez, comparada a misturas T1; <b>Menor</b> incremento de temperatura na hidratação após 1h, presença do solo interfere no comportamento inicial de hidratação do cimento; <b>Perda</b> acentuada de massa após 500°C devido perda de OH, mas não é verificada diferença de perda de massa em função da presença do aditivo; <b>Possível</b> presença de carbonatos e silicatos; <b>Visualização</b> de formação de produtos da hidratação do cimento, com grande espaçamento em função da presença de solo argiloso com grandes vazios entre grãos; <b>Formação</b> de produtos da hidratação do cimento (portlandita e calcita), além da presença de argilominerais presentes no solo (quartzo e dolomita).	

T5 - Cimento, água e aditivo	Amostra fresca apresentou ótima fluidez inicial; <b>Comportamento</b> típico de massas cimentícias na hidratação; <b>Formação</b> de possíveis produtos de hidratação; <b>Estrutura</b> cristalina típica de concretos; <b>Formação</b> de produtos como portlandita e calcita.	T5 apresenta comportamento típico de amostra de cimento hidratado na presença de aditivo superplastificante. O solo arenoso não apresenta interação físico-química alguma na presença do aditivo.
T6 - Solo arenoso, água e aditivo.	Amostra fresca com fluidez, mas aos 28 dias apresentou aspecto visual ainda plástico e sem resistência tátil; <b>Quase</b> nenhuma variação de temperatura na hidratação em 4h; <b>Perda</b> de massa nas temperaturas iniciais, devido perda de umidade superficial; <b>Presença</b> de óxido de silício, de acordo com o solo utilizado, sem produtos da hidratação do cimento; <b>Estrutura</b> muito empacotada em função dos pequenos grãos do solo usado, sem formação de estruturas cimentícias; <b>DRX</b> apresentou presença de argilominerais, sem formação de produtos da hidratação do cimento.	
T7 - Solo arenoso, cimento e água	Amostra fresca com consistência plástica; <b>Variação</b> de temperatura semelhante com outras amostras com cimento (T5, T8); <b>Perda</b> de massa nas temperaturas iniciais, devido perda de umidade superficial; <b>Possível</b> presença de carbonatos e silicatos na amostra; <b>Visualização</b> de formação de produtos da hidratação do cimento, pequeno espaçamento em função da presença de solo arenoso; <b>Formação</b> de produtos da hidratação do cimento (portlandita, calcita), além de massiva presença de argilominerais presentes no solo - quartzo.	T7 e T8 apresentam resultados praticamente iguais. No estado endurecido, não foram verificadas diferenças físico-químicas entre a presença ou não do aditivo na mistura.
T8 - Solo arenoso, cimento, água e aditivo	Amostra fresca com fluidez adequada para SCAA, mas solo proporcionou diminuição de fluidez, comparada a misturas T5; <b>Variação</b> de temperatura semelhante com outras amostras com cimento (T5 e T7); <b>Perda</b> de massa nas temperaturas iniciais, devido perda de umidade superficial; <b>Possível</b> presença de carbonatos e silicatos; <b>Visualização</b> de formação de produtos da hidratação do cimento, pequeno espaçamento em função da presença de solo arenoso; <b>Formação</b> de produtos da hidratação do cimento (portlandita e calcita), além da presença de argilominerais presentes no solo (quartzo).	

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise qualitativa durante a confecção das misturas de solo-cimento autoadensável - SCAA verificou-se que a ação do aditivo superplastificante à base de policarboxilatos ocorre nos primeiros instantes de adição na mistura, com aumento da fluidez de todos os tratamentos em que foi aplicado, independente da composição mineralógico do solo, cumprindo seu papel físico-químico no estado fresco das misturas.

A presença dos argilominerais na mistura de SCAA, ainda que em grandes proporções, não é impeditiva para a atuação do aditivo superplastificante nos mecanismos de dispersão de partículas do cimento. O aditivo atuou somente no cimento, sendo que a presença e quantidade do argilomineral não foi importante para a ação do aditivo na mistura SCAA.

Sobre a influência dos dois tipos de solos utilizados nas misturas SCAA, não foram verificadas variações substanciais de comportamento dos solos em relação às reações de hidratação do cimento, da interação do superplastificante e da sua ação de melhoria de fluidez nas misturas com solo. Ambos os solos em suas respectivas misturas de SCAA não impediram reações de hidratação do cimento, e não impediram a ação de dispersão do superplastificante.

