



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
BARBARA FURLAN HÜBBE

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LÃ DE ROCHA E POLIESTIRENO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Tubarão
2018



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
BARBARA FURLAN HÜBBE

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LÃ DE ROCHA E POLIESTIRENO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Relatório Técnico/Científico apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Prof. Eng. Marcos Marcelino Mazzucco, Dr. (Orientador)

Tubarão

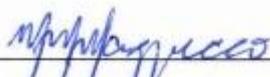
2018

BARBARA FURLAN HÜBBE

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE LÃ DE ROCHA E POLIESTIRENO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

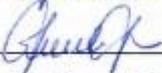
Este relatório técnico/científico foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 18 de junho de 2018.



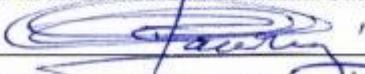
Professor Eng. Marcos Marcelino Mazzucco, Dr. (Orientador)

Universidade do Sul de Santa Catarina



Professora Lic. Jucilene Feltrin, Dra. (Avaliadora)

Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Eng. Richard Faraco Amorim, MSc. (Avaliador)

Universidade do Sul de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por cada dia me proporcionar mais uma oportunidade de correr atrás dos meus sonhos e por colocar tantas pessoas incríveis no meu caminho.

Aos meus pais, Miria e Rodrigo, por me fornecerem apoio emocional e financeiro para que eu chegasse até esta etapa de conclusão do curso. Agradeço, também, por seu amor incondicional, por serem estas pessoas incríveis e por acreditarem no meu potencial.

A todos os meus amigos, em especial ao Rogério, Ianca, Amanda e Zé, que sempre estão ao meu lado me alegrando, espantando meu estresse e servindo de ombro amigo nas horas difíceis.

Ao Jhon, por ser um exemplo de determinação e pragmatismo, me incentivando a focar nas soluções e não nos obstáculos.

À Mônica e ao Renan, do laboratório de Engenharia Civil, por todo o conhecimento passado e pelo enorme apoio com os ensaios e análise dos dados.

Ao meu orientador Mazzucco, que me inspira por seu conhecimento e lindo coração. Obrigada por me acompanhar mais uma vez e sempre me motivar a ir além.

Ao Said, por me conceder a vaga de estágio em sua empresa e ao engenheiro Geraldo, por toda a ajuda e pelas informações passadas.

Ao professor Gilson, por todo o carinho e assistência.

À UNISUL e a todos os demais professores, que passaram seus conhecimentos desde o início do curso até agora.

Ao Vicente, pelos auxílios com equipamentos e reagentes de laboratório.

Ao meu irmão Renaro, por me emprestar o *mouse* e me fazer rir todos os dias.

E às minhas princesinhas Nina e Sassa, por alegrarem meus dias.

... Muito obrigada!

“O nosso ideal devemos colocá-lo nas estrelas,
ainda que fiquemos no meio do caminho” (Liev Tolstói).

RESUMO

Atualmente há uma constante busca por soluções que diminuam a taxa de resíduos destinados a aterros através da reciclagem, seja para a redução de impactos ambientais, seja para a redução de custos com aterro sanitário. Tendo em vista os danos que a indústria cimenteira causa ao meio ambiente, neste trabalho são apresentadas maneiras de reutilização de dois materiais que têm potencial de aprimorar o desempenho de massas cimentícias e são frequentemente descartados: a lã de rocha e o poliestireno. Através da trituração e moagem dos filamentos de lã de rocha obtiveram-se finas partículas, as quais foram utilizadas como substituição parcial do cimento em pastas de argamassa. A substituição do cimento por este material apresentou bons resultados quanto à redução de água e absorção por capilaridade, mas não demonstrou melhoras significativas quanto à resistência à compressão dos corpos de prova. Com o poliestireno foi realizado o processo de sulfonação, visto que através deste, são obtidos polímeros com características plastificantes que tornam possível seu uso como aditivo. O grau de sulfonação do poliestireno sulfonado foi muito pequeno, com isto, não foi possível utilizá-lo como aditivo em compósitos cimentícios.

Palavras-chave: Cimento; lã de rocha; poliestireno; resíduo; sustentabilidade.

ABSTRACT

Nowadays there is a constant search for solutions that reduce the rate of waste destined for landfills through recycling, either for the reduction of environmental impacts or for the reduction of landfill costs. Considering the damages that the cement industry causes to the environment, in this work are presented ways of reusing two materials that have potential to improve the performance of cementitious composites and are often discarded: rock wool and polystyrene. By grinding and milling the rock wool filaments fine particles were obtained, which were used as partial replacement of the cement in mortar slurries. The replacement of the cement by this material showed good results regarding water reduction and capillary absorption, but did not show significant improvements in the compressive strength of the specimens. With the polystyrene was carried out the sulfonation process, since though polymers with plasticizing characteristics are obtained making it possible its use as additive. The degree of sulfonation of the sulfonated polystyrene was very low, therefore, it could not be used as an additive in cementitious composites.

Keywords: Cement; rock wool; polystyrene; waste; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Os 4R's da sustentabilidade.	21
Figura 2 – Situação da destinação dos RSU em SC em maio de 2001.	22
Figura 3 - Situação da destinação dos RSU em SC em julho de 2006.....	23
Figura 4 – Localização geográfica da Bacia do Rio Tubarão.....	23
Figura 5 – Destinação dos RSU nos municípios da Bacia do Rio Tubarão.	24
Figura 6 – Aterro sanitário da Serrana Engenharia em Pescaria Brava (SC).	25
Figura 7 – Diferença entre pasta, argamassa, concreto e concreto armado.	28
Figura 8 - Processo de fabricação do cimento Portland.	30
Figura 9 – Processo de aglomeração do cimento.	36
Figura 10 - Resíduo de lã de rocha da empresa B.	41
Figura 11 – Representação esquemática da polimerização do estireno.....	42
Figura 12 – Fragmento de uma estrutura de poliestireno sulfonado.	44
Figura 13 – Fluxograma de descrição dos processos.	47
Figura 14 – Lã de rocha triturada.	48
Figura 15 – Lã de rocha moída.	48
Figura 16 – Caracterização da lã moída.	49
Figura 17 – Relação entre as resistências de concreto e argamassa.	51
Figura 18 – Ensaios realizados com a argamassa.	53
Figura 19 – Ensaio <i>slump</i> de bancada.	54
Figura 20 – Medição da altura do <i>slump</i>	54
Figura 21 – Ensaio de densidade de massa.....	56
Figura 22 – Corpos de prova de argamassa.	56
Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão.....	56
Figura 24 - Reação de sulfonação do PS com acetil sulfato.....	59
Figura 25 – Rota homogênea.....	61
Figura 26 – Rota heterogênea.....	61
Figura 27 – Mecanismo da reação de sulfonação com ácido sulfúrico.	61
Figura 28 – Ensaio de consistência.....	64
Figura 29 – Resultados do ensaio de teor de ar.	65
Figura 30 – Resultado do ensaio de resistência à compressão após 7 dias.	66

Figura 31 - Resultado do teste Duncan para o ensaio de resistência à compressão após 7 dias.	67
Figura 32 - Resultado do ensaio de resistência à compressão após 21 dias.	68
Figura 33 - Resultado do teste Duncan para o ensaio de resistência à compressão após 21 dias.	68
Figura 34 – Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.	69
Figura 35 - Resultado do teste Duncan para o ensaio de absorção de água por capilaridade. .	70
Figura 36 – Sulfonação com diclorometano.....	71
Figura 37 – Sulfonação com tolueno.....	71
Figura 38 – Logo após a sulfonação.....	72
Figura 39 – 24 horas após a sulfonação.....	72
Figura 40 – Isolamento a quente do PSS.....	73
Figura 41 – PSS moído.....	73
Figura 42 – PSS pela rota heterogênea.....	75
Figura 43 – PSS isolado a frio.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Geração de RSU no Brasil.	20
Gráfico 2- Disposição final dos RSU coletados no Brasil (t/ano).	20
Gráfico 3 - Quantidade de resíduos de lã de rocha gerados pela empresa B.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulação da argamassa.....	52
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.1.1 Objetivos específicos.....	17
1.3 RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA DA INVESTIGAÇÃO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	19
2.1.1 Geração e destinação em Santa Catarina	22
2.2 RECICLAGEM.....	25
2.3 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	26
2.3.1 Reciclagem na construção civil.....	27
2.4 ARGAMASSA E CONCRETO	28
2.4.1 Aplicação.....	29
2.4.2 Constituintes.....	29
2.4.2.1 Cimento Portland.....	29
2.4.2.2 Agregados.....	31
2.4.2.3 Aditivos	32
2.4.2.4 Adições	33
2.4.2.4.1 Pozolanas.....	33
2.4.3 Cura.....	34
2.4.4 Hidratação do cimento	35
2.4.5 Propriedades da argamassa e do concreto.....	36
2.4.5.1 Consistência.....	36
2.4.5.2 Trabalhabilidade	37
2.4.5.3 Coesão e tixotropia.....	37
2.4.5.4 Plasticidade.....	37
2.4.5.5 Retenção de água.....	37
2.4.5.6 Aderência.....	38
2.4.5.7 Elasticidade.....	38

2.5	LÃ DE ROCHA.....	38
2.5.1	Propriedades.....	39
2.5.2	Aplicações	39
2.5.3	Resíduos	40
2.6	POLIESTIRENO	41
2.6.1	Propriedades.....	42
2.6.2	Aplicações	43
2.6.3	Resíduos	43
2.6.4	Sulfonação.....	43
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	46
3.1	A INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA.....	46
3.2	A PESQUISA REALIZADA.....	46
3.3	A DESCRIÇÃO DO PROCESSO	46
3.3.1	Preparação da adição	47
3.3.2	Preparação do aditivo.....	57
3.3.2.1	Sulfonação homogênea.....	58
3.3.2.2	Sulfonação heterogênea.....	60
4	ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA LÃ DE ROCHA.....	63
4.1.1	Granulometria.....	63
4.1.2	Massa específica	63
4.1.3	Pozolanicidade.....	63
4.2	ARGAMASSA INCORPORADA COM LÃ DE ROCHA.....	64
4.2.1	Ensaio no estado fresco	64
4.2.2	Ensaio no estado endurecido	66
4.3	SULFONAÇÃO DO POLIESTIRENO.....	70
4.3.1	Sulfonação em altas temperaturas	70
4.3.2	Sulfonação a temperatura ambiente	71
4.3.3	Sulfonação com ácido sulfúrico fumegante	73
4.3.4	Sulfonação com mais agente sulfonante e maior período de reação	73
4.3.5	Sulfonação com excesso de anidrido acético.....	74
4.3.6	Sulfonação com o mínimo possível de solvente	74
4.3.7	Sulfonação com copos de poliestireno comprados	74
4.3.8	Sulfonação heterogênea	74

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA	75
4.4.1 Economia com aterro sanitário.....	75
4.4.2 Custo de venda da lã de rocha	76
4.4.3 Lucro com o resíduo de lã de rocha	76
4.4.4 Gastos com equipamentos	77
4.4.5 Economia com cimento em obras	77
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS	80
ANEXOS	87

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aliado ao consumismo desenfreado provoca um aumento constante de geração de resíduos em todo o mundo. Pesquisas mostram que a taxa de crescimento dos resíduos sólidos urbanos está aumentando ainda mais rápido que a taxa de urbanização, apontando que em 2002 havia no mundo 2,9 bilhões de residências produzindo um total anual de 0,68 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, enquanto que em 2012 estes valores subiram para 3 bilhões de residências produzindo 1,3 bilhões de toneladas de resíduos, ou seja, em dez anos a quantidade de resíduos gerados praticamente duplicou. As pesquisas ainda afirmam que a tendência é de aumento contínuo por mais alguns anos, na qual se espera que em 2025 4,3 bilhões de residências produzam 2,2 bilhões de resíduos em todo o mundo. (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012).

No Brasil, conforme dados da ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), no ano de 2016 foram coletados 91% dos resíduos sólidos, valor referente a 71,4 milhões de toneladas e, deste montante, 41,7 milhões de toneladas foram destinadas a aterros sanitários e os outros 29,7 milhões de toneladas restantes, foram despachadas em lixões a céu aberto.

Atualmente há uma constante busca por soluções que diminuam a taxa de resíduos destinados a aterros através da reciclagem e, na visão do empreendedorismo, esta situação torna-se uma oportunidade para transformar fontes de despesas em negócios rentáveis que sigam o conceito da sustentabilidade. Neste contexto, investe-se cada vez mais em pesquisas que busquem rotas viáveis do ponto de vista técnico e econômico para a implantação de resíduos em diversos segmentos da indústria.

A indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais e energia, neste aspecto, a reciclagem de resíduos vem se consolidando como uma prática importante para este setor, seja atenuando os impactos ambientais, seja reduzindo alguns custos. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001). Alguns benefícios que a reciclagem proporciona para o ramo da construção civil são a redução no consumo de recursos naturais não renováveis, a redução de áreas disponíveis para aterro e a redução do consumo de energia durante o processo de produção. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001; JOHN, 1999; PINTO, 2000).

O poliestireno é um polímero vastamente utilizado em função de suas propriedades mecânicas e isolantes, sendo popularmente empregado em setores como o de materiais descartáveis, construção civil, proteção para equipamentos eletrônicos, espumas

para embalagens, etc.. À vista do elevado consumo de poliestireno e a inviabilidade de sua reciclagem, em função do baixo custo da resina virgem, o destino final destes materiais são comumente aterros e lixões; logo, um caminho alternativo para o aproveitamento do poliestireno é modificá-lo quimicamente produzindo um novo material. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2008). O poliestireno é um polímero que pode ser sulfonado, devido à sua capacidade de sofrer substituições eletrofílicas nos anéis benzênicos ligados à cadeia polimérica; na sulfonação do poliestireno produz-se um polieletrólito que, devido à presença dos grupos sulfônicos, é capaz de atuar como um aditivo. (ROYER *et al.*, 2005).

Outro material frequentemente descartado em aterros é a lã de rocha, um composto de fibras finas vastamente utilizado na indústria por sua facilidade de moldar-se aos equipamentos como tubulações, caldeiras, fornos e, sobretudo, pela sua capacidade de isolamento térmico e proteção contra incêndio. Porém, devido às manutenções necessárias nos equipamentos nos quais a lã de rocha é empregada, este material tem a sua propriedade de eficiência térmica e trabalhabilidade alteradas e se torna um resíduo industrial. (MEDEIROS, 2015). Diversas pesquisas têm comprovado que o resíduo de lã de rocha apresenta uma composição química semelhante a outros materiais pozolânicos, tais como cinzas volantes, escória de alto-forno e pó de sílica. (MEDEIROS, 2015). O emprego de pozolanas em cimento Portland gera matrizes mais duráveis devido à reação de consumo de hidróxido de cálcio e produção de compostos de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. (PEREIRA, 2010).

Assim sendo, investiga-se neste trabalho a possibilidade de incorporação destes dois resíduos bastante descartados na região em argamassas e concretos, unindo as características pozolânicas da lã de rocha com a capacidade de utilização do poliestireno sulfonado como aditivo.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Uma das grandes preocupações ambientais das últimas décadas é quanto ao consumismo inconsequente do modelo de sociedade em que vivemos hoje. Toneladas de lixo doméstico são destinadas diariamente a aterros e lixões em todo o mundo. No ramo industrial este problema é ainda mais agravante, devido à quantidade demasiada de resíduos gerados e seu alto custo com a destinação apropriada, fazendo com que algumas indústrias não façam um correto gerenciamento de seus resíduos.

A empresa A (nome fictício utilizado para manter em sigilo o nome da empresa) é responsável, além de outras atividades, pelo gerenciamento de resíduos industriais no sul do Estado de Santa Catarina. A empresa A faz a destinação final de resíduos de classe I e II de uma empresa geradora de energia, a empresa B. Dentre estes resíduos está a lã de rocha que, atualmente, é encaminhada para um aterro industrial. Conforme dados da empresa A, a contagem de resíduos de lã de rocha destinados a aterros em 2017 foi de aproximadamente 136 toneladas.

A sustentabilidade na reciclagem se dá em reconhecer o valor econômico destes resíduos almejando o aprimoramento do desempenho de produtos e processos com custos mais acessíveis e gerando menos impactos ambientais.

Em se tratando do exposto, o problema deste trabalho consiste na **verificação da possibilidade de incorporar resíduos de lã de rocha e poliestireno em compósitos cimentícios**, em estudo exploratório realizado para o Estágio Supervisionado de Engenharia Química, em Tubarão (SC), no ano de 2018.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Incorporar resíduos de lã de rocha e poliestireno em massas cimentícias, transformando problemas ambientais em um negócio rentável, que segue o conceito da sustentabilidade e visa contribuir para com as reduções da extração de recursos naturais, de custos, de resíduos em aterros e de impactos ambientais.

1.2.1.1 Objetivos específicos

- a) Descrever a sustentabilidade ambiental sob a ótica da destinação de resíduos;
- b) Preparar a adição à base de lã de rocha;
- c) Produzir um aditivo a partir da sulfonação do poliestireno;
- d) Fazer ensaios de caracterização com os resíduos de lã de rocha;
- e) Realizar os ensaios na argamassa em seu estado fresco;
- f) Moldar os corpos de prova de argamassa e realizar os ensaios no estado endurecido;
- g) Analisar as viabilidades técnica e econômica.

1.3 RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA DA INVESTIGAÇÃO

Quando se discute a destinação de rejeitos vem à tona uma questão socialmente preocupante: o que será do meio ambiente enquanto não houver uma efetiva preocupação com tudo o quanto resulta da produção industrial, de construções e outras atividades humanas? A pesquisa em foco tem essa preocupação, em transformar rejeitos industriais em matéria prima para a construção civil. Está caracterizada a relevância social desse estudo.

Ao mesmo tempo, os resultados da pesquisa deverão ser socializados através do RIUNI e da possível geração de artigos científicos o que permitirá à pesquisadores, professores, governantes e empresários uma ampla discussão sobre o tema e sustentabilidade, fato gerador de novas ações e que explicita a importância do estudo para a ciência.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são aqueles resíduos em estados sólidos e semissólidos que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços, de varrição ou agrícola.

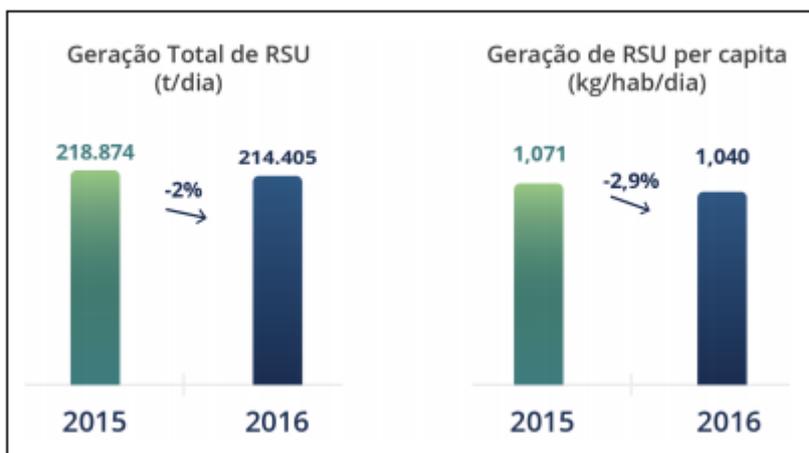
Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional e aumento de pessoas em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após 1980. Os problemas se caracterizavam por escassez de área de deposição de resíduos causadas pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001, p.1).

Em 1960 somente 34% da população mundial residia em cidades, o que correspondia a 300 milhões de pessoas. Em apenas 50 anos, esse percentual subiu para 52%, ou seja, nos anos 2000 cerca de 3,6 bilhões de pessoas viviam em cidades. (WORLDWATCH INSTITUTE, 2013 *apud* BRASILEIRO; MATOS, 2015). Cerca de 84% da população brasileira encontra-se vivendo nas cidades e a previsão é de um aumento para 90% em 2020. (IBGE, 2010). No Brasil, estes problemas são ainda mais complexos e preocupantes pela ínfima presença de soluções adequadas, um quadro típico dos países em desenvolvimento. (PINTO, 1999).

Das quase 70 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil anualmente, 42% ainda têm como destino lixões e aterros controlados, considerados ambientalmente inadequados. De acordo com este levantamento, e considerando as metas previstas na Política e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o País precisa investir R\$ 11,6 bilhões até 2031 na infraestrutura para universalizar a destinação final adequada dos resíduos sólidos. A este valor se somam R\$ 15,59 bilhões ao ano para custear a operação e manutenção das plantas que serão construídas. Os dados levantados pelo estudo da ABRELPE mostram que o Brasil investe pouco em infraestrutura e saneamento – uma média de 2,2% do PIB ao ano – e que há espaço para aumentar a participação privada no setor de resíduos sólidos, através de contratos de Parceria Público-Privada (PPP), que permitem soluções de longo prazo, com investimentos em infraestruturas e soluções avançadas. (ABRELPE; GO ASSOCIADOS, 2015, p.1).

No ano de 2016 foi gerado no Brasil aproximadamente 78,3 milhões de toneladas de RSU, o qual resulta em uma queda de 2% do montante gerado em 2015, conforme mostra o Gráfico 1. Deste total de resíduos gerados, 91% foram coletados, o que representa 71,3 milhões de toneladas. Os 7 milhões de toneladas de resíduos restantes não foram objeto de coleta, implicando uma destinação final imprópria. (ABRELPE, 2016).

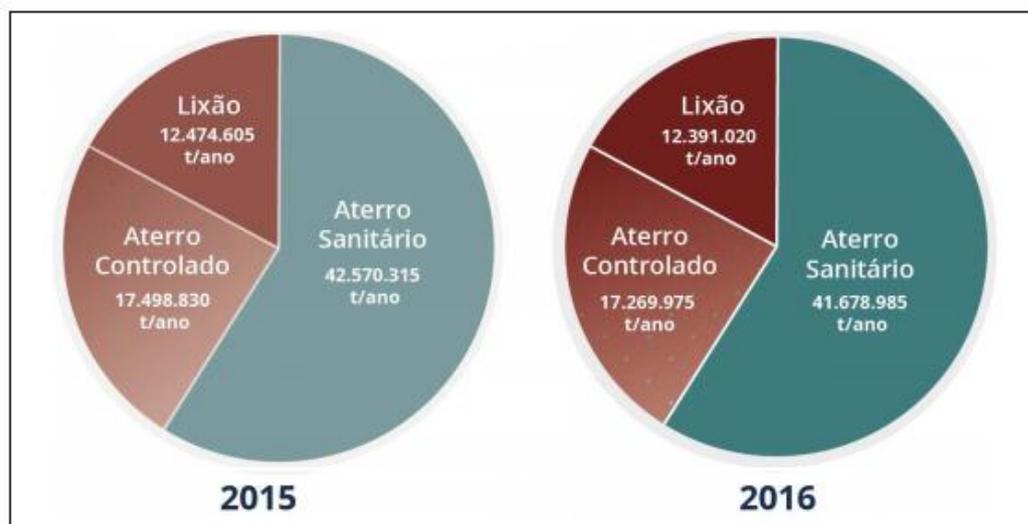
Gráfico 1- Geração de RSU no Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2016.

