

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

FERNANDA MEDEIROS DUTRA REIS

ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE TIJOLOS DE
SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÕES DE
QUARTZITO

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos
2019

FERNANDA MEDEIROS DUTRA REIS

ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE TIJOLOS DE
SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÕES DE
QUARTZITO

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como
requisito para a obtenção do título de
Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Pinto
Ribeiro.

São Carlos
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

375e Reis, Fernanda Medeiros Dutra
 ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE TIJOLOS
DE SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÕES
DE QUARTZITO /
Fernanda Medeiros Dutra Reis; orientador Rogério
Pinto Ribeiro. São Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2019.

1. Sustentabilidade ambiental. 2. Rejeito de
mineração. 3. ANOVA. 4. Construção Civil. 5.
Solo-cimento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **FERNANDA MEDEIROS DUTRA REIS.**

Título da dissertação: "Estudo do comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento com adição de rejeitos de minerações de quartzito".

Data da defesa: 03/05/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Rogério Pito Ribeiro**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Titular **Eduvaldo Paulo Sichieri**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Eduardo Goulart Collares**
(Universidade do Estado de Minas Gerais/UEMG)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que não mediram esforços para que eu chegasse nessa etapa da minha vida. Às minhas irmãs, pelo carinho incondicional e constante incentivo. O apoio de vocês foi de fundamental importância para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo neste e em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Maria José Reis e João Carlos Reis, por tudo que representam em minha vida e por fazerem parte de cada etapa desse trabalho, me incentivando, apoiando e ajudando em tudo, sempre com muito amor e paciência.

Às minhas irmãs Flávia e Fabiana, que sempre torceram por mim.

Aos meus professores Eduardo Goulart Collares e Ana Carina Zanollo Biazotti Collares (*in memoriam*), pelo incentivo à pesquisa desde a graduação, motivando o início desse mestrado.

Ao meu orientador, professor Rogério Pinto Ribeiro, pela oportunidade de realizar essa pesquisa e confiança em meu trabalho, por seus conhecimentos transmitidos durante esses anos e pela orientação paciente e compreensiva.

Às minhas amigas de departamento, que foram como uma segunda família para mim, Camila Amorim, Déborah Perotti (e Gustavo Perotti), Fabiane Ferrer, Iviny Barros, Liana Rocha e Nathália Marques, com as quais compartilhei boas experiências e conhecimento. Meu muito obrigada pelo carinho e bons momentos. Vocês marcaram esse período da minha vida com boas lembranças.

Ao meu amigo Felipe Loch, por todas as ideias e sugestões compartilhadas.

Às empresas Eco Oficina Tijolos Ecológicos – Passos/MG e Tijolos São Carlos – São Carlos/SP, em especial à Mileide, Alex e Evaldo, que viabilizaram o processo experimental da pesquisa, cedendo os materiais, os equipamentos e por fabricarem os tijolos de solo-cimento.

Aos técnicos dos laboratórios de Geotecnia, pela generosidade, profissionalismo e grande disposição em me auxiliar na execução dos ensaios da pesquisa. Sobretudo aos técnicos Oscar e Dito, por toda ajuda e paciência na fase experimental da pesquisa.

A todos funcionários do Departamento de Geotecnia, em especial ao Álvaro, Maristela e Neiva, da secretaria, que sempre estiveram à disposição para esclarecer minhas dúvidas e me auxiliar na resolução de problemas.

Aos professores do departamento de Geotecnia, que colaboraram com seus ensinamentos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de pesquisa e que possibilitou minha total dedicação a este trabalho.

A todos que, mesmo não sendo citados, me auxiliaram e me apoiaram na realização deste trabalho.

Muito obrigada a todos.

EPÍGRAFE

“Mind what you have learned. Save you it can.”

Yoda, Star Wars.

RESUMO

REIS, F. M. D. **Estudo do comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento com adição de rejeitos de minerações de quartzito.** 2019. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O aproveitamento de resíduos de mineração no setor da construção civil é uma alternativa economicamente atrativa e ambientalmente correta. Em algumas situações esses resíduos podem ser utilizados com vantagens técnicas e redução de custos, como é o caso, por exemplo, da produção de tijolos solo-cimento. Este trabalho tem como finalidade estudar o comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento (TSCQ) confeccionados com a adição de rejeitos de minerações de quartzito oriundos da cidade de Alpinópolis, localizada na região sudoeste do estado de Minas Gerais. Apresentando assim, uma solução técnica para reduzir o custo da produção dos tijolos de solo-cimento, possibilitando o aproveitamento deste resíduo e, dessa forma, minimizando os impactos ambientais decorrentes das atividades de mineração. A metodologia incluiu: a) ensaios de caracterização geotécnica das amostras de solo, dos rejeitos de quartzito e das misturas destes materiais visando a produção de TSCQ; b) procedimento experimental para a definição das dosagens dos traços, realizada por meio de uma análise estatística de experimentos através de um planejamento fatorial 3^2 , com duas variáveis independentes: porcentagem de quartzito e traço solo-cimento; c) preparação das misturas e a fabricação e d) caracterização físico-mecânica dos TSCQ, por meio dos ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água, ambos aos 7 e aos 28 dias de idade. Após a obtenção dos resultados, as análises estatísticas possibilitaram avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre a resistência à compressão (f_c). Pelo método de superfície de respostas foi possível demonstrar o comportamento das misturas e determinar as misturas ótimas para cada tipo de quartzito (traço 1:10 com adição de 30% de quartzito). De forma geral, os resultados dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água sugerem a possibilidade do uso do rejeito de quartzito sem o comprometimento das propriedades mecânicas relacionadas à resistência e à absorção de água dos tijolos solo-cimento.

Palavras-chave: sustentabilidade ambiental; rejeito de mineração; ANOVA; construção civil; solo-cimento.

ABSTRACT

REIS, F. M. D. **Study of the physical-mechanical behavior of soil-cement bricks with the addition of quartzite tailings.** 2019. 122 p. Dissertation (Master degree) - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The use of mining waste in the construction sector is an economically attractive and environmentally sound alternative. In some situations such waste can be used with technical advantages and cost reduction, as in the case of, for example, the production of soil-cement bricks. This work aims to study the physical-mechanical behavior of soil-cement bricks (TSCQ) made with the addition of tailings from quartzite mining from the city of Alpinópolis, located in the southwest region of the state of Minas Gerais. Featuring a technical solution to reduce the cost of production of soil-cement bricks, allowing the use of this residue and, thus, minimizing the environmental impacts resulting from mining activities. The methodology included: a) geotechnical characterization tests of soil samples, quartzite tailings and mixtures of these materials aiming the production of TSCQ; b) experimental procedure for the definition of trace strengths, performed by means of a statistical analysis of experiments using a 3^2 factorial design, with two independent variables: percentage of quartzite and soil-cement trait; c) preparation of the mixtures and the manufacturing and d) physical-mechanical characterization of the TSCQ, through the tests of resistance to simple compression and absorption of water, both at 7 and at 28 days. After obtaining the results, the statistical analyzes allowed to evaluate the effects of the independent variables on the compressive strength (CS). By the response surface method it was possible to demonstrate the behavior of the mixtures and to determine the optimal mixtures for each type of quartzite (trace 1:10 with addition of 30% quartzite). Overall, the results of the tests of compressive strength and water absorption suggest the possibility of the use of the quartzite waste without compromising the mechanical properties related to the resistance and the water absorption of the soil-cement bricks.

Keywords: environmental sustainability; mining wastes; ANOVA; civil construction; soil-cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição geográfica das aglomerações produtivas de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil.	35
Figura 2- Desmembramento e corte das placas de quartzito – Alpinópolis, MG.....	39
Figura 3- Fluxograma do processo de extração do quartzito.....	39
Figura 4- Material estéril disposto em área de exploração em Alpinópolis, MG.	40
Figura 5- Resíduos de quartzito sobre o maciço rochoso explorado – Pirenópolis, GO.	41
Figura 6- Deposição dos rejeitos de mineração de quartzito – Alpinópolis, MG.	41
Figura 7- Variações de Quartzitos.	43
Figura 8- Aspecto petrográfico do quartzito da cidade de Alpinópolis.....	44
Figura 9- Prensas. (A) Prensa manual CINVA-RAM e (B) Prensa manual IPT.....	48
Figura 10- Fluxograma de processo de fabricação de tijolos de solo-cimento.	49
Figura 11- Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.	56
Figura 12- Ponto de coleta das amostras.	57
Figura 13- Tipos de quartzito - Alpinópolis, MG.....	58
Figura 14- Vista da mineração de quartzito – Alpinópolis, MG.	59
Figura 15- Mapa do substrato rochoso - Alpinópolis, MG.....	60
Figura 16- a) Perfil esquemático de alteração da unidade 9. b) Solo maduro da região.	62
Figura 17- Mapa de Materiais Inconsolidados - Passos, MG.....	63
Figura 18- Prensa Hidráulica de tijolos - Alroma.....	71
Figura 19- Preparação dos materiais.	72
Figura 20- Moldagem dos tijolos solo-cimento.....	72
Figura 21- Ponto do teor de umidade ótimo utilizado.	73
Figura 22- Tijolos confeccionados.	73
Figura 23- Ensaio de absorção de água.	74
Figura 24- Ensaio de resistência à compressão: (A, B e C) Corte, retifica e análise dimensional dos tijolos, (D) Imersão; (E) Corpo de prova sendo posicionado na prensa servo-controlada e (F) Aspecto de tijolo rompido após ensaiado.	76
Figura 25- Curvas Granulométricas – Quartzitos NBR 7181 (ABNT, 2016).	80
Figura 26- Curva Granulométrica – Solo NBR 7181 (ABNT, 2016).	84
Figura 27- Curva Granulométrica – Solo D653-11 (ASTM, 2011).	85
Figura 28- Limite de Liquidez - Solo.	86

Figura 29- Superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ ₁	90
Figura 30- Projeção da superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ ₁	90
Figura 31- Superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ ₂	92
Figura 32- Projeção da superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ ₂	92
Figura 33- Superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ ₃	94
Figura 34- Projeção da superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ ₃	95
Figura 35- Limite de Liquidez - Q ₁ + 30%.....	98
Figura 36- Limite de Liquidez - Q ₂ + 30%.....	98
Figura 37- Limite de Liquidez - Q ₃ + 30%.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais produtores mundiais de rochas ornamentais.	32
Tabela 2-Principais exportadores mundiais de rochas ornamentais - 2017.....	33
Tabela 3- Principais importadores mundiais de rochas ornamentais – 2017.	34
Tabela 4- Estimativa da distribuição regional da produção bruta de rochas ornamentais no Brasil em 2015.....	36
Tabela 5- Principais aglomerações produtivas do setor de rochas no Brasil.....	37
Tabela 6- Perfil da produção brasileira por tipo de rocha – 2017.	38
Tabela 7- Localização geográfica dos pontos de coleta.	59
Tabela 8- Substrato Rochoso - Alpinópolis, MG.	61
Tabela 9- Critérios de seleção de solos para a fabricação de componentes de alvenaria.	61
Tabela 10- Ensaio de caracterização geotécnica - Quartzito.	64
Tabela 11- Nomenclatura dos solos.....	65
Tabela 12- Ensaio de caracterização física – Solo Natural.....	65
Tabela 13- Ensaio de caracterização física – Solo Homogeneizado.....	66
Tabela 14- Intervalo de diâmetro e fração dos grãos conforme ABNT e ASTM.	68
Tabela 15- Misturas do planejamento fatorial.....	69
Tabela 16- Quantitativo de tijolos por ensaio.....	74
Tabela 17- Massa específica dos sólidos - Quartzitos.....	77
Tabela 18- Massa específica dos sólidos em agregados de quartzito.....	78
Tabela 19- Distribuição Granulométrica – Quartzito, NBR 7181 (ABNT, 2016).	78
Tabela 20- Distribuição Granulométrica – Quartzito, D653-11 (ASTM, 2011).	79
Tabela 21- Massa específica dos sólidos - Solo.	82
Tabela 22- Distribuição Granulométrica – Solo, NBR 7181 (ABNT, 2016).	82
Tabela 23- Distribuição Granulométrica – Solo, D653-11 (ASTM, 2011).	83
Tabela 24– Limites de Consistência - Solo.	86
Tabela 25- Valores de resistência à compressão das misturas SCQ ₁	87
Tabela 26- Valores de resistência à compressão das misturas SCQ ₂	87
Tabela 27- Valores de resistência à compressão das misturas SCQ ₃	88
Tabela 28- Análise de variância da f_t para SCQ ₁	88
Tabela 29- Modelo ajustado: Análise de variância da f_t para SCQ ₁	89

Tabela 30- Análise de variância da f_t para SCQ ₂	91
Tabela 31- Modelo ajustado: Análise de variância da f_t para SCQ ₂	91
Tabela 32- Análise de variância da f_t para SCQ ₃	93
Tabela 33- Modelo ajustado: Análise de variância da f_t para SCQ ₃	93
Tabela 34- Definição dos traços.	95
Tabela 35- Distribuição Granulométrica – Misturas, NBR 7181 (ABNT, 2016).	96
Tabela 36- Distribuição Granulométrica – Misturas, D653-11 (ASTM, 2011).	96
Tabela 37- Análise de variância - Análise Granulométrica.....	97
Tabela 38- Limites de Consistência das Misturas.	97
Tabela 39- Teor de umidade.....	100
Tabela 40- Resultados: Resistência à Compressão.....	100
Tabela 41- Análise de variância- Resistência à Compressão Q ₁	101
Tabela 42- Análise de variância- Resistência à Compressão Q ₂	101
Tabela 43- Análise de variância- Resistência à Compressão Q ₃	102
Tabela 44- Absorção de água.	102
Tabela 45- Análise de variância - Absorção de Água: Q ₁	103
Tabela 46- Análise de variância - Absorção de Água: Q ₂	103
Tabela 47- Análise de variância - Absorção de Água: Q ₃	103
Tabela 48- Planilha orçamentária	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	–	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHAS	–	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	–	Areia Descartada de Fundação
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
BNH	–	Banco Nacional da Habitação
BT	–	Boletim Técnico
CBR	–	Índice Suporte Califórnia
CEPED	–	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CODEMA	–	Conselho Municipal de Defesa e Conservação do Meio Ambiente
CP	–	Cimento Portland
CPs	–	Corpos de prova
CPRM	–	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPV-ARI		Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
EESC	–	Escola de Engenharia de São Carlos
FEAM	–	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FUNTAC	–	Fundação de Tecnologia do Estado do Acre
IP	–	Índice de Plasticidade
IPT	–	Instituto de Pesquisas Técnicas do Estado de São Paulo
LP	–	Limite de Plasticidade
LL	–	Limite de Liquidez
MCT	–	Miniatura Compactado Tropical
MDIC	–	Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MR	–	Módulo Resiliente
NBR	–	Norma Brasileira
PCP	–	Peças de Concreto para Pavimentação
RCD	–	Resíduo de Construção e Demolição
RAA	–	Reação Álcali-Agregado
USP	–	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	–	Absorção
F	–	Força
f_t	–	Resistência à Compressão dos Tijolos Solo-Cimento
N	–	Newton
M_1	–	Massa Seca
M_2	–	Massa Saturada
MPa	–	MegaPascal
Q_1	–	Quartzito Tipo 1
Q_2	–	Quartzito Tipo 2
Q_3	–	Quartzito Tipo 3
f_t	–	Resistência à compressão simples
s	–	Área da Seção da Amostra
S	–	Solo
SC	–	Solo-Cimento
SQ_1	–	Solo + Quartzito 01
SQ_2	–	Solo + Quartzito 02
SQ_3	–	Solo + Quartzito 03
t	–	Tonelada
w	–	Teor de umidade
ρ_s	–	Massa Específica dos Sólidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	28
1.1.1 Objetivo Geral	29
1.1.2 Objetivos Específicos	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO	31
2.2 QUARTZITO.....	38
2.2.1 Processo de produção	38
2.2.2 Mineralogia.....	42
2.2.3 Estudos com rejeitos de quartzitos	45
2.3 TIJOLOS SOLO-CIMENTO	47
2.3.1 Propriedades	51
2.3.2 Utilização de Rejeitos nos Tijolos de Solo-Cimento.....	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 MATERIAIS	57
3.1.1 QUARTZITO	57
3.1.1.1 Geologia.....	59
3.1.2 SOLO.....	61
3.1.3 Cimento	63
3.2 METODOLOGIA.....	64
3.2.1 Caracterização Tecnológica do Rejeito de Quartzito	64
3.2.1.1 Massa Específica dos Sólidos.....	64
3.2.1.2 Análise Granulométrica Conjunta	64
3.2.2 Caracterização Tecnológica dos Solos	65
3.2.2.1 Massa Específica	66
3.2.2.2 Análise Granulométrica Conjunta	66
3.2.2.3 Limites de Consistência.....	66
3.2.2.4 Classificação Textural do Solo.....	67
3.3 ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS	68
3.3.1 Fabricação dos Tijolos de Solo-Cimento.....	70
3.4 ENSAIOS NOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	74
3.4.1 Absorção de Água	74

3.4.2 Resistência à Compressão Simples.....	75
4 RESULTADOS	77
4.1 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO REJEITO DE QUARTZITO.....	77
4.1.1 Massa Específica dos sólidos	77
4.1.2 Análise Granulométrica Conjunta	78
4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO SOLO.....	82
4.2.1 Massa Específica dos Sólidos.....	82
4.2.2 Análise Granulométrica Conjunta	82
4.2.3 Limites de Consistência.....	86
4.3 DOSAGEM DAS MISTURAS.....	87
4.3.1 Análise de Variância Q_1	88
4.3.2 Análise de Variância Q_2	90
4.3.3 Análise de Variância Q_3	93
4.3.4 Definição do traço	95
4.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS MISTURAS	96
4.4.1 Análise Granulométrica Conjunta	96
4.4.2 Limites de Consistência.....	97
4.5 FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	100
4.5.1 Ensaio de Resistência à Compressão.....	100
4.5.2 Ensaio de Absorção de Água.....	102
5 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	104
6 CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de rochas de revestimento. Segundo a Associação Brasileira de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS (2018), no ano de 2017 dez países compreendiam mais de 81,0% do total de rochas ornamentais e de revestimento produzidas e nove países foram responsáveis por 72,61% da sua produção. Neste contexto, o Brasil ocupa o 5º lugar no ranking de exportação e produção de rochas ornamentais, com uma participação de 5,4% e 4% respectivamente.

Dentre os maiores estados produtores e exportadores de rochas ornamentais e de revestimento no país destacam-se os estados do Espírito Santo em primeiro lugar e Minas Gerais, que ocupa com folga o segundo lugar no ranking de produção de rochas ornamentais, representando cerca de 18% do mercado nacional e é o maior estado produtor tratando-se de variedades de rochas (FEAM, 2015).

Segundo informações da ABIROCHAS (2018), existem 18 aglomerações produtivas do setor no Brasil. Seis delas estão localizadas no estado de Minas Gerais, sendo duas na região central do estado (Ardósia Papagaios, Quartzitos e Pedra Sabão Ouro Preto), duas na região sul (Quartzitos São Thomé e Alpinópolis), uma na região do Jequitinhonha (Granito Medina) e, por fim, uma na região oeste (Granito Candeias). Os granitos e os quartzitos possuem maior destaque na produção mineira de rochas. No tocante aos quartzitos, Minas Gerais responde pela maior parte da produção brasileira deste tipo de rocha (notadamente os quartzitos foliados) e são encontrados principalmente em quatro regiões do estado, sendo São Thomé das Letras, Alpinópolis, Ouro Preto e Diamantina (FEAM, 2015).

De acordo Fernandes (2002), o Centro Produtor Alpinópolis possui 15 pedreiras cadastradas, sendo 07 no município de Alpinópolis, 03 no município de Capitólio, 03 no município de São João Batista do Glória e 02 no município de São José da Barra. Outras lavras em início de operação foram registradas no município de São João Batista do Glória. O valor estimado para este centro, é que se produzam em média 850 mil m²/ano de placas de quartzito, representando cerca de 50 mil t/ano.

A prática da lavra dos quartzitos foliados em Minas Gerais é realizada a céu aberto. Sendo primeiramente retirado todo o material estéril por meio de explosivos e ferramentas, após essa etapa o material rentável fica disponível para ser retirado na forma de placas (ALECRIM, 2009). Esse processo rudimentar de exploração das placas diretamente no maciço em tamanhos pré-determinados, gera mais de 90% de material não

aproveitável, causando inúmeros impactos ambientais negativos, tais como desconfiguração da paisagem, acúmulo de rejeitos, instabilidade de taludes, assoreamentos dos rios e poluição atmosférica (REIS et al., 2017; COLLARES et al., 2012).

Desta forma, o uso eficiente do material extraído e a busca do aproveitamento dos rejeitos gerados devem ser objetivos de toda empresa com responsabilidade socioambiental. Outro fator determinante para o uso dos rejeitos das minerações é o aumento contínuo do custo dos agregados, visto que as jazidas estão cada vez mais distantes dos centros consumidores.

Nessa temática, diversos estudos geotécnicos vêm sendo realizados com o propósito de tornar esses rejeitos uma fonte alternativa de matéria prima para diferentes finalidades em obras de engenharia ou na construção civil.

Como justificativa para a realização da pesquisa pode-se citar benefícios ambientais, econômicos e sociais. Dentre os aspectos ambientais, o uso alternativo do quartzito estaria contribuindo para a diminuição do material destinado aos bota-foras das minerações, consequentemente, reduzindo os impactos ambientais negativos já citados anteriormente. Com relação ao aspecto econômico, o mercado passaria a disponibilizar de um novo tipo de agregado miúdo para uso na construção civil, com custo mais baixo, uma vez que não demandaria os encargos necessários para extração. No tocante ao aspecto social, o uso do rejeito da extração do quartzito como agregado poderia aumentar o número de empregos e colocar no mercado um produto mais sustentável.

Com base nessas premissas, a presente pesquisa visa estudar as viabilidades técnica e econômica do uso do rejeito de quartzito como agregado miúdo na confecção de tijolos de solo-cimento, finalidade geotécnica ainda pouco estudada para este tipo de material pétreo. Buscando tornar esse rejeito uma fonte alternativa de matéria prima na cadeia produtiva, agregando valor econômico e mitigando os impactos ambientais, além de minimizar os problemas enfrentados atualmente pelas empresas de mineração.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos dessa pesquisa foram definidos em gerais e específicos, conforme apresentado a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é caracterizar geotecnicamente os rejeitos de quartzito visando o aproveitamento e a viabilidade de uso desses materiais como agregado miúdo na produção de tijolos solo-cimento, aqui referidos como TSCQ, demonstrando dessa forma a possibilidade da sua utilização como um agregado alternativo aos agregados convencionais na fabricação destes produtos, atendendo às exigências técnicas vigentes. Dispondo, conseqüentemente, como uma alternativa adequada para destino do rejeito de quartzito, além de preservar o meio ambiente e de minimizar os problemas enfrentados atualmente pelas empresas de mineração.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização geotécnica dos rejeitos de quartzitos;
- Realizar ensaios preliminares de resistência à compressão, para identificação das combinações de solo-rejeito de quartzito a serem adicionadas ao solo;
- Analisar estatisticamente e determinar os traços a serem trabalhados com base nos resultados dos ensaios preliminares, optando pela máxima adição encontrada de rejeito de quartzito associado ao mínimo consumo de cimento;
- Confeccionar tijolos de solo-cimento com o agregado de quartzito e realizar ensaios tecnológicos físicos e mecânicos para avaliar aspectos de absorção de água e de resistência mecânica;
- Definir a viabilidade técnica de uso do tijolo solo-cimento-rejeito de quartzito produzido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão aborda, primeiramente, conceitos sobre rochas ornamentais e de revestimento, a situação da indústria de rochas, evidenciando sua situação atual e evolução nos mercados internacional e brasileiro, particularizando informações estaduais e regionais. Posteriormente são abordados o processo de exploração de placas nos quartzitos foliados e suas consequências do ponto de vista ambiental devido à baixa taxa de aproveitamento da rocha e o volume expressivo de resíduo gerado. Para enfatizar o aproveitamento dos rejeitos de quartzito são apresentados, ainda, pesquisas realizadas com este material visando aplicações geotécnicas em obras de engenharia ou na construção civil e uma abordagem conceitual sobre os tijolos solo-cimento, suas propriedades, processo de fabricação, suas características e estudos de sua utilização com diversos tipos de rejeitos.

2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO

Segundo a NBR 15012 (ABNT, 2013), rocha ornamental e de revestimento é um material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer função estética.

Conforme Montani (2018), no que concerne à produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento, o setor cresceu de 1,8 milhões de t/ano, na década de 1920, para atualmente 152 milhões de t/ano. Cerca de 58 milhões de toneladas de rochas brutas e beneficiadas foram comercializadas no mercado internacional em 2017, representando 856 milhões de m² equivalentes de chapas com 2 cm de espessura e transações de US\$ 20,6 bilhões. Os principais produtores, exportadores e importadores mundiais de 2017 são mostrados nas Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3.

Em 2017, no que se refere à produção mundial de rochas ornamentais, dez países detêm mais de 81,0% do total produzido. O país líder na produção mundial de rochas ornamentais é a China, detendo 32,2%, aproximadamente um terço da produção mundial, seguido da Índia e da Turquia, com 16,1% e 8,1%, respectivamente. O Brasil ocupa o 5º lugar, com uma participação de 5,4% (ABIROCHAS, 2018).