Para análise micro estrutural por meio dos ensaios de Espectroscopia FTIR, Microscopia eletrônica de varredura, Difração de raios-X no estado endurecido do SCAA pode-se corroborar que não houve interação direta entre solo e aditivo superplastificante, independente do tipo solo, visto que mesmo o solo argiloso apresentando maiores quantidades de argilominerais, as reações cimentantes ocorreram na mesma proporção independente da presença de aditivo químico.

O uso de aditivos químicos superplastificantes a base de policarboxilatos no sistema solo-cimento é interessante quando se deseja maior fluidez possível na mistura, mas não houve constatação de formação microestrutural diferente dos produtos da hidratação do cimento e de pozolanicidade formados em amostras de

solo-cimento sem aditivos químicos, independente do tipo solo, mostrando-se um produto final estável quanto as interações físico-químicas no estado endurecido do SCAA, ou seja, o aditivo superplastificante a base de policarboxilatos não exerce influência nas reações cimentantes do sistema solo-cimento autoadensável, bem como os argilominerais sendo a matriz do compósito SCAA não interfere na ação de dispersão do superplastificante a base de policarboxilato.

## 7 BIBLIOGRAFIA

ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento Normas de dosagem e métodos de ensaios**. 3. ed. São Paulo, SP. 2004. 63 p.

ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solocimento**. 115 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo-SP. 1980.

AIO, D. A.; SILVA, J. P. N.; MACHADO, A. F.; SEGANTINI, A. A. S. **Estudo da influência do uso do cimento ARI nas propriedades do solo-cimento auto-adensável**. In: 2º Workshop Concreto: durabilidade, qualidade e novas tecnologias, 2011, Ilha Solteira. Anais... Ilha Solteira: UNESP, 2011. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/pos-graduacao/>>. Acesso em: 01 Jun. 2014.

ALCANTARA, M. A. M.; BERTÉ, S. D. D. **Estudo do comportamento do solo-cimento autoadensável**. Revista eletrônica de Engenharia Civil, v. 7, n. 2, p. 37-52. 2013.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: solo - determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: solo - determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13553**: materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos, Rio de Janeiro, 2013. 3 p.

BAHMANI, S. H.; HUAT, B. B. K.; ASADI, A.; FARZADNIA, N. **Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement**. Construction and Building Materials, n. 64, p. 350–359, 2014.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal.** 131 p. Dissertação de Mestrado. UFPE. Recife-PE. 2013.

BARBOZA, C. S. **Avaliação físico-mecânica do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas.** 137 p. Dissertação de Mestrado. Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande-MS. 2014.

BENINI, H, SANDBERG, P. **O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais.** Revista Cimentos e Concretos. Ano XXXVI, n. 51, p. 22-26, 2008.

BERTÉ, S. D. D. **Otimização e estudo do comportamento do solo-cimento autoadensável.** 150 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira-SP. 2012.

BRYAN, A. J. **Criteria for the suitability of soil for cement stabilization.** *Building and Environment*, v. 23, n. 4, p. 309-319. 1988.

CATARINO, J. F. **Avaliação da Influência do Cimento na Interação Cimento-Superplastificante.** 179 p. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa. 2012.

CORRÊA, A. C. A., **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CP-III-40.** 149 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro-RJ. 2010.

FARIA, O. B., NEVES, C. M. M., ROTONDARO, R., SALAS, P. C., HOFFMANN, M. V. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra.** Rede Iberoamericana Proterra, Bauru-SP, 34 p. 2010.

FERRARI, L. BERNARD, L. DESCHNER, F. KAUFMANN, J. WINNEFELD, F. PLANK, J. **Characterization of Polycarboxylate-Ether Based Superplasticizer on Cement Clinker Surfaces.** *Journal of the American Ceramic Society*. v. 95, n. 7, p. 2189–2195. 2012.

FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L.; MARIN NETO, L.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. **Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo.** *Revista Brasileira de Cimento e Solo*, 36, p. 1769-1777. 2012.