Como expõe o Gráfico 2, locais inadequados de descarte de resíduos como lixões e aterros controlados ainda estão presentes em todo o país e recebem mais de 81 mil toneladas de resíduos por dia, expondo o meio ambiente e as pessoas em risco. (ABRELPE, 2016).

Gráfico 2- Disposição final dos RSU coletados no Brasil (t/ano).



Fonte: ABRELPE, 2016.

Visando reverter esta situação as pessoas devem tomar consciência de que a mudança se inicia com a alteração de simples ações do seu cotidiano, como reduzir o consumismo, escolher produtos com menos embalagens, levar sacola para as compras, imprimir na frente e no verso da folha, doar objetos que possam servir a outras pessoas, etc.. (GEOAMBIETAL, 2012). No ramo industrial não deve ser diferente, as indústrias devem tentar fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e a entrada de matéria-prima não renovável. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001). Ações como estas compõem os 4 R's da sustentabilidade: Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Recuperar. (CSRNO, 2016).

Figura 1- Os 4R's da sustentabilidade.



Fonte: CSRNO, 2016.

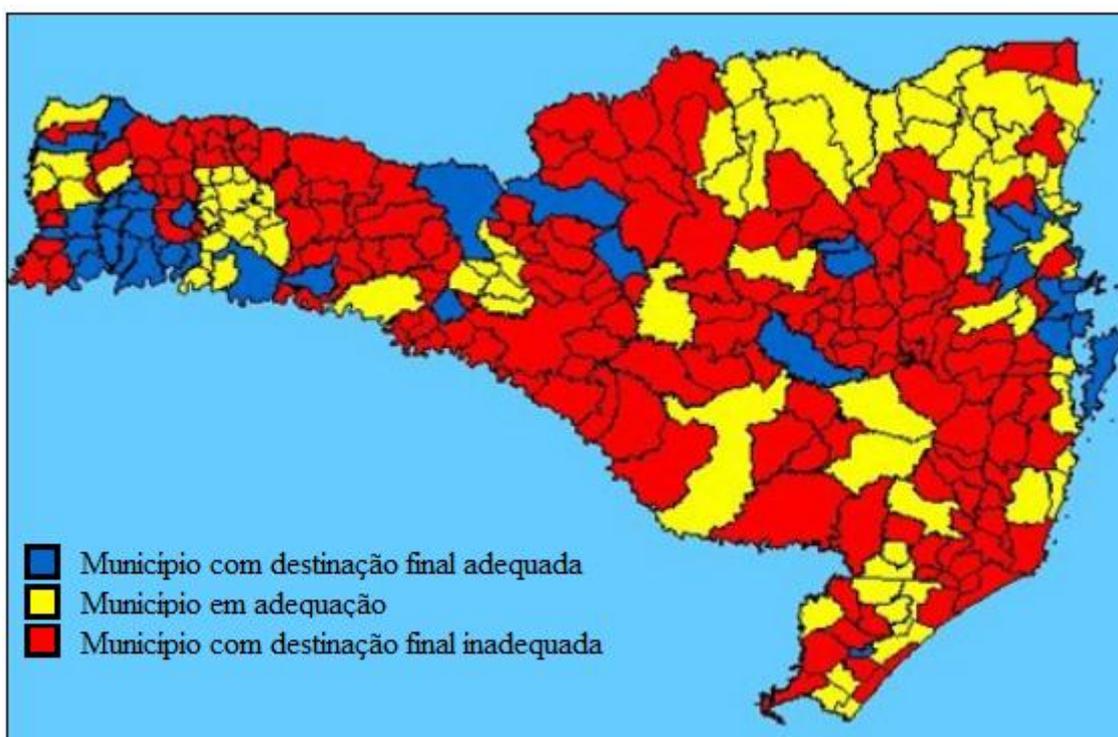
Há ainda um quinto R utilizado por alguns autores: reintegrar. Para Geoambiental (2012) os 5 R's da sustentabilidade seriam:

- **Reduzir** o consumo desnecessário e, conseqüentemente, a geração de lixo;
- **Reciclar** materiais para devolvê-los ao ciclo de produção, poupando todo o percurso dos insumos virgens;
- **Reutilizar** ao máximo antes de descartar os bens de consumo, aumentando sua vida útil;
- **Recuperar** os materiais que já foram descartados;
- **Reintegrar** produtos na natureza, transformando-os novamente em recursos naturais.

2.1.1 Geração e destinação em Santa Catarina

Em 2001, o Ministério Público idealizou o programa “lixo nosso de cada dia” para solucionar um grave problema do Estado de Santa Catarina: a ausência de locais adequados para o armazenamento do lixo na maioria dos municípios. Antes da implantação do programa, a maioria das cidades ainda utilizavam lixões para o depósito de seus resíduos, apenas 37 dos 293 municípios catarinenses dispunham de aterros sanitários tecnicamente adequados. Dois anos após a implantação do programa o número de municípios com aterros sanitários adequados aumentou para 202, um aumento de 12,6% para 69% de cobertura estadual. (COMITÊ DA BACIA DO RIO TUBARÃO E COMPLEXO LAGUNAR, 20??).

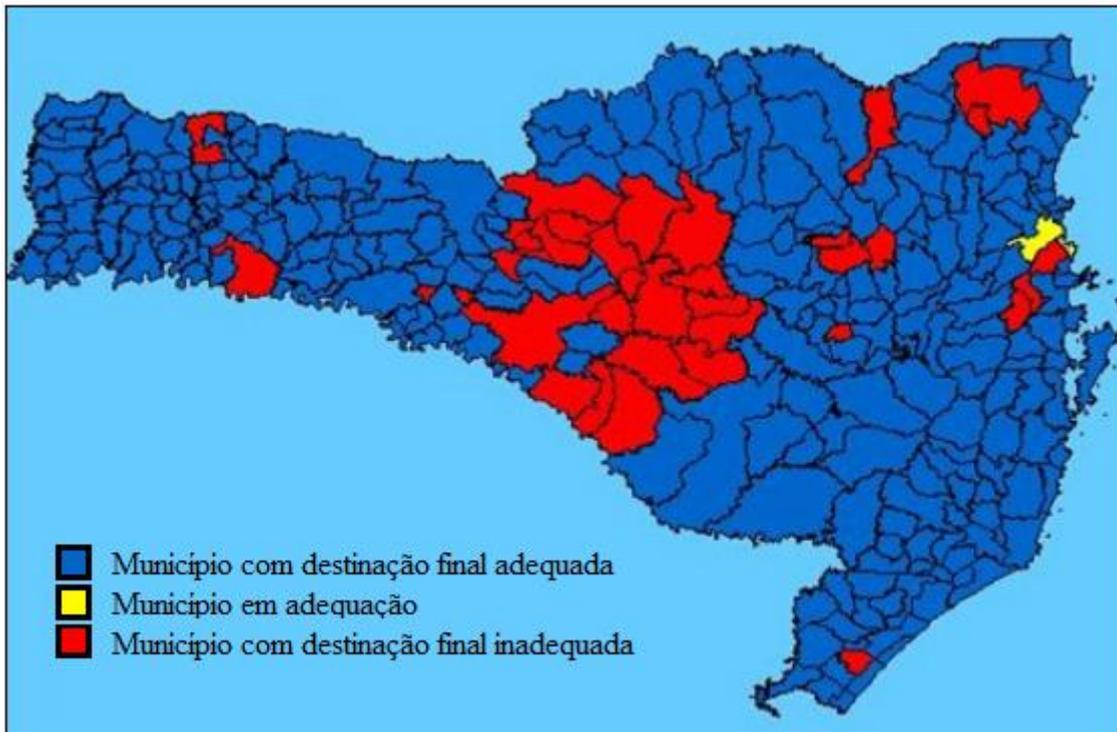
Figura 2 – Situação da destinação dos RSU em SC em maio de 2001.



Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/10875360/>, 2018.

A Figura 2 mostra como era a realidade do Estado antes da implantação do programa “lixo nosso de cada dia”, onde se vê que a menor parcela dos municípios fazia a destinação final adequada. Já na Figura 3, pode-se observar a significativa mudança que este programa fez para o Estado e o meio ambiente.

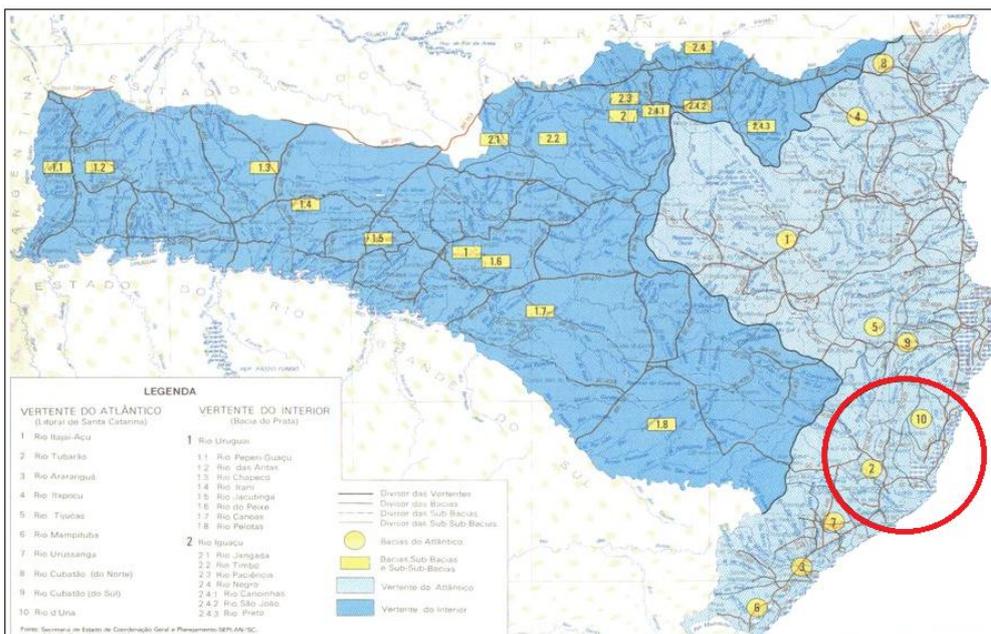
Figura 3 - Situação da destinação dos RSU em SC em julho de 2006.



Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/10875360/>, 2018.

As empresas A e B estão situadas na Bacia do Rio Tubarão, localizada ao sudeste do Estado de Santa Catarina, como mostra a Figura 4.

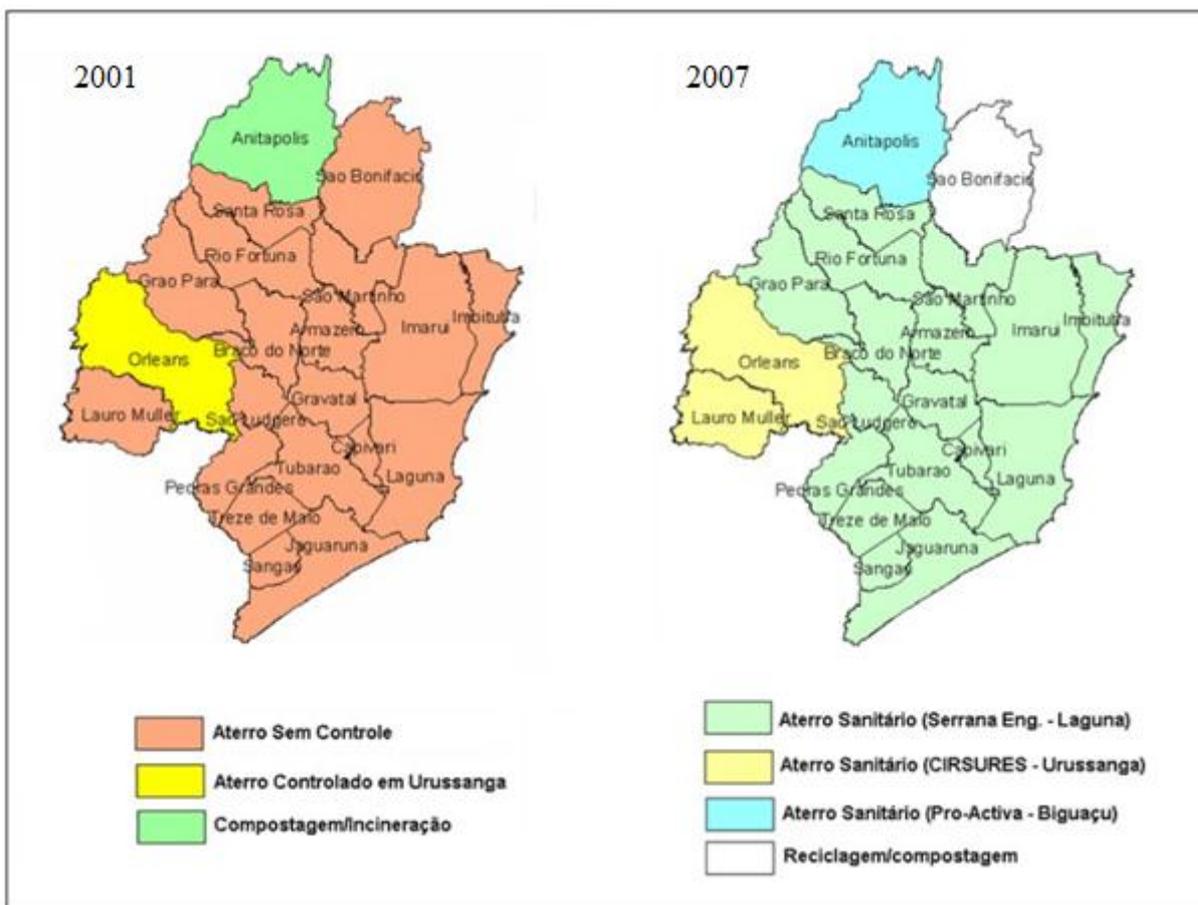
Figura 4 – Localização geográfica da Bacia do Rio Tubarão.



Fonte: Google Imagens, 2018 – adaptado pela autora, 2018.

As alterações quanto à destinação apropriado dos RSU nesta Bacia após o programa “lixo nosso de cada dia” são apresentadas na Figura 5. É aparente que a maioria das cidades adequou-se às novas práticas ambientais e deixou de lado a utilização de lixões.

Figura 5 – Destinação dos RSU nos municípios da Bacia do Rio Tubarão.



Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/10875360/> – adaptado pela autora, 2018.

Quanto à coleta seletiva, segundo pesquisa realizada em 2016 pela associação nacional Compromisso Empresarial para Reciclagem (Cempre), das 295 cidades de Santa Catarina, apenas 64 têm algum tipo de coleta seletiva. (FELDMANN, 2017).

A Serrana Engenharia, localizada no município de Pescaria Brava, é um aterro sanitário que recebe cerca de 7500 toneladas por mês de resíduos classificados como II-A e II-B de aproximadamente 20 municípios catarinenses. (SERRANA ENGENHARIA, 2018). Observa-se na Figura 6 a vista aérea deste aterro sanitário.

Figura 6 – Aterro sanitário da Serrana Engenharia em Pescaria Brava (SC).



Fonte: Google Imagens, 2018.

Como podem ser observados na imagem, diferentemente dos lixões, os lixos não ficam a céu aberto no aterro sanitário. No da Serrana Engenharia é diariamente feita a compactação e cobertura dos lixos com 40 centímetros de argila, além da impermeabilização do solo com lona plástica de polietileno de alta densidade (PEAD). (SERRANA ENGENHARIA, 2012).

2.2 RECICLAGEM

De acordo com a Lei Federal Nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos. Diferentemente da reutilização, que seria o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química.

O ato de reciclar consiste em desenvolver métodos adequados para a minimização e a valorização de resíduos, unindo a eficiência de resultados aos baixos custos e com um compromisso frente a preservação ambiental. (PINTO, 1999).

A reciclagem de resíduos industriais produz vantagens do ponto de vista econômico e ambiental, visto que promove a redução da extração de recursos naturais, poupa

os aterros sanitários, diminui custos de disposição e atenua os impactos ambientais. (SILVA, 2016).

Além da redução do consumo de matérias-primas e a superlotação de aterros, a reciclagem também serve para o aperfeiçoamento de projetos, como na substituição de materiais tradicionais por outros mais eficientes e que aumentem a durabilidade dos produtos. Bem como na redução global da poluição e a redução do consumo de energia, em especial a produzida pela queima de combustíveis não renováveis. (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Apesar de o lixo ter pouco valor, certos materiais contidos nele têm capacidade de gerarem lucro, uma vez que, se recuperados, podem substituir materiais virgens na fabricação de novos produtos. Neste aspecto é que se encontra a importância da triagem de resíduos, já que ela atua como um filtro entre a coleta e o descarte, valorizando o potencial de reaproveitamento de certos resíduos e amortizado a quantidade de insumos enviados a aterros. (MCKINNON; FAZAKERLEY; HULTERMANS, 2013).

Porém a reciclagem de resíduos, assim como qualquer outra atividade humana, também pode causar sérios danos ao ambiente. Há casos em que o processo de reciclagem pode ser ainda mais impactante do que o próprio resíduo, por este motivo alguns critérios devem ser previamente analisados, como o tipo de resíduo, a tecnologia empregada, e a utilização proposta para o material a ser reciclado. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

A quantidade de materiais e energia necessários ao processo de reciclagem pode representar um grande impacto para o meio ambiente. Todo processo de reciclagem necessita de energia para transformar o produto ou tratá-lo de forma a torná-lo apropriado a ingressar novamente na cadeia produtiva. Tal energia dependerá da utilização proposta para o resíduo, e estará diretamente relacionada aos processos de transformações utilizados. Além disso, muitas vezes apenas a energia não é suficiente para a transformação do resíduo. São necessárias também matérias-primas para modificá-lo física e/ou quimicamente. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001, p. 3).

Desta forma, até mesmo a reciclagem pode ir contra os princípios da sustentabilidade, de atender às necessidades desta geração sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades.

2.3 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A cadeia produtiva da construção civil é uma das que mais consome recursos naturais, chegando a consumir entre 14% e 50% dos recursos naturais de todo o planeta. (SJÖSTRÖM, 1996 *apud* JOHN, 2000).

As atividades de construção demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos modifica o perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais como modificação em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma danosa atividade ao meio-ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de instabilidade. (FERNANDES; AMORIM, 2014; CABRAL *et al.*, 2009 *apud* BRASILEIRO; MATOS, 2015, p. 178).

Tão só no Brasil são produzidas aproximadamente 35 milhões de toneladas de cimento Portland por ano. Assumindo que este cimento seja misturado com agregados a um traço médio de 1:6 (massa), exclusivamente para a produção de concretos e argamassas seriam precisos 210 milhões de toneladas de agregados. (JOHN, 2000).

Somando o fato da indústria da construção civil ser uma das maiores consumidoras de energia e matéria-prima do mundo com o crescimento populacional desenfreado, o dispêndio de recursos naturais torna-se cada vez maior e mais preocupante, o que acarreta um crescente número de pesquisas e projetos relacionados a um desenvolvimento sustentável no ramo da construção. (SILVA, 2016).

2.3.1 Reciclagem na construção civil

Por causa da imponência da cadeia produtiva da indústria da construção civil, fica evidente que não é possível alcançar o desenvolvimento sustentável sem que a indústria da construção também se torne sustentável. (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

A presença de resíduos reciclados na indústria da construção civil oferece um leque de produtos alternativos para uma mesma função e que, muitas vezes, proporcionam ainda mais eficiência. (JOHN, 2000).

A mais vasta experiência brasileira na área da reciclagem de resíduos provenientes de outras indústrias na produção de materiais de construção civil é a conduzida pela indústria cimenteira, a qual recicla, sobretudo, escórias de alto-forno básicas e cinzas volantes. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

YAMAMOTO *et al.* (1997) estimam que em 1996 a indústria cimenteira brasileira ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno básicas, além da calcinação de argilas e adição de *filler* calcário, reduziu a geração de CO₂ em 29% e uma economia de combustível de 28%. Adicionalmente, MARCIANO; KHIARA (1997) estimam que a indústria cimenteira economizou entre 1976 e 1995 cerca de 750 mil toneladas de óleo combustível queimando resíduos, como casca de arroz, serragem e pedaços de madeira, pó de carvão vegetal, pedaços de pneus e borrachas, cascas de babaçu, entre outros. Atualmente a indústria

cimenteira inicia no Brasil a prática de co-processamento, definido como calcinação de resíduos em fornos de cimento, reduzindo o consumo de energia e diminuindo o volume de resíduos em aterros. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001, p. 5).

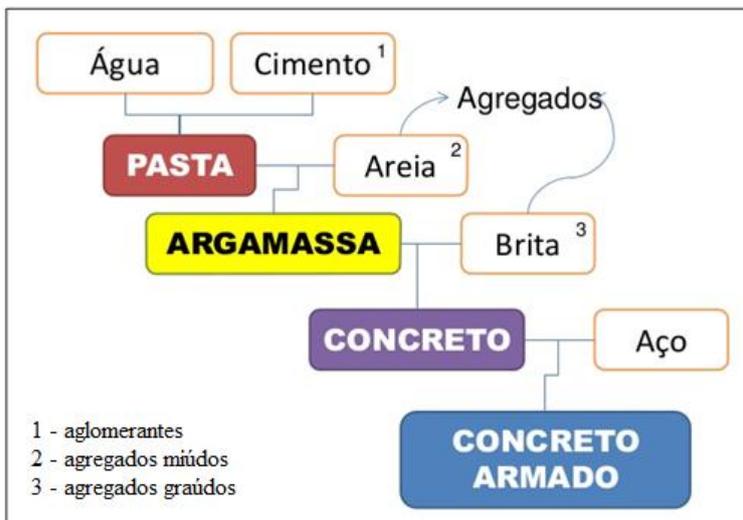
Além das vantagens ambientais, o reaproveitamento de resíduos industriais na construção civil também pode promover a redução de custos com matérias-primas e uma melhora no desempenho do produto.