Tabela 1- Principais produtores mundiais de rochas ornamentais.

Países x Ano (Peso)	2014		2015		2016		2017	
	mil t	%	mil t	%	mil t	%	mil t	%
China	42,5	31,1	45,0	32,1	46,0	31,7	49,0	32,2
Índia	20,0	14,7	21,0	15,0	23,5	16,2	24,5	16,1
Turquia	11,5	8,4	10,5	7,5	10,75	7,4	12,3	8,1
Irã	7,0	5,1	7,5	5,4	8,0	5,5	8,7	5,7
Brasil	8,75	6,4	8,2	5,9	8,5	5,9	8,3	5,4
Itália	6,75	4,9	6,5	4,6	6,25	4,3	6,3	4,1
Egito	4,2	3,1	5,0	3,5	5,25	3,6	5,3	3,5
Espanha	4,85	3,6	4,75	3,4	5,0	3,4	4,9	3,2
EUA	2,65	1,9	2,7	1,9	2,8	1,9	2,8	1,8
Portugal	2,75	2,0	2,7	1,9	2,6	1,8	2,8	1,8
França	1,2	0,9	1,25	0,9	1,3	0,9	1,4	0,9
Arábia Saudita	1,3	1,0	1,2	0,9	1,25	0,9	1,3	0,8
Grécia	1,3	1,0	1,25	0,9	1,2	0,8	1,5	1,0
Paquistão	1,0	0,7	1,05	0,7	1,1	0,7	1,2	0,8
Subtotal	115,75	84,8	118,6	84,6	123,5	85,0	130,3	85,7
Outros	20,75	15,2	21,4	15,7	21,5	15,0	21,7	14,3
Total	136,5	100	140,0	100	145,0	100	152,0	100

Fonte: Montani, 2018.

Em relação à exportação das rochas ornamentais e de revestimento, nove países são responsáveis por 72,61% da produção. A China lidera o ranking como principal exportador de rochas de processamento simples e especial. A Índia é a principal exportadora de rochas silicáticas, com cerca de 80,80% do total, seguido pela China, com 3,5%, e Portugal, em terceiro lugar, com 2,92%. O Brasil ocupa a 5ª colocação no ranking de exportações, com a marca de 2.301 milhões de toneladas, conforme Tabela 2.

Tabela 2-Principais exportadores mundiais de rochas ornamentais - 2017.

Países x Tipos de Rochas	Rochas	Rochas	Rochas de	Rochas de	Produto	Total
	Carbonáticas	Silicáticas	Processamento Simples	Processamento Especial	de Árdósia	
(1.000 t)						
China	83	387	1.344	9.124	387	11.325
Índia	256	8.948	322	1.923	31	11.480
Turquia	5.667	87	19	2.209	2	7.984
Itália	1.432	119	123	1.241	10	2.925
Brasil	17	976	27	1.185	96	2.301
Espanha	767	228	31	683	484	2.193
Portugal	461	324	404	425	21	1.635
Grécia	921	6	2	240	6	1.175
Irã	924	0	0	127	0	1.051
Subtotal	10.528	11.075	2.272	17.157	1.037	42.069
Outros	4.970	4.507	1.929	4.336	128	15.870
Total	15.498	15.582	4.201	21.493	1.165	57.939

Fonte: Montani, 2018.

No mercado consumidor, os dez principais países, que representam cerca de 54% do total mundial, são apresentados na Tabela 3. A China se destaca com 25,36% do consumo mundial de rochas ornamentais, seguido dos Estados Unidos com 8,01%, e da Coreia do Sul com 6,23%. Neste cenário o Brasil aparece como um importador pouco expressivo.

A importância das exportações de rochas processadas, com maior valor agregado, é ilustrada pelos números da Itália, Brasil e Índia. A Índia exportou 11,5 milhões de toneladas em 2017, das quais 9 milhões de toneladas foram em rochas brutas, principalmente blocos de granito (Grupo – Rochas Silicáticas), com um faturamento total de US\$ 1,85 bilhão. O Brasil exportou 1/5 do volume físico exportado pela Índia, com um faturamento inferior de apenas 42% ao deste país; isto se deve ao fato das exportações brasileiras de rochas processadas terem sido muito mais significativas do que as da Índia. As exportações da Itália, por sua vez, corresponderam a 1/4 do volume físico das exportações da Índia, tendo, no entanto, somado um faturamento 18% superior ao indiano. Isto porque a Itália exporta grande quantidade de rochas processadas em produtos acabados, o que lhe confere notável vantagem sobre a Índia (MONTANI, 2018).

Tabela 3- Principais importadores mundiais de rochas ornamentais – 2017.

Países x Tipos de Rochas	Rochas Carbonáticas	Rochas Silicáticas	Rochas de	Rochas de	Produto	Total
			Processamento Simples	Processamento Especial	de Árdósia	
(1.000 t)						
China	8.539	5.964	3	143	5	14.704
EUA	32	93	443	3.949	128	4.645
Coréia do Sul	7	33	687	2.882	5	3.614
Alemanha	87	320	801	712	76	1.996
Canadá	122	516	19	252	10	919
Reino Unido	30	415	273	174	164	1.056
Itália	245	496	62	185	11	999
França	28	261	320	367	231	1.207
Taiwan	153	468	30	190	4	845
Índia	1.047	54	0	134	0	1.235
Subtotal	10.340	8.620	2.638	8.988	634	31.220
Outros	5.158	6.962	1.563	12.535	531	26.749
Total	15.498	15.582	4.201	21.523	1.165	57.969

Fonte: Montani, 2018.

O Brasil está entre os principais países produtores, beneficiadores e consumidores de rochas de revestimento. Os granitos, quartzitos, ardósias, mármore, travertinos, arenitos, são os tipos de rochas de revestimento mais produzidos no Brasil. Essas rochas são destinadas a diversos fins, como, por exemplo, em esculturas, balcões, revestimentos internos e externos de paredes, pisos, colunas, pilares, soleiras, telhados (ABIROCHAS, 2013).

Segundo a ABIROCHAS (2018), estima-se que o setor de rochas ornamentais e de revestimento brasileiro, nos mercados interno e externo, inclusive relativos à prestação de serviços e à comercialização de máquinas, equipamentos e insumos, mobilizou cerca de US\$ 5 bilhões em 2017. Cerca de 10.000 empresas, dentre as quais pelo menos 400 exportadoras regulares, integram sua cadeia produtiva e respondem por 120 mil empregos diretos e 360 mil indiretos.

Como mostra a Figura 1, a maioria das atividades desse setor concentra-se em centros produtivos locais, como os de mármore e granito do Espírito Santo, de ardósias

e quartzitos foliados de Minas Gerais, de gnaisses foliados do Rio de Janeiro, de basaltos plaqueados do Rio Grande do Sul, etc. (ABIROCHAS, 2017).

Figura 1- Distribuição geográfica das aglomerações produtivas de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil.



1- Basaltos Nova Prata; 2- Ardósias Trambudo Central; 3- Granitos Bragança Paulista; 4- Granitos Caldas (a) e Candeias (b); 5- Quartzitos São Tomé; 6- Quartzitos Alpinópolis; 7- Ardósias Papagaio; 8- Quartzitos e Pedra-Sabão Ouro Preto; 9- Granitos Medina; 10- Pedra Paduana; 11- Mármore e Granitos Cachoeiro de Itapemirim; 12- Granitos Baixo Guandu 13- Granitos Nova Venécia; 14- Granitos Teixeira de Freitas; 15- Travertinos OuroLândia; 16- Quartzitos Pirenópolis; 17- Pedra Cariri; 18- Pedra Morisca.

Fonte: Chiodi Filho, 2008.

Segundo Montani (2016), a produção de rochas ornamentais no Brasil em 2015, foi estimada em 8,2 milhões de toneladas. A Região Sudeste, de onde são extraídos 69% da produção nacional, se destaca como a região líder de mineração. A Região Nordeste,

ocupa a segunda colocação, representando 18% da produção nacional. O Sul participa com 11% e as Regiões Norte e Centro-Oeste com 1,3% e 0,7% respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Estimativa da distribuição regional da produção bruta de rochas ornamentais no Brasil em 2015.

Região	Produção (milhões t)	Participação
Sudeste	5,65	69,0%
Nordeste	1,48	18,0%
Sul	0,90	11,0%
Norte	0,11	1,3%
Centro-Oeste	0,06	0,7%
Brasil	8,20	100,0%

Fonte: Montani, 2016.

De acordo com dados do Instituto Metas (2002), existem 18 aglomerações produtivas referentes ao setor de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil, enquadrando atividades de lavra em 10 estados e 80 municípios do país. Essas aglomerações produtivas estão apresentadas na **Tabela 5**.

A região sudeste apresenta a maior concentração desses aglomerados. Segundo Chiodi Filho et al. (2014), nenhum novo aglomerado produtivo significativo foi incluído desde 2002. Os estados da região norte, constituem as últimas grandes fronteiras brasileiras para produção e beneficiamento de rochas ornamentais e de revestimento. A região Nordeste e em especial os estados do Ceará e Rio Grande do Norte têm-se mostrado excepcionalmente promissores para rochas exóticas e calcários maciços. Existem cerca de 1.500 frentes de lavra ativas, responsáveis por aproximadamente 1.200 variedades comerciais de rochas (ABIROCHAS, 2018).

Ainda em seus estudos, Chiodi Filho et al. (2014) citam, no que diz respeito ao mercado interno brasileiro, que a região sudeste é a maior consumidora de rochas ornamentais do país, representando 78% do mercado interno, sendo o estado de São Paulo o maior consumidor, responsável por 45% do total, seguida da região Sul com 14% e, por último, as regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste, com 18%.

Tabela 5- Principais aglomerações produtivas do setor de rochas no Brasil.

Região	Aglomerações Identificadas	UF	Nº Municípios
Sudeste	Pedra Paduana	RJ	1
	Ardósia Papagaio	MG	8
	Mármore e Granitos Cachoeiro de Itapemirim	ES	8
	Granito Nova Venécia	ES	6
	Quartzito São Thomé	MG	6
	Granito Baixo Guandu	ES	4
	Granito Medina	MG	4
	Granitos Candeias – Caldas	MG	16
	Granito Bragança Paulista	SP	4
	Quartzito e Pedra-Sabão Ouro Preto	MG	4
	Quartzito Alpinópolis	MG	2
Centro-Oeste	Quartzito Pirenópolis	GO	2
Sul	Basalto Nova Prata	RS	7
	Ardósia Trombudo Central	SC	1
Nordeste	Travertino Ourolândia	BA	2
	Granito Teixeira de Freitas	BA	2
	Pedra Cariri	CE	2
	Pedra Morisca	PI	1
Total	18 Aglomerações Produtivas de Rochas	10	80

Fonte: Instituto Metas, 2002.

A produtividade brasileira de rochas ornamentais e de revestimento, foi estimada pela ABIROCHAS (2018) em cerca de 9,2 milhões de toneladas no ano 2017, recuando 3,2% frente ao ano de 2016. Dentre os principais tipos de rochas produzidos encontram-se os granitos, pegmatitos e várias outras rochas silicáticas, além de mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos e gabros, serpentinitos, pedra-sabão e pedra-talco, calcários, metaconglomerados polimíticos e oligomíticos, cherts, arenitos, xistos diversos, etc. O perfil da produção brasileira, por tipo de rocha, é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6- Perfil da produção brasileira por tipo de rocha – 2017.

Tipos de Rochas	Produção (mil t)	Participação (%)
Granitos e similares	5,0	54
Mármore e Travertino	2,0	22
Ardósia	0,4	4,5
Quartzito Foliado	0,3	3
Quartzito Maciço	0,9	10
Pedra Miracema	0,2	2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão.)	0,4	4,5
Total	9,2	100

Fonte: ABIROCHAS, 2018.

Quanto ao desempenho dos estados brasileiros nas exportações de rochas ornamentais e seus diversos produtos comerciais, em 2017 o Brasil exportou o correspondente a 1,07 bilhão de dólares. A participação das rochas processadas no total do faturamento evoluiu de 80,15% em 2016 para 80,45% em 2017, correspondendo a cerca de 861 milhões de dólares. (MONTANI, 2018)

Dados do Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC (2017), quatro estados foram responsáveis por 98,1% desse montante, o estado do Espírito Santo é o maior produtor desse segmento, representando 88,9% do total, seguido respectivamente por Minas Gerais (7,1%), Ceará (1,5%), Rio Grande do Norte (0,6%)

2.2 QUARTZITO

O estado de Minas Gerais se destaca, no cenário brasileiro, por grande parte da produção de quartzitos, com quatro centros de lavras do minério que é utilizado como rocha ornamental e de revestimento. O maior produtor é o centro de São Thomé das Letras, seguido de Alpinópolis, Ouro Preto e Diamantina (FERNANDES et al., 2003).

2.2.1 Processo de produção

O processo de produção utilizado no estado de Minas Gerais para extração do quartzito é a lavra a céu aberto. É realizado previamente o decapeamento e a retirada de toda a faixa de material estéril para então se atingir o maciço. O material útil então é

desmontado mediante utilização de explosivos e ferramentas manuais e, em seguida, desmembrado e cortado em placas no próprio local de extração, por meio de talhadeiras, marretas e gabaritos (Figura 2). Nessa etapa ocorre a geração de um grande volume de resíduos, constituído por blocos e retalhos.

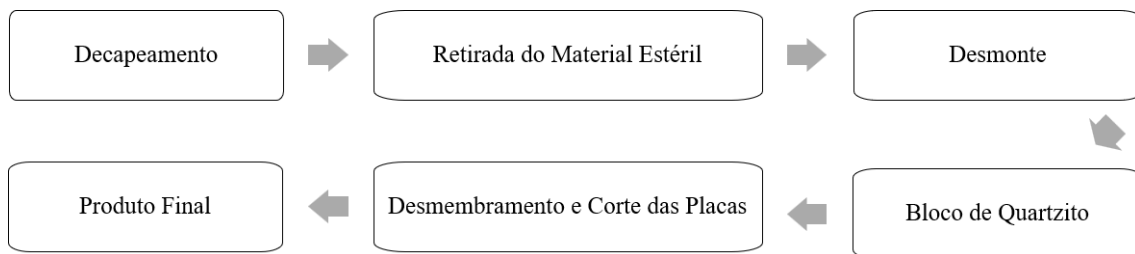
Figura 2- Desmembramento e corte das placas de quartzito – Alpinópolis, MG.



Fonte: O Autor, 2019.

O fluxograma da Figura 3 apresenta as etapas do processo de exploração do quartzito.

Figura 3- Fluxograma do processo de extração do quartzito.



Fonte: O Autor, 2019.

Esse método de extração apresenta grande geração de material estéril, e muitas vezes não é executado com adequada caracterização da jazida e planejamento de lavra. Essa geração de material estéril é uma das questões de maior relevância quanto ao controle ambiental da exploração de quartzitos foliados no Brasil, principalmente, em relação ao impacto causado pela exposição desse material, que quase sempre é disposto de forma inadequada nas áreas de mineração ou nas encostas (

Figura 4).

Figura 4- Material estéril disposto em área de exploração em Alpinópolis, MG.



Fonte: O Autor, 2019.

A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2003) e o Conselho Municipal de Conservação e Defesa do Meio Ambiente (CODEMA, 2003) apontam que cerca de 90% dos quartzitos extraídos das minerações em Minas Gerais são transformados em resíduos. Os elementos que causam esse baixo aproveitamento dos quartzitos são as técnicas inadequadas de desmontes (com explosivos), a grande incidência de fraturamento do maciço rochoso e a intercalação de níveis puramente quartzosos que não sofrem delaminação.

Valadão et al. (2010), durante realização de levantamento de produtores de quartzito na região da Serra da Canastra, observaram os variados tipos de produção e exploração existentes na região. Existem desde minerações com dezenas de empregados até frentes de lavra com poucas pessoas. Verifica-se desde atividade de lavra bastante mecanizada com alguma técnica convencional de mineração até as atividades quase que exclusivamente manuais, constituindo uma lavra de garimpo. Quanto aos aspectos geológicos, verificaram que, nas mineradoras, as atividades de lavra geralmente não são planejadas, não apresentam um estudo da geologia local para um melhor conhecimento e detalhamento dos depósitos explorados.

Em seus estudos em Pirenópolis, Campos e Silva (2003), constataram diversos problemas que colaboram para a baixa produtividade na obtenção de placas de quartzito diretamente no maciço. Um exemplo mencionado é a disposição do rejeito gerado por sobre o maciço rochoso que ainda será explorado (Figura 5).

Figura 5- Resíduos de quartzito sobre o maciço rochoso explorado – Pirenópolis, GO.



Fonte: Campos e Silva (2003).

Para Silva (2000), os impactos nas mineradoras são evidenciados em todos os meios, podendo ser, em alguns casos, irreversíveis. O meio físico associado ao antrópico são os que mais representam os impactos negativos do processo de extração e beneficiamento do quartzito. O efeito negativo da degradação visual é o mais expressivo, pois a exposição do manto rochoso da cava de exploração e do bota-fora cria um cenário desértico, de aspecto árido, semelhante ao de um “lixão”, que contracena com a paisagem natural.

Esses impactos são notáveis na região de Alpinópolis – MG, principal cidade do centro produtor de quartzito do sudoeste de Minas Gerais. A Figura 6 mostra um exemplo do volume que este passivo ambiental pode atingir.

Figura 6- Deposição dos rejeitos de mineração de quartzito – Alpinópolis, MG.



Fonte: O Autor, 2019.

Na região do sudoeste de Minas Gerais, o método de exploração dos quartzitos gera discussões, principalmente em relação às questões ambientais e socioeconômica. Os profissionais da área ambiental afirmam que essa exploração é predatória, em virtude do seu baixo aproveitamento, estimado entre 8 e 10%. Do ponto de vista socioeconômico, essas pedreiras proporcionam muitos empregos nas cidades. Desta forma, fica caracterizado que muitas famílias têm a sua sobrevivência tirada desse tipo de atividade (FEAM, 2003).

2.2.2 Mineralogia

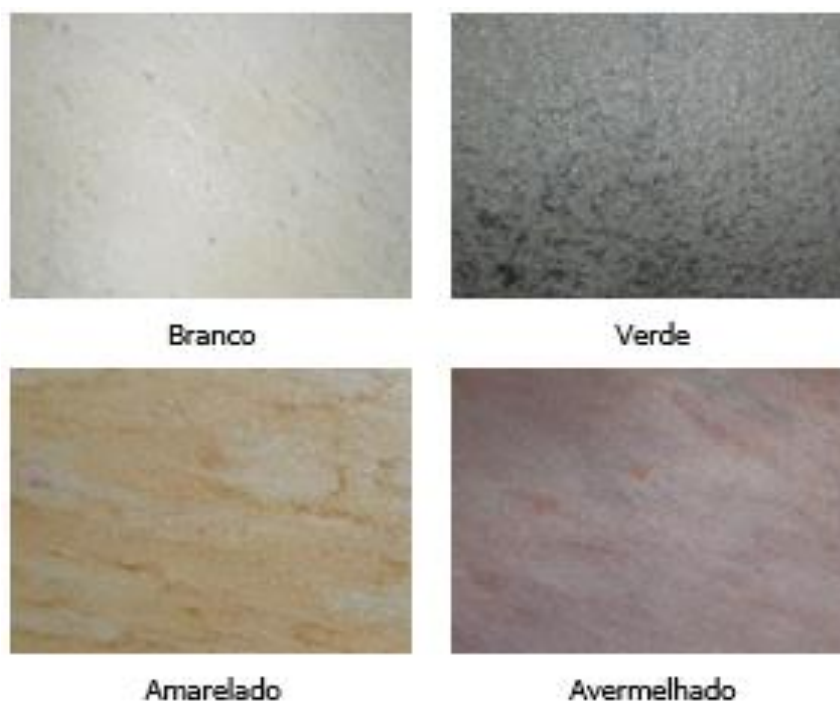
Para um melhor conhecimento do quartzito e de sua aplicabilidade é de suma importância conhecer suas características mineralógica, textural e estrutural. Sua mineralogia é formada quase que exclusivamente de quartzo recristalizado em arranjos granoblásticos e serícita; apresenta textura granoblástica ou granolepídoblástica e estrutura maciça ou foliada (FRASCÁ E SARTORI, 1998).

O quartzito é classificado geologicamente como uma rocha metamórfica com textura sacaróide, composta quase que inteiramente de grãos de quartzo, apresenta uma tendência a ser coesa, com estrutura cristalina densa e organizada de modo que a força do cimento entre as partículas propicia uma resistência interna bastante alta. Sua formação está relacionada com ação de processos metamórficos termodinâmicos desenvolvidos

principalmente sobre rochas sedimentares ricas em quartzo, tais como arenitos e cherts (ABIROCHAS, 2013).

Além do quartzo, os quartzitos podem conter outros minerais, tais como mica e feldspato ou ainda novos minerais formados no metamorfismo (COSTA, 1950 apud ALECRIM, 2009, p.18). Os quartzitos são em geral brancos com algumas variações para amarelo, vermelho, verde ou acastanhado (Figura 7).

Figura 7- Variações de Quartzitos.



Fonte: GraniPex.

A composição química do quartzito equivale-se praticamente à da sílica (SiO_2), podendo conter pequena porção de alumínio, ferro, cálcio, entre outros minerais. Quartzitos com pequena quantidade de filossilicatos (normalmente mica branca) não desenvolvem foliação metamórfica e planos preferenciais de divisão. Estes quartzitos são, conseqüentemente, caracterizados como rochas maciças de textura sacaróide granoblástica, extraídos como blocos nas pedreiras e posteriormente serrados em chapas.

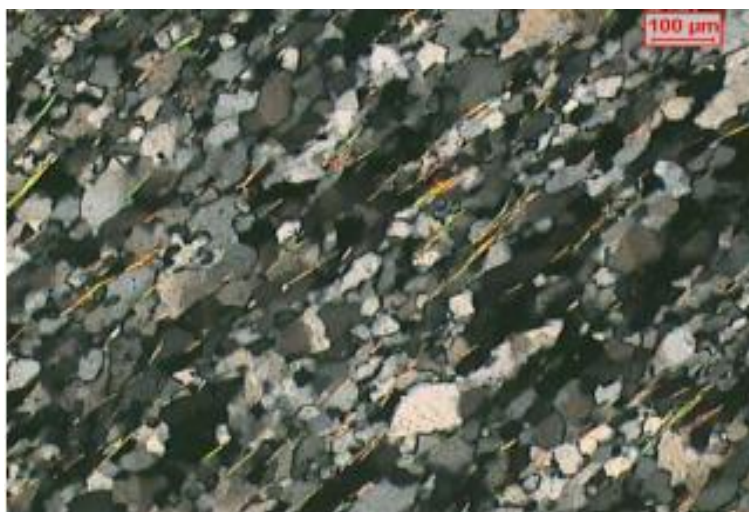
Quando a presença de micas isorientadas é grande, os quartzitos desenvolvem textura sacaróide granolepidoblástica, com relativa facilidade de divisão através dos planos de fraqueza formados. A existência desse tipo de estruturação dificulta e/ou impede a obtenção de quartzito na forma de blocos e seu desdobramento em teares ou

mesmo seu corte regular em chapas, portanto são geralmente extraídos como placas diretamente dos afloramentos (COSTA et al., 2002).

Conforme Fernandes (2002), a maior parte dos quartzitos da região de Alpinópolis são levemente friáveis, de granulometria fina a muito fina, e possuem o quartzo, a sericita, o zircão, a magnetita/ilmenita e os hidróxidos de ferro e manganês como componentes mineralógicos básicos. A coloração destes quartzitos é esbranquiçada a acinzentada. As placas apresentam cores variadas, com tonalidades de cinza, amarelo, marrom e vermelho, de acordo com a quantidade do grau de oxidação e transformação dos minerais acessórios.

Estudos petrográficos realizados por Alecrim (2009), demonstram que o quartzito da cidade de Alpinópolis apresenta granulação fina, composição mineralógica estimada de 96 a 97% de quartzo, 2 a 3% de muscovita, menos de 1% de minerais opacos e traços de turmalina, hidróxido de ferro, biotita, zircão e rutilo, leve alteração e forte laminação. Os cristais de quartzo apresentam formas alongadas de contornos denteados a lobulados, gerando trama bem orientada e assimétrica, com aspecto associado à forte orientação cristalográfica. A muscovita ocorre como palhetas bem isoorientadas, isoladas e formando agregados de poucos cristais com forma lenticular delgada. Distribuem-se de maneira mais ou menos homogênea pela seção, definindo difusas trilhas. Os demais minerais (opacos, turmalina e zircão) estão dispersos e apresentam dimensões normalmente menores que 150 μ m. Os hidróxidos de ferro e hematita ocorrem localmente ao longo de micro-fissuras ou intersticialmente. A Figura 8 ilustra os aspectos petrográficos dos quartzitos da região.

Figura 8- Aspecto petrográfico do quartzito da cidade de Alpinópolis.



Fonte: Alecrim, 2009.