GALVÃO, J. C. A. **Estudo das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V ARI e CP II 32-F-32, sob diferentes temperaturas de misturas e métodos de cura.** 112 p. Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba-PR. 2003.

GONÇALVES, J. P., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R. **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica.** *Ambiente Construído*, v. 6, n. 4, p. 83-94. 2006.

HARTMANN, C. T., HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Boletim Técnico da EPUSP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo-SP. 22 p. 2003.

HILDEBRANDO, E. A.; SHELLER, T. ; ANGÉLICA, R. S.; NEVES, R. F. **Caracterização mineralógica de material argiloso proveniente do município de Santa Barbara-PA**. International Nuclear Information System. 2009. Disponível em: <[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/105/42105279.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105279.pdf)>. 9 p. Acesso em 03 de Mar. 2016.

IBI. **Manual de utilização de aditivos para concreto dosado em central**. 2013. Disponível em: <<http://www.ibibrasil.org.br/index.php/>>. Acesso em: 14 Fev. 2015.

LEI, L.; PLANK, J. **A study on the impact of different clayminerals on the dispersing force of conventional and modified vinyl ether based polycarboxylate superplasticizers**. Cement and Concrete Research, n. 60, p.1-10, 2014.

MARTINS, A. P. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos solo-cimento auto adensáveis**. In: Congresso de Arquitetura com Terra no Brasil, 4. Fortaleza. 11 p. 2012.

MARTINS, A. P. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. **Mechanical behavior of self-compacting soil-cement-sisal fiber composites**. Key Engineering Materials, v. 634, p. 421-432. 2015.

MAZZA, S. C.; DWECK, J., TOLEDO FILHO, R. D. **Investigação da blenda de cimento, cinza volante e lama de cal por calorimetria isotérmica**. IX Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria, Serra Negra, SP, Brasil. 6 p. 2014.

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

MILANI, A. P. S.; PAZ, J. G. **Uso de resíduos de pneus em compósitos à base de solo cimento plástico para aplicação em paredes de edificações**. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande-MS. 2015.

NACANO, M. **Capacidade de carga de estacas apiloadas confeccionadas com solo-cimento plástico**. 175 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira-SP. 2006.

NUNES, G. **Programa em linguagem C+ para leitura das temperaturas de hidratação do cimento**. UFMS. Campo Grande – MS. 2015.

PANZERA, T. H.; SABARIZ, A. L. R.; STRECKER, K.; BORGES, P. H. R.; VASCONCELOS, D. C. L; WASCONCELOS, W. L. **Propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de cimento Portland e resina epóxi**. Cerâmica, n. 56 p 77-82. 2010.

PCA. **Soil-Cement Basics**. 2014. Disponível em: <<http://www.cement.org/>>. Acesso em: 25 de Jun. 2014.

PISANI, M. A. J. **Taipas: A arquitetura da terra**. Sinergia, v. 5, n. 1, p. 9-15, 2004.

PLANK J., HIRSCH, C. **Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption**. Cement and Concrete Research, n. 37, 537–542. 2007.

PUERTAS, F.; SANTOS, H.; PALACIOS, M.; MARTINEZ-RAMIREZ, S.. **Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes**. Advances in Cement Research, v. 17, n. 2, p. 77-89, 2005.

ROJAS, C. M.; CINCOTTO, M. A. **Influência da estrutura molecular dos policarboxoílatos na hidratação do cimento Portland**. Ambiente Construído, v. 13, n. 3, p. 267-283. 2013.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. v. 1. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento em estacas apiloadas para obras de pequeno porte**. 114 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. 1994.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira – SP**. 206 p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. 2000.

SILVA, D. A. ROMAN, H. R. **Caracterização Microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA**. Ambiente construído. v. 2, n. 2, p. 31-46. 2002.

SILVA, E. J.; GALVÃO, S. P.; FREITAS, M.; MAIOR R. M. S. **Análise microestrutural de pastas de cimento Portland branco modificado por um polímero de base acrílica como ferramenta para estudo do comportamento de resistência mecânica**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 54, 2012, Maceió. Anais...Maceió: IBRACON. 2012.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

WILLIAMSON, S. CORTES, D. D. **Dimensional analysis of soil–cement mixture performance**. Géotechnique Letters, n. 4, p. 33–38, 2014.