2.4 ARGAMASSA E CONCRETO

A NBR 13529 (ABNT, 1995) define argamassa como sendo uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. Enquanto que a NBR 12655 (ABNT, 2006) determina o concreto de cimento Portland como sendo um “material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água)”.

Os conceitos de argamassa e concreto, assim como a diferença entre ambos, são mais bem explicados na Figura 7.

Figura 7 – Diferença entre pasta, argamassa, concreto e concreto armado.



Fonte: Google Imagens, 2018.

Portanto, o concreto nada mais é que a mistura de agregados graúdos à massa de argamassa.

2.4.1 Aplicação

Os revestimentos de argamassas têm as funções de proteger tanto as vedações quanto a estrutura contra a ação de agentes agressivos, evitando sua degradação precoce, aumentando a durabilidade e reduzindo custos de manutenção; de auxiliar as vedações a cumprirem com suas funções de isolamento termoacústico, estanqueidade à água e aos gases e segurança ao fogo; estéticas, de acabamento e aquelas relacionadas com a valorização da construção ou determinação do padrão do edifício. (SABBATINI, 1984 *apud* SILVA, 2006).

As argamassas podem ser de três tipos, AC-I, AC-II e AC-III, sendo diferenciadas somente pelo consumo dos seus três constituintes básicos, o cimento, a areia e a água, os quais alterarão a aderência e a retenção de água. A argamassa AC-I é habitualmente utilizada para o assentamento de revestimentos e pisos cerâmicos em ambientes internos. Já a AC-II, pode ser utilizada tanto em ambientes internos quanto em ambientes externos, pois suporta as variações de temperatura, umidade e ação do vento, podendo ser utilizada para revestimento de paredes e fachadas, pisos em áreas externas, assentamento de revestimento de piscinas de água fria e pisos cerâmicos industriais. A AC-III é a mais aderente das três, desta forma, é indicada para assentamento de revestimentos cerâmicos em fachadas onde o risco de acidentes por queda das peças é mais acentuado, como em piscinas de água quente, sauna e revestimentos de placas grandes - maiores que 60x60cm. (PEREIRA, 2018).

O concreto, por outro lado, possui inúmeros tipos, como convencional, bombeável, rolado, de alta resistência inicial, leve, pesado, pré-moldado, protendido, de alto desempenho, autoadensável, dentre outros. Os concretos são empregados em obras civis (paredes de casas, edifícios, pavimentação), industriais (barragens, apoio de equipamentos, isolante radioativo em usinas nucleares), em peças pré-moldadas (lajotas, pilares, blocos de isolamento termoacústico), como contra peso em gasodutos, entre muitas outras aplicações. (CONSTRUCAOCIVILPET, 2012).

2.4.2 Constituintes

2.4.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland, ou apenas cimento, é um material cerâmico que em contato com a água produz reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, o que leva o material a adquirir resistência mecânica. (INDÚSTRIA HOJE, 2014).

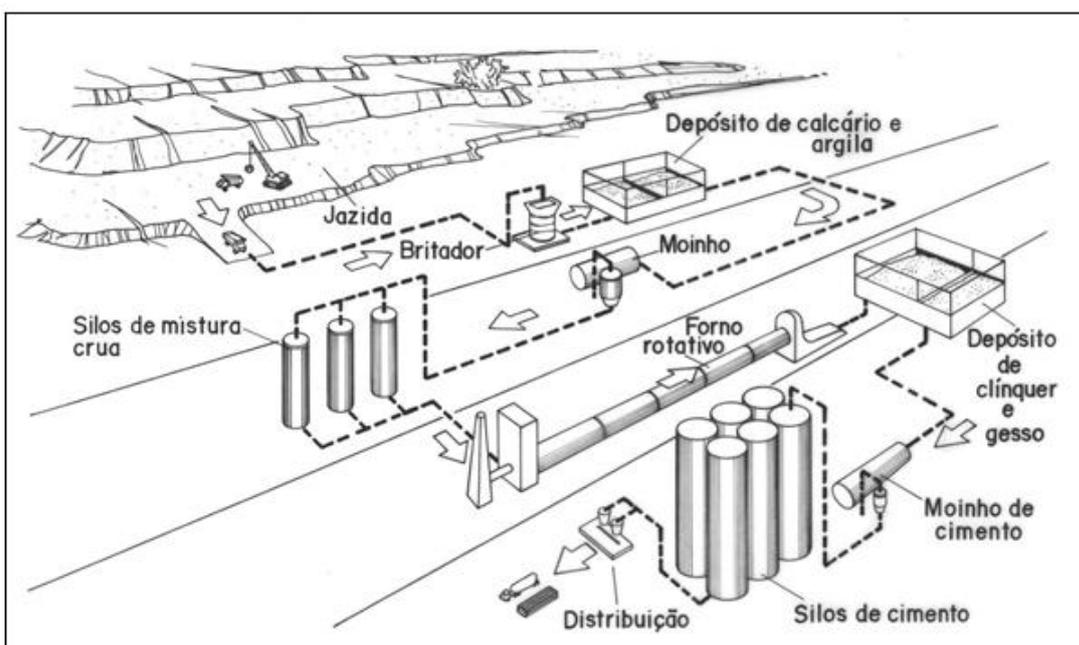
Conforme a NBR 12655 (ABNT, 2006) o cimento Portland é um “aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante essa operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a essa mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores indicados nas normas específicas”.

Entre os materiais componentes da argamassa e do concreto, o cimento é o que demanda maior custo e consumo energético para produção. (PEREIRA, 2010).

O clínquer é o principal elemento que constitui o cimento. É um pó homogêneo de diferentes matérias-primas moídas e misturadas que, quando submetido ao processo de clinquerização, se transforma em rocha. A principal matéria-prima para a fabricação do clínquer é a rocha calcária, em menor proporção utiliza-se a argila, óxidos de ferro e óxido de alumínio. (eCYCLE, 2018).

Na Figura 8 é apresentado o processo de fabricação do cimento Portland, o qual se inicia com a extração das matérias-primas nas minas por meio de detonações. Na sequência esses materiais são britados, moídos e homogeneizados para, então, sofrerem o processo de clinquerização no forno rotativo, o qual opera a altíssimas temperaturas de até 1450 °C. Fabricado o clínquer, este é então armazenado junto às outras matérias-primas que compõem o cimento, como o gesso, o calcário e a pozolana ou a escória. Dependendo da quantidade de cada produto obtém-se um tipo diferente de cimento. (INDÚSTRIA HOJE, 2014).

Figura 8 - Processo de fabricação do cimento Portland.



No forno rotativo ocorre a reação química de calcinação das rochas calcárias (CaCO_3) em cal virgem (CaO) com a liberação de grandes quantidades de gás carbônico (CO_2). A cada 1000 Kg de calcita (CaCO_3) calcinada são gerados 560 Kg de CaO e 440 Kg de CO_2 , o que torna a reação química de calcinação a responsável por aproximadamente metade das emissões de CO_2 do processo de produção do cimento, enquanto o consumo de energia sob a forma de calor (queima de combustíveis) responde pelo restante. (COSTA *et al.*, 2013).

2.4.2.2 Agregados

Os agregados utilizados na construção civil são os insumos minerais mais consumidos em todo o mundo. A NBR 12655 (ABNT, 2006) os classifica como sendo um “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o preparo de argamassa e concreto”.

Os agregados têm três funções principais: a de material de enchimento, a de fornecer à pasta de cimento partículas que resistam às cargas aplicadas, ao desgaste mecânico e à percolação de intempérie e a de reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega, endurecimento e variações de umidade. (MINEROPAR, 2004 *apud* SILVA, 2006).

Os agregados são divididos em miúdos e graúdos. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregados miúdos são “agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm [...]” enquanto que os graúdos são “agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm [...]”.

A distribuição granulométrica da areia influencia diretamente no desempenho da argamassa, interferindo na trabalhabilidade e no consumo de água e aglomerantes, no estado fresco; no revestimento acabado, exerce influência na fissuração, na rugosidade, na permeabilidade e na resistência de aderência (ANGELIM *et al.*, 2003 *apud* SILVA, 2006, p. 14).

Os agregados naturais são aqueles já encontrados na natureza sob a forma definitiva de utilização, como as areias de rios e dunas. Por outro lado, os artificiais são aqueles que precisam de modificações físicas para estarem aptos ao uso, como é o caso da brita - areia de britagem de rochas como basaltos, calcários, sílex, pórfiros, arenitos, quartzitos e gnaisses. (SILVA, 2006).

2.4.2.3 Aditivos

As NBRs 12655 (ABNT 2006) e 11768 (ABNT, 2011) consideram o aditivo como sendo um produto adicionado em pequenas quantidades, geralmente inferior a 5% em relação à massa de cimento, durante o processo de fabricação de argamassas e concretos, com a finalidade de modificar determinadas propriedades do material fresco ou endurecido, no sentido de melhor ajudá-las a determinadas condições.

Ou seja, o aditivo serve para intensificar determinada propriedade do composto cimentício, desta forma, a argamassa e o concreto precisam ter, previamente, certas características para que o aditivo possa acentuá-las, retardá-las, acelerá-las ou plastificá-las.

A maioria dos fabricantes de aditivos recomenda não adicionar teores maiores que 5% em relação à massa do cimento, pois o excesso do produto poderá causar o efeito contrário e prejudicar as propriedades da argamassa e do concreto; um exemplo disto é o retardo da pega na superdosagem de um plastificante. (RIBEIRO, 2007).

As partículas de cimento Portland, quando entram em contato com a água, que tem molécula polar, tendem a se flocular e aprisionar água entre seus grãos, reduzindo a disponibilidade de água e a lubrificação da mistura. Isso resulta em um aumento da viscosidade da pasta e na redução da área específica dos grãos de cimento disponíveis para as reações de hidratação (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009 *apud* SCHANKOSKI, 2017, p. 83).

Em função disso, o uso de aditivos dispersantes é essencial. Entre os aditivos dispersantes redutores de água estão os plastificantes, capazes de reduzir cerca de 10 a 15% da água da mistura.

Os aditivos à base de lignossulfonato atuam, principalmente, por repulsão eletrostática, em que os grupos polares do aditivo são atraídos e adsorvidos pelas regiões carregadas eletricamente nas partículas de cimento, logo, ocorre a dispersão das partículas pelo efeito das cargas opostas. (FERRON, 2008 *apud* SCHANKOSKI, 2017). Já os aditivos à base de policarboxilato atuam não só pela repulsão eletrostática, mas principalmente pela repulsão estérica produzida pela longa cadeia do polímero, produzindo um forte efeito dispersante. (HARTMANN; HELENE, 2003 *apud* SCHANKOSKI, 2017).

2.4.2.4 Adições

As adições, também chamadas de materiais cimentícios suplementares, são materiais que substituem parte do cimento nas formulações de argamassas e concretos.

A NBR 13529 (ABNT, 1995) define as adições como sendo “materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração no proporcionamento”.

Ou seja, diferentemente dos aditivos, as adições conferem às argamassas e aos concretos propriedades que eles originalmente não tinham. (RIBEIRO, 2007).

2.4.2.4.1 Pozolanas

A NBR 12653 (ABNT, 2012) define as pozolanas como “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

De acordo com Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC 2012), o cimento brasileiro emite em torno de 600 kg de CO₂ por tonelada produzida, e com as adições de pozolanas, evita a necessidade de produção de clínquer, trazendo grande impacto de redução das emissões de CO₂ geradas no processo de calcinação do calcário e queima dos combustíveis. (MEDEIROS, 2015, p. 36).

O emprego de pozolanas em cimento, além de contribuir com o desenvolvimento sustentável (por substituir parte do cimento nas formulações de argamassas e concretos e, muitas vezes, por serem resíduos de outros processos), também melhora o desempenho da matriz cimentícia, originando matrizes mais duráveis, devido à redução do hidróxido de cálcio, e mais resistentes, devido à geração de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. (SILVA, 2016).

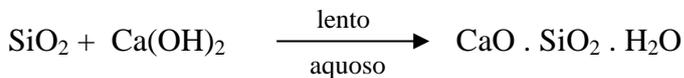
Diversos subprodutos como a cinza volante, argila ativa, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno, sílica fume, resíduo de porcelanato apresentam propriedades pozolânicas, quando utilizadas como adições minerais. O que se mostra uma alternativa à disposição desses resíduos, e além, incorporando esses na produção de materiais cimentícios é obtido uma melhora no desempenho do cimento Portland e uma redução nos custos de produção (YAMAMOTO *et al*, 1997; SILVA, 2011 *apud* SILVA, 2016, p. 2).

Os materiais pozolânicos possuem um elevado teor de Sílica Reativa (SiO_2), a qual reage com o Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)_2) produzido na hidratação do clínquer de cimento e se transforma em compostos aglomerantes similares aos produzidos pelo cimento comum, conforme mostram as reações:

- Cimento Portland comum:



- Cimento Portland pozolânico:



Onde:

$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ – Silicato Tricálcico

H_2O – Água

$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – Silicato de Cálcio Hidratado

Ca(OH)_2 – Hidróxido de Cálcio

SiO_2 – Dióxido de Silício

Os vazios capilares do cimento Portland pozolânico são mais bem preenchidos se comparados ao do cimento Portland comum, já que os cristais de Hidróxido de Cálcio são consumidos pelo gel de Silicato de Cálcio Hidratado durante a reação pozolânica, logo, esta lenta reação promove um refinamento dos poros da estrutura, e por consequência, um ganho de resistência e aumento da impermeabilidade do sistema. Além disto, como a reação consome o Hidróxido de Cálcio, há um ganho de durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos. (MEHTA&MONTEIRO, 2014 *apud* SILVA, 2016).

2.4.3 Cura

O processo de cura da argamassa e do concreto é utilizado para desacelerar a evaporação (causada pelo sol, vento, umidade) da água de amassamento e permitir a completa hidratação do cimento. Quando a cura é bem conduzida há um aumento da resistência da argamassa e do concreto em cerca de 30%, além de diminuir a incidência de

trincas e fissuras. A cura do concreto resume-se em manter a superfície da argamassa ou do concreto úmida durante um período de pelo menos 7 dias, podendo ser estendido dependendo das condições locais. (CONSTRUFACILRJ, 2013).

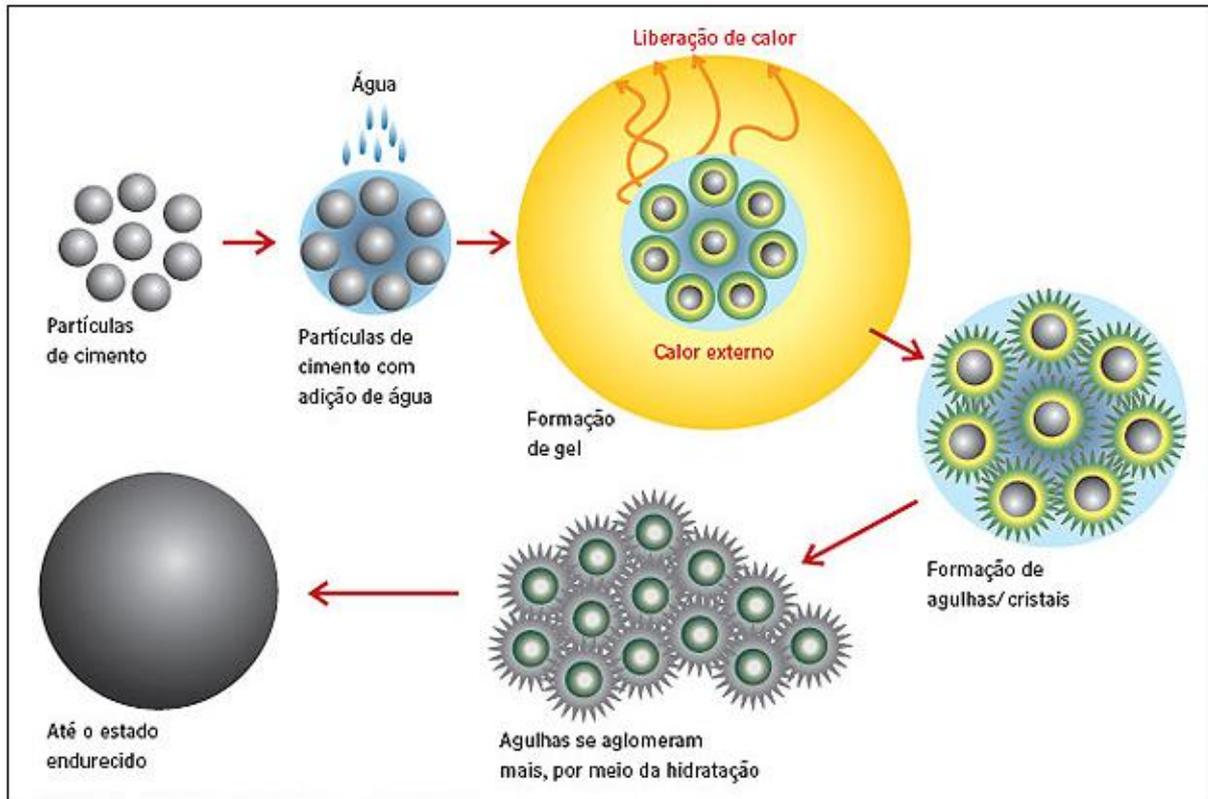
2.4.4 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento é o fenômeno responsável pelo endurecimento das argamassas e dos concretos e acontece em função do tempo, considerando que 80% do processo acontece até o final de 28 dias de cura e se conclui praticamente ao final de 365 dias. (TAYLOR, 1990 *apud* SILVA, 2016).

Durante a hidratação do cimento há uma liberação de calor chamada de “calor de hidratação”, o qual é de fundamental importância para a evolução das resistências das argamassas e dos concretos. A velocidade de hidratação de qualquer tipo de cimento é influenciada, principalmente, pela temperatura e pela finura do cimento. Com temperaturas inferiores a 15°C ou com o uso de água com temperaturas abaixo de 20°C é gerado o chamado “baixo nível de calor de hidratação”, responsável pelo retardamento das resistências iniciais. Com temperaturas inferiores a 10°C, além deste retardamento, pode ainda ocorrer a paralisação do início de pega do cimento mantendo a argamassa e o concreto em seu estado fresco. (LAGUNA; IKEMATSU, 2009).

Na Figura 9 são apresentados os 3 estágios do processo de aglomeração do cimento. No primeiro estágio, o de contato do cimento com a água, ocorre uma rápida dissolução dos grãos do cimento e sobem as concentrações de álcalis solúveis (Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^-) em solução, resultando em um pH de 12 a 13. No segundo estágio, os íons Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^- reagem com os silicatos e aluminatos e formam um gel de silicato de cálcio hidratado e cristais de etringita. Estes cristais formam uma barreira em torno dos grãos de cimento não hidratados, retardando novas hidratações e permitindo um período de trabalhabilidade durante o qual o concreto deve ser lançado e assentado. (FREITAS JR., 2013).

Figura 9 – Processo de aglomeração do cimento.



Fonte: Mehta&Monteiro, 1994 *apud* téchne, 2009.

Durante o terceiro estágio a concentração de íons Ca^{2+} continua a aumentar, reiniciando lentamente a hidratação dos grãos de cimento atrás da barreira. Com a supersaturação de Ca^{2+} , seguida da precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ocorre uma rápida hidratação dos grãos de cimento gerando mais gel de silicato de cálcio hidratado e etringita. A formação de gel de silicato de cálcio hidratado e o intertravamento das partículas é que promovem a pega e o endurecimento do cimento. (FREITAS JR., 2013).

2.4.5 Propriedades da argamassa e do concreto

2.4.5.1 Consistência

É a propriedade pelo qual a argamassa e o concreto tendem a resistir à deformação em seu estado fresco. (CINCOTTO *et al.*, 1995 *apud* SILVA, 2006). Ela pode ser classificada como: fluida, quando os grãos ficam imersos na pasta; seca, quando a pasta preenche os vazios entre os grãos; e plástica, quando a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados. (SILVA, 2006).

2.4.5.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a facilidade de manuseio da argamassa e do concreto. É uma propriedade que tem relação direta com a consistência, uma vez que se chama de trabalhável uma argamassa/concreto que se distribui facilmente durante o assentamento, não gruda na ferramenta durante a aplicação, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorptivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a operação seja concluída. (SABBATINI, 1984 *apud* SILVA, 2006).

2.4.5.3 Coesão e tixotropia

A coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e do concreto no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante. (CINCOTTO *et al.*, 1995 *apud* SILVA, 2006). Já a tixotropia é a propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas e reversíveis do estado sólido para o estado gel. (SELMO, 1989 *apud* SILVA, 2006).

No caso da argamassa e do concreto essas duas propriedades estão conectadas, uma vez que o estado gel é alcançado em função da coesão entre os componentes do aglomerante. (CINCOTTO *et al.*, 1995 *apud* SILVA, 2006).

2.4.5.4 Plasticidade

Plasticidade é a propriedade pela qual a argamassa e o concreto, no estado fresco, tendem a permanecer deformados após a redução das tensões de deformação. (SILVA, 2006).

2.4.5.5 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade da argamassa e do concreto, no estado fresco, de manterem suas consistências ou trabalhabilidades quando sujeitos a ações que provoquem a perda de água por evaporação, sucção pelo substrato ou pela hidratação do cimento. (CINCOTTO *et al.*, 1995 *apud* SILVA, 2006).

Rosello, 1976 *apud* Selmo, 1989 diz que as argamassas e os concretos possuem uma tendência de conservar a água necessária para molhar as partículas dos aglomerantes e

dos agregados e a água em excesso é cedida facilmente, devido à absorção do substrato. (SILVA, 2006).

2.4.5.6 Aderência

A aderência é a capacidade que a interface substrato/argamassa ou substrato/concreto possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem se romper. (SABBATINI, 1984 *apud* SILVA, 2006).

2.4.5.7 Elasticidade

Elasticidade é a capacidade que a argamassa e o concreto têm, no estado endurecido, de se deformar sem se romper quando sujeitas a ações diversas, e de retornar à dimensão inicial quando cessam estas ações. (SABBATINI, 1984 *apud* SILVA, 2006).

2.5 LÃ DE ROCHA

A lã de rocha é uma substância inorgânica fibrosa produzida a partir de matérias-primas abundantes na natureza (rocha basáltica e outros minerais) e recicladas (escória metalúrgica) através da fusão em altas temperaturas (1500°C) e sua posterior transformação em fibras por centrifugação; estas finas fibras (de 6 a 8 micra) são, então, aglomeradas com resinas especiais e aditivos que proporcionam espessuras controladas e propriedades de repelência à água e ausência de poeira. (ROCKFIBRAS, 2012).