2.2.3 Estudos com rejeitos de quartzitos

Diversos estudos científicos têm sido realizados para se avaliar a viabilidade de uso dos quartzitos em outras cadeias produtivas e não apenas como rocha de revestimento. Foi verificado que esses rejeitos possuem características diferenciadas, em função de variabilidade textural e estrutural de quartzitos ocorrentes no sudoeste mineiro, o que pode afetar em suas propriedades geotécnicas para uso específico como agregado. Este fato demonstra a importância dos estudos nos diferentes tipos de materiais dispostos nas pilhas de rejeitos de minerações da região.

O estudo sobre aplicações do rejeito de extração de quartzito como agregado na construção civil realizado por Cabello (2011) analisou a viabilidade técnica e a econômica de se fragmentar o material mais grosseiro, gerando um produto aplicável na produção de pré-moldados de concreto e argamassas industrializadas. Dentre os ensaios realizados as amostras foram analisadas quanto à trabalhabilidade, à resistência à compressão, degradação, abrasão, perda ao choque e índice de forma. Com ressalva às dimensões alongadas do agregado graúdo obtido, os resultados mostraram possibilidade de se utilizar o rejeito de quartzito em camadas de base para pavimentação. Concluiu-se, ainda, que o rejeito pode ser empregado como agregado para argamassas industrializadas e para produção de pré-moldados dentro de diversas faixas de resistência à compressão, abrangendo diferentes aplicações.

Alecrim (2009) conclui que o resíduo da extração de quartzito foliado pode ser utilizado como material granular em base ou sub-base de camadas de pavimentos. Mesmo com a maior quantidade de partículas de quartzito de forma cúbica, há uma parcela expressiva de grãos lamelares e alongados. Entretanto a alteração no processo de britagem pode melhorar essa característica de forma e viabilizar o maior uso em obras rodoviárias. Pode-se também utilizar esse agregado em misturas solo resíduo, onde a forma do agregado não é uma limitação.

Collares et al. (2012), em estudos com quartzitos de diferentes pontos do sudoeste mineiro, verificaram que os valores de resistência à tração no concreto endurecido mostraram-se satisfatórios, porém com resultados diferentes, dependendo dos locais coletados. Os traços de duas amostras de quartzitos, denominados A1 e A3, obtiveram valores inferiores ao traço de gnaiss (padrão) da ordem de 12,5%, enquanto que os traços denominados A2 e A4 obtiveram um acréscimo na resistência à tração em relação ao traço padrão em 6,28%.

Em quase todas as minerações de quartzito localizadas no Grupo Canastra, na região Sudoeste de Minas Gerais, dois tipos distintos foram individualizados por Collares et al. (2008): o Tipo 1, de cor branca amarelada a variegada, foliado, com médio teor em micas (sericita) e que é utilizado como pedra de revestimento; o Tipo 2, de cor cinza, bastante silicificado, com baixo teor em micas e não foliado. Este último tipo é pouco utilizado como pedra de revestimento, constitui grande parte dos rejeitos nas minerações e nele foram verificados os melhores resultados nos ensaios de índices físicos e mecânico.

As pesquisas realizadas por Franklin Júnior (2009) e Pinheiro (2003) mostraram que os resíduos de quartzito possuem um grande potencial para ser utilizado como agregados em concreto. Porém, ambos os autores recomendam um estudo mais aprofundado em relação a uma possível reação álcali-agregado que pode ocorrer no concreto, visto que o quartzito é considerado um agregado reativo aos álcalis presentes no cimento.

Abdullahi (2012) avaliou as características de três tipos de agregados: quartzito, granito e cascalho de rio. O traço adotado foi o de 1:2:4 (cimento: agregado fino: agregado grosso), e foram verificadas as características de trabalhabilidade e resistência à compressão do material. Os resultados indicaram que o concreto feito de cascalho de rio tem a maior trabalhabilidade, seguido de quartzito e agregados de granito. Quanto à resistência à compressão, em todas as idades, foi observado que o concreto feito de agregado quartzito obteve maior resistência, seguido do cascalho de rio e granito.

Em estudo do uso do rejeito do quartzito como agregado graúdo para o uso em peças de concreto para pavimentação (PCPs) realizado por Reis (2016), os resultados mostraram possibilidade de substituição de 100% desse agregado, pois não houve diferença de resistência em relação ao agregado convencional. Já para substituição do agregado miúdo, foram utilizados areia de quartzito lavada e não lavada, e não houve constatação de diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão simples quanto ao uso do material de quartzito como areia fina lavada e não lavada, com um diferencial de um melhor acabamento superficial das peças, para o agregado miúdo de quartzito não lavado.

Alecrim (2004) e Alecrim e Fabri (2005) pesquisaram as potencialidades do uso de rejeito de quartzito na produção de sub-base e base de pavimentos flexíveis, utilizando diferentes dosagens entre solos lateríticos da região sudoeste de Minas Gerais com rejeito granular de quartzitos. Concluíram que a proporção de 60% de rejeito e 40% de solo

apresentou o melhor desempenho relativo aos ensaios de Índice Suporte Califórnia (CBR) e de Módulo Resiliente (MR) com respectivos valores de 84% e de 700 MPa.

Grilo (2016) estudou o uso do quartzito como agregado miúdo em misturas com solo argiloso laterítico local para base de pavimentos em vias de baixo volume de tráfego. Sendo comparado o desempenho das misturas compostas com material alternativo (quartzito) em relação às misturas com material tradicional (areia lavada de rio). Os resultados obtidos demonstram a potencialidade de uso do agregado miúdo de resíduos de quartzito, tendo sido analisadas misturas solo-areia (material tradicional) e solo-quartzito (material alternativo) nas composições de 85% x 15%, de 70% x 30% e de 55% x 45%, respectivamente. Dessas misturas, as que continham 30% e 45% de agregados foram consideradas recomendadas e satisfatórias para uso em base de pavimentos.

Dias et al. (2016) propuseram em seus estudos a aplicação do rejeito de quartzito, oriundo de Ouro Preto- MG, como substituto à areia natural para elaboração de argamassas colantes. Foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco, como índice de consistência, deslizamento, retenção de água, teor de ar incorporado, densidade de massa e *squeeze flow*. Os resultados foram satisfatórios, sugerindo a viabilidade deste material como agregado miúdo em substituição total ao agregado natural, permitindo a mitigação dos impactos ambientais.

Ferreira (2017) investigou a utilização dos resíduos de quartzito, oriundos da cidade mineira de São Tomé das Letras, em substituição parcial ou total de agregados miúdos na fabricação de microconcreto usando o cimento Portland CPV-ARI. Conforme os ensaios físico-mecânicos realizados, o resíduo de quartzito mostrou-se apto para ser usado como agregado no microconcreto em todas as faixas granulométricas investigadas, preferencialmente com a relação água/cimento de 0,55.

2.3 TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Diante da necessidade crescente de métodos construtivos mais racionais e que causem menos impacto ao meio ambiente, o tijolo solo-cimento configura-se como uma opção para suprir essas necessidades, principalmente na temática habitacional, uma vez que possui fácil processo de fabricação, favorecendo a redução de custos e prazos de construção (MOTTA et al., 2014).

A ideia do uso de solo compactado como elemento de construção não é recente. O engenheiro britânico H.E. Brook-Bradley, no final do século XIX, foi pioneiro no uso

desta mistura, inicialmente para o tratamento de leitos de estradas e de pistas para veículos a cavalo no sul da Inglaterra (ACCHAR E MARQUES, 2016).

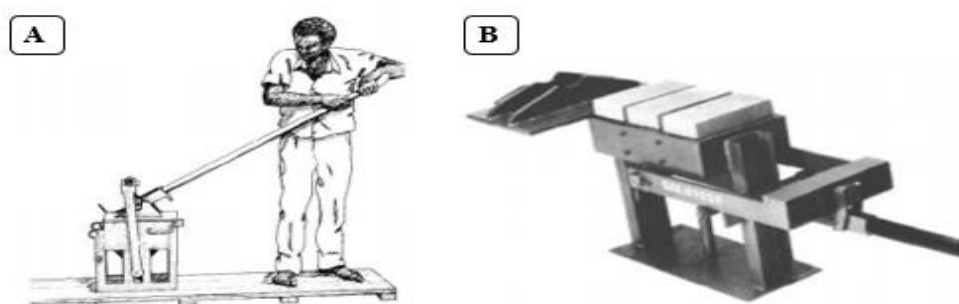
Nos Estados Unidos, em 1915, o solo-cimento foi empregado pela primeira vez, pelo engenheiro Bert Reno, na pavimentação de uma rua, através da mistura de areia de praia, conchas e cimento Portland. No Brasil, o solo-cimento era utilizado na composição de bases de estradas e diversos estudos foram desenvolvidos com essa finalidade. Posteriormente, a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, sugerindo outro uso para este material, divulgou um boletim, Casas e Paredes de Solo-Cimento (nº 54), onde propunha a utilização do solo-cimento na construção de paredes monolíticas (NEVES, 1978).

Segundo Thomaz (1979), a utilização do solo-cimento em edificações no Brasil aconteceu pela primeira vez em 1945, na cidade de Santarém (PA), onde foi construída, em caráter experimental, uma casa de bombas com 42 m², para abastecimento das obras de construção do aeroporto local.

Em 1948, foi realizada a construção de casas residenciais em Vale Florido, na sede da Fazenda Inglesa, em Petrópolis – RJ. (BARBOSA, 2003; LIMA, 2013). Em 1953 foi construído em Manaus o Hospital Adriano Jorge com paredes monolíticas de solo-cimento (CABALA, 2007).

Na década de 1950, o solo só passou a ser usado na forma comprimida por equipamentos, com a criação de uma prensa manual para fabricação de tijolos e blocos, pelo pesquisador Colombiano, G. Ramires. A prensa manual ficou mundialmente conhecida como prensa CINVA-RAM (Figura 9A). (BARBOSA E MATTONE, 2002). No Brasil também foi desenvolvida uma prensa para fabricação dos tijolos de solo-cimento, com o apoio do Banco Nacional de Habitação (BNH), com produção de três tijolos ao mesmo tempo (Figura 9B).

Figura 9- Prensas. (A) Prensa manual CINVA-RAM e (B) Prensa manual IPT.



Fonte: Barbosa, 2003.

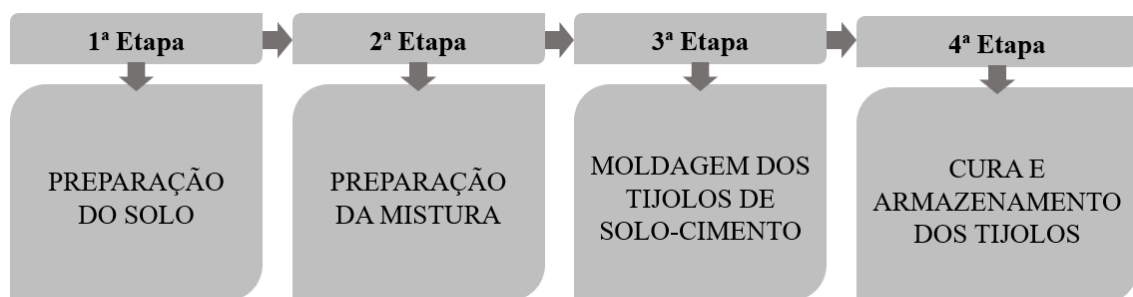
Na década de 1970, o solo-cimento foi empregado em maior escala em construções de casa para moradias após a aprovação de técnicas de construções de habitações populares pelo então Banco Nacional de Habitação (BNH), com base na comprovação do desempenho adequado do material, através de testes e pesquisas feitos pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED) e o Instituto de Pesquisas Técnicas do Estado de São Paulo (IPT) (CABALA, 2007).

Construções mais atuais mostram que a técnica de solo melhorado com cimento (solo-cimento) tem crescido cada vez mais, sendo usada não somente em construções populares, como também em habitações de diferentes classes sociais para empregos diversos.

A NBR 8492 (ABNT, 2012) define o tijolo solo-cimento como um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água, em proporções estabelecidas por norma, compactado por meio de uma prensa, hidráulica ou mecânica e endurecido sem a necessidade de queima, podendo ser maciço ou vazado.

O processo de fabricação dos tijolos compreende as seguintes etapas:

Figura 10- Fluxograma de processo de fabricação de tijolos de solo-cimento.



Fonte: O Autor, 2019.

- Preparação do solo: Constitui-se no destorroamento e no peneiramento do solo seco;
- Preparação da mistura: Incorpora-se o cimento ao solo preparado e efetua-se a homogeneização dos materiais até a obtenção de uma coloração uniforme; em seguida, adiciona-se água gradativamente, misturando os materiais, até atingir a umidade ideal;
- Moldagem dos tijolos: Transfere-se o material misturado para o molde, onde é executada a prensagem. A prensagem pode ser efetuada em prensas manuais ou

hidráulicas. Os tijolos são retirados e empilhados, à sombra, sobre uma superfície plana e lisa;

- Cura e armazenamento: Após a moldagem e durante os sete primeiros dias os tijolos devem ser mantidos úmidos, a fim de garantir a cura necessária.

Os tijolos solo-cimento apresentam diversas vantagens em relação aos tijolos comuns, desde sua fabricação até sua utilização as obras. Os equipamentos utilizados em sua fabricação são simples e apresentam baixo custo, a mão-de-obra para operar os equipamentos não precisa ser especializada, a fabricação pode ser feita no próprio canteiro de obras, além da rapidez no processo construtivo e alta produtividade (BORGES E COLOMBO, 2009).

Souza (2006) destaca que, do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, uma das vantagens mais relevantes dos tijolos de solo-cimento é não precisar passar pelo processo de queima, no qual são consumidas grandes quantidades de madeira ou de outros combustíveis, como é o caso dos tijolos convencionais produzidos nas olarias. Além disso, ao contrário dos tijolos de argila queimada, que quando quebram não podem ser reaproveitados, os tijolos de solo-cimento podem ser moídos e prensados novamente, evitando o desperdício.

Por se tratar de uma alvenaria modular, há uma diminuição do desperdício e uma relativa eficiência na construção, em virtude dos blocos serem encaixados ou assentados com pouca quantidade de argamassa, além de possuírem furos internos, o que descarta a necessidade de cortes e quebras para a passagem de tubulações e instalações hidráulicas (CORDEIRO et al., 2006).

Outra vantagem é a redução do emprego de argamassas de assentamento e revestimento já que a qualidade e o aparência final das peças são notadamente superiores, com maior regularidade dimensional e planicidade de suas faces, sendo capaz até de ser utilizado em alvenaria aparente, necessitando apenas de uma cobertura impermeabilizante como acabamento (SOUZA, 2006).

Pentado e Marinho (2011) realizaram um estudo comparativo de custos e produtividade dos sistemas construtivos de blocos de solo-cimento, blocos cerâmicos e blocos de concreto. O estudo foi realizado em uma moradia popular de 33 m², na cidade de Curitiba - Paraná, considerando os custos e o tempo de execução das etapas de estrutura, vedação e revestimentos internos e externos. Os pesquisadores concluíram que “o sistema construtivo solo-cimento é o mais viável para construção de residências

populares, tendo em vista que apresentou os melhores resultados quando comparado ao sistema de alvenaria convencional e concreto”.

Carneiro et al. (2001) ressaltaram outra vantagem dos tijolos de solo estabilizado: a possibilidade de incorporar outros materiais na sua fabricação, como por exemplo, agregados produzidos com entulho reciclado e rejeitos industriais (sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto forno e outros).

Conforme Acchar e Marques (2016), apesar desses pontos positivos, no Brasil, o interesse pelo método de estabilização do solo é mais significativo em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases nossas estradas são feitas de cimento-solo compactado), represas e muros de contenção, com aplicação secundária na construção civil devido à falta de conhecimento técnico de profissionais envolvidos nos diversos segmentos da sociedade. Diante dessa realidade, são necessários mais estudos que visam desenvolver e disseminar essa técnica.

2.3.1 Propriedades

O tijolo solo-cimento é o resultado da mistura homogênea de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas, após sofrer compactação ou moldagem e cura. É um material que possui boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade e boa durabilidade (FUNTAC, 2007).

De acordo com Acchar e Marques (2016), nos anos 80, a empresa SUPERTOR, fabricante de máquinas, com objetivo de divulgar a tecnologia do solo-cimento publicou um manual sobre o funcionamento e utilização. Este manual apresenta alguns fatores que influenciam as propriedades de resistência dos tijolos de solo-cimento, tais como: as características do solo, o teor de cimento na mistura, os graus de finura do cimento utilizado e da homogeneização da mistura, a densificação da mistura na fase de prensagem, definição do tempo e a condição da mistura após pressionar e os aditivos utilizados.

A escolha do solo a ser utilizado é de suma importância na confecção dos tijolos. É necessário que o solo possua características de granulometria, teor de umidade e índice de plasticidade e liquidez. A NBR 10833 (ABNT, 2012) especifica as seguintes características que o solo deve atender:

- 100 % de material que passa na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1;
- 10 % a 50 % de material que passa na peneira com abertura de malha 75 µm, de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1;
- limite de liquidez menor ou igual a 45 %;
- índice de plasticidade menor ou igual a 18 %.

A quantidade de cimento influencia de forma considerável na resistência da mistura de solo-cimento. Isto se deve em parte pelo aumento do peso específico aparente máximo da mistura. O cimento age como um fíler, preenchendo os vazios entre as partículas do solo até um determinado teor, após este ponto, o peso específico aparente seco do solo-cimento pode diminuir (LADE ET AL.,1998).

2.3.2 Utilização de rejeitos nos tijolos de solo-cimento

Os tijolos de solo-cimento tem a vantagem de poder incorporar outros materiais em sua composição, como agregados reciclados e rejeitos industriais, além de representar uma economia de energia significativa, por dispensar a queima, e ter sua viabilidade comprovada em diversos programas habitacionais (BARBOSA E GHAVAMI, 2010).

Muitos estudos foram realizados na tentativa de incorporar resíduos na produção de tijolos, como por exemplo, com resíduos de minério (Ferreira et al., 2015; Carrasco et al., 2013; Miqueleiz et al., 2013; Ullas et al., 2010), materiais como lodo (Herek et al., 2011; Nasly e Yassin, 2009; Balasubramanian et al., 2006), bagaço de cana de açúcar, casca de arroz e celulose (Carrasco et al., 2013; Medjo Eko e Riskowski, 1999), PET, alumina e cinzas de carvão (Paschoalin Filho et al., 2016; Miqueleiz et al., 2013), cinzas volantes (Shon et al., 2008; Cicek e Tanriverdi, 2006; Lingling et al., 2005) resíduos de construção e demolição e com areia de fundição (Segantini e Wada, 2011; Leonel et al., 2017).

De acordo com Leonel et al. (2017) vários estudos investigaram a adição de outros materiais residuais em substituição ao cimento. Com o objetivo de reduzir os custos, substituindo parcialmente o cimento ou o solo, materiais como resíduos de argamassa, concreto, resíduo de cerâmica, resíduos de processamento de caulim, sílica ativa, cinza de defensivos agroindustriais, materiais como bagaço de cana de açúcar ou casca de arroz e escória de alto forno vêm sendo estudados.

Neste contexto, insere-se os rejeitos gerados pelas minerações e pelo processamento das pedras naturais, onde o materil extremamente fino e as suas partículas

inertes ajudam a preencher espaços vazios na matriz. Aditivos de resíduos de outras atividades industriais podem ficar retidos na matriz de cimento, embora haja limites para a substituição de solo que deve ser respeitado, a fim de evitar comprometer a propriedades mecânicas dos tijolos.

Vieira et al. (2007) estudaram os rejeitos oriundos da extração da bauxita da Região de Minas Gerais, esse rejeito apresenta-se como uma lama, com alto teor de umidade, granulometria fina e baixa plasticidade. Com a realização dos ensaios, observou-se que a utilização do rejeito juntamente com a areia de construção, água e cimento apresentou resultados satisfatórios, pois propiciaram melhorias substanciais nas propriedades de resistência mecânica à compressão e absorção de água do solo-cimento, obtendo-se resultados melhores que os estipulados nas normas brasileiras, chegando a valores de 2,75 MPa.

Paschoalin Filho et al. (2016) propuseram uma alternativa de desenvolvimento de tijolos de solo-cimento por meio da inclusão de flocos de PET obtidos a partir da moagem de garrafas de água mineral. Os valores de resistência à compressão e de absorção de água dos tijolos de solo-cimento estudados indicaram valores inferiores ao recomendado pela NBR 8491 (ABNT, 2012). Contudo esses tijolos podem ser considerados como uma solução ambiental e alternativa em obras de alvenaria que não estejam submetidas a grandes carregamentos ou funções estruturais visto que na dosagem que apresentou os melhores valores de resistência à compressão e absorção de água foram utilizados aproximadamente 300g de resíduos de PET para a fabricação de um tijolo. Essa quantidade de massa equivale a cerca de 6 garrafas de bebidas de PET com capacidade de 2L.

Siqueira e Holanda (2015) estudaram o resíduo grits, oriundos do processo de Kraftit (Indústria de celulose) e avaliaram a influência da adição do resíduo grits sobre o comportamento de densificação do tijolo solo-cimento. Amostras de solo-cimento contendo até 30% em peso de resíduo grits, como substituto parcial de cimento Portland, foram preparadas por prensagem uniaxial e cura durante 28 dias. As seguintes propriedades tecnológicas foram determinadas: absorção de água, resistência à compressão simples e durabilidade. A microestrutura foi avaliada via microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X. Os resultados experimentais indicaram que a incorporação do resíduo grits influenciou positivamente o comportamento de densificação do tijolo solo-cimento. O resíduo grits poderia ser incorporado até 20% em peso como substituto de cimento Portland na composição do tijolo solo-cimento.

Betsuyaku et al. (2017), estudaram utilização de resíduo de areia diatomácea resultante da filtração da cerveja na confecção de eco tijolos ou tijolos ecológicos. Obtiveram resultados satisfatórios com resistência acima de 1,7 MPa, conforme recomendado pela norma NBR 8491 (ABNT, 2012), após o período de 28 dias de cura. Os resultados dos ensaios de absorção de água unitária e da resistência à compressão dos corpos de prova permitem concluir que o solo-cimento com adição de resíduos de areia diatomácea é uma boa alternativa construtiva.

Leonel et al. (2017) estudaram a possibilidade de areia descartada de fundição (ADF) ser incorporada em tijolos de solo-cimento. Os tijolos modulares foram preparados com 10% de cimento, 0 a 25% de areia comercial, 0 a 65% de areia de fundição usada, 25 a 65% de argila e 15 a 30% de pó de cascalho, sendo utilizado de cimento o teor de 10% de cimento Portland para assegurar a viabilidade econômica e cascalho foi usado para melhorar a resistência mecânica. Nos testes de durabilidade, os tijolos apresentaram absorção de água e perda de massa de acordo com as normas técnicas existentes. A adição de areia descartada de fundição combinada com pó de brita reduziu absorção de água e manteve estável a resistência mecânica a níveis aceitáveis de padrões de solo-cimento.

Segantini e Wada (2011) utilizaram a adição de resíduos de construção e demolição (RCD) na fabricação dos tijolos de solo-cimento. Os resultados se mostraram satisfatórios com substituição parcial e até total da massa de solo por RCD, e constataram que quanto maior a quantidade de RCD presente na mistura, maior é a resposta em termos de resistência à compressão. Concluíram que as dosagens compostas no mínimo com 4% de cimento, com adição de 20% ou mais de RCD, são consideradas ótimas para a confecção de tijolos de solo-cimento.

Com o objetivo de determinar a influência da adição de serragem em tijolos de solo-cimento e avaliar as suas propriedades mecânicas Carrasco et al. (2014) realizaram ensaios de resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade e impulsos ultrassônicos. Os resultados indicaram que a influência da inclusão de serragem em solos arenosos aumentou a sua resistência à compressão, módulo de elasticidade e ductilidade, e quando adicionados a solos argilosos, houve uma diminuição na resistência à compressão dos solos, mas um aumento no módulo de elasticidade e ductilidade.

Herek et al. (2011) propuseram em seus estudos a aplicação de misturas de lodo de esgoto provenientes de lavanderia têxtil com argila para produzir tijolos cerâmicos para construção civil. Os tijolos foram produzidos com diversas proporções de lodo e

foram analisados quanto as suas características mecânicas, além dos ensaios de lixiviação e solubilização para verificação de questões ambientais. Em geral os resultados obtidos foram satisfatórios e mostraram que o lodo pode ser incorporado ao tijolo cerâmico até uma concentração de 20% (em massa) para produzir tijolos adequados em termos de suas propriedades mecânicas e sob a norma brasileira vigente. Além disso, os ensaios de lixiviação e de solubilização demonstraram que os tijolos cerâmicos fabricados com lodo têxtil são inertes.