Esta lã mineral é o material mais utilizado mundialmente para isolamentos térmicos e acústicos por apresentar características como baixa condutividade térmica, tolerância a elevadas temperaturas, incombustibilidade, inércia química e alto índice de absorção acústica. (PEREIRA, 2010).

A estrutura formada pelo entrelaçamento de suas fibras impede a movimentação do ar no seu interior, resultando em produtos com propriedades térmicas, acústicas e de resistência ao fogo que nenhum outro material isolante pode alcançar, mesmo com o passar do tempo. (ABRALISO, 2013).

A lã de rocha é um dos únicos produtos que economiza mais de cem vezes a energia empregada em sua produção. Ao longo do seu ciclo de vida, por ser mineral e

inorgânica, não se deteriora, garantindo seu desempenho e economia de energia indefinidamente. (ROCKFIBRAS, 2012).

2.5.1 Propriedades

Segundo Rockfibras (2012), a lã de rocha apresenta características como:

- Baixa condutividade térmica em larga faixa de temperatura, de - 270 à + 750 °C;
- Elevada resistência à temperatura e ao fogo: seu ponto de fusão é acima de 1100 °C e a temperatura máxima recomendada para operação contínua é de 750°C;
- Incombustível: quando em contato com chama, não queima e não emite fumaça tóxica como as espumas plásticas (poliuretano, EPS, PVC...);
- Elevada absorção sonora atingindo 100% em várias frequências;
- Quimicamente inerte, podendo ser utilizada em contato com todos os tipos de materiais. Não causa corrosão;
- Fácil manuseio, extremamente leve e fácil de ser cortada e instalada;
- Comercializada em várias densidades: de 32 kg/m³ a 200 kg/m³, dispondo de produtos leves e flexíveis até muito rígidos.

2.5.2 Aplicações

Por não reagir quimicamente com o meio em que é submetida, a lã de rocha tem uma elevada procura como material isolante, já que pode ser empregada em diversos ramos de serviços sem comprometer a estrutura do processo. Seu coeficiente de condutividade térmica relativamente pequeno, de aproximadamente 0,033 W/m°C, é outro quesito altamente atrativo para o meio industrial. (MENDES, 2017).

A lã de rocha atende a diversos segmentos da indústria, como refinarias, petroquímicas, cerâmicas, automotivo, naval, geração de energia elétrica e construção civil. É um material que garante segurança e aumento de rendimento, já que evita o hiperaquecimento e mau funcionamento de máquinas, proporcionando maior produtividade e economia de energia. (BIOLÃ, 2016).

A lã de rocha é comercializada em painéis, tubos, mantas, feltros ou flocos, atendendo a diversas necessidades específicas. No ramo da construção civil é usada em

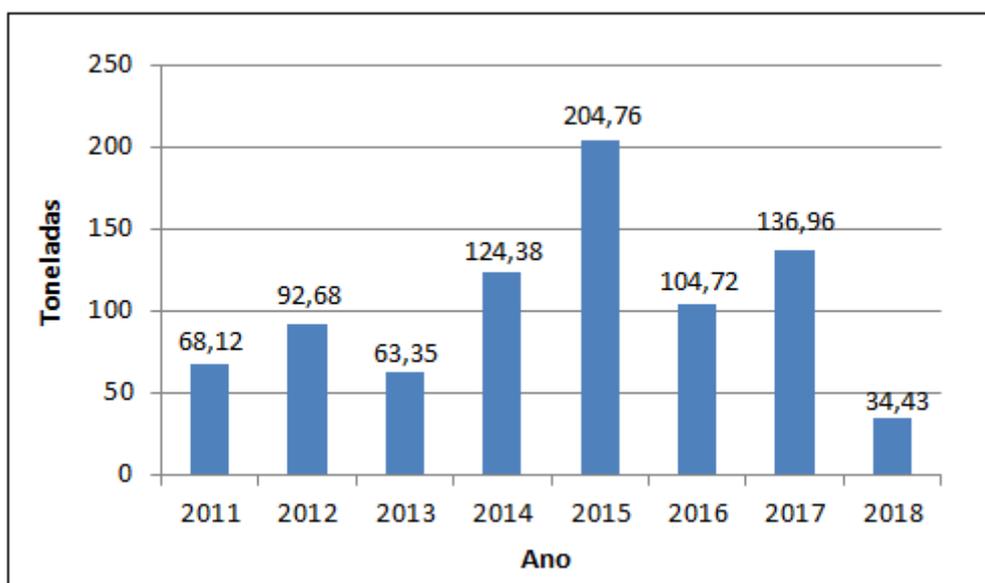
telhados, paredes, pisos e dutos de ar-condicionado de residências, estúdios, salas de cinema, entre outros. Neste ramo, é também utilizada como proteção térmica adicional às estruturas de concreto. (PEREIRA, 2010). Já na indústria química, é empregada em isolamentos de tubulações, tanques, aquecedores, caldeiras, fornos e demais equipamentos que operem com temperaturas elevadas ou que emitam ruídos.

Outra aplicação da lã de rocha é na agricultura como solo sintético para plantações, em que o sistema hidropônico da lã de rocha serve como um sistema fechado em que toda água é fornecida para as plantas, reduzindo consideravelmente as perdas por evaporação e anulando as perdas por escorrimento. (BALDUZZI, 2015).

2.5.3 Resíduos

Apesar da lã de rocha ser um material com uma longa vida útil, de tempos em tempos ela precisa ser substituída, quer por manutenção nos equipamentos em que é empregada, quer por desgastes em função da variação da temperatura interna e externa ou aos impactos em que o material é submetido. No Gráfico 3 constam as quantidades de resíduos de lã de rocha gerados pela empresa B e gerenciados pela empresa A desde janeiro de 2011 até junho de 2018.

Gráfico 3 - Quantidade de resíduos de lã de rocha gerados pela empresa B.



Fonte: Empresa A, 2018.

Tendo em vista a significativa quantidade de resíduos de lã de rocha gerados anualmente pela empresa B, a empresa A busca alternativas para a reciclagem destes resíduos que, atualmente, são destinados a aterro sanitário por não apresentar periculosidade (classe II-A).

Figura 10 - Resíduo de lã de rocha da empresa B.



Fonte: da autora, 2018.

Conforme mostra análise química por fluorescência de raios X, os resíduos de lã de rocha são constituídos por 30,5% de SiO_2 , 26,8% de CaO , 22,6% de Fe_2O_3 , 7,1% de Al_2O_3 , 5,5% de TiO_2 , 3% de MgO , 2,6% de SO_3 , 1,4% de K_2O e 0,5% de MnO . (FONTES *et al.*, 2014). Além destes, nos resíduos também podem estar presentes certas quantidades de óleos lubrificantes, graxa, poeira, ferrugem, pedaços metálicos de arames que foram usados para fixar o material e outros. O ANEXO A mostra a caracterização do resíduo de lã de rocha proveniente da empresa B.

2.6 POLIESTIRENO

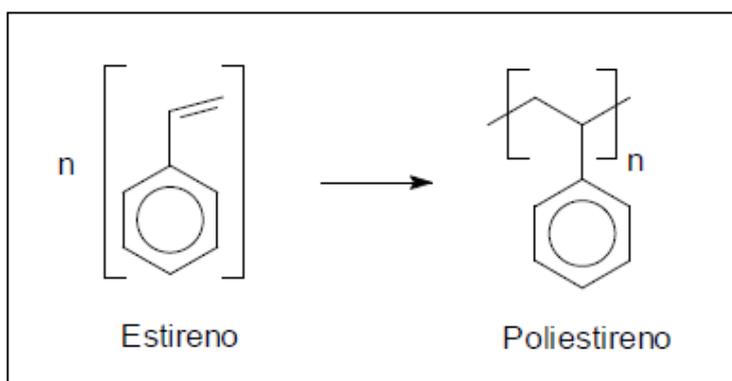
Os polímeros são os materiais que têm a maior contribuição para o impacto ambiental, já que vêm gradativamente substituindo materiais como vidros e metais em função de sua baixa densidade, baixo custo e de propriedades físicas e químicas bem versáteis. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2008).

O poliestireno, ou apenas PS, é um dos integrantes desta grande família de polímeros. É um polímero apolar, quimicamente inerte, de fácil polimerização e que apresenta boa processabilidade. (MARTINS, 2002).

O PS é um dos polímeros mais utilizados no mundo todo, estima-se que apenas no Brasil são consumidos aproximadamente 300 mil toneladas de PS por ano. (BNDES, 2002 *apud* SOLDI, 2006).

A obtenção do PS é através da polimerização do estireno, realizada por mecanismos de reação via radicais livres. (SOUSA; NUNES, 2014). Os processos mais comumente utilizados são os de polimerização em massa, em solução, em suspensão e em emulsão. (SOLDI, 2006). A matéria-prima para sua produção é originada, principalmente, do petróleo e do gás natural devido ao seu processo de fabricação possuir um menor custo em relação à extração a partir da madeira, carvão ou CO₂. (OLIVEIRA, 2013).

Figura 11 – Representação esquemática da polimerização do estireno.



Fonte: Soldi, 2006.

Na Figura 11 é representado o monômero estireno antes e após sua polimerização. Antes, como um hidrocarboneto líquido, incolor e de ponto de ebulição 145°C e depois, como uma macromolécula sólida, branca e de ponto de fusão 220°C.

2.6.1 Propriedades

Algumas das propriedades que fazem o poliestireno ser um dos termoplásticos mais consumidos no mundo é a baixa densidade (1,04 g/cm³), boa resistência mecânica, térmica e elétrica, alto índice de refração, elevada resistência a álcalis e ácidos, baixa absorção de umidade, baixo custo, fácil moldabilidade a quente, resistência ao envelhecimento e a

versatilidade, como a possibilidade ilimitada de cores, formatos e tamanhos. (SOLDI, 2006; MOTTA, *et al.*, 2016; OLIVEIRA, 2013).

2.6.2 Aplicações

O poliestireno é um dos polímeros de maior participação na produção de materiais descartáveis tais como copos, pratos, bandejas de alimentos, sacolas plásticas e espumas para embalagens e proteção para equipamentos eletrônicos. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2008; ROYER *et al.*, 2005; MOTTA *et al.*, 2016).

2.6.3 Resíduos

O consumo de produtos descartáveis de PS representa uma considerável porção dos RSU gerados pela humanidade. Seu uso e descarte devem ser repensados almejando um consumo sustentável, já que após cumprirem sua tarefa grande parte vira resíduo. (SOLDI, 2006; MOTTA *et al.*, 2016).

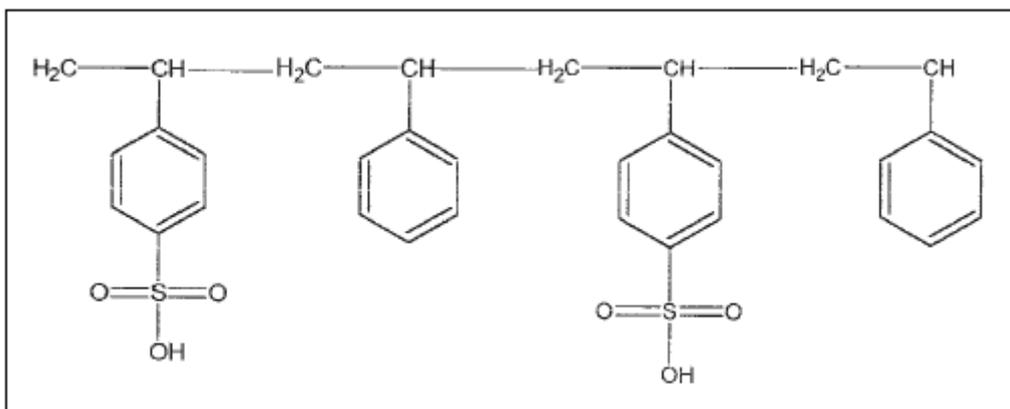
A demanda mundial de PS, em 2001, atingiu em torno de 10,5 milhões de toneladas e a demanda da América do Sul, em torno de 450 mil toneladas, tendo o Brasil como maior produtor de PS e responsável por 64% da produção, com uma taxa de crescimento da produção de 5,2% ao ano, no período de 1993 até o presente, sendo uma das regiões mais dinâmicas do mundo nesse segmento. Desta produção, cerca de 45% é destinado à produção de embalagens e descartáveis. (BNDES, 2002 *apud* SOLDI, 2006, p. 25).

Devido ao elevado consumo de poliestireno, o destino final observado para estes materiais são aterros e lixões, visto que este raramente é reciclado em função do baixo custo da resina virgem, não contrabalançando economicamente o processo da reciclagem. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2008).

2.6.4 Sulfonação

Um caminho alternativo à reciclagem do PS pós-consumo é a sua transformação química para a produção de um novo material. O PS é um polímero que possibilita o processo de sulfonação devido à sua capacidade de sofrer substituições eletrofílicas, no qual, os grupos sulfônicos ($\sim\text{SO}_3\text{H}$) se unem aos anéis benzênicos que estão ligados à cadeia polimérica, como mostra a Figura 12. (ROYER *et al.*, 2005; KUCERA; JANCAR, 1998).

Figura 12 – Fragmento de uma estrutura de poliestireno sulfonado.



Fonte: Assunção *et al.*, 2004.

As condições de reação necessárias para que as transformações químicas ocorram satisfatoriamente sobre a cadeia do polímero precisam ser ajustadas, considerando a dificuldade adicional geralmente relacionada ao impedimento estérico promovido pelo tamanho da cadeia. Portanto, até a mais simples das reações orgânicas pode se tornar extremamente complexa quando realizada sobre uma cadeia polimérica. (SOLDI, 2006, p. 52).

O poliestireno sulfonado (PSS) pode ser utilizado como aditivo para argamassas e concretos e como agente floculante em estações de tratamento de águas industriais. O mecanismo de ação para ser utilizado como aditivo é fundamentado no fenômeno de adsorção do polieletrólito (PSS) pelas partículas de cimento, conferindo carga negativa às partículas. Estas cargas negativas provocam repulsão entre si favorecendo sua dispersão em água e evitando a floculação do cimento. (ROYER *et al.*, 2005; MOTTA *et al.*, 2016).

A efetividade dessas substâncias é fortemente influenciada por sua estrutura, peso molecular e atividade superficial. A atividade superficial está relacionada com a presença de grupos polares na estrutura. Estes grupos interagem com as partículas do cimento e aprimoram sua dispersão e homogeneidade. Como resultado, um ganho de trabalhabilidade do concreto é observado para uma dada relação água/cimento (a/c), a qual pode ser utilizada para reduzir a quantidade de água no concreto. A redução da relação (a/c) melhora as propriedades do concreto, especialmente a resistência à compressão; entretanto, a relação a/c não pode ser reduzida drasticamente porque, por conta disto, o concreto se tornaria seco e de difícil compactação. (HOVER, 1998 *apud* ASSUNÇÃO *et al.*, 2004, p. 1534 – tradução nossa).

O grau de sulfonação indica a porcentagem em mol de grupos sulfônicos que estão presentes na cadeia polimérica. (PROENÇA, 2009). Ele pode ser obtido através da análise de espectroscopia na região do infravermelho ou pela volumetria de neutralização.

Caso seja utilizada a volumetria de neutralização, devem ser aplicadas as seguintes equações para descobrir o grau de sulfonação:

$$X = \frac{W}{MM} \qquad M_{NaOH} = N_{NaOH} \cdot V_{NaOH} \qquad SD = \frac{M}{X} \cdot 100$$

Onde M é a molaridade e N a normalidade da solução padrão de NaOH, V é o volume de NaOH necessário para neutralizar o meio, W é a massa do polieletrólito, SD é o grau de sulfonação e MM é a massa molar da unidade monomérica, que para o estireno é de 104 g/gmol.

A sulfonação do poliestireno pode ser realizada de duas formas, homogênea (quando o polímero e o agente sulfonante estão na mesma fase - líquida) e heterogênea (o polímero permanece sólido e o agente sulfonante líquido). A vantagem da rota homogênea é o emprego de baixas concentrações de ácido sulfúrico, com isto, tem-se um menor custo do processo. Enquanto que a vantagem em fazê-la em meio heterogêneo é a não utilização de solventes, o que facilita a separação dos produtos finais. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2018).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 A INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

Investigar sob os critérios metodológicos na direção da resposta à hipótese de trabalho (problema) e, sobretudo, permitir ao pesquisador desvendar cenários e realidades transformando-o em protagonista, naquele que possui autonomia para resolver problemas, não apenas de ordem acadêmica, mas, que lhes possibilite interpretar a realidade em que está inserido. Observa-se na descrição de Demo (2012, p. 36) essa relevância: “[...] o conceito de pesquisa inclui sofisticação e a especialidade, mas nisto jamais se esgota. O signo central da pesquisa é o questionamento sistemático, crítico e criativo, mais a intervenção competente na realidade, ou o diálogo crítico permanente com a realidade, em sentido teórico e prático”.

3.2 A PESQUISA REALIZADA

A investigação realizada foi caracterizada pelo método de abordagem quantitativo e método de procedimento do tipo experimental. O nível do estudo foi descritivo, não apenas pela razoável quantidade de material bibliográfico disponível, mas, sobretudo, porque foi realizado com a manipulação de variáveis independente (material cimentício) e dependentes (frações de lã de rocha e frações de poliestireno utilizados).

A força básica da pesquisa experimental está no controle relativamente alto da situação experimental e consequentemente das possíveis variáveis independentes. Isto significa que as relações podem ser estudadas isoladas da cacofonia do mundo exterior; as relações “puras” podem ser estudadas. (KERLINGER, 2003, p. 127).

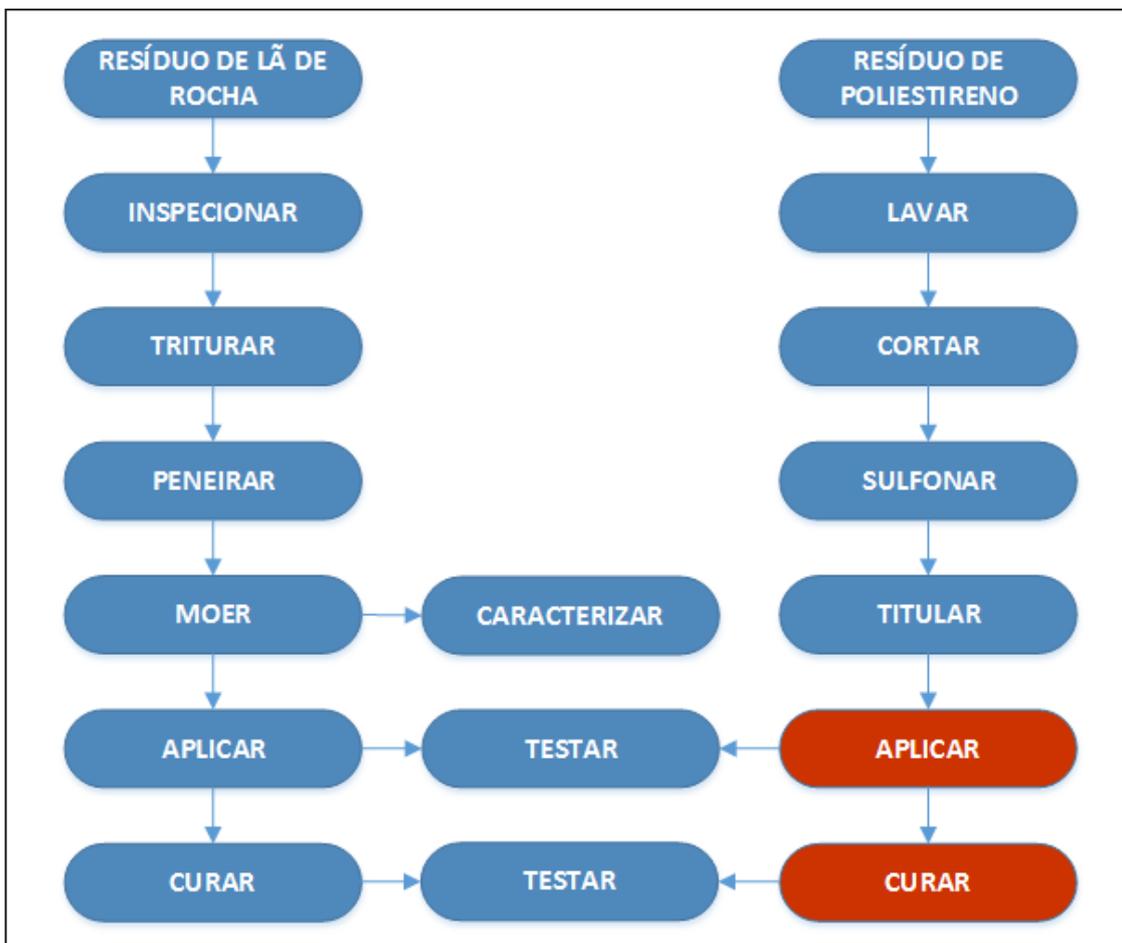
Assim, o objeto de estudo, neste método de procedimento, é isolado de possíveis interferências externas e estudado em função das variáveis adequadamente manipuladas.

3.3 A DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Como já mencionado no item 2.3, a indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais e energia, além de ser uma grande poluidora. Buscando o desenvolvimento sustentável, neste trabalho se avalia a possibilidade de utilizar resíduos de lã de rocha e poliestireno como adição mineral e aditivo (respectivamente) em argamassas e concretos, almejando a obtenção de estruturas mais duráveis, resistentes, com

menor consumo de matéria-prima e com a diminuição de impactos ambientais. Para tanto, foi desenvolvida a metodologia de pesquisa apresentada na Figura 13 – Fluxograma de descrição dos processos. Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma de descrição dos processos.



Fonte: da autora, 2018.

Cada tópico do fluxograma apresentado na Figura 13 será desenvolvido a seguir; o procedimento experimental desenvolvido com os resíduos de lã de rocha no item 3.3.1 e com os resíduos de poliestireno no item 3.3.2.

3.3.1 Preparação da adição

Primeiramente fez-se a **coleta dos resíduos** de lã de rocha provenientes da empresa B. Estes resíduos são gerenciados pela empresa A, que os estoca em contêiner até possuir uma quantidade suficiente para destiná-los ao aterro industrial.

Após coletados os resíduos, fez-se uma **inspeção** manual para retirar pedaços de metais e partes muito sujas. Os metais encontrados eram na sua maioria telas que serviam para fixar o isolante nos equipamentos da empresa.

O próximo passo foi a **trituração** da lã de rocha em um triturador de facas, obtendo as estruturas mostradas na Figura 14.

Percebeu-se que entre os pedaços de lã de rocha havia pequenas sujidades, como areia e ferrugem, que foram separadas através do **peneiramento** em malha #14 (abertura de 1,4 mm) por aproximadamente 15 minutos.

Na sequência utilizou-se o moinho de periquito com bolas de cerâmica de tamanhos variando entre 1 e 3 cm de diâmetro para a **moagem** da lã de rocha já triturada. O vaso do moinho foi preenchido até a metade com as bolas de cerâmica e completado com a lã até sua abertura. O processo de moagem teve duração de 1 hora e ao seu término, a lã de rocha possuía uma granulometria superfina quão a do cimento, como se pode observar na Figura 15.

Figura 14 – Lã de rocha triturada.



Fonte: da autora, 2018.

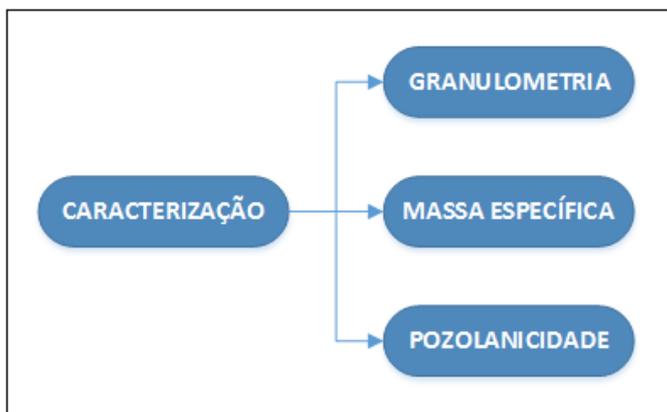
Figura 15 – Lã de rocha moída.



Fonte: da autora, 2018.

Com a lã de rocha já moída foram feitas três análises de **caracterização**, demonstradas na Figura 16.

Figura 16 – Caracterização da lâ moída.



Fonte: da autora, 2018.

Devido aos grãos moídos apresentarem tamanho tão reduzido, foi difícil fazer a determinação da **granulometria** dos mesmos, pois a vibração das peneiras fazia com que as partículas se unissem e não passassem na malha #325 (abertura de 0,043 mm), mesmo tendo a ciência de que elas passariam. Fez-se então, o peneiramento a úmido com o auxílio de água corrente, o qual mostrou-se mais eficiente.

A **massa específica** foi determinada através imersão da lâ de rocha em uma proveta contendo água. Antes da imersão foi feita a pesagem da lâ (m) e a medição do volume de água (V1) e após a imersão, fez-se uma nova medição do volume (V2). A massa específica foi, então, obtida através da equação:

$$\mu = \frac{m}{(V2 - V1)}$$

Já para a determinação da **pozolanicidade** da lâ de rocha, foi utilizado o método de Chapelle Modificado, proposto pela NBR 15895 (ABNT, 2010), em que se determina o teor de hidróxido de cálcio fixado pelo material. As etapas realizadas foram as seguintes:

- Colocou-se 1g da lâ de rocha em um Erlenmeyer de plástico (para garantir que não aja reação química do material do frasco com o CaO e com a lâ de rocha), 2g de óxido de cálcio (CaO) e 250 mL de água isenta de gás carbônico (CO₂);
- Levou-se o Erlenmeyer para um banho-maria com agitação e temperatura de 90°C, por um período de 16 horas;
- Passado este período, retirou-se o Erlenmeyer do banho e resfriou-o em água corrente;

- Adicionou-se 250 mL de uma solução de sacarose para cessar a reação e agitou-se em agitador mecânico por 15 minutos;
- Filtrou-se a solução com o auxílio de um funil de vidro e papel filtro;
- Titularam-se 50 mL da solução filtrada com ácido clorídrico (HCl) 0,1M e indicador fenolftaleína;
- Realizou-se o mesmo procedimento com uma amostra padrão de CaO;
- Calculou-se a pozolanicidade através da equação:

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \times (V_3 - V_2) \times F_c}{m_2} \times 1,32$$

Onde:

I = índice de atividade pozolânica (mg de Ca(OH)₂/g de material);

V₃ = volume necessário para titulação da solução com material pozolânico (mL);

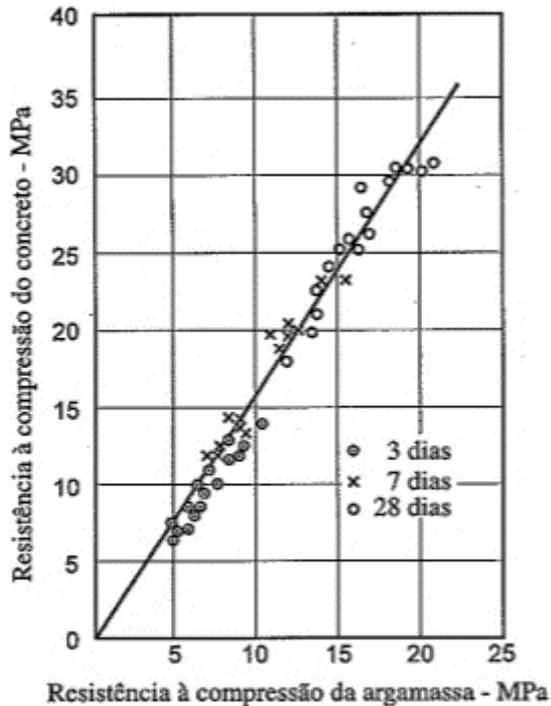
V₂ = volume necessário para titulação da solução padrão (mL);

F_c = fator de correção do HCl;

m₂ = massa do material pozolânico.

Com a lâ de rocha já caracterizada prosseguiu-se para a próxima etapa: a aplicação. A **aplicação** da lâ de rocha na argamassa se deu através de substituições parciais de 10, 20 e 30% do cimento. A substituição foi realizada sobre o volume absoluto de cimento para cada traço, sendo que foram reproduzidos 7 traços - considerando o traço padrão, que não possuía nenhum tipo de adição. A formulação do concreto utilizada nesta pesquisa é com teor de argamassa de 56% (os 44% restantes são de brita), sendo referente a um concreto bombeável com resistência característica (fck) de 30 MPa. Esta formulação foi adaptada para estudo em argamassa, retirando o agregado graúdo (brita), desta forma, é possível avaliar o desempenho da lâ de rocha na massa cimentícia sem a necessidade do amassamento de um expressivo volume de concreto. O desempenho da lâ de rocha na argamassa tende a ser o mesmo que no concreto, já que o único componente que os diferencia é a brita - que não participa das reações pozolânicas. A Figura 17 demonstra a correlação entre os ensaios de resistência à compressão de concretos e argamassas com igual relação água/cimento.

Figura 17 – Relação entre as resistências de concreto e argamassa.



Fonte: Neville, 1997.

Analisando o gráfico, percebe-se que o mesmo apresenta um comportamento linear nas três idades estudadas pelo autor, comprovando que o comportamento da adição é similar em argamassas e concretos.

Antes do processo de mistura, as matérias-primas (cimento, areia fina e areia de britagem) foram mantidas em condições de laboratório, com temperatura de 23°C e umidade controlada de 60%. A mistura dos materiais foi realizada da seguinte maneira:

- Misturaram-se os aglomerantes (cimento e lã de rocha) com parte da água, por aproximadamente 30 segundos em velocidade baixa;
- Adicionaram-se as duas areias (fina e de britagem), misturando por mais 30 segundos em velocidade baixa. Durante este tempo, o restante da água foi adicionado gradativamente, verificando visualmente a consistência da argamassa;
- Durante os próximos 30 segundos, a argamassa foi mantida em repouso, tempo necessário para a raspagem dos materiais aderidos na parede do recipiente;
- Após este tempo, a argamassa foi misturada por mais 30 segundos em velocidade alta e 15 segundos em velocidade baixa.

Visando estudar a influência da lã de rocha com diferentes aditivos, utilizaram-se para cada traço 2 tipos distintos: à base de lignossulfonato e à base de policarboxilato. O aditivo à base de lignossulfonato utilizado foi o CR 3414 da empresa *Grace Construction Products*, considerado como um aditivo plastificante de segunda geração, de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011); entretanto, comercialmente é considerado um aditivo polifuncional redutor de água. Já o aditivo à base de policarboxilato utilizado foi o Mira flow 973, também da *Grace Construction Products*, considerado pelo fabricante como um redutor de água de alta eficiência e bom tempo de manutenção da trabalhabilidade, e comercialmente como um aditivo polifuncional de alta eficiência. O teor utilizado de ambos os aditivos foi de 0,5% sobre a massa do cimento.

Portanto, dos 7 traços: 4 foram com a adição do aditivo à base de lignossulfonato (considerando o padrão) e 3 foram com a adição do aditivo à base de policarboxilato. O traço utilizado é empregado pelas centrais dosadoras de concreto da região de estudo e é mostrado na Tabela 1 com as quantidades necessárias de cada material (exceto a brita) para a produção de 2 L de concreto.

Tabela 1 – Formulação da argamassa.

Traço	Cimento (g)	Lã (g)	AF* (g)	AB* (g)	Aditivo (g)
Padrão	600,0	0	879,7	888,5	3,0
Lignossulfonato + Lã 10%	540,0	13,5	879,7	888,5	3,0
Lignossulfonato + Lã 20%	480,0	27,1	879,7	888,5	3,0
Lignossulfonato + Lã 30%	420,0	40,6	879,7	888,5	3,0
Policarboxilato + Lã 10%	540,0	13,5	879,7	888,5	3,0
Policarboxilato + Lã 20%	480,0	27,1	879,7	888,5	3,0
Policarboxilato + Lã 30%	420,0	40,6	879,7	888,5	3,0

Fonte: da autora, 2018.

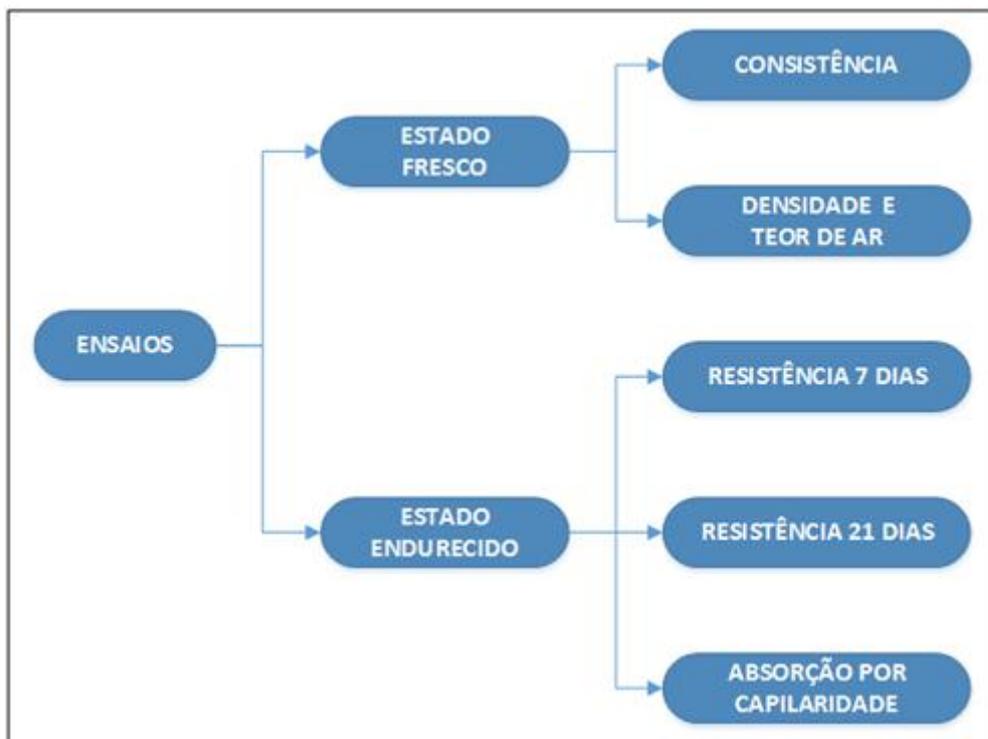
*AF = areia fina; AB = areia de britagem.

O fator água/aglomerante foi determinado individualmente para cada traço buscando atender, nos traços com adição, uma consistência semelhante à do traço piloto. O ajuste na quantidade de água de cada traço foi realizado com intuito de analisar o consumo de água da lã de rocha nos diferentes teores para uma mesma consistência.

Feitos os traços, iniciaram-se os testes para avaliar o comportamento e o desempenho da lã de rocha na massa cimentícia. Os primeiros ensaios realizados foram no

estado fresco, seguidos pelos ensaios no estado endurecido após uma semana e três semanas. Estes ensaios são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Ensaio realizados com a argamassa.



Fonte: da autora, 2018.

A determinação da **consistência** foi realizada através do ensaio de *slump* de bancada - método que validou os ensaios de espalhamento estático *Flow 0* e espalhamento dinâmico *Flow 10*, regido no Brasil pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Neste trabalho, o método *slump* de bancada para analisar a consistência de concretos foi adaptado para uso em argamassas, para isto, o molde tronco-cônico e a haste de adensamento possuíam metade das dimensões dos equipamentos do método original (uma vez que tirando o agregado gráudo reduz-se consideravelmente o volume da massa cimentícia). Além disto, o equipamento utilizado possuía um peso maior que o peso da argamassa que o preenchia - para que não houvesse a necessidade de um segundo operador segurar o equipamento durante o ensaio (para que não ocorresse vazamento do material por baixo do mesmo). Quanto ao procedimento, foi feito o seguinte:

- Fez-se a moldagem no tronco-cônico com 3 camadas da argamassa;
- Compactou-se cada camada com 12 golpes da haste de socamento (Figura 19);

- Rasou-se a superfície da argamassa para fazer um nivelamento da massa;
- Retirou-se o molde levantando-o cuidadosamente na direção vertical (a retirada deve ser realizada num período de 5 a 10 segundos e com um movimento constante para cima, para que não ocorra movimentos de torção lateral);
- Mediu-se o abatimento e determinou-se a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo da argamassa (Figura 20).

Figura 19 – Ensaio *slump* de bancada.



Fonte: da autora, 2018.

Figura 20 – Medição da altura do *slump*.



Fonte: da autora, 2018.

Esta diferença de altura representa a altura média do corpo de prova desmoldado. Para que a argamassa esteja na sua consistência ideal, o valor desta diferença deve ser entre 6 e 8 cm. Valores acima de 8 cm demonstram que fora utilizada muita água mistura, enquanto que valores abaixo de 6 cm, representam o contrário.

Ainda no estado fresco, foi determinada a densidade de massa e teor de ar incorporado, conforme os métodos estabelecidos pela NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a determinação da **densidade de massa**, realizaram-se os seguintes procedimentos imediatamente após o preparo da argamassa:

- Colocaram-se porções da argamassa no recipiente cilíndrico (próprio para o teste), formando três camadas de alturas aproximadamente iguais;

Em cada camada, aplicou-se 20 golpes com uma espátula ao longo do perímetro da argamassa (cada golpe corresponde à entrada e à saída da espátula na posição vertical, como mostra a Figura 21);

Para os ensaios no estado endurecido foram moldados 42 corpos de prova com dimensões 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura), como mostra a Figura 22.

- Figura 21 Após a execução e golpeamento de cada camada, efetuou-se 3 quedas do recipiente com altura de aproximadamente 3 cm;
- Conferiu-se se haviam espaços vazios entre a argamassa e a parede do recipiente;
- Rasou-se o recipiente com a espátula;
- Pesou-se o recipiente contendo a argamassa;
- Calculou-se a densidade de massa conforma a equação:

$$d = \frac{mc - mv}{Vr} 1000$$

Onde:

d: densidade de massa da argamassa (kg/cm³);

mc: massa do recipiente contendo a argamassa (g);

mv: massa do recipiente vazio (g);

Vr: volume do recipiente (cm³).

A partir destes dados, utilizou-se a seguinte equação para calcular o **teor de ar incorporado** em cada traço de argamassa:

$$A = \left(1 - \frac{d}{dt}\right) 100$$

Onde:

A: teor de ar incorporado na argamassa (%);

d: densidade de massa da argamassa (g/cm³);

dt: densidade de massa teórica da argamassa (g/cm³).

Para os ensaios no estado endurecido foram moldados 42 corpos de prova com dimensões 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura), como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Ensaio de densidade de massa.



Fonte: da autora, 2018.

Figura 22 – Corpos de prova de argamassa.



Fonte: da autora, 2018.

Subsequente ao endurecimento dos corpos de prova ocorreu a etapa de **cura**, onde os corpos de prova foram mantidos imersos em água numa estufa a 23°C e umidade de 97%. Após 7 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao primeiro ensaio no estado endurecido, o de **resistência à compressão**. Para este ensaio os corpos de prova foram submetidos à prensa, como mostra a Figura 23, até que houvesse o rompimento dos mesmos.

Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: da autora, 2018.

Os ensaios de resistência à compressão foram repetidos após 21 dias, juntamente com os ensaios de absorção de água por capilaridade. Segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) o ensaio de resistência à compressão deveria ter sido realizado após 28 dias, mas, em função do prazo de entrega deste trabalho, teve de ser feito após 21 dias.

O ensaio de **absorção de água por capilaridade** foi conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005) e foi realizado pesando os corpos de prova previamente lixados (m_0) e colocando-os em um recipiente contendo água. O nível de água deve permanecer constante a 5 mm (desvio padrão de +/- 1 mm) acima da face em contato com a água. Retiraram-se os corpos de prova para pesagem após 10 min (m_{10}), retirando o excesso de água dos mesmos com o auxílio de um pano úmido. Imediatamente após a pesagem, retornaram-se os corpos de prova para o recipiente com água. Pesaram-se novamente os corpos de prova após 90 min (m_{90}) do início do ensaio e calcularam-se as quantidades de água absorvidas por cada corpo de prova conforme a equação:

$$At = \frac{m_t - m_0}{Ac}$$

Onde:

At: Absorção de água por capilaridade para cada tempo (g/cm²);

m_t : massa do corpo de prova em cada tempo (g);

m_0 : massa inicial do corpo de prova (g);

Ac: área do corpo de prova (cm²).

Para a análise dos resultados no estado endurecido, inicialmente aplicou-se o teste estatístico de Bartlett para a verificar a hipótese de igualdade entre as variâncias dentro de cada grupo. Caso seja rejeitada a hipótese, os grupos não podem ser analisados em conjunto, e sim combinados em pares, e a verificação de qual valor difere dos demais é realizada pelo teste Duncan. Se aceita a hipótese de igualdade das variâncias, a análise de igualdade é feita por meio do quadro ANOVA.

3.3.2 Preparação do aditivo

O poliestireno utilizado para a fabricação do aditivo foi oriundo dos copos descartáveis pós-consumo provenientes da empresa B e gerenciados pela empresa A. Assim como os resíduos de lã de rocha, os resíduos de poliestireno foram **coletados** do contêiner que os aloja enquanto não são encaminhados para o aterro sanitário.

Fez-se a **lavagem** destes resíduos com água e detergente e, em seguida, **cortaram-se** os copos com o auxílio de uma tesoura até dimensões inferiores a 1x1cm.

3.3.2.1 Sulfonação homogênea

O processo de **sulfonação homogênea** do poliestireno foi baseado nas metodologias de Makowski, Lundberg e Singhal (1975), Martins (2002) e Proença (2009). A primeira etapa deste processo consistiu na **síntese do agente sulfonante** acetil sulfato, conforme segue:

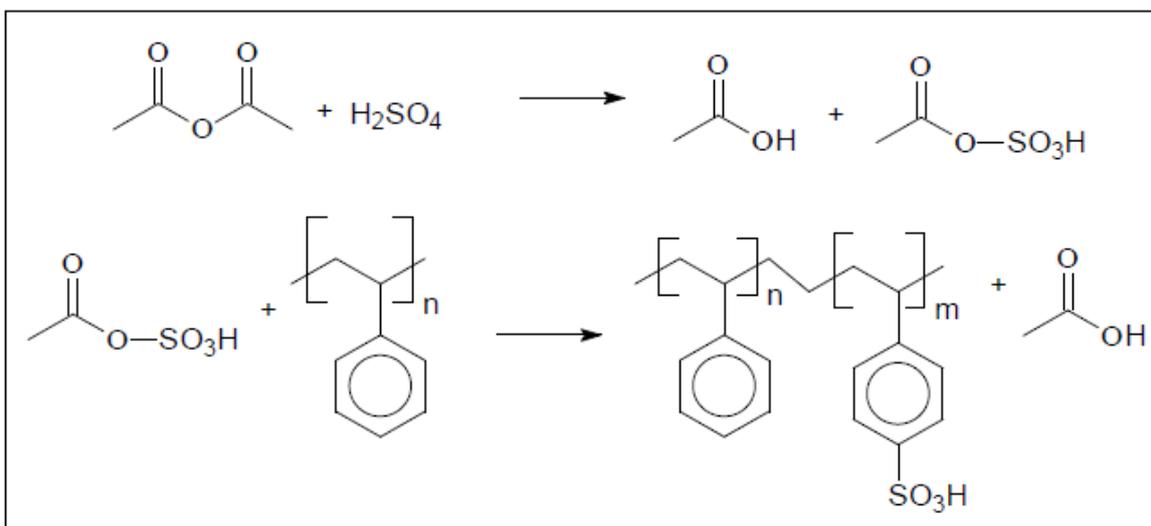
- Resfriar 38,15 mL de anidrido acético a temperaturas inferiores a 10°C;
- Adicionar 14 mL de ácido sulfúrico 98%;
- Agitar bem.

A segunda etapa é a de **obtenção do polieletrólito (PSS)** através da sulfonação do poliestireno com o acetil sulfato sintetizado:

- Dissolver 52 g de poliestireno em 245 mL de diclorometano;
- Aquecer a solução até 60°C;
- Adicionar 15 mL do agente sulfonante acetil sulfato;
- Deixar a solução agitando por 2 horas a 60°C;
- Cessar a reação com o gotejamento de 2-propanol por 30 min;
- Deixar a solução resfriar a temperatura ambiente;
- Isolar o polímero sulfonado por *stripping* com vapor, gotejando a solução em 500 mL de água destilada fervente;
- Lavar com água destilada e secar em estufa a 80°C por 24 horas;
- Moer os grânulos de PSS em moinho de periquito por 30 minutos.

A reação de sulfonação do poliestireno com o agente sulfonante acetil sulfato é representada na Figura 24. Na primeira etapa ocorre a reação do anidrido acético com o ácido sulfúrico concentrado, obtendo como produto o ácido acético e o acetil sulfato. Na segunda etapa, ocorre a reação do acetil sulfato com o poliestireno, obtendo como produto o poliestireno sulfonado e o ácido acético, que não participou da reação.