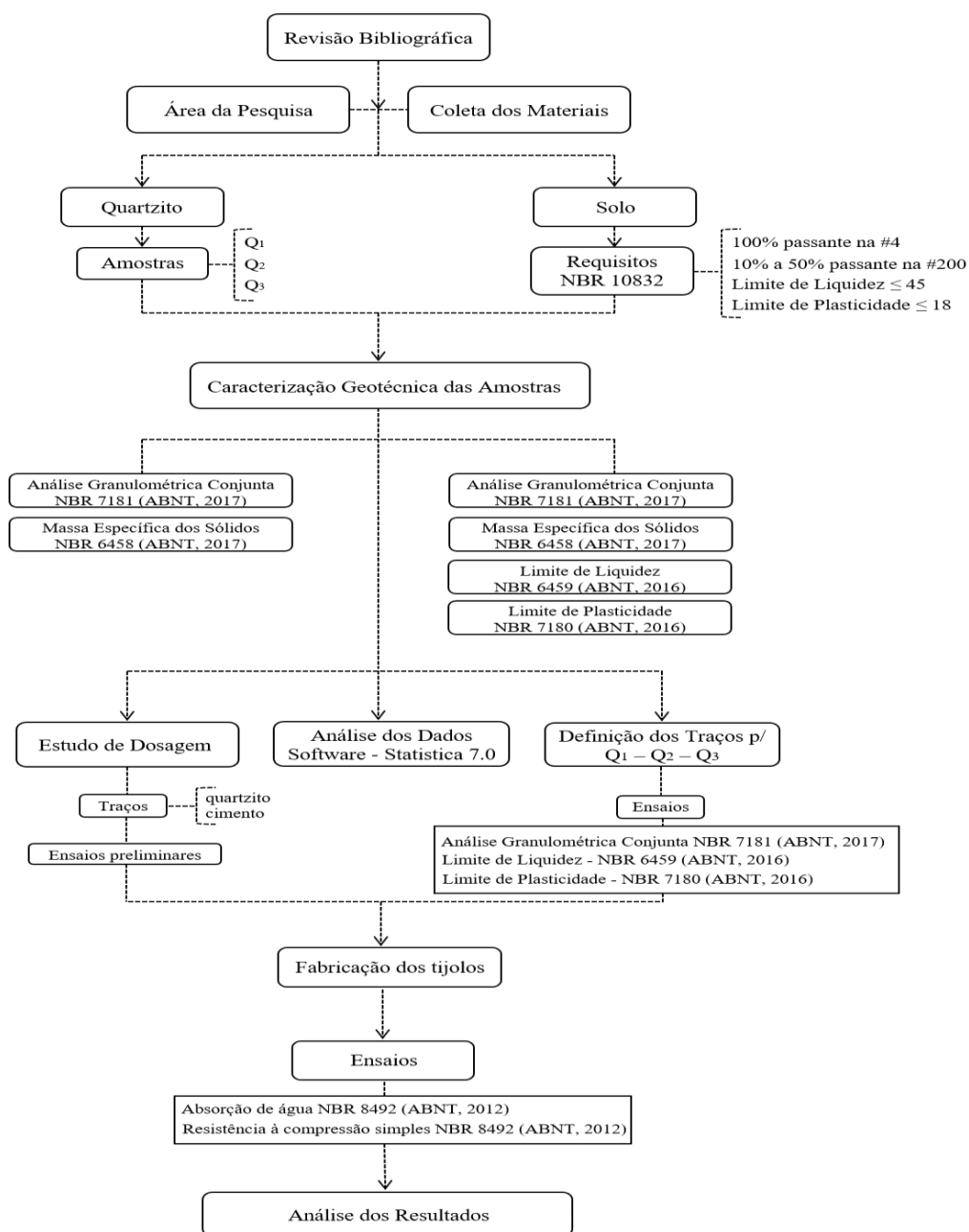
Miqueleiz et al. (2013) investigaram a aplicação de resíduo de alumina e de cinzas de carvão na produção de tijolos de solo-cimento/solo-cal. Diversas composições de misturas solo argiloso, cimento, cal, resíduo de alumina e cinzas de carvão foram analisados nos ensaios experimentais de resistência à compressão e de durabilidade realizados. Os resultados laboratoriais demonstram que a resistência à compressão dos tijolos diminuiu com o aumento do nível de substituição de argila. Os corpos de prova feitos com as misturas contendo resíduos de cinzas de carvão e cal alcançaram valores de resistência mais altos quando comparados com os resíduos de cinza de carvão e misturas de cimento Portland. Os resultados obtidos por Miqueleiz et al. (2013) sugerem potencial para fabricação de tijolos de solo-cimento/solo-cal a partir de resíduos de alumina e resíduos de cinzas de carvão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o estudo de caracterização tecnológica dos materiais utilizados na pesquisa, os procedimentos metodológicos empregados na determinação das misturas solo-cimento-rejeito de quartzito bem como na produção dos tijolos de solo-cimento e na execução de ensaios destrutivos e não-destrutivos nas peças confeccionadas.

As principais etapas desenvolvidas neste trabalho são apresentadas no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.



Fonte: O Autor, 2019.

3.1 MATERIAIS

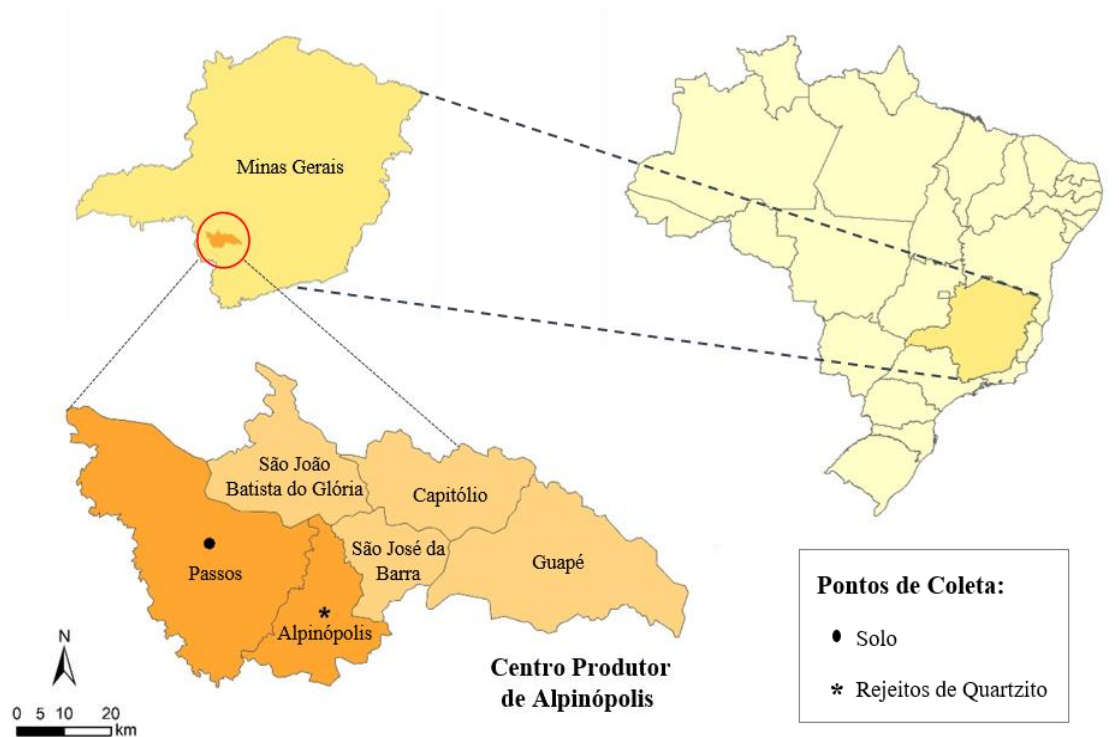
Os materiais utilizados neste trabalho para a produção dos tijolos de solo-cimento foram:

- Rejeito de quartzito – fração fina;
- Solo;
- Cimento Portland.

3.1.1 QUARTZITO

A área de estudo localiza-se na região sudoeste de Minas Gerais, no Centro Produtor Alpinópolis, formado pelas cidades de Alpinópolis, São João Batista do Glória, São José da Barra, Capitólio e Guapé. Os rejeitos estudados foram coletados na cidade de Alpinópolis (Figura 12).

Figura 12- Ponto de coleta das amostras.



Fonte: O Autor, 2019.

Levantamentos de campo mostraram diferenças de tonalidade e de textura em termos da fração fina dos rejeitos de quartzito conforme o ponto de extração (Figura 13), tendo sido classificados três tipos geotécnicos de quartzitos:

- Q3 – Quartzito friável/ muito alterado: originado de rochas de baixa resistência que se desgastam com relativa facilidade ao toque das mãos;
- Q2 – Quartzito duro: originado de pontos intermediários da extração, onde ocorre os deslocamentos da rocha, obtendo-se as maiores produções de placas extraídas diretamente do maciço;
- Q1 - quartzito muito duro - Originado de rochas mais resistentes e estruturalmente mais maciças.

Figura 13 - Tipos de quartzito - Alpinópolis, MG.



Fonte: O Autor, 2019.

Com base na distribuição citada acima, optou-se por trabalhar com os três tipos de rejeitos, visando bem representar as variedades litológicas e seu aproveitamento do ponto de vista ambiental.

As amostras foram coletadas em três pontos de uma mineradora, sendo denominadas de Q₁, Q₂ e Q₃. A Figura 14 mostra uma visão da mineração de quartzito e a Tabela 7 a localização geográfica dos pontos de coleta.

Figura 14 - Vista da mineração de quartzito – Alpinópolis, MG.



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 7- Localização geográfica dos pontos de coleta.

Ponto	Latitude	Longitude
Q ₁	20°51'7.56"S	46°21'19.08"W
Q ₂	20°50'58.56"S	46°21'18.72"W
Q ₃	20°50'58.92"S	46°21'27"W

Fonte: O Autor, 2019.

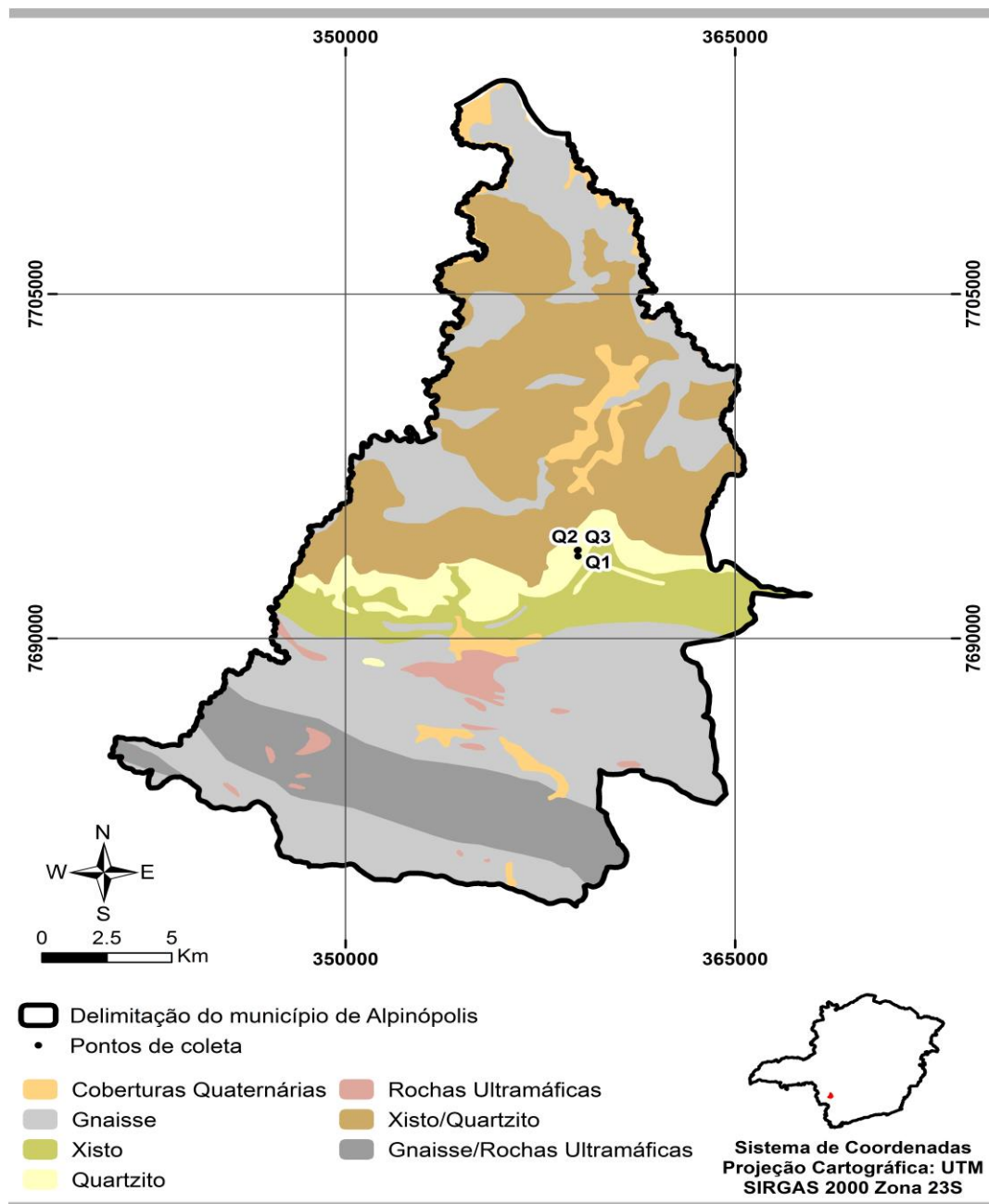
3.1.1.1 Geologia

O estado de Minas Gerais engloba uma ampla diversidade geológica, essa variedade geológica é demonstrada tanto no contexto mineralógico do estado, do qual o desenvolvimento está profundamente associado à exploração de recursos minerais, como em sua geodiversidade.

O território mineiro é composto por cinco grandes unidades geológicas aflorantes: Cráton do São Francisco; Faixa Brasília; Orógeno Araçuaí/Ribeira; Bacia do Paraná; Coberturas Colúvio-Aluviais e Eluviais. A área estudada situa-se na Faixa Brasília, nessa faixa, situada na parte oeste do Cráton do São Francisco, encontra-se os depósitos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante, Araxá e Andrelândia (MACHADO; CPRM, 2010)

A geologia local do município de Alpinópolis está relacionada as rochas do Grupo Canastra e Araxá (Collares, 2013). Segundo Barbosa et al. (1970), as rochas do Grupo Canastra, que afloram na região da serra da Canastra e do Triângulo Mineiro, são constituídas por quartzitos e filitos. O grupo Araxá apresenta substrato rochoso constituído por gnaisse, xistos e mica-xistos com intercalações ocasionais de quartzito (SEER et al., 2001; Collares, 2013). Os tipos de substratos rochosos encontrados no município são retratados na Figura 15 e Tabela 8.

Figura 15 - Mapa do substrato rochoso - Alpinópolis, MG.



Fonte: Adaptado de Collares, 2013.

Tabela 8 - Substrato Rochoso - Alpinópolis, MG.

Substrato Rochoso	Área (km²)	Área (%)
Coberturas Quaternárias	18,11	4,23
Xisto/Quartzito	117,31	27,41
Gnaisse/Rochas Ultramáficas	51,12	11,95
Gnaisse	177,02	41,37
Xisto	33,71	7,88
Quartzito	22,41	5,24
Rochas Ultramáficas	8,24	1,93
Total	427,92	100,00

Fonte: Adaptado de Collares, 2013.

3.1.2 SOLO

O critério para a escolha do solo foi baseado nos preceitos da norma NBR 10833 (ABNT, 2012), cujos requisitos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Critérios de seleção de solos para a fabricação de componentes de alvenaria.

Característica	Requisitos (%)
% de solo que passa na peneira ABNT 4,8mm (n.º 4)	100
% de solo passa na peneira ABNT 0,075mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Fonte: NBR 10833 (ABNT, 2012).

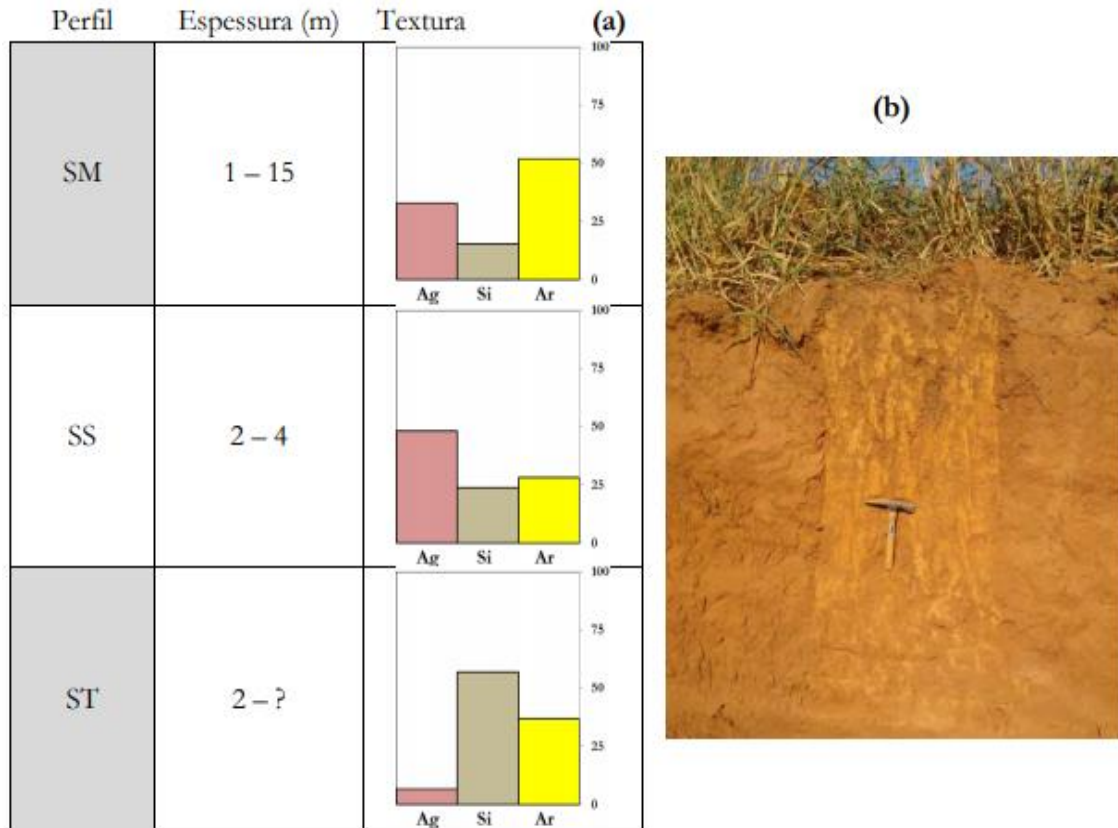
3.1.2.1 Geologia Local

A coleta do solo foi realizada na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, mais especificamente no entorno da cidade de Passos/MG (Figura 12). Nesta região, os solos são constituídos, predominantemente, por latossolos amarelo, vermelho-amarelo e vermelho escuro, localmente ocorrem cambissolos e solos podzólicos (ANDRADE e FONSECA, 2013).

Segundo Magri (2013), o nível de solo maduro dessa região possui espessura entre 1 a 15 metros e é constituído por uma areia argilosa. Logo abaixo, encontra-se o solo saprolítico constituído por uma argila areno-siltosa e o por último o nível de solo saprolito (silte arenoso). Nesta região ocorre a presença de relevos colinosos, sustentados por

gnaisse e xistos com intercalações ocasionais de quartzito do Grupo Araxá. Na Figura 16 é possível observar o perfil esquemático desta unidade (unidade 9) e o aspecto do solo maduro em campo.

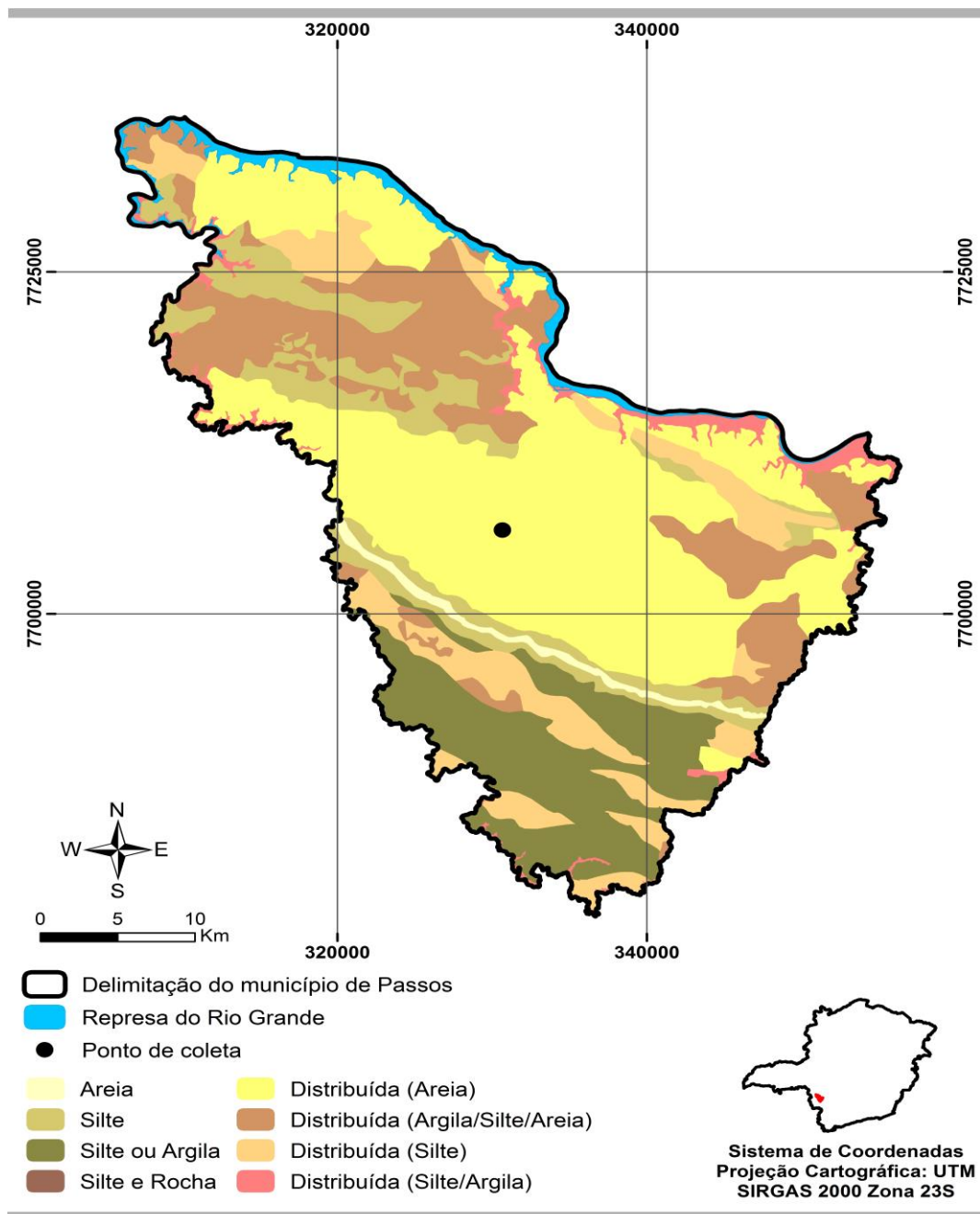
Figura 16- a) Perfil esquemático de alteração da unidade 9. b) Solo maduro da região.



Fonte: Magri, 2013.

O mapa da Figura 17 apresenta os tipos de materiais inconsolidados encontrados na região e o ponto de coleta do solo.

Figura 17 - Mapa de Materiais Inconsolidados - Passos, MG.



Fonte: Adaptado de Collares, 2013.

3.1.3 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Optou-se pela utilização deste tipo cimento devido à sua característica de atingir altas resistências já nos primeiros dias de utilização. Esse tipo de cimento também é um dos mais utilizados pelos fabricantes de tijolos de solo-cimento da região de São Carlos visto que suas propriedades são satisfatórias para a confecção do solo-cimento.

As especificações deste cimento são dadas pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Caracterização Tecnológica do Rejeito de Quartzito

Os rejeitos de quartzitos utilizados nesta pesquisa foram caracterizados geotecnicamente segundo as normas brasileiras apresentadas na Tabela 10, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Tabela 10 - Ensaios de caracterização geotécnica - Quartzito.

Norma	Ensaio
NBR 6458 (ABNT, 2017)	Massa Específica dos Sólidos
NBR 7181 (ABNT, 2016)	Análise Granulométrica Conjunta

Fonte: O Autor, 2019.

3.2.1.1 Massa Específica dos Sólidos

A determinação da massa específica dos agregados miúdos de quartzito foi realizada segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016).

A massa específica é a relação entre a massa dos grãos de um solo e seu volume real. É uma característica física dos solos, sendo em função da sua composição mineralógica. Esse ensaio é de fundamental importância na caracterização do solo pois é utilizado nos cálculos dos ensaios de sedimentação, índice de vazios e demais índices físicos do solo.

3.2.1.2 Análise Granulométrica Conjunta

De acordo com as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2016), o ensaio de granulometria é utilizado para determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada.

O ensaio de granulometria é dividido em duas partes distintas, o peneiramento, para a parte grosseira da amostra (areia e pedregulhos se houver) e a sedimentação,

utilizada para determinar os diâmetros equivalentes e a porcentagem de ocorrência da fração fina da amostra (silte e argila). O ensaio de granulometria por meio do peneiramento e sedimentação tem a finalidade de obter a curva de distribuição granulométrica de um solo. Através desta curva granulométrica pode-se estimar as porcentagens, em relação ao peso seco total, correspondentes a cada fração granulométrica do solo.

3.2.2 Caracterização Tecnológica dos Solos

Sabendo-se da necessidade da avaliação dos solos para o estudo de dosagem e adequação ao seu uso como matéria-prima do tijolo solo-cimento, os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no solo natural e nas misturas solo-rejeito de quartzito adotas. A Tabela 11 apresenta a nomenclatura dos solos que serão descritos e estudados na presente pesquisa.

Tabela 11- Nomenclatura dos solos.

Solos	Nomenclatura
Solo Puro	S
Solo + Quartzito 01	SQ ₁
Solo + Quartzito 02	SQ ₂
Solo + Quartzito 03	SQ ₃

Fonte: O Autor, 2019.

As amostras utilizadas na realização dos ensaios de caracterização física do solo natural e do solo homogeneizado, descritos na Tabela 12 e 13 respectivamente, foram preparadas de acordo com os procedimentos descritos na norma brasileira NBR 6457 (ABNT, 2016), incluindo a secagem prévia, o destorroamento e o peneiramento na peneira de malha 4,8 mm.

Tabela 12 - Ensaio de caracterização física – Solo Natural.

Normas	Ensaio
NBR 6458 (ABNT, 2017)	Massa Específica
NBR 7181 (ABNT, 2016)	Análise Granulométrica Conjunta
NBR 6459 (ABNT, 2016)	Limites de Liquidez
NBR 7180 (ABNT, 2016)	Limite de Plasticidade

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 13 - Ensaios de caracterização física – Solo Homogeneizado.

Normas	Ensaios
NBR 7181 (ABNT, 2016)	Análise Granulométrica Conjunta
NBR 6459 (ABNT, 2016)	Limites de Liquidez
NBR 7180 (ABNT, 2016)	Limite de Plasticidade

Fonte: O Autor, 2019.

3.2.2.1 Massa específica

Os procedimentos realizados neste ensaio foram similares ao descrito no item

3.2.1.1.

3.2.2.2 Análise Granulométrica Conjunta

Os procedimentos realizados neste ensaio foram similares ao descrito no item

3.2.1.2.

3.2.2.3 Limites de Consistência

Os limites de consistência são usados para separar os estados de consistência de um solo fino ou da fração fina de um solo grosso. Assim, em função da quantidade de água presente no solo, podem-se ter vários estados de consistência, os quais, em ordem decrescente de teor de umidade, são:

- Estado líquido: o solo apresenta as propriedades e a aparência de uma suspensão e, portanto, não apresenta nenhuma resistência ao cisalhamento;
- Estado plástico: no qual o solo apresenta a propriedade de plasticidade;
- Estado semi-sólido: o solo tem a aparência de um sólido, entretanto, ainda passa por variações de volume ao ser secado;
- Estado sólido: não ocorrem mais variações de volume pela secagem do solo.

Os limites de consistência são teores de umidade que separam dois estados de consistência de um solo; tem-se o limite de liquidez (que separa o estado líquido do plástico), limite de plasticidade (separa o estado plástico do semi-sólido) e limite de contração (separa estado sólido do semi-sólido). Esses limites também são conhecidos

como Limites de Atteberg em homenagem ao engenheiro sueco criador (NOGUEIRA, 1995).

Desses três limites o de plasticidade e o de liquidez são os de uso mais comum na engenharia geotécnica, utilizados para a definição do intervalo de teor de umidade no qual o solo se encontra em seu estado plástico e nos métodos de classificação dos solos (NOGUEIRA, 1995).

A determinação de cada um desses limites de consistência e de seus teores de umidade é realizada por meio de ensaios de laboratório cujos procedimentos se encontram padronizados pelas seguintes normas técnicas: NBR 6459 – Solo: Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 2016); NBR 7180 – Solo: Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 2016) e NBR 7183 – Determinação do Limite e Relação de Contração dos Solos (ABNT, 2014).

Neste trabalho foram determinados apenas os ensaios de Limite de Liquidez e de Limite de Plasticidade para a caracterização dos solos estudados.

3.2.2.4 Classificação textural do solo

A classificação do solo serve para dar um nome ao solo mais específico que o recebido na identificação tátil e visual. Dessa forma, é preciso adotar um sistema de classificação e ter os resultados dos ensaios requeridos por cada sistema. O sistema de classificação utilizado foi a classificação granulométrica.

A classificação pelo sistema granulométrico dos sólidos é feita com base na distribuição granulométrica do material analisado a partir da curva granulométrica obtida pelos ensaios de peneiramento e/ou análise granulométrica conjunta. Diferentes escalas podem ser utilizadas, contudo, vale ressaltar que as diferenças entre elas não alteram drasticamente o nome final do solo na classificação. Na Tabela 14 pode ser visto o intervalo do tamanho dos grãos utilizados para a classificação granulométrica no presente relatório conforma a escala de granulometria da norma NBR 7181 (ABNT, 2016) e D 653 (ASTM, 2011).

Tabela 14 - Intervalo de diâmetro e fração dos grãos conforme ABNT e ASTM.

Norma	Grupo	Diâmetro		Norma	Grupo	Diâmetro	
		Fração	mm			Fração	mm
ABNT	Pedregulho		2 a 60	ASTM	Pedregulho		4,8 a 75,0
		Grosso	20 a 60			Grosso	19,0 a 75,0
		Médio	6 a 20			Fino	4,8 a 19,0
		Fino	2 a 6				
	Areia		0,06 a 2		Areia		0,075 a 4,8
		Grossa	0,6 a 2			Grossa	2,0 a 4,8
		Média	0,2 a 0,6			Média	0,42 a 2,0
		Fina	0,06 a 0,2			Fina	0,075 a 0,42
	Silte		0,002 a 0,06		Silte		0,002 a 0,075
	Argila		< 0,002		Argila		< 0,002

Fonte: NBR 7181 (ABNT, 2016) e D 653 (ASTM, 2011).

A partir da curva granulométrica são obtidas as porcentagens de ocorrência de cada um dos grupos, onde aquele com a maior porcentagem nomeia o solo, enquanto o grupo com segundo maior valor percentual complementa o nome do solo. Se o grupo predominante for pedregulho ou areia, as porcentagens de cada fração devem ser obtidas e a maior ou as duas maiores são incluídas no nome do solo. Se o segundo e o terceiro grupos se equivalem percentualmente, ambos devem estar inclusos no nome do solo, onde o com maior valor percentual é citado primeiro. Destaca-se ainda que a informação da existência de pedregulho, mesmo em porcentagem pequena, é sempre conveniente.

3.3 ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS

Para o estudo de dosagem das misturas foram realizados ensaios preliminares de resistência à compressão em corpos de prova de solo natural e solos com diferentes teores de rejeito de quartzito para a definição do melhor traço a ser utilizado para cada tipo de quartzito.

Para a definição do melhor traço para cada mistura de solo-cimento- rejeito de quartzito foi empregada uma técnica de planejamento fatorial 3², com duas variáveis independentes (ou de entrada): rejeito de quartzito e traço solo-cimento e uma variável dependente (ou de saída): resistência à compressão.

O planejamento fatorial é uma ferramenta útil quando se tem como objetivo o estudo dos efeitos de dois ou mais fatores de influência. Para obter tal informação todas as combinações dos diferentes níveis das variáveis são investigadas. Deste modo é possível estimar os efeitos de cada fator e das possíveis interações entre eles (HINKELMANN e KEMPTHORNE, 2008).

Foram adotados três níveis para cada mistura, de modo que se tenha um intervalo de estudo capaz de mostrar a variação e influência da resistência à compressão. As porcentagens de rejeito de quartzito determinadas foram de 0%, 15% e 30% e os traços de solo-cimento 1:10, 1:8 e 1:6. O estudo dos traços solo-cimento partiu do boletim técnico BT-111 (ABCP, 2002), que estabelece o traço volumétrico básico de 1:10, para a mistura de cimento e solo, os outros dois traços foram escolhidos em virtude de serem os mais difundidos e utilizados pelos fabricantes de tijolos solo-cimento da região.

Para melhor identificação das misturas, foram adotadas as seguintes nomenclaturas: “SCQ₁” para identificar as misturas solo-cimento + Q₁, “SCQ₂” para identificar as misturas solo-cimento + Q₂ e “SCQ₃” para identificar as misturas solo-cimento + Q₃; seguidas do número identificador das misturas (Tabela 15).

Com esses dados definidos, fez-se uma análise estatística buscando determinar as variáveis que influenciaram nas propriedades do solo-cimento-rejeito de quartzito. A ferramenta estatística mais apropriada para análise e comparação entre diferentes grupos é a Análise de Variância (ANOVA), a qual permite uma avaliação completa dos dados. Utiliza-se esse método para avaliar numericamente a qualidade do ajuste do modelo (BARBETTA et al., 2004).

Tabela 15- Misturas do planejamento fatorial.

Mistura	SCQ ₁		SCQ ₂		SCQ ₃	
	SC	Q ₁ (%)	SC	Q ₂ (%)	SC	Q ₃ (%)
01	1:6	0	1:6	0	1:6	0
02	1:6	15	1:6	15	1:6	15
03	1:6	30	1:6	30	1:6	30
04	1:8	0	1:8	0	1:8	0
05	1:8	15	1:8	15	1:8	15
06	1:8	30	1:8	30	1:8	30
07	1:10	0	1:10	0	1:10	0
08	1:10	15	1:10	15	1:10	15
09	1:10	30	1:10	30	1:10	30

Fonte: O Autor, 2019.

Com o objetivo de definir se as curvas de resposta poderiam ser ajustadas matematicamente em função dos dados obtidos, foram determinadas as equações de regressão para cada caso, procurando-se estabelecer as possíveis correlações existentes entre as variáveis estudadas.

Através da análise de regressão pode-se determinar qual a relação entre as variáveis de entrada (ou variáveis independentes) e a variável de saída (ou variável dependente), descrevendo-a em uma equação matemática. Assim é possível encontrar o valor para a variável de saída gerada com todas as combinações possíveis, dentro dos intervalos considerados para as variáveis independentes. O modelo de regressão pode, ainda, quantificar os valores das variáveis de entrada necessários para a obtenção da solução ótima (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Segundo Mattos (2004), quando se aplica a técnica de regressão às observações obtidas por meio de um experimento pode haver fatores não significativos para projeto. Esses fatores devem ser descartados na elaboração da equação de regressão, considerando apenas os fatores significativos.

Para tal, utilizou-se como ferramenta de análise o software Statistica 7.0.

3.3.1 Fabricação dos Tijolos de Solo-Cimento

Após a caracterização do solo, do resíduo de quartzito, das misturas de solo-cimento-rejeito de quartzito e o estudo preliminar nos corpos de provas foram preparadas as misturas para a confecção dos tijolos solo-cimento.

A máquina utilizada para a fabricação dos tijolos de solo-cimento foi uma prensa hidráulica disponibilizada pela empresa Tijolos São Carlos, da marca Alroma – Máquinas para Tijolos Ecológicos (Figura 18), sediada na cidade de São Carlos - SP, com de dimensões 12,5 cm x 25 cm x 7,5 cm (largura x comprimento x espessura).

Figura 18 - Prensa Hidráulica de tijolos - Alroma.



Fonte: O Autor, 2019.

Os tijolos solo-cimento referentes a cada mistura foram moldados de acordo com a norma NBR 10833 (ABNT, 2012) que fixa as condições exigíveis para a produção de tijolos maciços e blocos vazados de solo-cimento em prensas hidráulicas.

Antes de serem misturados ao cimento, o solo e os quartzitos foram secos, destorroados e passados na peneira nº4 (Figura 19). Em seguida esses materiais foram misturados. Primeiramente foi colocado o solo e iniciada a rotação no misturador, seguido do rejeito de quartzito e depois do cimento. Esta mistura dos materiais secos é realizada para que se obtenha uma completa homogeneização da massa. Após a mistura, a água é adicionada aos poucos até atingir o ponto ótimo de umidade. Depois da completa adição de água e da uniformidade da massa o misturador foi desligado e o material levado até a prensa para a compactação e moldagem do tijolo (Figura 20).

Figura 19- Preparação dos materiais.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 20 - Moldagem dos tijolos solo-cimento.



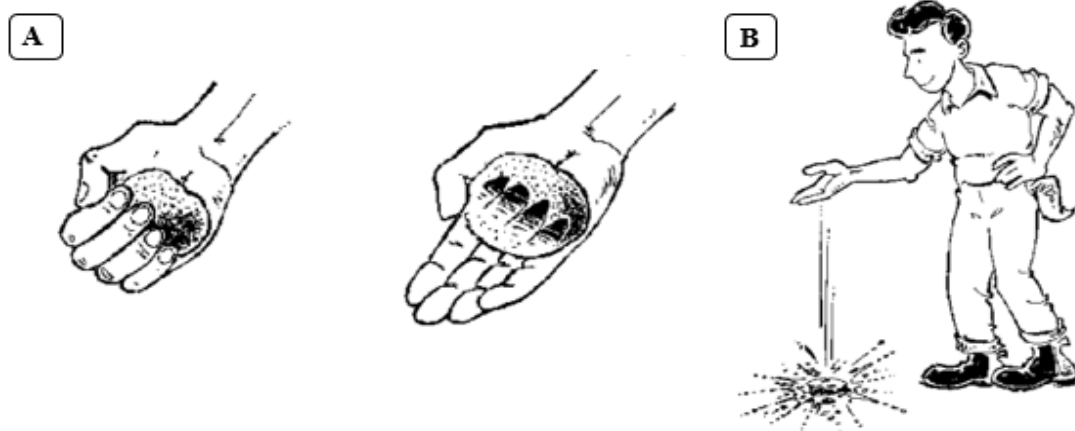
Fonte: O Autor, 2019.

Com o intuito de evitar a quebra dos tijolos, durante a retirada do compartimento de moldagem, a quantidade de água adicionada à mistura seguiu o procedimento recomendado pela ABCP em seu Boletim Técnico (2002). A verificação da umidade da mistura é feita, com razoável precisão, da seguinte maneira:

- toma-se uma porção da mistura e aperta-se ela entre os dedos e a palma da mão; ao se abrir a mão, o bolo deverá ter a marca deixada pelos dedos (Figura 21A).

- deixando-se o bolo cair de uma altura aproximada de 1 m, sobre uma superfície dura; ele deverá esfarelar-se ao chocar-se com a superfície (Figura 21B); se isto não ocorrer, significa que a mistura está muito úmida.

Figura 21 - Ponto do teor de umidade ótimo utilizado.



Fonte: BT – 111 (ABCP, 2002).

Logo após a prensagem, os blocos produzidos foram transportados e colocados na área de cura. Durante os 7 primeiros dias de idade os tijolos foram mantidos em cura úmida de acordo com a NBR 10833 (ABNT, 2012), permaneceram protegidos do vento e da insolação direta, nas condições normais de armazenamento do local, estando prontos para utilização 14 dias após sua fabricação. A Figura 22 apresenta os blocos após a moldagem.

Figura 22 - Tijolos confeccionados.



Fonte: O Autor, 2019.

3.4 ENSAIOS NOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Os ensaios realizados para análise de desempenho dos tijolos de solo-cimento foram os ensaios de absorção e de resistência à compressão simples. A Tabela 16 apresenta o quantitativo de tijolos moldados e ensaiados.

Tabela 16 - Quantitativo de tijolos por ensaio.

	Resistência à Compressão		Absorção de água		Total
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	
Q1	7	7	3	3	20
Q2	7	7	3	3	20
Q3	7	7	3	3	20
Total	21	21	9	9	60

Fonte: O Autor, 2019.

3.4.1 Absorção de água

Os tijolos de solo-cimento foram submetidos ao ensaio de absorção de água, segundo os métodos da NBR 8492 (ABNT, 2012). Os procedimentos deste ensaio consistem na secagem dos tijolos em estufa, a uma temperatura entre 100 °C e 110 °C até a constância de massa, obtendo-se a massa seca M_1 , em gramas. Ao atingir temperatura ambiente, os tijolos são imersos em um tanque com água durante um período de 24h. Após as 24h, os tijolos são retirados da imersão e enxugados com um pano úmido, obtendo-se assim a massa saturada M_2 , em gramas, antes de decorridos 3 min (Figura 23).

Figura 23 - Ensaio de absorção de água.



Fonte: O Autor, 2019.

Os valores de absorção (A), expressos em porcentagem, de cada tijolo solo-cimento são obtidos pela Equação 1, e a absorção média é obtida pela média dos valores individuais:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

3.4.2 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão dos tijolos solo-cimento (ft), aos 7 e 28 dias, foi determinada de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012).

Nesse ensaio foram preparados sete corpos de prova (CPs) para cada traço e tipo de quartzito. Utilizando-se a estrutura e equipamentos disponíveis nos Laboratórios de Geologia de Engenharia e de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, os tijolos são cortados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão. Após o corte, as duas metades obtidas são superpostas, por suas faces maiores e ligadas com uma camada fina de pasta de cimento Portland pré-contraída, com 2 mm a 3 mm de espessura e as reentrâncias preenchidas. Os CPs ficam aproximadamente 12h em repouso antes da próxima etapa. Antes de serem submetidos ao ensaio, os tijolos são retificados, para que suas faces fiquem planas e paralelas, para que o perfeito contato entre as superfícies. Os tijolos de solo-cimento então são imersos em água por 6h e retirados logo antes da execução do ensaio. As dimensões das faces de trabalho são medidas e em seguida os tijolos são colocados na máquina de ensaio. A aplicação da carga deve ocorrer de maneira uniforme e os resultados são obtidos em kN. As cargas são gradativamente elevadas até ocorrer à ruptura do tijolo (Figura 24).

Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão: (A, B e C) Corte, retifica e análise dimensional dos tijolos, (D) Imersão; (E) Corpo de prova sendo posicionado na prensa servo-controlada e (F) Aspecto de tijolo rompido após ensaiado.



Fonte: O Autor, 2019.

Os valores individuais de resistência à compressão, expressos em MPa, são obtidos dividindo-se a carga máxima de ruptura aplicada (F), em N, pela área da seção da amostra (S), em mm², conforme a Equação 2. A resistência média é obtida a partir da média aritmética dos sete ensaios.

$$f_t = \frac{F}{S} \quad (2)$$

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados de caracterização geotécnica das amostras de quartzito, do solo e das misturas solo-rejeito de quartzito estudados nesta pesquisa. Assim como os resultados com relação ao estudo de dosagem e dos ensaios de absorção de água e resistência à compressão realizados com as amostras de quartzitos nos tijolos de solo-cimento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO REJEITO DE QUARTZITO

4.1.1 Massa Específica dos sólidos

Seguindo os procedimentos da NBR 6458 (ABNT, 2016) foram determinadas a massa específica dos sólidos dos três agregados miúdos de quartzito. Os resultados das determinações das massas específicas encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Massa específica dos sólidos - Quartzitos.

Amostra	Massa Específica (g/cm ³)		
		Intervalo de aceitação	
		$\rho_s - 0,020$	$\rho_s + 0,020$
Q1	2,675	2,655	2,695
Q2	2,674	2,654	2,694
Q3	2,668	2,648	2,688

Fonte: O Autor, 2019.

Os valores de massa específica obtidos foram satisfatórios, não havendo grandes variações entre as amostras. Apresentando resultados similares quando comparados com ensaios realizados por outros autores em amostras de quartzitos semelhantes (Tabela 18).

Tabela 18- Massa específica dos sólidos em agregados de quartzito.

Autor	Procedência	ρ_s (g/cm³)
Andrade et al. (1997)	Estreito	2,65
	Serra da Mesa	2,80
	Corumbá I	2,64
	Foz da Bezerra	2,64
	Paulista	2,49
Francklin Jr. (2009)	São João Batista do Glória	2,63
	Capitólio	2,64
	São João da Boa Vista	2,59
Reis (2016)	Alpinópolis	2,62

Fonte: O Autor, 2019.

4.1.2 Análise Granulométrica Conjunta

As distribuições granulométricas das amostras de quartzito, descritas nas Tabelas 19 e 20, podem ser visualizadas nas Figuras 25 e 26. As amostras Q₁ e Q₂ apresentaram uma melhor distribuição granulométrica enquanto a amostra Q₃ mostrou-se um pouco menos bem graduada, com uma maior porcentagem de areia fina. Todas as amostras foram classificadas, segundo a ABNT e ASTM, como areia.

Tabela 19 - Distribuição Granulométrica – Quartzito, NBR 7181 (ABNT, 2016).

Grupo	Diâmetro		Porcentagem (%)		
	Fração	Mm	Q₁	Q₂	Q₃
Pedregulho		2 a 60	4,8	5,7	2,5
	Grosso	20 a 60	0,0	0,0	0,0
	Médio	6 a 20	0,0	0,0	0,0
	Fino	2 a 6	4,8	5,7	2,5
Areia		0,06 a 2	66,0	70,6	74,5
	Grossa	0,6 a 2	16,2	17,3	3,0
	Média	0,2 a 0,6	16,3	15,0	18,5
	Fina	0,06 a 0,2	33,5	38,3	53,0
Silte		0,002 a 0,06	25,3	21,3	20,0
Argila		< 0,002	3,9	2,4	3,0

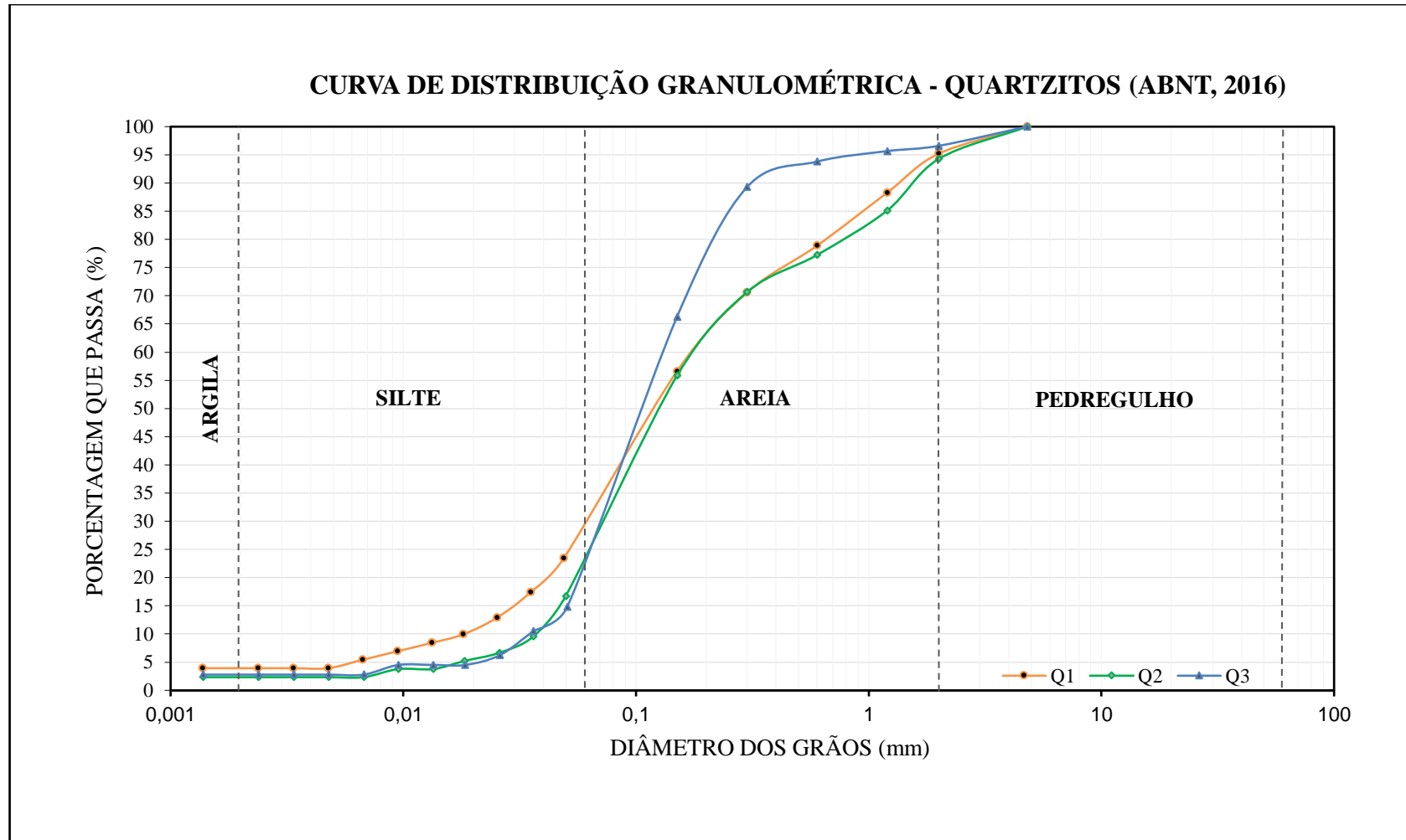
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 20 - Distribuição Granulométrica – Quartzito, D653-11 (ASTM, 2011).