Figura 24 - Reação de sulfonação do PS com acetil sulfato.



Fonte: Soldi, 2006.

Para saber o grau de sulfonação do polieletrólito obtido, fez-se uma **titulação** conforme segue:

- Preencher uma bureta de 50 mL com NaOH 0,01 mol/L;
- Adicionar a um erlenmeyer 0,2 g de PSS, 50 mL de metanol e 4 gotas do indicador fenolftaleína;
- Gotejar o conteúdo da bureta no erlenmeyer até a viragem para a cor rosa;
- Calcular o grau de sulfonação utilizando as fórmulas descritas no item 2.6.4.

Seguindo esta metodologia não foi possível obter o produto final, portanto, adaptou-se um pouco a rota da reação. As mudanças executadas foram:

- Troca do solvente diclorometano pelo tolueno;
- Substituição do ácido sulfúrico concentrado pelo ácido sulfúrico fumegante;
- Execução do processo a temperatura ambiente;

- Adição de um excesso de anidrido acético;
- Adição de um excesso de acetil sulfato;
- Substituição dos copos de PS descartados por copos comprados;
- Redução do solvente para o mínimo possível;
- Aumento do tempo de reação para 24 horas e 48 horas;

Fez-se, também, a substituição da rota homogênea pela heterogênea, a qual é apresentada no item 3.3.2.2.

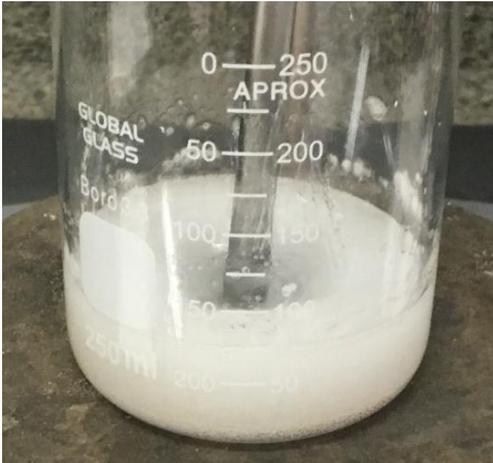
3.3.2.2 Sulfonação heterogênea

Na rota heterogênea o agente sulfonante e o polímero não se encontram na mesma fase. Para realização desta rota utilizou-se a metodologia proposta por Assunção *et al.* (2004):

- Adicionar 15 mL de ácido sulfúrico 97% em um béquer;
- No mesmo béquer, adicionar 0,02 g de sulfato de prata;
- Mexer bem;
- Acrescentar 1 g de poliestireno;
- Manter a temperatura ambiente por 24 horas, mexendo ocasionalmente;
- Lavar com água destilada a 10°C;
- Separar o sólido do líquido e adicioná-lo num banho de água saturada com cloreto de sódio a aproximadamente 0°C;
- Secar em estufa a 90°C por 3 horas;
- Titular da mesma forma feita na rota homogênea.

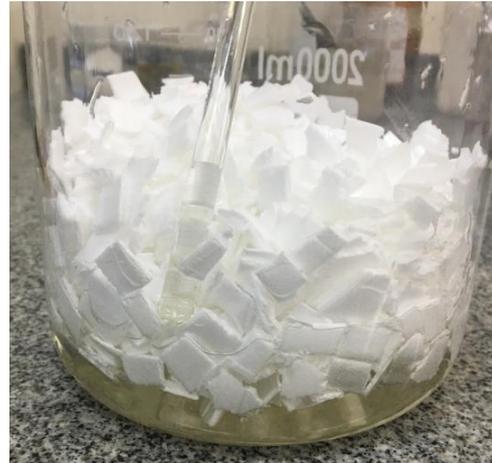
Observa-se a diferença da realização do processo com a rota homogênea e heterogênea na Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 – Rota homogênea.



Fonte: da autora, 2018.

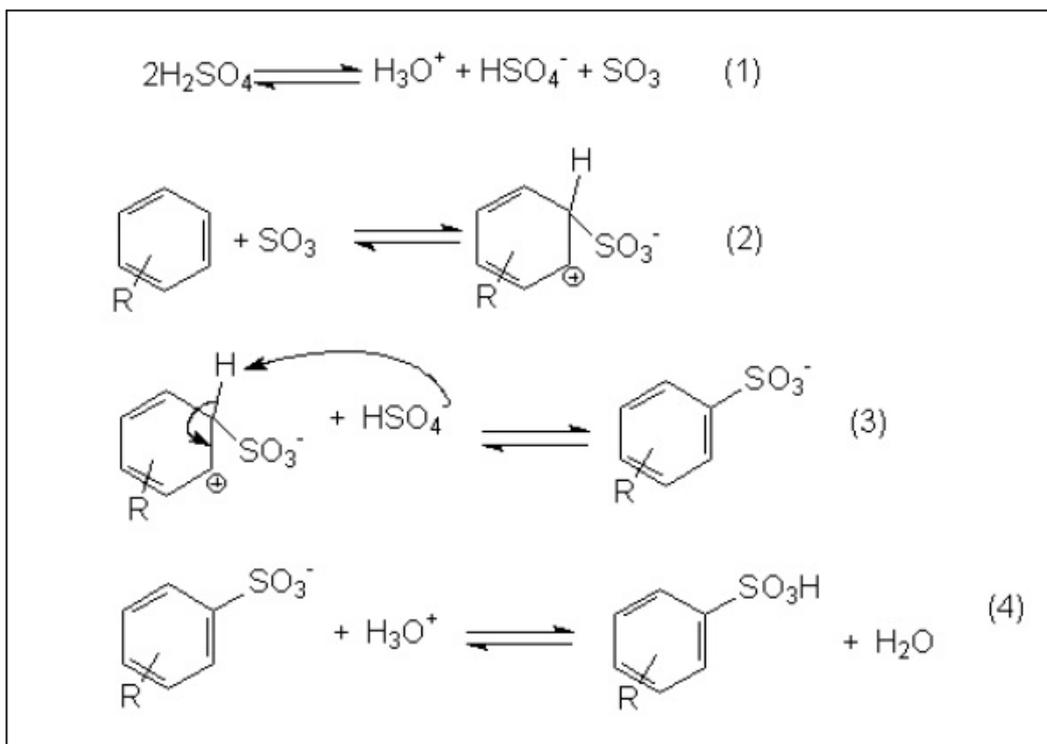
Figura 26 – Rota heterogênea.



Fonte: da autora, 2018.

A Figura 27 mostra o mecanismo da reação de sulfonação com ácido sulfúrico concentrado na presença do catalisador sulfato de prata. A reação consiste na dissociação do ácido sulfúrico, seguida por substituições eletrofilicas no anel aromático.

Figura 27 – Mecanismo da reação de sulfonação com ácido sulfúrico.



Fonte: Sousa; Nunes, 2014.

Mesmo com todas estas substituições na metodologia, ainda não foi possível obter o aditivo, portanto, não foi realizada a **aplicação** do aditivo na argamassa e no concreto, e

consequentemente não foi feita a **cura**. Ou seja, apenas os procedimentos demonstrados nos balões de cor vermelha da Figura 13 não foram realizados.

4 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA LÃ DE ROCHA

4.1.1 Granulometria

O ensaio da granulometria demonstrou que apenas 7% dos grãos ficaram retidos na malha #325, correspondente a 0,045 mm de abertura, o que comprova a granulometria superfina da lâ de rocha moída.

Para passar no controle de qualidade, o cimento deve ser passante na malha #200, ou seja, apresentar granulometria inferior a 0,074 mm, conforme estabelece a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2012). Logo, a lâ de rocha moída apresentou granulometria mais fina que a do próprio cimento.

Geralmente, quanto mais fino for o aglomerante, mais rápido ele reagirá e mais cedo ele desenvolverá resistência. (NETO, 2013). Além de haver uma correlação entre o diâmetro das partículas e a capacidade de fixação de hidróxido de cálcio, a qual demonstra que quanto menor o diâmetro das partículas, maior será a atividade pozolânica do material. (MARTINS, 2018). Ou seja, a finura do aglomerante é um bom indicativo de desempenho da argamassa e do concreto e podem-se relacionar os testes de resistência à compressão com este parâmetro – granulometria da lâ de rocha moída.

4.1.2 Massa específica

Após a realização do procedimento experimental e do cálculo de massa específica, obteve-se um valor de $\mu = 0,7 \text{ g/cm}^3$. Sabendo que a massa específica do cimento é de $3,1 \text{ g/cm}^3$, conclui-se que a massa específica da lâ de rocha é inferior à do cimento. Esta informação proporcionou a substituição do cimento pela lâ de rocha em volume absoluto, ao invés da substituição em massa - como recomenda a NBR 5752 (ABNT, 2014).

4.1.3 Pozolanicidade

Segundo a metodologia de Chapelle Modificado para a determinação da atividade pozolânica, para que o material seja classificado como pozolânico ele deve apresentar capacidade de fixação de Ca(OH)_2 maior que $435,6 \text{ mgCa(OH)}_2/\text{g}$ de material. (CORDEIRO,

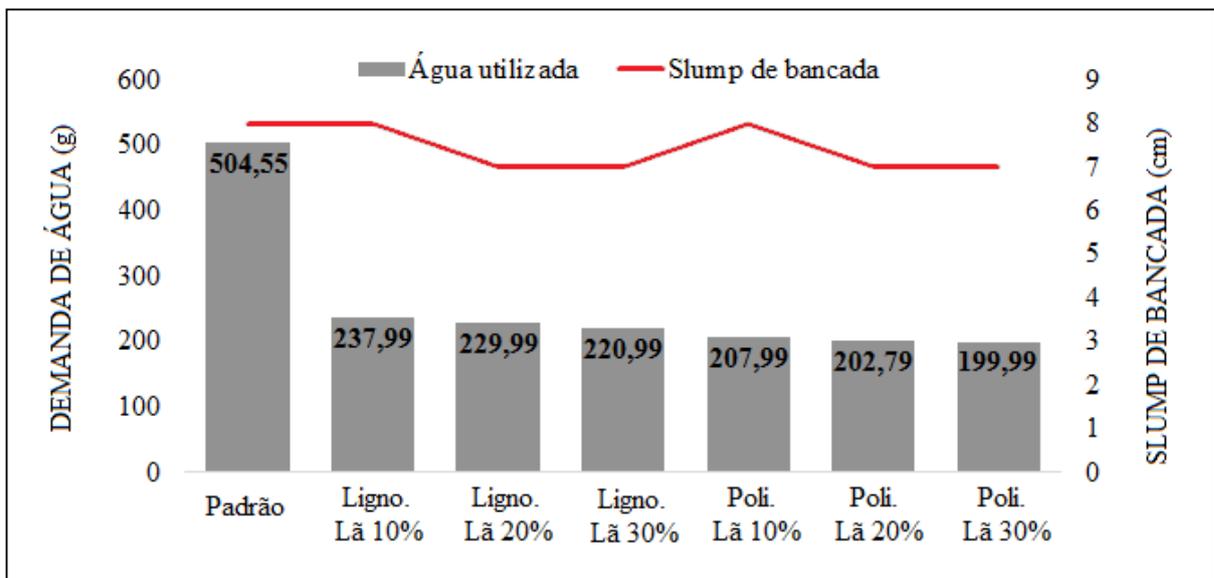
2009 *apud* MARTINS, 2018). Com a lã de rocha obteve-se o valor de 604,25 mgCa(OH)₂/g, logo, comprovou-se a pozolanicidade da mesma.

4.2 ARGAMASSA INCORPORADA COM LÃ DE ROCHA

4.2.1 Ensaios no estado fresco

Em relação aos resultados obtidos com o ensaio de consistência pelo método de *slump* de bancada, observa-se na Figura 28 que todos os traços apresentaram *slump* de 7 ou 8 cm. O *slump* está diretamente relacionado com a quantidade de água utilizada no preparo da argamassa e, como dito no item 3.3.1, a quantidade de água utilizada foi tal que a consistência dos traços com a adição fosse equivalente à consistência do traço padrão, logo, esta é a justificativa para valores próximos de *slump*. As quantidades de água utilizadas são também observadas na Figura 28.

Figura 28 – Ensaio de consistência.

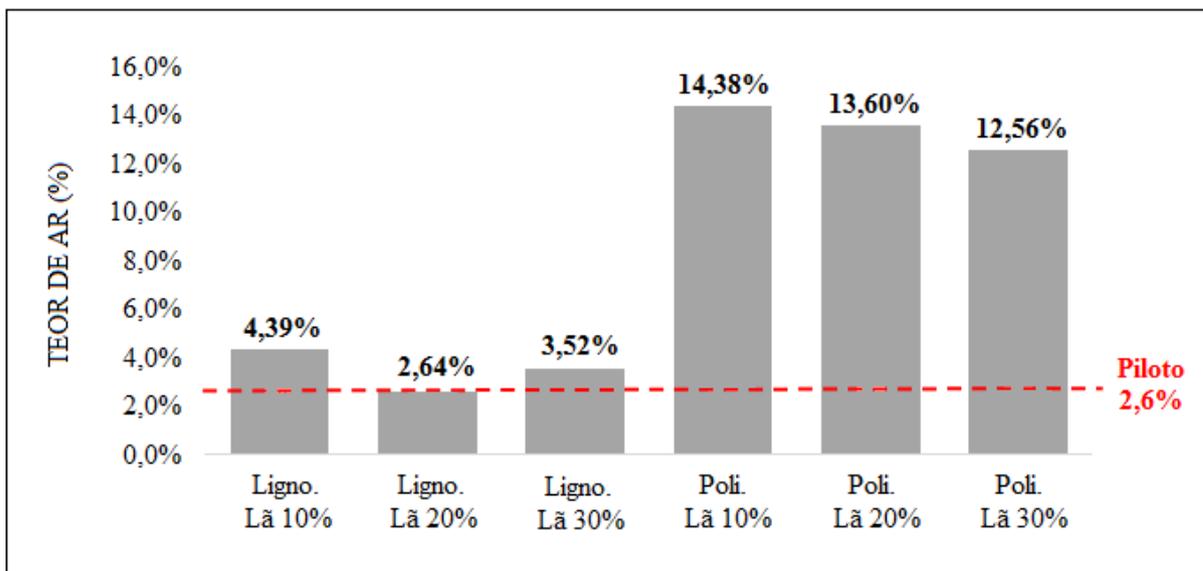


Fonte: da autora, 2018.

Observa-se que a demanda de água para os traços com adição de lã de rocha foi significativamente inferior que a demanda de água para o traço padrão, apresentando resultados abaixo da metade do traço padrão. Isto implica a redução do consumo de água para a obtenção de uma mesma consistência e, conseqüentemente, na redução de custos com a obra.

Outro ensaio realizado no estado fresco foi o de densidade de massa. Este ensaio foi preciso para calcular o teor de ar presente em cada traço de argamassa, que é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Resultados do ensaio de teor de ar.



Fonte: da autora, 2018.

Analisando os dados obtidos, nota-se que todos os traços apresentaram uma quantidade superior de teor de ar incorporado na argamassa em comparação ao traço padrão (piloto).

O teor de ar incorporado na massa pode ser relacionado com duas propriedades: durabilidade e trabalhabilidade. Quanto menor a porosidade da massa cimentícia, menos ar adentra os poros, com isto, maior é a sua durabilidade. Por outro lado, quanto mais porosa for a massa, mais ar penetra nos poros (proporcionando uma maior deformidade), logo, tem-se um aumento na trabalhabilidade.

Os traços contendo lã de rocha e aditivo à base de policarboxilato apresentaram elevados valores de incorporação de ar e, por isto, são recomendados para uso em concretos quando se almeja uma maior trabalhabilidade, especialmente aquele que possui 10% de lã de rocha, por apresentar um teor de incorporação de ar de 14,38%.

Já os traços contendo lã de rocha e aditivo à base de lignossulfonato são indicados quando se prefere a durabilidade do concreto diante da trabalhabilidade. Todavia, apresentam valores um pouco acima do traço piloto de 2,6%, o que não deve ser considerado como pior

que o traço padrão, uma vez que geralmente se aspira um ponto ótimo entre as duas propriedades - trabalhabilidade e resistência.

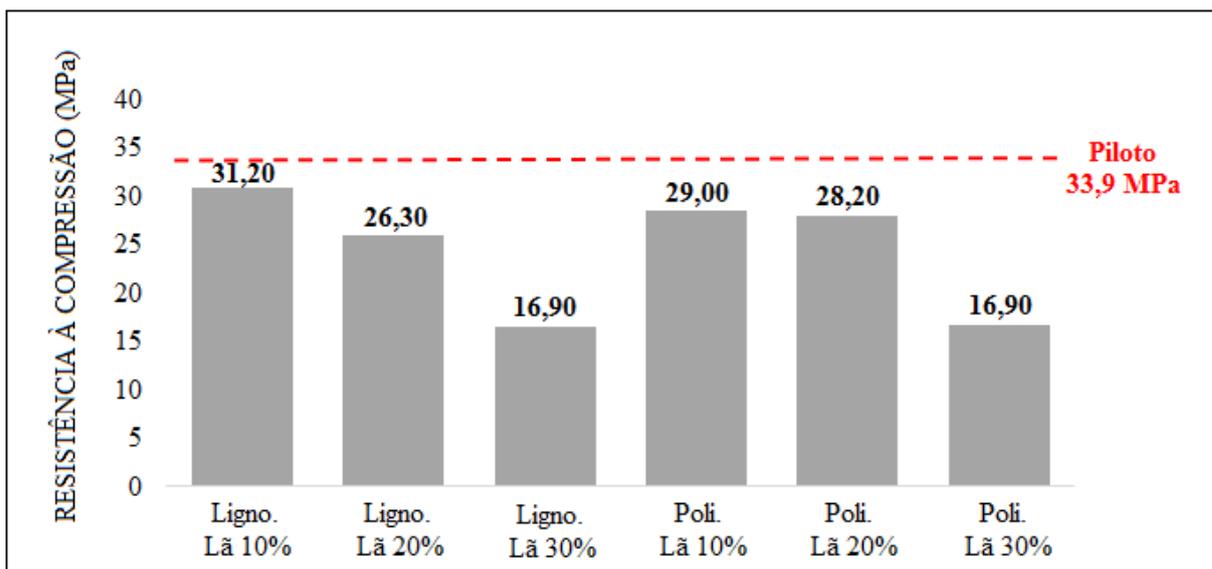
Portanto, os valores de teor de ar devem ser analisados em função das propriedades que se desejam ter no concreto final, as quais dependem da aplicação do mesmo.

4.2.2 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido, foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade e de resistência à compressão nas idades de 7 e 21 dias. Para a análise estatística destes valores foi realizado o teste de Barlett, onde obteve-se para os três ensaios a hipótese de igualdade entre as variâncias aceita, com isto, realizou-se o teste Duncan, ao invés do ANOVA.

Na Figura 30 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova após 7 dias de cura. Nota-se que todos os traços obtiveram valores de resistência à compressão inferiores que o traço piloto, sendo que com ambos os aditivos os melhores valores de resistência foram com 10% de lã de rocha e os piores, com 30%. Estes valores também são apresentados na Figura 31 em ordem crescente (sentido da flecha) de resistência.

Figura 30 – Resultado do ensaio de resistência à compressão após 7 dias.

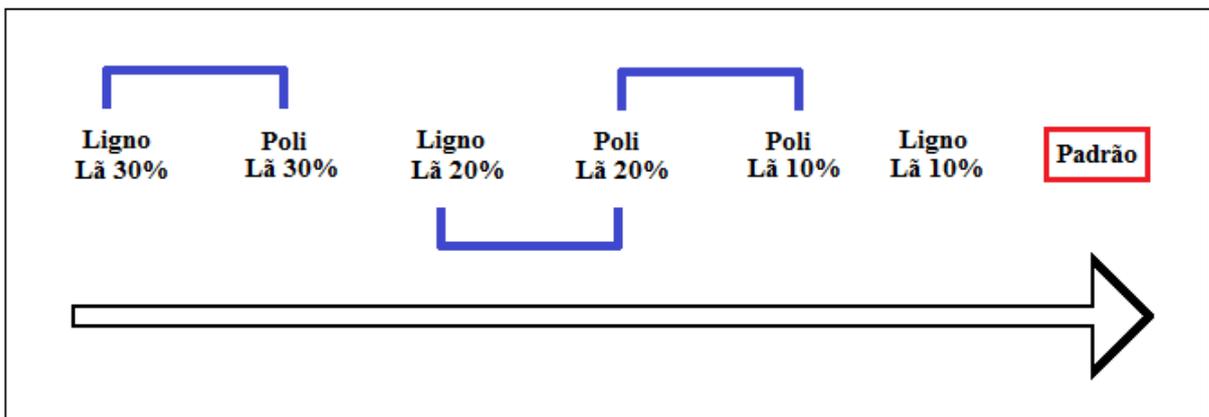


Fonte: da autora, 2018.

Para os resultados do teste Duncan, os valores grifados em vermelho representam os melhores resultados obtidos e os traços azuis relacionam os valores que não apresentam diferença significativa.

No caso do ensaio de resistência à compressão após 7 dias de cura o traço que apresenta o melhor resultado é o padrão, de 33,9 MPa. O traço contendo 30% de lã de rocha e aditivo à base de lignossulfonato equivale ao traço contendo 30% de lã de rocha e aditivo à base de policarboxilato (ambos com 16,90 MPa), assim como o traço que contém 20% de lã de rocha e aditivo à base de policarboxilato (28,2 MPa) se assemelha aos traços que contém 20% de lã e aditivo à base de lignossulfonato (26,3 MPa) e 10% de lã e aditivo à base de policarboxilato (29 MPa).