Grupo	Diâmetro		Porcentagem (%)		
	Fração	mm	Q ₁	Q ₂	Q ₃
Pedregulho		4,8 a 75,0	0,0	0,0	0,0
	Grosso	19,0 a 75,0	0,0	0,0	0,0
	Fino	4,8 a 19,0	0,0	0,0	0,0
Areia		0,075 a 4,8	62,0	69,0	68,0
	Grossa	2,0 a 4,8	5,0	5,7	3,5
	Média	0,42 a 2,0	19,5	20,3	4,7
	Fina	0,075 a 0,42	37,5	43,0	59,8
Silte		0,002 a 0,075	34,1	28,6	29,0
Argila		< 0,002	3,9	2,4	3,0

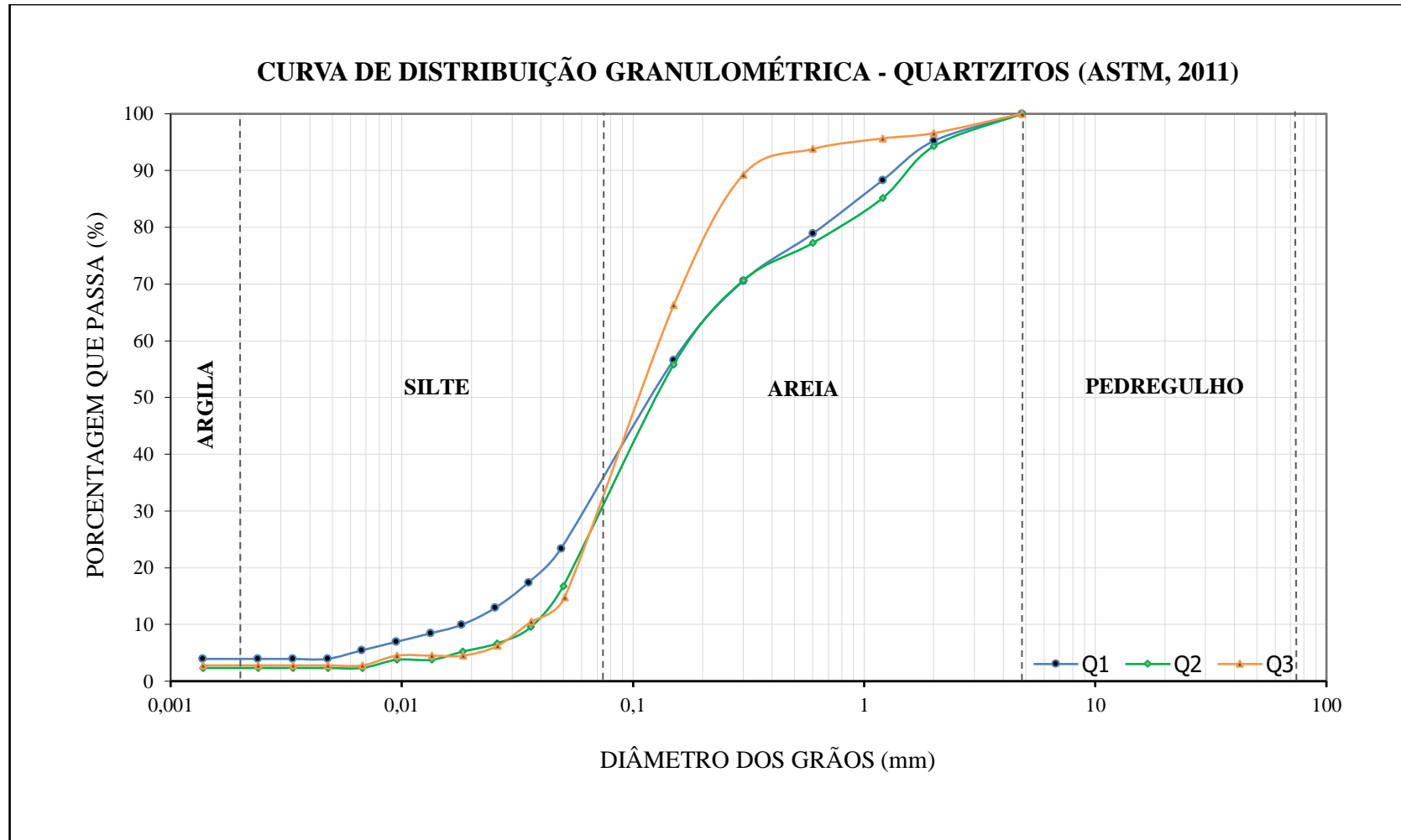
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 25 - Curvas Granulométricas – Quartzitos NBR 7181 (ABNT, 2016).



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 23 - Curvas Granulométricas – Quartzito D653-11 (ASTM, 2011).



Fonte: O Autor, 2019.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO SOLO

4.2.1 Massa específica dos sólidos

A determinação da massa específica dos sólidos do solo utilizado nesta pesquisa seguiu os procedimentos da NBR 6458 (ABNT, 2016). O resultado encontra-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Massa específica dos sólidos - Solo.

Amostra	Massa Específica (g/cm ³)		
	Intervalo de aceitação		
		$\rho_s - 0,020$	$\rho_s + 0,020$
Solo	2,711	2,691	2,731

Fonte: O Autor, 2019.

4.2.2 Análise Granulométrica Conjunta

A distribuição granulométrica do solo, classificado como areia fina, média e grossa argilosa marrom avermelhado, é descrita nas Tabelas 22 e 23 e pode ser visualizada nos gráficos das Figuras 26 e 27.

Tabela 22 - Distribuição Granulométrica – Solo, NBR 7181 (ABNT, 2016).

Grupo	Diâmetro		Porcentagem (%)
	Fração	Mm	Solo
Pedregulho		2 a 60	0,0
	Grosso	20 a 60	0,0
	Médio	6 a 20	0,0
	Fino	2 a 6	1,0
Areia		0,06 a 2	45,0
	Grossa	0,6 a 2	4,5
	Média	0,2 a 0,6	12,5
	Fina	0,06 a 0,2	28,0
Silte		0,002 a 0,06	16,0
Argila		< 0,002	38,0

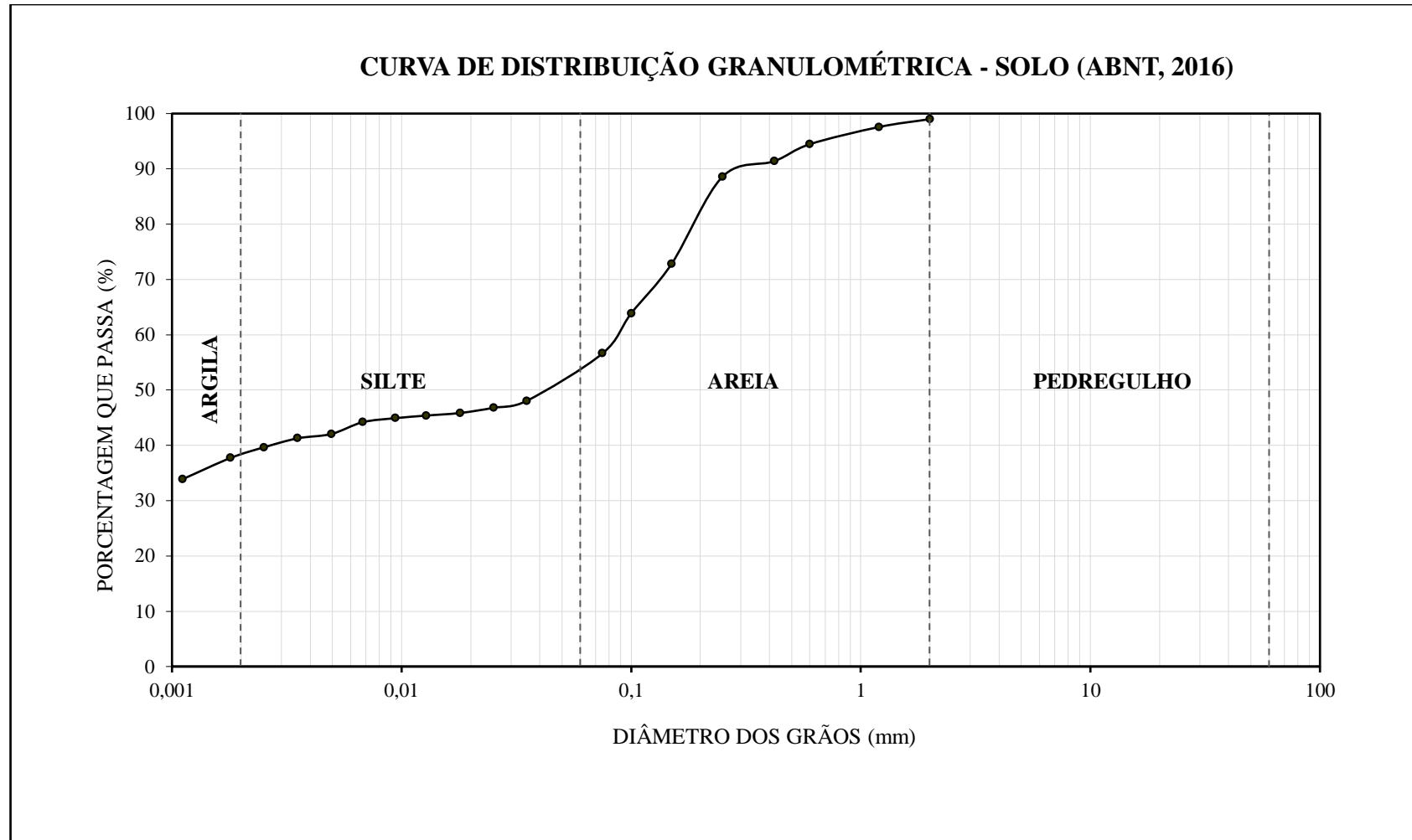
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 23 - Distribuição Granulométrica – Solo, D653-11 (ASTM, 2011).

Grupo	Diâmetro		Porcentagem (%)
	Fração	Mm	Solo
Pedregulho		4,8 a 75,0	0,0
	Grosso	19,0 a 75,0	0,0
	Fino	4,8 a 19,0	0,0
Areia		0,075 a 4,8	43,5
	Grossa	2,0 a 4,8	1,0
	Média	0,42 a 2,0	7,3
	Fina	0,075 a 0,42	35,2
Silte		0,002 a 0,075	18,5
Argila		< 0,002	38,0

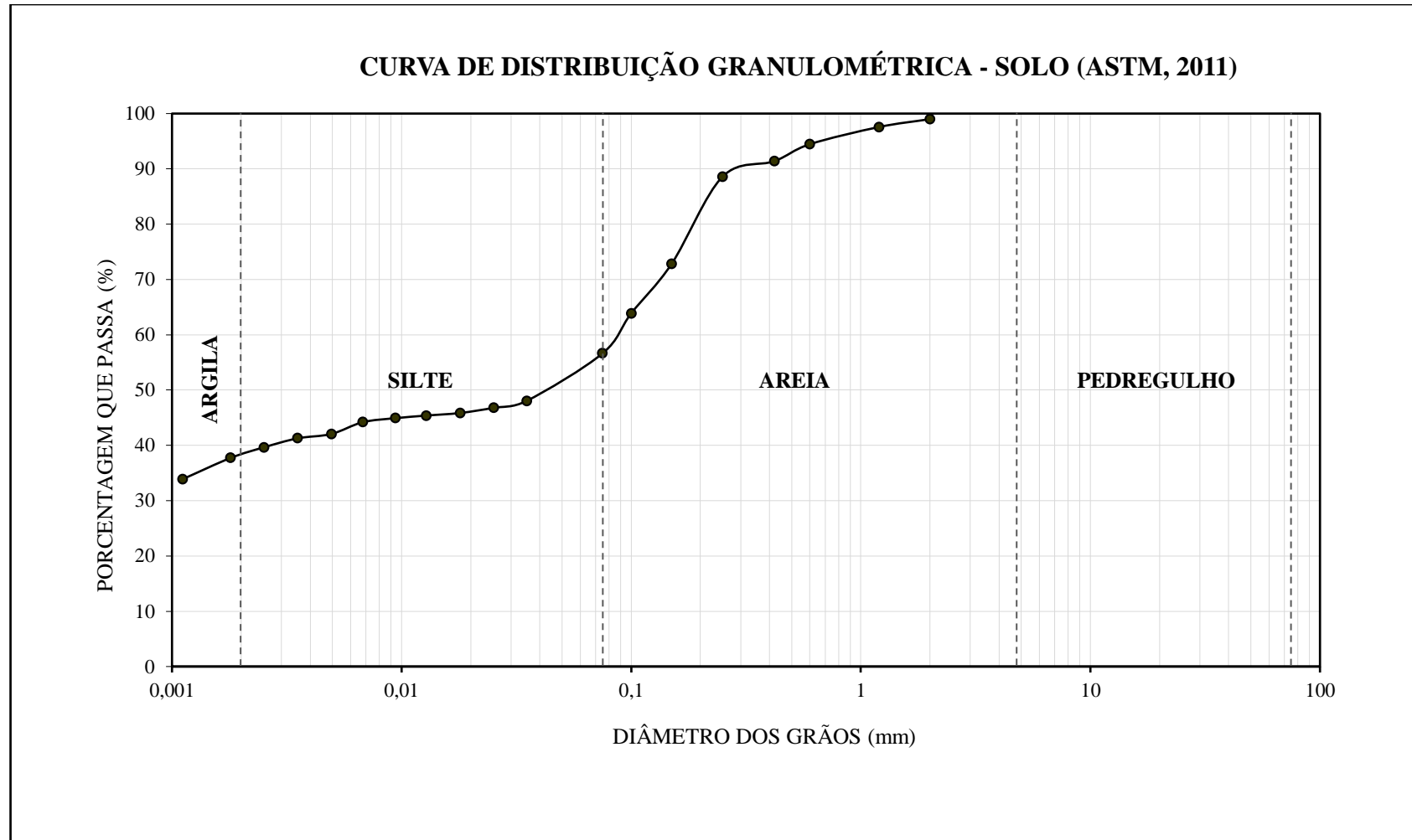
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 26 - Curva Granulométrica – Solo NBR 7181 (ABNT, 2016).



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 27 - Curva Granulométrica – Solo D653-11 (ASTM, 2011).



Fonte: O Autor, 2019.

4.2.3 Limites de Consistência

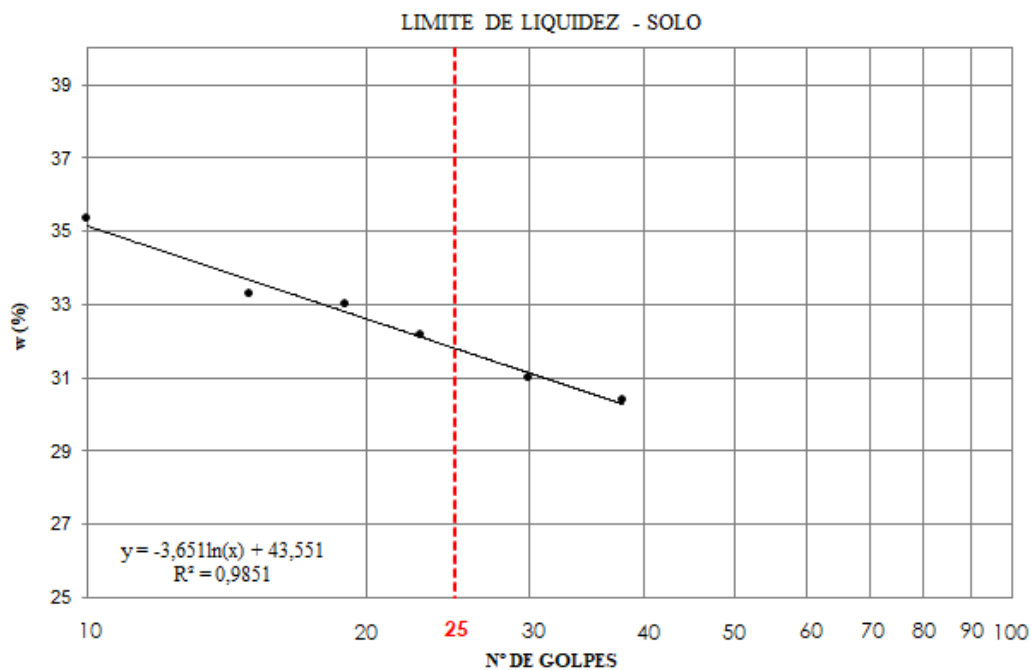
Os resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LL) e o índice de plasticidade (IP) para o solo podem ser observados na Tabela 24 e Figura 28.

Tabela 24 – Limites de Consistência - Solo.

Amostra	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
Solo Puro	31,80	23,91	7,89

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 28- Limite de Liquidez - Solo.



Fonte: O Autor, 2019.

De acordo com os requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2012), considera-se adequado para produzir blocos de solo-cimento, solos que possuam limite de liquidez (LL) $\leq 45\%$ e índice de plasticidade (IP) $\leq 18\%$. Sendo assim, os valores obtidos foram inferiores aos limites máximos estabelecidos pela norma.

4.3 DOSAGEM DAS MISTURAS

Para análise da propriedade mecânica dos tijolos de solo-cimento das misturas estudadas foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 7 dias. Nas Tabelas 25, 26 e 27 estão apresentados os tratamentos e os valores de resistência à compressão.

Tabela 25- Valores de resistência à compressão das misturas SCQ₁.

Tratamentos	Resistência à Compressão - f_t (MPa)			
	1	2	Média	Desvio Padrão
SCQ ₁ 01	5,58	5,29	5,44	0,14905
SCQ ₁ 02	4,91	4,47	4,69	0,21772
SCQ ₁ 03	4,10	4,44	4,27	0,16744
SCQ ₁ 04	4,71	4,72	4,71	0,00871
SCQ ₁ 05	4,40	4,47	4,44	0,03435
SCQ ₁ 06	3,84	4,08	3,96	0,12029
SCQ ₁ 07	3,81	3,84	3,82	0,01195
SCQ ₁ 08	3,50	3,57	3,54	0,0387
SCQ ₁ 09	2,81	2,78	2,79	0,0171

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 26- Valores de resistência à compressão das misturas SCQ₂.

Tratamentos	Resistência à Compressão - f_t (MPa)			
	1	2	Média	Desvio Padrão
SCQ ₂ 01	5,59	5,29	5,44	0,15405
SCQ ₂ 02	5,15	5,09	5,12	0,02905
SCQ ₂ 03	4,78	4,62	4,70	0,08033
SCQ ₂ 04	4,75	4,72	4,74	0,01387
SCQ ₂ 05	3,95	4,11	4,03	0,08166
SCQ ₂ 06	3,60	3,50	3,55	0,05521
SCQ ₂ 07	3,81	3,83	3,82	0,01195
SCQ ₂ 08	3,34	3,4	3,38	0,03101
SCQ ₂ 09	3,06	2,88	2,97	0,09017

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 27- Valores de resistência à compressão das misturas SCQ₃.

Tratamentos	Resistência à Compressão - f_t (MPa)			
	1	2	Média	Desvio Padrão
SCQ ₃ 01	5,48	5,16	5,32	0,1616
SCQ ₃ 02	4,63	4,43	4,53	0,09615
SCQ ₃ 03	3,88	4,21	4,04	0,16905
SCQ ₃ 04	4,61	4,42	4,51	0,09129
SCQ ₃ 05	4,07	3,91	3,99	0,07941
SCQ ₃ 06	3,05	3,18	3,11	0,06517
SCQ ₃ 07	3,61	3,67	3,64	0,02695
SCQ ₃ 08	2,89	2,96	2,93	0,03484
SCQ ₃ 09	2,51	2,70	2,61	0,09097

Fonte: O Autor, 2019.

4.3.1 Análise de Variância Q₁

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da mistura SCQ₁, são apresentadas nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28- Análise de variância da f_t para SCQ₁.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Estatística F	Valor P	Variável Significativa
x_1	5,995886	1	5,995886	233,9821	0,000000	sim
x_1^2	0,312485	1	0,312485	12,1943	0,006808	sim
x_2	2,892325	1	2,892325	112,8694	0,000002	sim
x_2^2	0,011848	1	0,011848	0,4624	0,513635	não
$x_1.x_2$	0,009416	1	0,009416	0,3675	0,559373	não
$x_1.x_2^2$	0,100265	1	0,100265	3,9127	0,079307	não
$x_1^2.x_2$	0,080422	1	0,080422	3,1384	0,110238	não
$x_1^2.x_2^2$	0,003560	1	0,003560	0,1389	0,717990	não
Erro	0,230629	9	0,025625	-	-	-
Total	9,636835	17	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Empregando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores SC linear (x_1), SC quadrático (x_1^2) e Q_1 linear (x_2) mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 29- Modelo ajustado: Análise de variância da f_t para SCQ_1 .

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Estatística F	Valor P
x_1	5,995886	1	5,995886	233,9821	0,000000
x_1^2	0,312485	1	0,312485	12,1943	0,006808
x_2	2,892325	1	2,892325	112,8694	0,000002
Falta de Ajuste	0,205511	5	0,041102	1,6040	0,253259
Erro	0,230629	9	0,025625	-	-
Total	9,636835	17	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

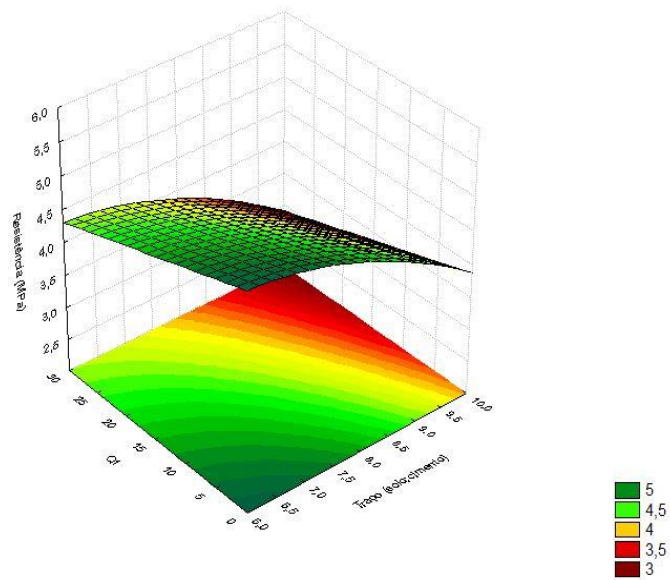
O coeficiente de determinação (R^2) de SCQ_1 , obtida na análise de variância foi $R^2= 0,95474$. A equação de regressão final ajustada do modelo é representada pela Equação 3, onde x_1 representa os valores do fator SC e x_2 representa os valores do fator Q_1 . As Figuras 29 e 30 representam graficamente o efeito dos fatores SC e Q_1 sobre f_t .

$$f_t = 3,21755 + 0,76457 \cdot x_1 - 0,06987 \cdot x_1^2 - 0,03273 \cdot x_2$$

(Equação 3)

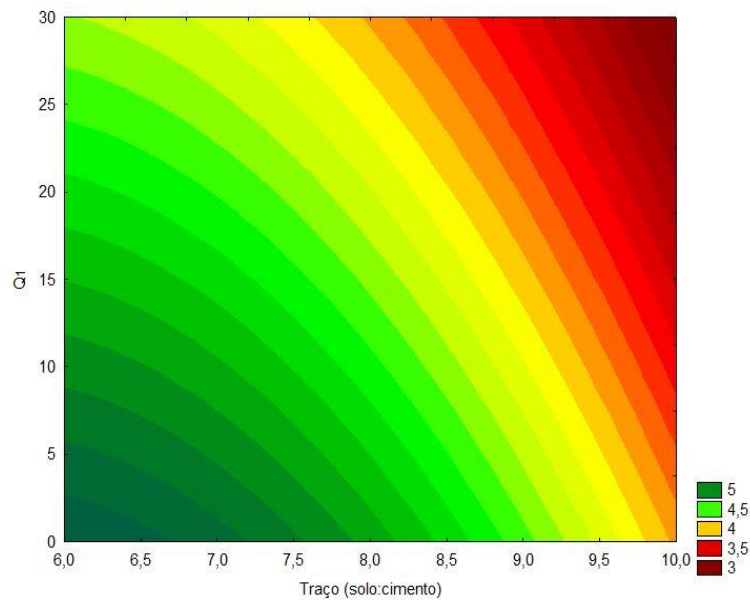
As curvas de projeção da superfície de resposta da SCQ_1 (Figura 30) mostraram que a variável de resposta, resistência à compressão (f_t), torna-se maior com o aumento da variável solo-cimento (SC) e se reduz com a adição da variável quartzito (Q_1).

Figura 29- Superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ₁.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 30- Projeção da superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ₁.



Fonte: O Autor, 2019.

4.3.2 Análise de Variância Q₂

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da mistura SCQ₂, são apresentadas nas Tabelas 30 e 31.

Tabela 30- Análise de variância da f_t para SCQ₂.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Estatística F	Valor P	Variável Significativa
x_1	8,64192	1	8,641915	775,0998	0,000000	Sim
x_1^2	0,06923	1	0,069231	6,2094	0,034317	Sim
x_2	2,56815	1	2,568148	230,3391	0,000000	Sim
x_2^2	0,00277	1	0,002768	0,2482	0,630263	Não
$x_1.x_2$	0,00683	1	0,006833	0,6128	0,453827	Não
$x_1.x_2^2$	0,00295	1	0,002952	0,2647	0,619275	Não
$x_1^2.x_2$	0,10001	1	0,100008	8,9697	0,015079	Sim
$x_1^2.x_2^2$	0,01461	1	0,014605	1,3100	0,281928	Não
Erro	0,10034	9	0,011149	-	-	-
Total	11,50680	17	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Empregando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores SC linear (x_1), SC quadrático (x_1^2), Q₂ linear (x_2) e a interação $x_1^2.x_2$ mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 31- Modelo ajustado: Análise de variância da f_t para SCQ₂.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Estatística F	Valor P
x_1	8,64192	1	8,641915	775,0998	0,000000
x_1^2	0,06923	1	0,069231	6,2094	0,034317
x_2	2,56815	1	2,568148	230,3391	0,000000
$x_1^2.x_2$	0,10001	1	0,100008	8,9697	0,015079
Falta de Ajuste	0,02716	9	0,006789	0,6089	0,666523
Erro	0,10034	4	0,011149	-	-
Total	11,50680	17	-	-	-

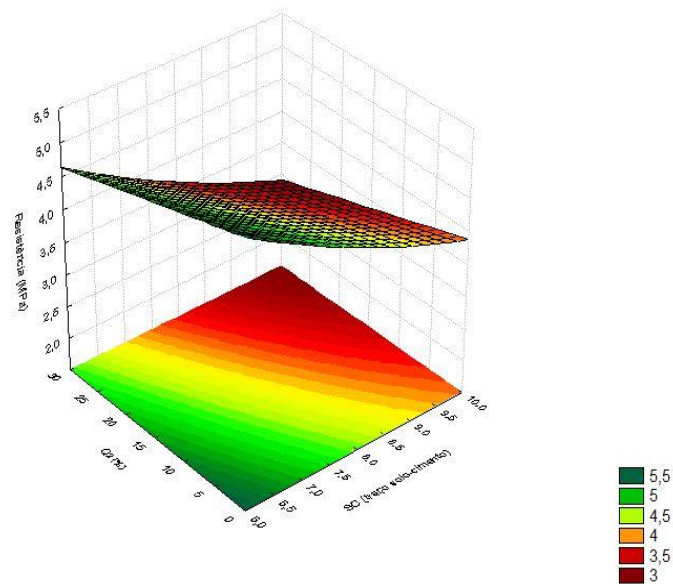
Fonte: O Autor, 2019.

A proporção de variabilidade na medida de SCQ₂, obtida na análise de variância foi $R^2 = 0,98892$. A equação final ajustada do modelo é representada pela Equação 4, onde x_1 representa os valores da variável SC e x_2 representa os valores da variável Q₂. As Figuras 31 e 32 representam graficamente o efeito dos fatores SC e Q₂ sobre f_t .

$$f_t = 10,02590 - 0,95055.x_1 + 0,03355.x_1^2 - 0,02792.x_2 - 0,000043846.x_1^2.x_2$$

(Equação 4)

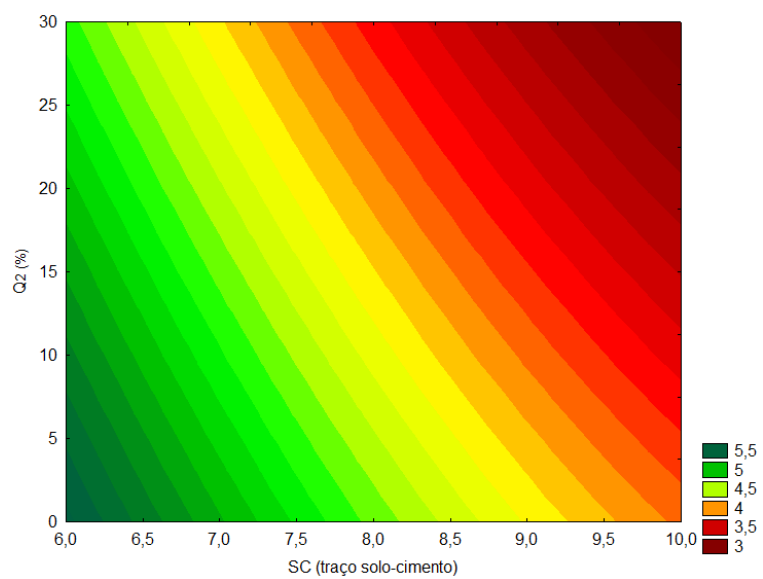
Figura 31- Superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ₂.



Fonte: O Autor, 2019.

O comportamento das misturas de solo-cimento, conforme as curvas Figura 31, mostrou que a variável de resposta, resistência à compressão (f_t), também torna-se maior com o aumento da variável solo-cimento (SC) e se reduz com a adição da variável quartzito (Q_2).

Figura 32- Projeção da superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ₂.



Fonte: O Autor, 2019.

4.3.3 Análise de Variância Q₃

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da mistura SCQ₃, são apresentadas nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32- Análise de variância da f_t para SCQ₃.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Estatística F	Valor P	Variável Significativa
x ₁	7,44203	1	7,442034	359,9486	0,000000	Sim
x ₁ ²	0,00334	1	0,003342	0,1616	0,697050	Não
x ₂	4,58824	1	4,588239	221,9192	0,000000	Sim
x ₂ ²	0,01258	1	0,012577	0,6083	0,455454	Não
x ₁ .x ₂	0,03006	1	0,030062	1,4540	0,258630	Não
x ₁ .x ₂ ²	0,00110	1	0,001101	0,0533	0,822654	Não
x ₁ ² .x ₂	0,03969	1	0,039694	1,9199	0,199241	Não
x ₁ ² .x ₂ ²	0,11024	1	0,110243	5,3321	0,046302	Sim
Erro	0,18608	9	0,020675	-	-	-
Total	12,41337	17	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Empregando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores SC linear (x₁), Q₃ linear (x₂) e a interação x₁². x₂² mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 33- Modelo ajustado: Análise de variância da f_t para SCQ₃.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Estatística F	Valor P
x ₁	7,44203	1	7,442034	359,9486	0,000000
x ₂	4,58824	1	4,588239	221,9192	0,000000
x ₁ ² . x ₂ ²	0,11024	1	0,110243	5,3321	0,046302
Falta de Ajuste	0,08677	5	0,017355	0,8394	0,553925
Erro	0,18608	9	0,020675	-	-
Total	12,41337	17	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

A proporção de variabilidade na medida de SCQ₃, obtida na análise de variância foi R²= 0,97802. A equação final ajustada do modelo é representada pela Equação 5, onde

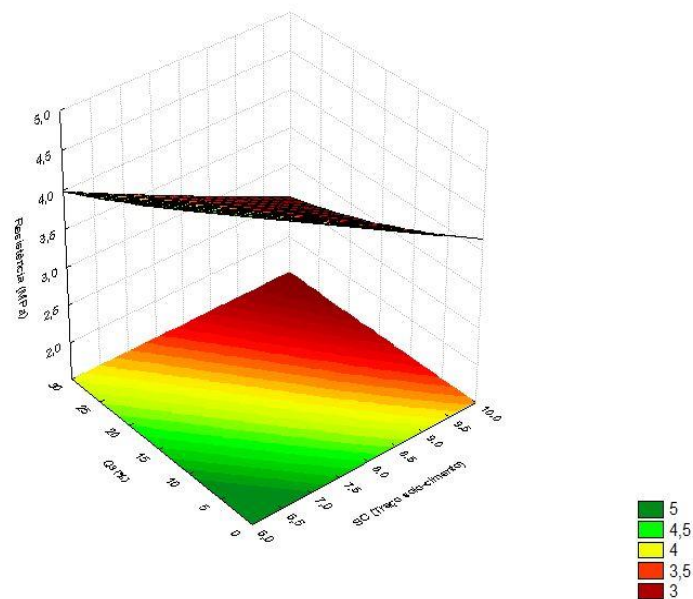
x_1 representa os valores da variável SC e x_2 representa os valores da variável Q_3 . As Figuras 32 e 33 representam graficamente o efeito dos fatores SC e Q_3 sobre f_t .

$$f_t = 7,84774 - 0,41919 \cdot x_1 - 0,04970 \cdot x_2 + 0,0000042387 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2$$

(Equação 5)

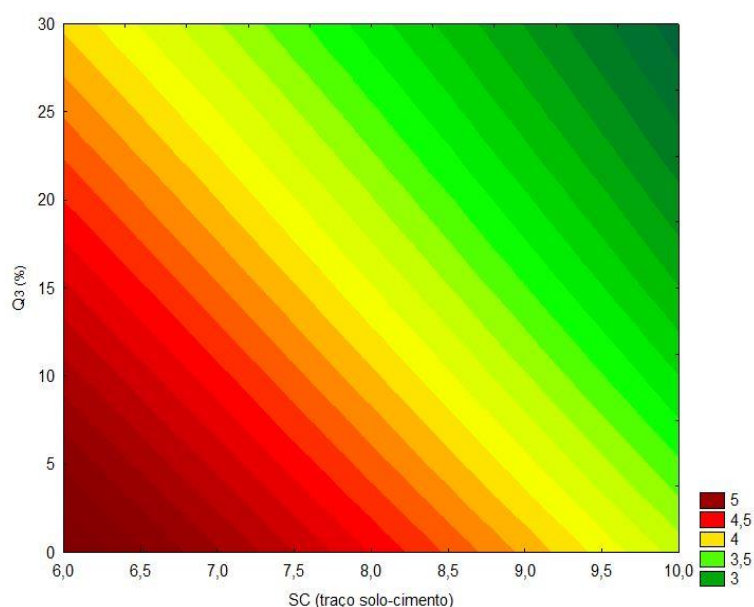
As curvas de projeção da superfície de resposta da SCQ_3 (Figura 34) mostraram que a variável de resposta, resistência à compressão (f_t), torna-se maior com o aumento da variável solo-cimento (SC) e reduz com a adição da variável quartzito (Q_3), assim como ocorrido em Q_1 e Q_2 .

Figura 33- Superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ_3 .



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 34- Projeção da superfície de resposta da f_t (MPa) das misturas SCQ₃.



Fonte: O Autor, 2019.

Por meio da análise de variância realizada nos três tipos de quartzito verificou-se que não houve diferença entre os tratamentos analisados, indicando assim a possibilidade de uso de qualquer um dos tipos de rejeito de quartzito para a produção de tijolos de solo-cimento.

4.3.4 Definição do traço

A escolha do traço adequado deve ser o que apresentar menor consumo de cimento e atender aos critérios definidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012).

Os traços foram determinados conforme as equações de regressões estabelecidas em 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3. Sendo possível assim encontrar o valor de cada fator, dentro do intervalo considerado para a variável resistência. As dosagens escolhidas para a confecção dos tijolos solo-cimento são apresentadas a Tabela 34.

Tabela 34- Definição dos traços.

Q	Traço (solo-cimento)	% de Quartzito
Q1	1:10	30%
Q2	1:10	30%
Q3	1:10	30%

Fonte: O Autor, 2019.

4.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS MISTURAS

4.4.1 Análise Granulométrica Conjunta

As análises granulométricas das misturas solo-quartzito são descritas nas Tabelas 35 e 36. Pode-se observar que as distribuições granulométricas atenderam os critérios da NBR 10833 (ABNT, 2012).

Tabela 35- Distribuição Granulométrica – Misturas, NBR 7181 (ABNT, 2016).

Grupo	Diâmetro		Porcentagem (%)		
	Fração	Mm	SQ ₁ +30%	SQ ₂ +30%	SQ ₃ +30%
Pedregulho		2 a 60	1,44	1,71	0,75
	Grosso	20 a 60	0,00	0,00	0,00
	Médio	6 a 20	0,00	0,00	0,00
	Fino	2 a 6	2,14	2,41	1,45
Areia		0,06 a 2	51,30	52,68	53,85
	Grossa	0,6 a 2	8,01	8,34	4,05
	Média	0,2 a 0,6	13,64	13,25	14,3
	Fina	0,06 a 0,2	29,65	31,09	35,5
Silte		0,002 a 0,06	18,79	17,59	17,2
Argila		< 0,002	27,77	27,32	27,5

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 36 - Distribuição Granulométrica – Misturas, D653-11 (ASTM, 2011).

Grupo	Diâmetro		Porcentagem (%)		
	Fração	Mm	SQ ₁ +30%	SQ ₂ +30%	SQ ₃ +30%
Pedregulho		4,8 a 75,0	0,00	0,00	0,00
	Grosso	19,0 a 75,0	0,00	0,00	0,00
	Fino	4,8 a 19,0	0,00	0,00	0,00
Areia		0,075 a 4,8	49,05	51,15	50,85
	Grossa	2,0 a 4,8	2,20	2,41	1,75
	Média	0,42 a 2,0	10,96	11,20	6,52
	Fina	0,075 a 0,42	35,89	37,54	42,58
Silte		0,002 a 0,075	23,18	21,53	21,65
Argila		< 0,002	27,77	27,32	27,50

Fonte: O Autor, 2019.

Com o intuito de verificar se haveria alguma diferença entre os tratamentos Q₁, Q₂ e Q₃ foi realizada a análise de variância do ensaio de análise granulométrica das amostras (Tabela 37).

Tabela 37- Análise de variância - Análise Granulométrica.

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,20754	2	0,10377	0,000339	0,999661	3,354131
Resíduo	8272,35	27	306,3833	-	-	-
Total	8272,557	29	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

A partir da análise de variância realizada na análise granulométrica das três misturas foi possível verificar que não existe diferença significativa entre os tratamentos ($F < F$ crítico).

4.4.2 Limites de Consistência

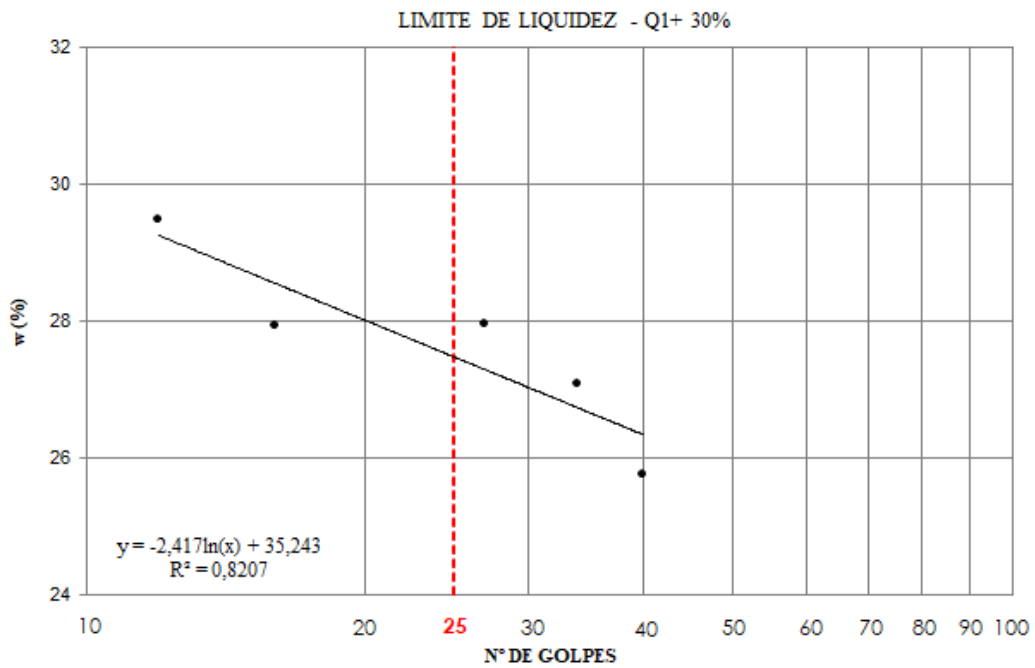
Os resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LL) e o índice de plasticidade (IP) para as misturas podem ser observados na Tabela 38 e Figuras 35, 36 e 37.

Tabela 38- Limites de Consistência das Misturas.

Amostra	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
SQ1 + 30%	28,00	20,50	7,50
SQ2 + 30%	28,70	20,93	7,77
SQ3 + 30%	27,80	20,56	7,24

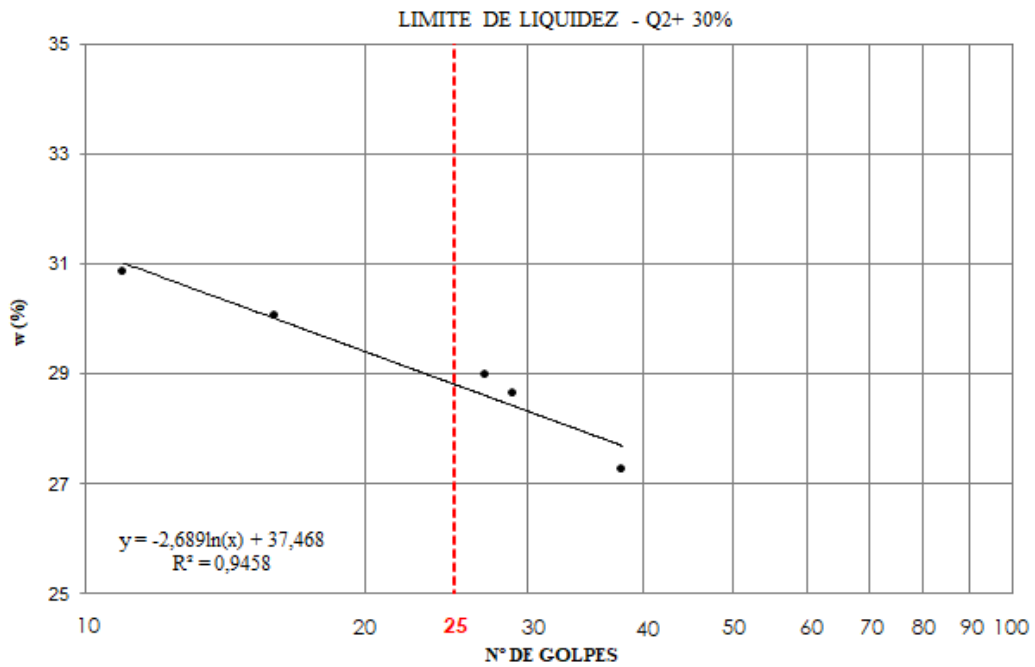
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 35- Limite de Liquidez - Q1+ 30%.



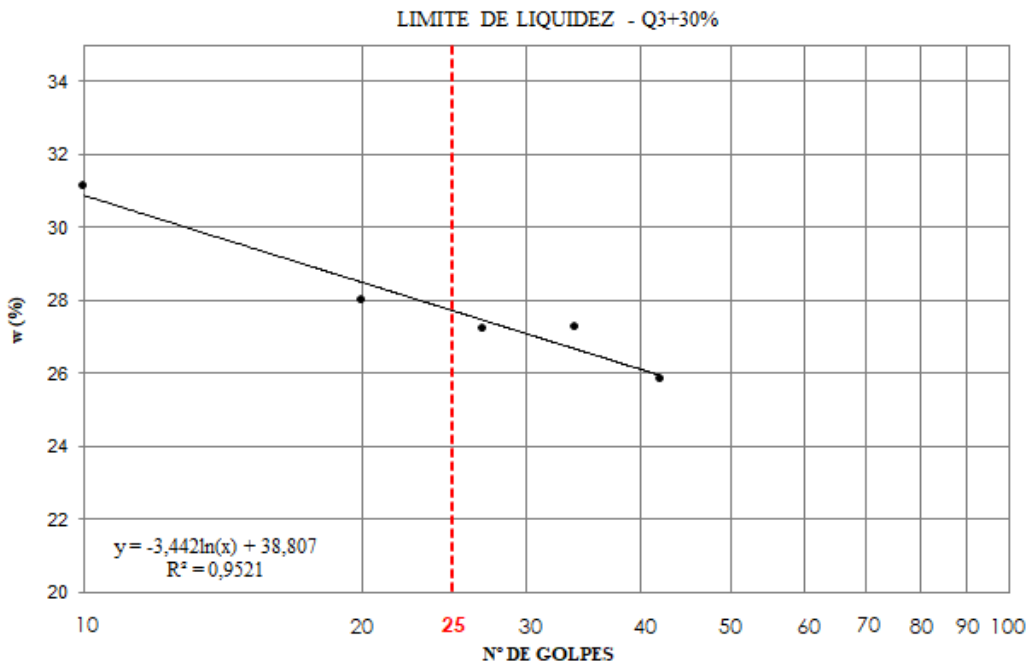
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 36- Limite de Liquidez - Q2+ 30%.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 37- Limite de Liquidez - $Q_3+30\%$.



Fonte: O Autor, 2019.

Analisando os resultados das Tabelas 24 e 38 observa-se que o solo apresenta limite de liquidez (LL) igual a 31,80%, limite de plasticidade (LP) de 23,91%, e índice de plasticidade (IP) igual a 7,89%, sendo classificado segundo Caputo (1998) como solo medianamente plástico ($7 < IP \leq 15$). Os resultados demonstraram que a adição do rejeito de quartzito promoveu uma redução dos limites de liquidez e plasticidade, assim como do índice de plasticidade. Esse comportamento ocorre devido a diminuição da porcentagem da fração argilosa do solo, visto que as argilas possuem comportamento plástico e alta capacidade de aglutinação, ao contrário das areias.

De acordo com os requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2012), considera-se adequado para produzir blocos de solo-cimento, solos que possuam limite de liquidez (LL) $\leq 45\%$ e índice de plasticidade (IP) $\leq 18\%$. Sendo assim, os valores obtidos, tanto para o solo natural quanto para as misturas, foram inferiores aos limites máximos estabelecidos pela norma.

4.5 FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

A verificação da umidade ideal para fabricação dos tijolos de solo-cimento foi feita manualmente no local, com relativa precisão, através do teste da mão e o teor de umidade dos tijolos são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39- Teor de umidade.

Traço 1:10	w (%)
SQ ₁ + 30%	9,91
SQ ₂ + 30%	9,82
SQ ₃ + 30%	9,14

Fonte: O Autor, 2019.

4.5.1 Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados aos 7 e 28 dias após a moldagem, sendo que os corpos-de-prova ficaram sob cura úmida durante o intervalo de 7 dias. Os resultados estão expressos na Tabela 40.

Tabela 40- Resultados: Resistência à Compressão.

Traço 1:10	CP	7 dias			28 dias		
		Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
SQ1+30%	1	2,69	2,93	0,53	3,00	3,06	0,19
	2	4,07			3,25		
	3	3,09			3,29		
	4	2,53			2,89		
	5	2,47			3,20		
	6	2,51			2,85		
	7	3,11			2,92		
SQ2+30%	1	2,31	2,74	0,34	2,63	2,91	0,26
	2	2,43			3,10		
	3	2,82			3,15		
	4	3,16			3,27		
	5	2,93			2,91		

	6	3,15			2,63		
	7	2,37			2,71		
	1	2,29			2,85		
	2	2,99			2,45		
	3	2,83			2,90		
SQ3+30%	4	2,52	2,52	0,26	2,59	2,70	0,26
	5	2,43			2,33		
	6	2,26			3,06		
	7	2,34			2,70		

Fonte: O Autor, 2019.

Analisando os valores da Tabela 40 foi observado que a resistência à compressão simples (f_i) de todas as amostras atenderam às prescrições da NBR 8491 (ABNT, 2012) que prescreve um valor médio maior ou igual a 2,0 MPa aos sete dias e valores individuais de resistência igual ou superior a 1,7 MPa.

Com relação aos valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento-rejeito de quartzito, aos 7 e 28 dias de idade, a análise de variância mostrou que os tratamentos SQ₁+30%, SQ₂+30% e SQ₃+30% são estatisticamente iguais entre si ($F < F$ crítico) (Tabelas 41, 42 e 43).

Tabela 41- Análise de variância- Resistência à Compressão Q₁.

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,061779	1	0,061779	0,341993	0,569514	4,747225
Resíduo	2,167714	12	0,180643	-	-	-
Total	2,229493	13	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 42- Análise de variância- Resistência à Compressão Q₂.

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,108064	1	0,108064	1,058712	0,323803	4,747225
Resíduo	1,224857	12	0,102071	-	-	-
Total	1,332921	13	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 43- Análise de variância- Resistência à Compressão Q₃.

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,106314	1	0,106314	1,447297	0,252161	4,747225
Resíduo	0,881486	12	0,073457	-	-	-
Total	0,9878	13	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

4.5.2 Ensaio de Absorção de Água

Na Tabela 44 é apresentado os valores obtidos no ensaio de absorção dos tijolos para os 7 e 28 dias respectivamente.

Neste ensaio verificou-se que todos os traços atenderam a NBR 8491 (ABNT, 2012), já que a norma especifica que as amostras ensaiadas não devem apresentar a média dos valores de absorção de água maior do que 20 % nem valores individuais superiores a 22 %, com idade mínima de sete dias.

Tabela 44- Absorção de água.

Traço 1:10	CP	7 dias			28 dias		
		Massa Inicial (kg)	Massa Final (kg)	Absorção (%)	Massa Inicial (kg)	Massa Final (kg)	Absorção (%)
SQ ₁₊ 30%	1	3,265	3,795	16,23	3,265	3,765	15,31
	2	3,280	3,740	14,02	3,335	3,840	15,14
	3	3,230	3,745	15,94	3,300	3,805	15,30
Média (%)			15,40			15,25	
SQ ₂₊ 30%	1	3,060	3,605	17,81	3,200	3,740	16,87
	2	3,380	3,885	14,94	3,250	3,775	16,15
	3	3,205	3,770	17,63	3,210	3,760	17,13
Média (%)			16,79			16,72	
SQ ₃₊ 30%	1	3,120	3,685	18,11	3,105	3,620	16,58
	2	3,165	3,700	16,90	3,310	3,835	15,86
	3	3,075	3,575	16,26	3,300	3,855	16,82
Média (%)			17,09			16,42	

Fonte: O Autor, 2019.

A análise de variância foi realizada entre Q₁, Q₂ e Q₃, aos 7 e 28 dias, com o objetivo de verificar a possibilidade de alguma diferença entre os tratamentos nas referidas idades (Tabela 45, 46 e 47).