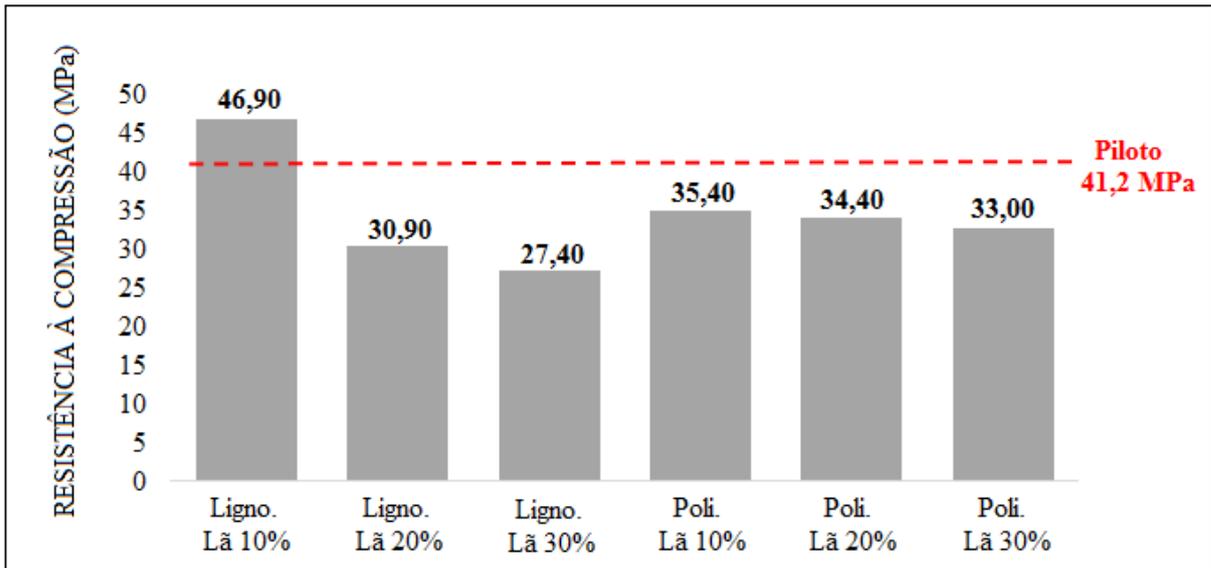
Figura 31 - Resultado do teste Duncan para o ensaio de resistência à compressão após 7 dias.



Fonte: da autora, 2018.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão após 21 dias e cura são mostrados na Figura 32. Comparando estes com os resultados de resistência após 7 dias, nota-se que estes valores foram superiores ao teste anterior, demonstrando que aconteceram reações de hidratação do cimento neste período. O ganho de resistência foi proporcional, mantendo os valores de resistência das amostras com 10% de lã de rocha maiores que os demais e os com 30%, menores.

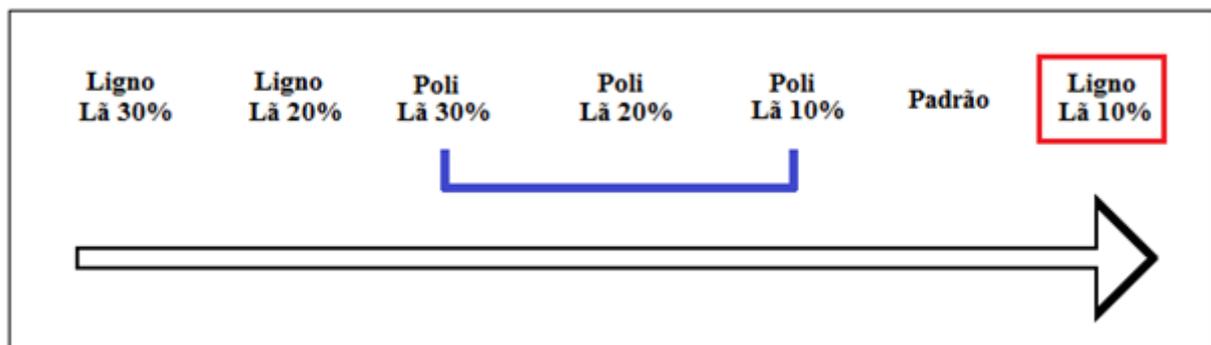
Figura 32 - Resultado do ensaio de resistência à compressão após 21 dias.



Fonte: da autora, 2018.

Na Figura 32 são apresentados os resultados do teste de Duncan para estes valores. Observa-se que, desta vez, o traço que conteve o maior índice de resistência fora aquele com 10% de lã de rocha e aditivo à base de lignossulfonato e o pior continuou sendo o traço com 30% de lã de rocha e o mesmo aditivo.

Figura 33 - Resultado do teste Duncan para o ensaio de resistência à compressão após 21 dias.



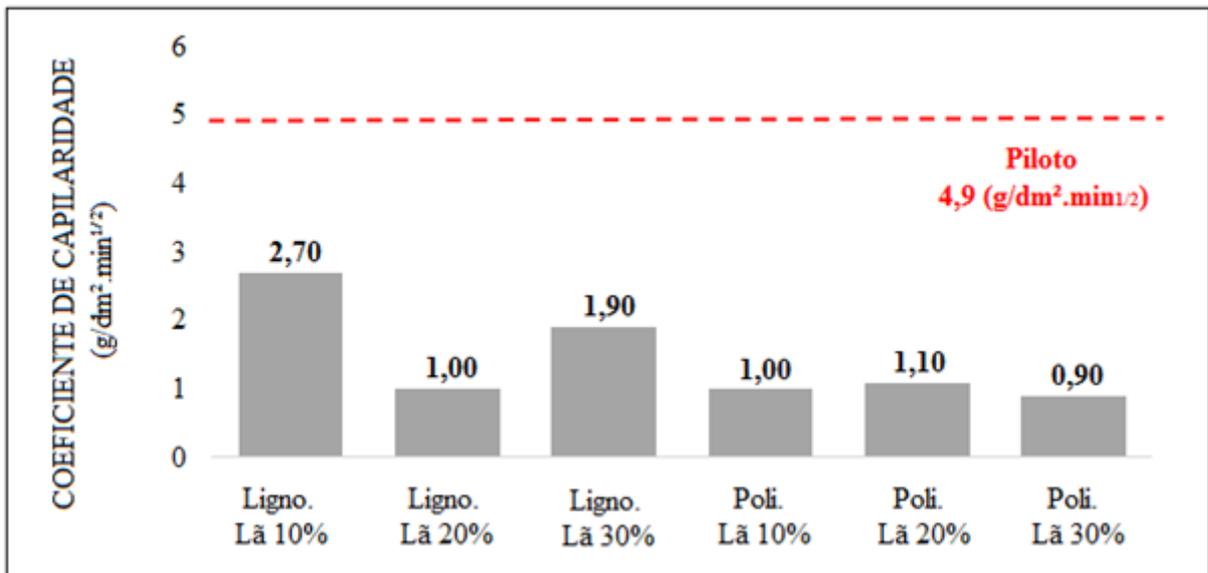
Fonte: da autora, 2018.

Os resultados dos testes de resistência à compressão não demonstraram o que se esperava (resultados melhores que o padrão), visto que a lã de rocha apresentou um índice de pozolanicidade pelo ensaio de Chapelle relativamente alto. Portanto, cabe ressaltar que a lã de rocha aparentemente possui atividade pozolânica tardia e requer um período mais longo de cura antes da realização dos testes de avaliação de desempenho. Cria-se a hipótese de que a

resistência à compressão apresente resultados mais satisfatórios após 63 dias, que é a terceira idade em que se deve realizar o ensaio segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007).

O terceiro ensaio realizado foi o de absorção de água por capilaridade após 21 dias. Os resultados deste ensaio são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.

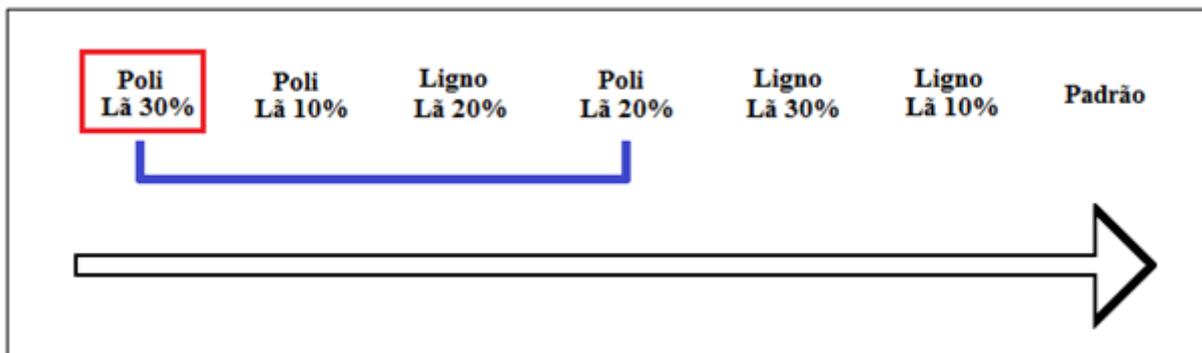


Fonte: da autora, 2018.

Como já mencionado no item 2.4.2.4.1, os vazios capilares da argamassa contendo material pozzolânico são mais bem preenchidos que da argamassa padrão, já que os cristais de hidróxido de cálcio são consumidos pelo gel de silicato de cálcio hidratado durante a reação pozzolânica, promovendo um aumento de impermeabilização do sistema.

A absorção de água está atrelada com a durabilidade do concreto e é influenciada pelo tamanho das partículas e pelas reações de hidratação, uma vez que a água penetra pelos espaços vazios da estrutura. Quanto menos água for absorvida através dos poros, mais durável se considera o concreto (e mais protegido estará o aço dentro da estrutura), logo, observando a Figura 34, percebe-se que todos os traços apresentaram valores melhores que o traço padrão.

Figura 35 - Resultado do teste Duncan para o ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: da autora, 2018.

Analisando os resultados do teste de Duncan, mostrados na Figura 35, observa-se que o melhor desempenho em relação à absorção de água foi a do traço contendo 30% de lã de rocha e aditivo à base de policarboxilato, e que seu valor se assemelha aos obtidos pelos traços contem 10 e 20% de lã de rocha e aditivo à base de policarboxilato e 20% de lã de rocha e aditivo à base de lignossulfonato, sendo eles aproximadamente 4 vezes menores que o traço padrão.

4.3 SULFONAÇÃO DO POLIESTIRENO

Não foi possível obter o poliestireno sulfonado (PSS) para ser utilizado como aditivo para argamassas e concretos. Segundo Soldi (2006) diversos foram os trabalhos que descreveram a sulfonação do poliestireno, porém, poucos são os detalhes disponíveis na literatura sobre as reações de sulfonação e as propriedades dos produtos. Foram feitas várias experiências para conseguir obter o poliestireno sulfonado e nenhuma delas foi eficaz, serão discutidos a seguir os possíveis motivos.

4.3.1 Sulfonação em altas temperaturas

A primeira tentativa foi com o agente sulfonante acetil sulfato, bastante recomendado na literatura por ser um agente de sulfonação menos oxidante quando comparado com os agentes de sulfonação tradicionais, como o ácido sulfúrico concentrado e o ácido sulfúrico fumegante, preservando a estrutura do polímero. (SOLDI, 2006).

Utilizaram-se altas temperaturas na etapa da sulfonação, uma vez que para Kucera e Jancar (1998) a “sulfonação realizada a altas temperaturas gera produtos com alto grau de

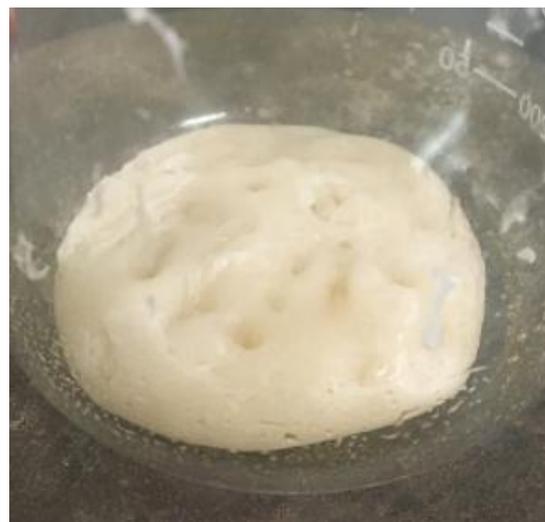
sulfonação”. Optou-se por utilizar a temperatura de 60°C, pois estava entre a faixa estipulada pelos autores em que foi fundamentada a metodologia, de 40°C a 70°C. Quando a temperatura alcançava a faixa dos 30°C percebia-se que a solução viscosa ia endurecendo constantemente, até que alcançou estado rígido e coloração bege rosado, ao contrário do que se esperava, de um gel marrom. Para Soldi (2006) o “aspecto de gel é devido à interação dos grupos sulfônicos com a água”. E acima de 40°C o composto começa a queimar no fundo do béquer. Chegou-se a conclusão que isto era em função do ponto de ebulição do solvente utilizado, o diclorometano, que é 39,6°C. Portanto foi feita a substituição para o solvente tolueno, que possui o ponto de ebulição de 110,6°C e o mesmo comportamento de endurecimento e mudança de cor para bege rosado foi visualizado. Logo, foi descartado que o problema estava sendo a evaporação do solvente e optou-se por trabalhar a temperaturas ambientes.

Figura 36 – Sulfonação com diclorometano.



Fonte: da autora, 2018.

Figura 37 – Sulfonação com tolueno.



Fonte: da autora, 2018.

4.3.2 Sulfonação a temperatura ambiente

Nesta segunda tentativa a etapa de sulfonação foi realizada em temperatura ambiente e, por isto, foi aumentado o tempo de reação de 2 horas para 24 horas. (ASSUNÇÃO *et al.*, 2004; CORRENTE, RODRIGUES FILHO, ASSUNÇÃO, 20??; ROYER *et al.*, 2005). Desta vez, o resultado alcançado foi similar ao esperado, a obtenção de um gel marrom, como mostra a Figura 38 – Logo após a sulfonação. Figura 38 e a Figura 39.

Para saber o grau de sulfonação obtido, ou seja, o teor de grupos sulfônicos ($\sim\text{SO}_3\text{H}$) presentes no poliestireno sulfonado foram realizadas titulações de neutralização com

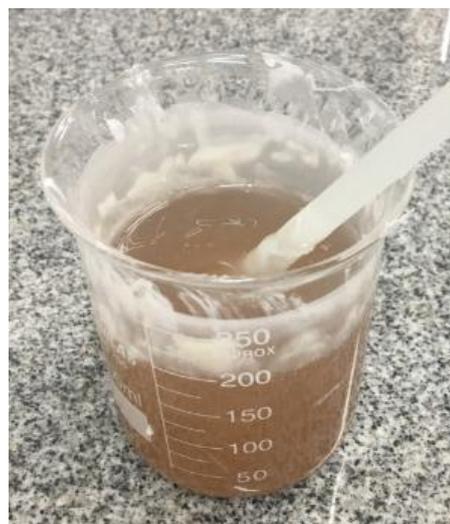
hidróxido de sódio e cálculos utilizando as equações apresentadas no item 2.6.4. Obteve-se um grau de sulfonação de 10%, o que não é desejado para este processo, visto que o PSS só é solúvel em água quando possui um grau de sulfonação superior a 30%. (CORRENTE, RODRIGUES FILHO, ASSUNÇÃO, 20??). A elevada solubilidade do polímero em água é um indício significativo da modificação química sofrida durante a reação de sulfonação. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2008).

Figura 38 – Logo após a sulfonação.



Fonte: da autora, 2018.

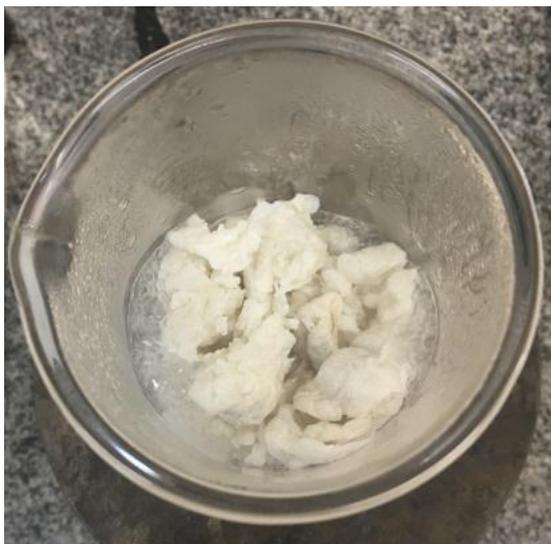
Figura 39 – 24 horas após a sulfonação.



Fonte: da autora, 2018.

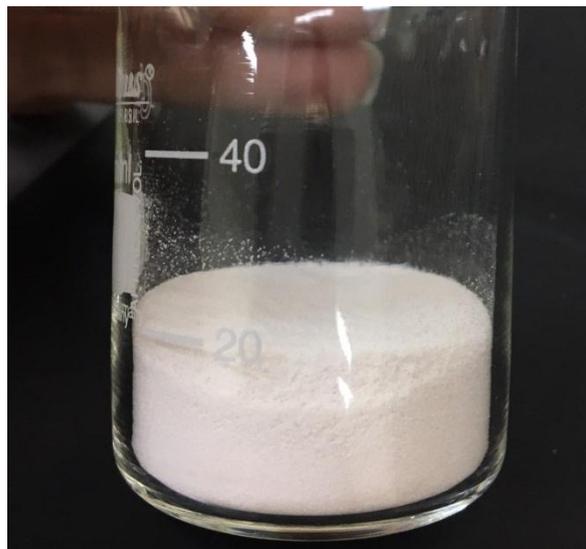
A solubilidade do PSS em água é uma propriedade importante, uma vez que é imprescindível fazê-la para que se possa alcalinizar o aditivo (elevar o pH de aproximadamente 3,5 para valores acima de 8) para, então, aplicar na massa cimentícia. Pensando na hipótese que o solvente pudesse interferir na solubilidade, já que o diclorometano é insolúvel em água, fez-se o isolamento do polímero gotejando-o em água destilada fervente. Fizeram-se lavagens com água destilada para a completa retirada do solvente, deixaram-se os grânulos do polímero secando em estufa e posteriormente fez-se a moagem.

Figura 40 – Isolamento a quente do PSS.



Fonte: da autora, 2018.

Figura 41 – PSS moído.



Fonte: da autora, 2018.

Tentou-se novamente solubilizar o poliestireno sulfonado em água, só que desta vez com ele isolado e moído, como mostra a Figura 41, e mesmo assim ele não solubilizou.

4.3.3 Sulfonação com ácido sulfúrico fumegante

Almejando um aumento no grau de sulfonação, fez-se a substituição do ácido sulfúrico concentrado (98%) pelo ácido sulfúrico fumegante, já que ele próprio já possui agrupamentos sulfônicos. O produto final obtido possuía o mesmo aspecto que o da Figura 39 e não foi adquirido aumento algum do grau de sulfonação.

4.3.4 Sulfonação com mais agente sulfonante e maior período de reação

Segundo Proença (2009) há outros fatores que influenciam nas propriedades do produto final, como a quantidade de agente sulfonante adicionada à reação e o tempo de reação. Por isto, fizeram-se novas tentativas de sulfonação: com o dobro de agente sulfonante acetil sulfato e com o dobro de ácido sulfúrico fumegante. Em nenhum dos testes foi observado mudança no aspecto final do PSS. Deixou-se, também, o meio reacional agindo por 48 horas em vez de 24, e nenhuma mudança foi visualizada novamente, com isto, descartou-se a hipótese que a reação não tinha sido completada.

4.3.5 Sulfonação com excesso de anidrido acético

Fez-se ainda outro experimento, desta vez com excesso de anidrido acético como proposto por Zhang *et al.* (2000) *apud* Soldi (2006), os quais dizem que “maiores valores referentes ao teor de agrupamentos sulfônicos são encontrados quando um excesso de 30% de anidrido acético é empregado na reação”. Mesmo assim, não houve alteração no PSS obtido.

4.3.6 Sulfonação com o mínimo possível de solvente

Na etapa de dissolução do PS em solvente, observava-se que era recomendada uma grande quantidade de solvente e que não era necessário tal volume. Pensando que talvez este excesso de solvente estivesse sendo a causa do problema, realizou-se um teste utilizando o mínimo possível de diclorometano para dissolver o PS. A quantidade utilizada foi a metade do que já estava se utilizando. Foi observado que devido a esta redução de solvente, o PSS obtido não possuía o aspecto de gel, como deveria.

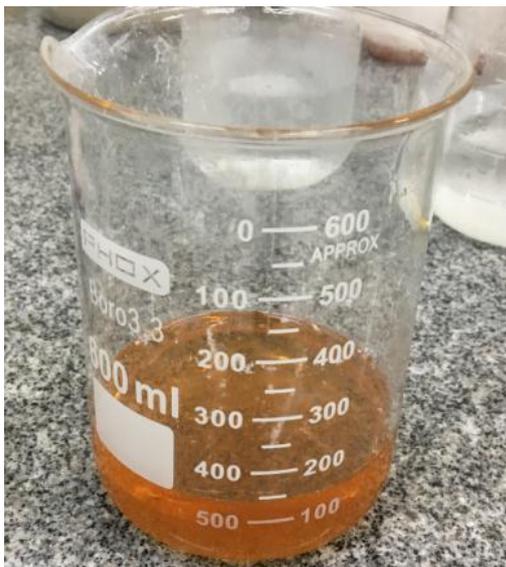
4.3.7 Sulfonação com copos de poliestireno comprados

Um dos testes realizados foi com a substituição dos copos de PS descartados por copos comprados, fez-se isto para conferir se o problema estava sendo por contaminação. Novamente não houve mudança no PSS obtido, sendo assim, eliminou-se a hipótese do problema ter sido a interferência de possíveis resíduos presentes nos copos descartados lavados.

4.3.8 Sulfonação heterogênea

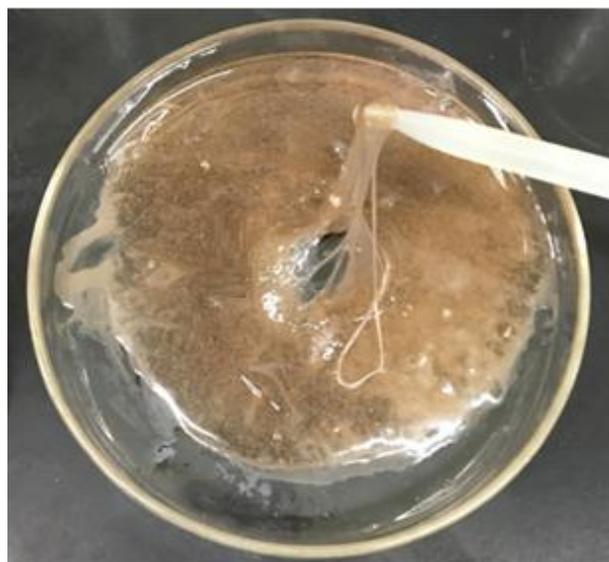
A última tentativa de sulfonação do PS foi através da rota heterogênea apresentada no item 3.3.2.2. Com esta rota se obteve um líquido bastante viscoso e de cor alaranjada, como mostra a Figura 42. Após o isolamento do polímero e a secagem em estufa obteve-se um material elástico levemente rosado, como mostra a Figura 43.

Figura 42 – PSS pela rota heterogênea.