Tabela 45- Análise de variância - Absorção de Água: Q₁.

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,032267	1	0,03226	0,0444	0,8433	7,7086
Resíduo	2,903067	4	0,72577	-	-	-
Total	2,935333	5	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 46- Análise de variância - Absorção de Água: Q₂

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,008817	1	0,00882	0,0062	0,9410	7,7086
Resíduo	5,683933	4	1,42098	-	-	-
Total	5,69275	5	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 47- Análise de variância - Absorção de Água: Q₃.

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor P	F crítico
Tratamento	0,67335	1	0,67335	1,1893	0,336754	7,7086
Resíduo	2,2646	4	0,56615	-	-	-
Total	2,93795	5	-	-	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

A análise de variância foi realizada no ensaio de absorção de água com o intuito de comparar as médias das diferentes populações estudadas e verificar se essas populações possuem médias iguais ou não. Os resultados mostraram que não existiu diferença significativa entre nenhum dos tratamentos estudados ($F < F$ crítico).

5 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

No estudo viabilidade econômica foi realizado uma estimativa de custo de 1 m² de alvenaria com tijolos cerâmicos tradicionais e tijolos de solo-cimento.

O levantamento dos valores de composições e de insumos fora feito com base nos preços utilizados no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) da Caixa Econômica Federal, que abrange o levantamento de preços de materiais e salários pagos na construção civil para o setor de habitação.

A proporção solo-cimento-rejeito de quartzito mais adequada e utilizada neste estudo de viabilidade econômica, conforme apresentado no item 4.3.4, foi de 30% da fração fina de rejeito de quartzito e 70% de solo para o traço 1:10.

Os dados utilizados para estudo estão de acordo com a composição dos serviços e insumos do SINAPI do mês referência de dezembro/2018. A Tabela 48 mostra a comparação entre as execuções considerando apenas os materiais e a mão de obra necessária para o assentamento da alvenaria e revestimentos necessários para pintura.

Comparando a composição de 1 m² de alvenaria de tijolo cerâmico (9cm x 9 cm x 19 cm) com 1 cm de chapisco e 1 cm de revestimento de massa única e 1 m² de alvenaria em tijolo de solo-cimento (7cm x 12,5cm x 25cm) considerado o assentamento dos tijolos e rejunte, para posterior recebimento de impermeabilização e/ou pintura nota-se uma economia de 15% no valor total.

Não foi considerado revestimento em argamassa visto que a construção com tijolo ecológico não tem grandes perdas como no método construtivo convencional e não exige detalhes de acabamento.

Essa economia pode ser ainda maior quando a obra é analisada em seu contexto geral, pois elimina os gastos com formas de madeira na moldagem de colunas e vigas, dispensa quebras de paredes para instalação elétrica e hidráulica, além da rapidez no processo construtivo quando comparado aos sistemas convencionais, reduzindo consequentemente o custo da mão de obra.

Tabela 48- Planilha orçamentária

Alvenaria – Tijolo Cerâmico				
Composição/ Descrição	Unidade	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Composição representativa do serviço de alvenaria de vedação de blocos vazados de cerâmica de 9 x 19 x 19 cm (espessura 9 cm) para edificação habitacional unifamiliar (casa) e edificação pública padrão. AF 11/2014	m ²	1,00	57,03	57,03
Chapisco aplicado em alvenaria (com presença de vãos) e estruturas de concreto de fachada, com colher de pedreiro. Argamassa traço 1:3 com preparo em betoneira 400 l. AF 06/2014	m ²	2,00	5,64	11,28
Massa única, para recebimento de pintura, em argamassa traço 1:2:8, preparo e aplicação manual em faces internas de paredes, espessura de 10 mm, com execução de taliscas. AF 06/2014	m ²	2,00	16,71	33,42
			Total:	R\$ 101,73
Alvenaria – Tijolo de solo-cimento				
Alvenaria em tijolo de solo cimento 7 x 12,5 x 25 cm (espessura 12,5 cm), assentado com argamassa (cimento, areia e cola)	m ²	1,00	76,20	76,20
Rejunte para parede de tijolo solo cimento (pedreiro com encargos complementares, servente com encargos complementares; argamassa para tijolos de solo-cimento (solo + cimento + cola)	m ²	2,00	4,96	9,92
			Total:	R\$ 86,12

Corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa, Lima (2013) efetuou um levantamento dos custos para a construção de duas paredes de 8,1 m², uma com tijolos convencionais e outra com tijolos de solo-cimento, para comparação desses sistemas com o propósito de analisar a viabilidade dos tijolos de solo-cimento. O estudo mostrou que a parede de solo-cimento apresentou custo menor, reduzindo o custo total em aproximadamente 27% em relação ao tijolo convencional. Constatou também que, a produtividade do componente, a diminuição do desperdício nos recortes para instalações, a economia com revestimento interno e a economia na quantidade de argamassa para assentamento, contribuem para esse menor custo.

Hammes et al. (2017) avaliaram a viabilidade econômica da substituição de blocos cerâmicos de 9 furos por tijolos ecológicos em um conjunto de habitações populares na cidade de Santa Rosa – RS. O orçamento foi feito com base na tabela SINAPI, considerando apenas a execução da alvenaria e seu revestimento. O valor orçado para os blocos cerâmicos, considerando materiais e mão de obra necessário para assentamento da alvenaria, execução das vergas, contra vergas, cinta de amarração, revestimento para pintura e pintura foi de R\$ 20.868,74. No orçamento da construção com tijolo ecológico foi considerado o assentamento de tijolo, rejunte e concretagem das colunas e cintas horizontais, não sendo levado em conta revestimento em argamassa visto que a construção com tijolo ecológico não tem grandes perdas como no método construtivo convencional e não exige detalhes de acabamento, obtendo um valor total de R\$ 14.166,54. A substituição por tijolos de solo-cimento representou uma economia de 32,12%, o que é de grande valia principalmente para as construções de habitações de interesse social, onde esse valor pode ser empregado nas construções de novas unidades habitacionais.

Visando o estudo de viabilidade econômica e a quantificação do tempo de execução, Ciceri (2016) realizou um comparativo entre três métodos construtivos, com base em um projeto de uma edificação popular, utilizando alvenaria com blocos cerâmicos, tijolos maciços e tijolos de solo-cimento. Os resultados obtidos mostraram um aumento de custo de 5,73% com a utilização de tijolos cerâmicos maciços e uma redução de 6,38% utilizando tijolos de solo-cimento em relação à alvenaria com blocos cerâmicos. Também foi possível observar um aumento no tempo de execução de 6,38% com a utilização de tijolos cerâmicos maciços, e uma redução de 27,66% utilizando tijolos de solo-cimento em substituição à alvenaria com blocos cerâmicos. Concluiu-se então que a utilização da alvenaria com tijolos de solo-cimento, além dos benefícios em relação ao meio ambiente, é viável economicamente devido à redução no custo total e no tempo de execução da obra.

O estudo realizado indica que a utilização de tijolos de solo-cimento em alvenarias modulares se mostra mais econômica e ambientalmente mais sustentável. A utilização da fração fina dos rejeitos de quartzito em substituição parcial do solo reduz o custo dos tijolos de solo-cimento visto que esse rejeito não tem custo de produção nas regiões onde há a exploração dos quartzitos, ou seja, seu valor é menor do que o da areia ou solo convencionais utilizados na fabricação das peças em regiões próximas das minerações de

quartzito. Caso contrário, há o acréscimo do custo de transporte o qual, para longas distâncias, pode tornar inviável economicamente o uso desse material alternativo.

6 CONCLUSÕES

Em vista dos resultados obtidos, concluiu-se que:

- A adição dos rejeitos de quartzitos possibilitou condições favoráveis para produção dos tijolos prensados de solo-cimento com qualidade e redução parcial do consumo de solo, atendidas as especificações das normas técnicas brasileiras;
- Os tijolos produzidos com os rejeitos de quartzitos em estudo não conferiram melhoras significativas em termos de propriedades mecânicas quando comparados aos tijolos produzidos apenas com o solo estudado, porém todos atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos nas normas;
- O aumento do teor de cimento levou a um incremento dos valores de resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento. Observou-se um aumento médio de 4% a 7% da resistência à compressão simples das amostras dos 7 para os 28 dias de idade.
- O planejamento fatorial utilizado e o método de superfície de resposta foram eficientes para a avaliação do comportamento da resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento. O uso combinado dessas ferramentas mostrou diversas possibilidades e combinações de adição de rejeitos de quartzito e teores de cimento sem o comprometimento nos resultados de resistência à compressão e de absorção de água.
- Para o solo estudado nesta pesquisa a adição do teor de rejeito de quartzito utilizada, de 30%, foi considerada adequada para alcançar o valor mínimo de resistência à compressão simples e de absorção de água utilizando o traço solo-cimento 1:10.
- Através análise de variância realizada nos três tipos de quartzito verificou-se que não houve diferença entre as amostras, indicando assim a possibilidade de uso de qualquer um dos tipos de rejeito de quartzito para a produção de tijolos de solo-cimento.
- O aproveitamento desses resíduos na fabricação de tijolos de solo-cimento pode configurar-se como uma prática ecologicamente correta, pois dispensa o processo de queima, pode contribuir no sentido de reduzir o volume de material descartado na natureza além de diminuir a exploração dos recursos naturais e assim preservar o meio-ambiente.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. ABIROCHAS em Notícia. **ABINEWS**, Ano 2 / Nº 5 – 2017. ISSN 2359-5779.

____, **Balanco das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento em 2012**. Belo Horizonte, 07 jan. 2013. 17 p.

____, **Exportações estaduais de rochas ornamentais e de revestimento em 2012**. Belo Horizonte, 16 jan. 2013. 5 p.

____, **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Brasília, Julho/2018. 34 p.

ABDULLAHI, M. (2012). Effect of aggregate type on Compressive strength of concrete. **International Journal of Civil and Structural Engineering**. Volume 2, n3, 2012. 10 p.

ACCHAR, W.; MARQUES, S.K.J., Ecological Soil-Cement Bricks from Waste Materials. **Springer Briefs in Applied Sciences and Technology**, 2016.

ALECRIM, A. V; FABBRI, G. T. P. (2004). Aproveitamento de rejeitos da mineração de quartzito do sudoeste de Minas Gerais em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis. In: **1 Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos**, 2004, São Carlos - SP. Geo-Jovem, 2004. p. 1-6.

ALECRIM, A.U.; FABBRI, G. T. P. Utilização de rejeitos de quartzito em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis. **36ª Reunião Anual de Pavimentação**, ABPv, Curitiba, PR, 2005. p. 1 – 10.

ALECRIM, A. V. **Estudo do resíduo de quartzito foliado para emprego em estruturas de pavimentos**. 2009.139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D653-11**, Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids, 2011. 46p.

ANDRADE, W. P. – Equipe de FURNAS, Laboratório de Concreto. **Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo – Ensaio e Propriedades**. São Paulo, Pini, 1997.

ANDRADE, H.; FONSECA, L.D. Pedologia. In: COLLARES, E. G. **Zoneamento Ambiental das sub-bacias Hidrográficas dos afluentes Mineiros do Médio Rio Grande**. [recurso eletrônico] - Aspectos dos meios físico e biótico. Org. Eduardo Collares. Passos, MG: Edifesp, 2013. cap. p 166-170.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. São Paulo, 2002. 19 p. BT-111.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

_____. **NBR NM 3310-1**: Peneira de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010. 20p.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 10p.

_____. **NBR 6459**: Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

_____. **NBR 7180**: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

_____. **NBR 7181:** Solo: Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

_____. **NBR 7183:** Determinação do Limite e Relação de Contração de Solos. Rio de Janeiro, 2014. 3p.

_____. **NBR 8491:** Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5p.

_____. **NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____. **NBR 15012:** Rochas para revestimento de edificações. Rio de Janeiro, 2013. 23p.

_____. **NBR 15577-1:** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008. 11p.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12p.

BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. **Estatística para cursos de engenharia e informática.** São Paulo, Atlas, 2004.

BALASUBRAMANIAN, J.; SABUMON, P.C.; LAZAR, J.U.; ILANGOVAN, R. (2006) Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Manage**, 2010, v.26. p22-28.

BARBOSA, N.P.; GHAVAMI, K. Terra Crua para Edificações. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: **IBRACON**, 2010, 2ª. Ed. v.2. Cap.25.

BARBOSA, N.P.; MATTONE, R. Construção com terra crua. In: **Seminário Iberoamericano De Construção Com Terra**. Salvador: Proterra/Cyted, 2002.

BARBOSA, N.P. **Transferência de tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua para uma comunidade muito pobre**. Departamento de tecnologia da construção civil. Universidade Federal da Paraíba. 2003.

BARBOSA, O.; BRAUN, O.P.G.; DYER, R.C.; CUNHA, C.A.B.R. 1970. **Geologia da Região do Triângulo Mineiro**. Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral, DNPM, Bol. 136, 140p.

BETSUYAKU, R.Y.; DELGADO JUNIOR, H.G.; VALADÃO, I.C.R.P. Produção de tijolo ecológico com resíduo de Areia Diatomácea. **Cadernos UniFOA**. ISSN: 1809-9475 Edição 34 | Agosto de 2017 e-ISSN: 1982-1816.

BORGES, L. V. S; COLOMBO, C. R. **Construções com Terra: Alternativa voltada à sustentabilidade**, 2009.

CABALA, G. V. E. (2007). **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CABELLO, M. L. R. (2011). **Reciclagem de resíduo gerado na extração de quartzito**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.

CAMPOS, A. R.; SILVA, M. A. R. (2003). Assistência técnica na exploração de quartzito em Pirenópolis (GO). Rio de Janeiro, **CETEM – IV**, Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, Fortaleza (CE) de 16 a 19 de novembro de 2003.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, v.1: Fundamentos. 6ªed. Rio de Janeiro: Ltc, 2005. 512 p.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. & CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, Salvador, 2001.

CARRASCO, E. V. M., MANTILLA, J. N. R., ESPÓSITO, T., MOREIRA, L. E. Compression Performance of Walls of Interlocking Bricks made of Iron Ore ByProducts and Cement. **International Journal of Civil & Environmental Engineering**, v.13, n.3. 7p, 2013.

CHIODI FILHO, C. Situação atual e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais e de revestimento. **CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**, 3, 2007, Natal. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 17-41.

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, K. D. Plano de ação para sustentabilidade do setor de rochas ornamentais- Ardósia em Papagaios. Implementação do Plano de ação, Parte 1. Minas Gerais: **FEAM**, 2014. 50 p.

CICEK. T.; TANRIVERDI, M. Lime based steam autoclaved fly ash bricks. **Construction and Building Materials**, 2006, v.21. p1295-1300

COLLARES, E. G; RAMIRIO, R. F.; PAMPLONA, D. R. P, FRANKLIN JUNIOR I. Estudo comparativo de rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no Sudoeste de Minas Gerais. **Ciência et Praxis**. Passos, v. 1, n. 1, p.10, 2008.

COLLARES, E.G.; FRANCKLIN Jr, I; MOTTA, L.A.C. 2012. Evaluation of the aggregate produced from wastes of quartzite mining sites to use in concrete. An **International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, São Paulo, Volume 35, N. 3, p. 251-266, September-December. 2012.

COLLARES, E. G. **Zoneamento Ambiental das sub-bacias Hidrográficas dos afluentes Mineiros do Médio Rio Grande** [recurso eletrônico] - Aspectos dos meios físico e biótico. Org. Eduardo Collares. Passos, MG: Edifesp, 2013. 1485 p.

CORDEIRO, M. E. V. M.; CONCEIÇÃO, P. M. da; LIMA, T. V. **A Educação Ambiental e o Uso do solo-cimento**. Vértices, v.8, n.1/3. p.35-54. Campos dos Goytacazes - RJ: Editora Essência, 2006.

COSTA, J. B. (1950). **Estudo e classificação das rochas por exame macroscópico**. 4.ed. In: Fundação Calouste Gulbenkian. Portugal, Lisboa. P.161-184

COSTA, A.G.; CAMPELLO, M.S.; MACIEL, S.L.; CALIXTO, C.; BEZERRA, J.E. Rochas ornamentais e de revestimento: proposta de classificação com base na caracterização tecnológica. In: **III Simpósio sobre Rochas Ornamentais do Nordeste**, Anais, Recife-PE, 2002.

DIAS, L. S; R. MOL, M. R; SILVA, K. D. C; MENDES, A. J. C; CAMPOS, P. A. M; MENDES, J. C; PEIXOTO, R. A. F. Utilização de quartzito friável como agregado miúdo em argamassas colantes. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Natal-RN, Brasil, 2016. 12 p.

FERNANDES, T.M.G. **Caracterização petrográfica, química e tecnológica dos quartzitos do centro produtor de São Thomé das Letras no Sudoeste do Estado de Minas Gerais**. 2002. 169 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências e Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2002.

FERNANDES, T.M.G. Aspectos geológicos e tecnológicos dos quartzitos do centro produtor de São Thomé das Letras (MG). São Paulo, UNESP. **Geociências**, v.22, n.2, p. 129-141, 2003.

FERREIRA, F.B.S. **Avaliação da utilização de resíduos de quartzito como agregado em microconcretos**. 2017. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2017. 104 p.

FERREIRA, W.L.; REIS, E.L.; LIMA, R.M.F. Incorporation of residues from the minero-metallurgical industry in the production of claylime brick. **Journal of Cleaner Production**, 2015. v.87. p 50-510.

FRANCKLIN Jr, I. **Estudo tecnológico em rejeitos de quartzitos do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e Rochas. In: OLIVEIRA, A. M.S; BRITO, S.N.A. **Geologia de Engenharia**, São Paulo: ABGE, 1998. Cap.2, p.15-38.

Fundação Estadual do Meio Ambiente e Conselho Municipal de Desenvolvimento Ambiental - FEAM.; CODEMA. (2003): **depoimento [abr. 2003]**. Entrevistador: A. V. Alecrim. Minas Gerais: Passos MG. Entrevista concedida por meio telefônico. Passos MG.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) . **Guia técnico ambiental da indústria de rochas ornamentais / Fundação Estadual do Meio Ambiente**, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM, 2015.

Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – FUNTAC. Departamento técnico e de produção. Cartilha para a produção de tijolo solo-cimento. Rio Branco, 2007.

GRILO, S. M. S. (2016) **Estudo da Viabilidade de uso do Rejeito Fino de Quartzito para Pavimentação**. Dissertação (Mestrado Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) - Universidade Estadual de Minas Gerais, Passos/ MG, 2016.

HAMMES, R. F; ROSSI, C. T; VIER, L. C; SILVA, J. M; PEDROZO, E. C. Análise da viabilidade do uso do tijolo ecológico em habitação de interesse social-estudo de caso. **XXVIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2017**. Ijuí – RS – Brasil

HEREK, L. C. S.; HORI, C. E.; REIS, M. H. M.; MORA, N. D.; TAVARES, C. R. G.; BERGAMASCO, R. Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge. **Ceramics International**, v.38, 951-959, 2011.

HINKELMANN, K. KEMPTHORNE, O. **Design and Analysis of Experiments: Volume 1 Introduction to Experimental Design**. 2nd ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008. 631p.

INSTITUTO METAS. **Identificação, Caracterização e Classificação de Arranjos Produtivos de Base Mineral e de Demanda Mineral Significativa no Brasil**. Belo Horizonte: MCT/CGEE/CNPq/FIEMG, 2002. 01 CD-ROM.

LADE, P.V.; LIGGIO, C.D.; YAMAMURO, J.A. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. **Geotechnical Testing Journal**, v.21, N°4, 1998, pp.336:347.

LEONEL, R. F; FOLGUERAS, M. V; DALLA VALENTINA, L. V. O; PRIM, S. R; PRATES, G. A; CARASCHI, J. C. Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 329-335, 2017.

LIMA, F. X. R. F. **Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: Caracterização para uso em edificações**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Brasília – GO, 2013.

LINGLING, X.; WEI, G.; TAO, W.; NANRU, Y. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. **Construction and Building Materials**, 2005, v.9. p 243-247.

MACHADO, M. F. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais: Programa Geologia do Brasil-Levantamento da Geodiversidade** / Organização Marceley Ferreira Machado e Sandra Fernandes da Silva. — Belo Horizonte: CPRM, 2010. 131 p.

MAGRI, R. A. F. **Análise da suscetibilidade à erosão da região do Médio Rio Grande (MG)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

MATTOS, V. L. D. **Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal De Santa Catarina, 2004. 160 p.

MEDJO EKO, R.; RISKOWSKI, G.A. Procedure for Processing Mixtures of Soil, Cement, and Sugar Cane Bagasse. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development**, 1999, v.3. p 1-11.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS – **MDIC**. Sistemas. Aliceweb. Disponível em < <http://alicesweb.mdic.gov.br/>>. Acesso em: 18 out. 2018.

MIQUELEIZ, L; RAMIREZ, F; OTI, J. E; SECO, A; KINUTHIA, J. M; OREJA, I; URMENETA P. Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production. **Engineering Geology**. v. 163, p. 68-74, 2013.

MONTANI, C. **Rapporto Marmore e Pietre nel Mondo**, 2016 (XVII World Marble and Stones Report 2016. Ed.: Aldus Casa di Edizioni in Carrara: Carrara 2016.

MONTANI, C. **XXVIII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo**, 2018. 132 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied Statistics for Engineers*. 3 ed. New York, John Wiley & Sons, 2003. 656p.

MOTTA, C. J.; MORAIS, W. P.; ROCHA, N. G. Tijolo de Solo Cimento: Análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. Belo Horizonte: **Exata**, 2014. 13-26 p.

NASLY, M.A.; YASSIN, A.A.M. Sustainable Housing Using an Innovative Interlocking Block Building System. **Meniti Pembangunan Lestari dalam Kejuruteraan Awam**, Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Universiti Sains Malaysia, 2009, p 130-198.

NEVES, C. M. M. **Novos materiais para a melhoria da habitação popular**. Camaçari: CEPED – Centro de Pesquisas de Desenvolvimento, 1978.

NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos solos - Ensaios de laboratório**. Apostila do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, São Carlos, 1995.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; STOROPOLI, J. H.; GUERNER DIAS, A. J. Evaluation of compressive strength and water absorption of soilcement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. **Acta Scientiarum. Technology**, v.38, n.2. 2016, p. 163-171.

PENTEADO, P. T.; MARINHO R. C. **Análise Comparativa de Custo e Produtividade dos Sistemas Construtivos: Alvenaria de Solo-Cimento, Alvenaria com Blocos Cerâmicos e Alvenaria Estrutural com Blocos de Concreto na Construção de uma Residência Popular**. Monografia. Curitiba - PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

PINHEIRO, W. M. G. **Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 202p, 2003.

REIS, M. J. **Avaliação tecnológica de rejeitos de minerações de quartzito do Sudoeste Mineiro como agregados em peças de concreto para pavimentação (PCP), 2016. 207f**. Dissertação - Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Passos, 2016

REIS, M.J.; COLLARES; E.G, REIS, F.M.D. Technological assessment of tailings from quartzite mining sites in Alpinópolis (Minas Gerais–Brazil) as aggregates in concrete block paving (CBP) . **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2017. p1-15.

SEER, H. J.; BROD, J. A.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M.; BOAVENTURA, G. R.; DARDENNE, M. A. Grupo Araxá em sua área-tipo, um fragmento de crosta oceânica neoproterozoica na faixa de dobramentos Brasília. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 31, p. 385-396, 2001.

SEGANTINI, A.A.S; WADA, P.H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição-[doi: 10.4025/actascitechnol. v33i2. 9377](https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i2.9377). Acta Scientiarum. **Technology**, v. 33, n. 2, p. 179-183, 2011.

SHON, C.S; SAYLAK, D.; ZOLLINGER, D.G. Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks. **Construction and Building Materials**, 2009, v.23. p 2062–2071.

SILVA, P.A.D. **Estudos geotécnicos na recuperação ambiental da pedreira municipal de Pirenópolis**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2000.

SIQUEIRA, F. B; HOLANDA, J. N. F. Efeito da incorporação de resíduo grits sobre o comportamento de densificação de tijolo solo-cimento. **Cerâmica [online]**. 2015, vol.61, n.360, pp.414-419. ISSN 0366-6913.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento**. Dissertação Mestrado, Ilha Solteira: UNESP, 2006. 121p.

THOMAZ, C. A. **Paredes monolíticas de solo-cimento: Hospital Adriano Jorge, Manaus, 1950-1976**. 3ed. São Paulo: ABCP, 1979. 55p.

ULLAS, S.N.; VENKATARAMA, R.B.V.; NANJUNDA RAO, K.S. Characteristics of masonry units from iron ore tailings. **International Conference on Sustainable Built Environment**, 2010, p 108-114.

VALADÃO, G. E. S., Dutra, J. I. G., Galéry, R., Morais, B. F., Braga, G. P, Oliveira, M. M. (2010) **Quartzito no parque nacional da serra da Canastra e seu entorno – Relatório Final**. DEMIN (Departamento de Engenharia de Minas), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

VIEIRA A; CECHINEL, B; DEGHEHARD, C; MAGNUS, D; HOLTHAUSEN, R; TASSI R; MODESTO, C; NONI JR., A; CARGNIN, M. Estudo do processo de obtenção

e caracterização de tijolos de solo-cimento. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 6, p. 47-50, 2007.