Fonte: da autora, 2018.

Figura 43 – PSS isolado a frio.



Fonte: da autora, 2018.

O PSS não apresentou solubilidade em água em nenhum dos dois estados (isolado ou não), ou seja, apresentou um baixo grau de sulfonação e não é adequado para o uso como aditivo.

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Anteriormente foram discutidas as vantagens ambientais e técnicas da substituição parcial do cimento pela lã de rocha, neste item serão abordadas as vantagens econômicas desta substituição. Ressalvando que a empresa A faz o gerenciamento dos resíduos de lã de rocha da empresa B.

4.4.1 Economia com aterro sanitário

A empresa A gasta atualmente R\$0,28 por quilo de resíduo com aterro sanitário. Calculou-se que a média anual de resíduos de lã de rocha destinados ao aterro sanitário pela empresa A, entre 2011 e 2017, foi de 113,57 toneladas, logo:

$$1 \text{ kg} \rightarrow \text{R\$}0,28$$

$$113570 \text{ kg} \rightarrow \boxed{\text{R\$ } 31799,60}$$

Portanto, a quantia média gasta pela empresa A com a destinação da lã de rocha ao aterro sanitário é de R\$31799,60 por ano.

4.4.2 Custo de venda da lã de rocha

A partir do custo de venda de alguns materiais cimentícios suplementares estipulou-se o valor que a lã de rocha moída poderia ser vendida.

- Cinza de casca de arroz - R\$ 1,80/kg
- Cinza volante - R\$ 0,22/kg
- Fíler de calcário - R\$ 0,15/kg
- Metacaulim - R\$ 1,04/kg
- Sílica ativa - R\$ 1,29/kg

Adotou-se que o custo de venda da lã de rocha seria a média destes valores, ou seja, R\$0,90 por quilo.

4.4.3 Lucro com o resíduo de lã de rocha

Fora estipulado que o preço de venda da lã de rocha seria R\$0,90 por quilo e calculou-se que a média anual de resíduos de lã de rocha gerenciados pela empresa A é 113,57 toneladas, então:

$$1 \text{ kg} \rightarrow \text{R}\$0,90$$

$$113570 \text{ kg} \rightarrow \boxed{\text{R}\$102213,00}$$

Considerando que a empresa A venda 113,57 toneladas de resíduos a R\$0,90 o quilo e somando este montante com o valor economizado com o aterro sanitário, têm-se:

$$\text{R}\$102213,00 + \text{R}\$31799,60 = \boxed{\text{R}\$134012,60}$$

O lucro da empresa A seria de R\$134012,60, o que equivale ao lucro de R\$1,18 por quilo de resíduo de lã de rocha.

4.4.4 Gastos com equipamentos

Para a transformação dos filamentos de lã de rocha em pó, em escala industrial, seriam necessários 3 equipamentos básicos: o triturador de facas para cortar os filamentos da lã, a peneira vibratória para a retirada de sujeiras e o moinho de bolas para a moagem das partículas.

Utilizando a média de 113, 57 toneladas de resíduos de lã de rocha que a empresa A descarta por ano e considerando que 1 mês tenha 21 dias úteis e 1 dia de trabalho tenha 8 horas de expediente, deveriam ser triturados, peneirados e moídos 450,67 kg de lã de rocha por dia, ou, 56,33 kg por hora. Com estes valores, pesquisou-se uma média de preço dos equipamentos, a qual foi:

- Triturador de facas com capacidade de 60 kg/h R\$5000,00
- Peneira vibratória com capacidade de 1 t/h R\$3000,00
- Moinho de bolas com capacidade de 1 t/h R\$15000,00

Portanto, para a preparação da adição de lã de rocha seria necessário o desembolso inicial de aproximadamente R\$23000,00 com equipamentos. Ressalta-se que todos estes equipamentos possuem vida útil longa e necessitam de pouca manutenção.

4.4.5 Economia com cimento em obras

Supondo que se deseja fazer uma laje de concreto de área 5m x 5m e 0,12m de espessura. Para tanto, seria preciso um volume de 3m³ de concreto. Utilizando as proporções de matérias primas mencionadas na Tabela 1, o custo da lã de rocha de R\$0,90/kg e o custo do cimento R\$0,58/kg, tem-se:

- Concreto padrão: 900 kg de cimento → R\$522,00
- Concreto com substituição de 10% de cimento por lã de rocha: 810 kg de cimento + 20,25 kg de lã de rocha → R\$488,02
- Concreto com substituição de 30% de cimento por lã de rocha: 630 kg de cimento + 60,90 kg de lã de rocha → R\$420,21

Logo, se o consumidor optar por fazer a construção desta laje com a substituição de 10% de cimento por lã de rocha, ele terá uma economia de R\$33,98. Caso faça a substituição por 30% de lã de rocha, em apenas uma laje de 3m³ terá uma economia de R\$101,79, um valor bem expressivo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido visando à minimização de impactos ambientais causados pela cadeia produtiva do cimento e a redução da quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. Ambas as soluções propostas (preparação da adição mineral com resíduos de lã de rocha e fabricação do aditivo com resíduos de poliestireno) seguiam os conceitos da sustentabilidade ambiental, por transformarem resíduos em matérias-primas.

A preparação da adição mineral de lã de rocha foi um processo simples de ser realizado e demonstrou resultados satisfatórios em relação ao índice de atividade pozolânica, redução da quantidade de água e absorção de água por capilaridade. Estes resultados demonstram que as estruturas que contém adição de lã de rocha são mais baratas, pois consomem menos água e cimento, e mais duráveis, uma vez que absorvem menos água (e agentes nocivos à estrutura) através de seus microporos. Contudo, nos ensaios de resistência à compressão não foi perceptível um aumento significativo no desempenho da argamassa com a adição de lã de rocha; crê-se que isto seja em função da reação pozolânica ser lenta, provocando a hidratação tardia do cimento. Em função disto, quanto mais lã de rocha é adicionada ao traço, menos cimento este traço terá, logo, bons resultados só serão observados após algum tempo; em contrapartida, o traço que não contém adição de lã de rocha apresentará, em um curto período de tempo, resultados melhores que os com adição, uma vez que possui mais cimento para reagir com a água através de reações rápidas de hidratação. Conclui-se, portanto, que os resultados dos ensaios no estado endurecido tendem a melhorar com o passar do tempo e que a cada minuto estão mais perto do resultado esperado - de ganho de resistência à compressão.

A fabricação e aplicação do aditivo à base de poliestireno não foram concluídas, visto que não foi possível obter um teor de sulfonação do poliestireno acima de 10%. Os polímeros com grau de sulfonação inferiores a 30% não são solúveis em água, com isto, não se é possível fazer a correção do pH dos mesmos e a aplicação na massa cimentícia.

Por fim, analisando as vantagens técnicas, ambientais e econômicas, conclui-se que a lã de rocha tem potencial para ser utilizada como adição em compósitos cimentícios e, se for realmente preparada e comercializada, irá trazer benefícios para o meio ambiente, lucro (com a venda das adições) e economia (com aterro sanitário) para a empresa A e economia (com matéria-prima e água) para os consumidores finais.

REFERÊNCIAS

ABRALISO. **Nossa missão**. Publicado em 2013. Disponível em:

<https://www.abraliso.org.br/missao.html>. Acesso em: 25 de abr. de 2018.

ÂNGULO, Sérgio C.; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Vanderley Moacyr.

Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. PCC – Departamento de Engenharia de Construção civil da Escola Politécnica. São Paulo, SP, 2001.

ABRELPE. Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais; GO ASSOCIADOS. **Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, SP, 2015. Disponível em:

http://www.abrelpe.org.br/arquivos/pub_estudofinal_2015.pdf. Acesso em: 08 de mai. de 2018.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2016**. São Paulo, SP. Disponível em:

<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>. Acesso em: 08 de mai. de 2018.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. NBR 12655/2006: **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2006.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 19 p.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 4 p.

_____. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 3 p.

_____. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 6 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 4 p.

_____. **NBR 7211:** Agregado para concreto - Especificações. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 8 p.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8 p.

ASSUNÇÃO, Rosana M. N.; ROYER, Betina; OLIVEIRA, Juliana S.; RODRIGUES FILHO, Guimes; MOTTA, Leila A. C. **Synthesis, characterization, and application of the sodium poly(styrenesulfonate) produced from waste polystyrene cups as na admixture in concrete.** Journal of Applied Polymer Science, Vol. 96: Wiley Periodicals, Inc., 2005.

BALDUZZI. **Como cultivar em lâ de rocha da cultilene.** Publicado em 2015. Disponível em: <http://www.conosul.com.br/novidades/como-cultivar-em-la-de-rocha-da-cutilene/>. Acesso em: 06 de mai. de 2018.

BIOLÃ. **O que é la de rocha?** Publicado em 2016. Disponível em: <http://www.biola.com.br/la-de-rocha/>. Acesso em: 25 de abr. de 2018.

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

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil.** Cerâmica, Vol.61, p. 178 – 189, 2015.

COMITÊ DA BACIA DO RIO TUBARÃO E COMPLEXO LAGUNAR. **Diagnóstico da geração e destinação dos resíduos sólidos urbanos na Bacia do Rio Tubarão.** Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/10875360/>. Acesso 01 de jun. de 2018.

CONSTRUCAOCIVILPET. **O concreto como material construtivo: da origem as novas tecnologias.** Publicado em 2012. Disponível em: <https://civilizacaoengenhira.wordpress.com/2012/11/07/o-concreto-como-material-construtivo-da-origem-as-novas-tecnologias/>. Acesso em: 25 de mai. de 2018.

CONSTRUFACILRJ. **Cura do concreto.** Publicado em 2013. Disponível em: <https://construfacilrj.com.br/cura-do-concreto/>. Acesso em: 28 de mai. de 2018.

CORRENTE, Natália G.; FILHO, Guimes R.; ASSUNÇÃO, Rosana M. N. **Estudos da sulfonação homogênea de poliestireno a partir de bandeja de alimentos descartadas.** 8º congresso brasileiro de polímeros.

COSTA, Eugênio B. da; NOBRE, Thiago R. S.; GUERREIRO, Agenara Q.; MANCIO, Maurício; KIRCHHEIM, Ana Paula. **Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental.** Ambiente Conctruido, Vol. 13, No. 2, p. 75 – 86. Porto Alegre, RS, 2013.

CSRNO (Commission de Services régionaux Nord-Ouest). **The 4Rs at Home and at the Office: Reduce, Reuse, Recycle and Recover!** Publicado em 2016. Disponível em: <http://csrno.ca/en/solid-waste/the-4rs/>. Acesso em: 23 de mai. de 2018.

DEMO, Pedro. **Pesquisa e construção de conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas**. 7. ed. Rio de Janeiro: Tempo brasileiro, 2012.

eCYCLE - **Clínquer: saiba o que é, quais seus impactos ambientais e alternativas**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/67-dia-a-dia/5870-clinquer-saiba-o-que-e-quais-seus-impactos-ambientais-e-conheasa-alternativas.html>. Acesso em: 26 de mai. de 2018.

FELDMANN, Simone. **Um terço do lixo destinado à coleta seletiva em SC não é aproveitado por descarte incorreto**. Publicado no jornal Diário Catarinense em 2017. Disponível em: <http://dc.clicrbs.com.br/sc/estilo-de-vida/noticia/2017/06/um-terco-do-lixo-destinado-a-coleta-seletiva-de-sc-nao-e-aproveitado-por-descarte-incorreto-9823641.htm>. Acesso em: 04 de jun. de 2018.

FERNANDES, Rodrigo C.; OLIVEIRA, Rafael C. de; MORAES JUNIOR, João Miguel de; OLIVEIRA, Cleberson F. de; RAMIREZ, Bruna N. **Estudo da reutilização dos resíduos de lâ de rocha para produção de argamassa**. Anais do 58º Congresso brasileiro do concreto, IBRACON. Belo Horizonte, MG, 2016.

FIESC, SINDIMOLDURAS. **Reciclagem do isopor: círculo virtuoso beneficia a sociedade, a economia e o meio ambiente**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/Apres_LogiscaReversa.pdf. Acesso em: 08 de mai. de 2018.

FONTES, Wanna C.; DUTRA, Marina B.; OKADA, Eigi M.; SILVA, Guilherme J. B.; PEIXOTO, Ricardo A. F. **Argamassas com resíduos de lâ de vidro e lâ de rocha pós-processados**. Anais do 56º Congresso brasileiro do concreto, IBRACON. Natal, RN, 2014.

FREITAS JR., J. de A. **A estrutura do concreto**. Materiais de Construção (TC- 030), 2013 - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/3/36/TC030_Estrutinterna_x.pdf. Acesso em: 28 de mai. 2018.

GEOAMBIENTE. **Os 5Rs da gestão ambiental**. Publicado em 2012. Disponível em: <http://www.geoambiente.eng.br/noticia/view/id/13>. Acesso em: 23 de mai. de 2018.

HOORNWEG, Daniel; BHADA-TATA, Perinaz. **What a waste: a global review of solid waste management**. Urban development series knowledge papers, No. 15, 2012. Disponível em: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/1e5ca7004c07698db58eb7d8bd2c3114/What-A-Waste-Report.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: 27 de mar. de 2018.

INDÚSTRIA HOJE. **Como é produzido o cimento?** Publicado em 2014. Disponível em: <https://www.industriahoje.com.br/fabricacao-de-cimento>. Acesso em: 17 de mai. de 2018.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2000.

KERLINGER, Fred Nichols. **Metodologia da pesquisa em ciências sociais: um tratamento conceitual.** 9. ed. Tradução: Helena Mendes Rotundo. São Paulo: EPU, 2003. 378 p.

KUCERA, F.; JANCAR, J. **Homogeneous and heterogeneous sulfonation of polymers: a review.** Polymer engineering and science, 1998, Vol. 38, No. 5.

_____. **Preliminary study of sulfonation of polystyrene by homogeneous and heterogeneous reaction.** Chem. Papers, 1996.

LAGUNA, L. A.; IKEMATSU, P. **A influência da temperatura na desforma do concreto.** Publicado em 2009. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/150/artigo-a-influencia-da-temperatura-na-desforma-do-concreto-286635-1.aspx>. Acesso em: 28 de mai. de 2018.

LIN, Wei-Ting; CHENG, An; HUANG, Ran; WU, Yuan-Chieh; HAN, Ta-Yuan. **Rock wool wastes as a supplementary cementitious material replacement in cement-based composites.** Computers and Concrete, Vol. 10, No. 4, p. 401 – 411, 2012.

MAKOWSKI, Henry S.; LUNDBERG, Robert D.; SINGHALL, Gopal H. **Flexible polymeric compositions comprising a normally plastic polymer sulfonated to about 0.2 to about 10 mole % sulfonate.** United States Patents, 1975.

MARTINS, Cristiane R. **Blendas de polianilina e polietireno obtidas por processamento reativo: preparação e caracterização.** Tese de doutorado, UNICAMP. Campinas, SP, 2002.

MARTINS, Cristiane R.; RUGGERI, Giacomo; PAOLI, Marco-A de. **Synthesis in pilot plant scale and physical properties of sulfonated polystyrene.** J. Braz. Chem. Soc., Vol. 14, No. 5, 2003.

MARTINS, Mônica M. **Investigação da influência do uso materiais cimentícios suplementares utilizados em substituição parcial ao cimento Portland.** Tese de Bacharelado, Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, SC, 2018.

MCKINNON D.; FAZAKERLEY J.; HULTERMANS R. **Waste sorting plants: extracting value from waste.** INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). Vienna, Austria, 2017.

MEDEIROS, Maiara G. **Valorização do resíduo de lã de rocha através da sua incorporação em matrizes de cimento Portland.** Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2015.

MEDEIROS, Maiara G.; CASTILHO JUNIOR, Armando B.; ROCHA, Janaíde C.; OLIVEIRA, Kamila A. de. **Caracterização e classificação do resíduo de lã de rocha para utilização em indústria cimenteira.** 5º fórum internacional de resíduos sólidos. São Leopoldo, RS, 2014.

MENDES, Henrique G. **Isolantes sustentáveis: estudo para viabilidade de fabricação de isolante térmico e acústico a partir dos resíduos de lã de rocha e de poliuretano.** Tese de Bacharelado, Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, SC, 2017.

MEYER, Wilfred C.; MIDLAND; MICH. **Superplasticizer composition for use with hydraulic cement.** United States Patents, 1988.

MOTTA, L. A. C.; VIEIRA, J. G.; OMENA, T. H., FARIA, F. A. C.; RODRIGUES FILHO, G.; ASSUNÇÃO, R. M. N. **Mortar modified with sulfonated polystyrene produced from waste plastic cups.** IBRACON structures and materials journal, Vol. 9, No. 5, 2016.

NAKAKURA, Elza H.; CINCOTTO, Maria A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento.** Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, SP, 2004.

NETO, F. B. F. **Determinação da finura do cimento através da peneira N° 200 (NBR 11579:2012).** Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, TO, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2ª ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p. Tradução de Eng. Salvador E. Giammusso.

OLIVEIRA, Kamila A. **Caracterização e classificação do resíduo de lã de rocha para utilização em indústria cimenteira.** Tese de Bacharelado, Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, SC, 2013.

OLIVEIRA, Lívia S. de. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios.** Tese de mestrado, UFSJ. São João del-Rei, MG, 2013.

PEREIRA, C. **Tipos de argamassa – AC-I, AC-II e AC-III.** Escola Engenharia, 2015. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-argamassa/>. Acesso em: 25 de mai. de 2018.

PEREIRA, Tobias A. da C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adição de fibras de lã de rocha ou poliamida.** Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2010.

PINTO, Tarcísio de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 1999.

PROENÇA, Marcela P. **Desenvolvimento de membranas íon-seletivas com poliestireno sulfonado e polianilina dopada para a aplicação em eletrodialise.** Tese de mestrado, UFRGS. Porto Alegre, RS, 2009.

RESNIL. **Tipos de cimento.** Disponível em: <http://resdil.com.br/tipos-de-cimento/>. Acesso em: 15 de abr. de 2018.

RIBEIRO, Rosemeri. **Aditivo ou adição?** Publicado em 2017. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/aditivo-ou-adicao/>. Acesso em 11 de mai. de 2018.

ROCKFIBRAS. **Isolantes térmicos e acústicos**. Publicado em 2012. Disponível em: <http://www.rockfibras.com.br/>. Acesso em: 07 de mai. de 2018.

RODRIGUES FILHO, Guimes; ASSUNÇÃO, Rosana M. N.; MARQUES, Flavia C. A.; CORRENTE, Natália G.; MEIRELES, Carla da S. **Síntese de poliestireno sulfonado para aplicação no tratamento de água produzido a partir de copos e bandejas descartadas de poliestireno**. Química Nova, Vol. 31, No. 8, 2008.

ROYER, Betina; ASSUNÇÃO, R. M. N.; RODRIGUES Fº, Guimes; MOTTA, Leila, A. C. **Efeito da aplicação do poliestireno sulfonado (PSSNa) como aditivo em argamassas e concretos de cimento Portland CPV32**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 15, No. 1, p. 63-67, 2005.

SC ENGENHARIA E GEOTECNOLOGIA. **Diagnóstico: plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos – PMGIRS**. Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/10195885/>. Acesso em: 01 de jun. de 2018.

SCHANKOSKI, R. A. **Estudo de concreto autoadensável contendo fíler de britagem: Características das partículas, floculação e reologia**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2017.

SERRANA ENGENHARIA. Informação obtida por meio eletrônico em 05 de junho de 2018.

_____. Vídeo institucional publicado em 2012. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=m84mu4Ys__k. Acesso em: 04 de jun. de 2018.

SILVA, Keoma D. do C. e. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e lã de vidro**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2016.

SILVA, Narciso G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2006.

SOLDI, Rafael Augusto. **Síntese e caracterização de catalisadores poliméricos ácidos, a partir da reciclagem química de poliestireno, e avaliação na síntese de biodiesel em fase heterogênea**. Tese de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2006.

SOUSA, Bianca P.; NUNES, Gislaíne, A. **Sulfonação de poliestireno**. Tese de bacharelado, Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, SP, 2014.

STRECKER, K.; SILVA, C. A. da.; PANZERA, T. H. **Fabricação e caracterização de compósitos a base de cimento com incorporação de poliestireno expandido (isopor)**. Cerâmica, Vol. 60, p. 310 – 315, 2014.

TÉCHNE. **A influência da temperatura na desforma do concreto**. Publicado em 2009. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/150/artigo-a-influencia-da-temperatura-na-desforma-do-concreto-286635-1.aspx>. Acesso em: 11 de jun. de 2018.

YANG, Zhengxian; HOLLAR, John; SHI, Xianming. **Surface-sulfonated polystyrene microspheres improve crack resistance of carbon microfiber-reinforced Portland cement mortar.** *J Mater Sci*, Vol. 45, p. 3497 – 3505, 2010.

ANEXOS

ANEXO A - Caracterização dos resíduos de lã de rocha da empresa B.

1ª Legislação: ABNT NBR 10004:2004 - Resíduos Sólidos - Lixiviação e Solubilização			
PARÂMETRO	LEGISLAÇÃO	RESULTADO	UNIDADE
Corrosividade	-	Ausência	-
Inflamabilidade	-	Ausência	-
Lixiviado - Arsênio	1,0 mg/L	< 0,001	mg As/L
Lixiviado - Bário Total	70,0 mg/L	< 0,200	mg Ba/L
Lixiviado - Cádmio Total	0,5 mg/L	0,002	mg Cd/L
Lixiviado - Chumbo	1,0 mg/L	< 0,010	mg Pb/L
Lixiviado - Cromo Total	5,0 mg/L	< 0,031	mg Cr/L
Lixiviado - Mercúrio	0,1 mg/L	< 0,001	mg Hg/L
Massa Bruta - Cianeto	250 mg/kg	<0,010	mg/kg
Massa Bruta - pH	entre 2 e 12,5 pH a 25°C	7,30	pH a 25°C
Massa Bruta - Sulfeto	500 mg/kg	0,977	mg/kg
Reatividade	-	Não reativo	-
Solubilizado - Arsênio	0,01 mg/L	< 0,001	mg As/L
Solubilizado - Bário Total	0,7 mg/L	< 0,200	mg Ba/L
Solubilizado - Cádmio Total	0,005 mg/L	0,003	mg Cd/L
Solubilizado - Chumbo	0,01 mg/L	< 0,010	mg Pb/L
Solubilizado - Cianeto Total	0,07 mg/L	0,001	mg CN - /L
Solubilizado - Cobre	2,0 mg/L	0,038	mg Cu/L
Solubilizado - Cromo Total	0,05 mg/L	< 0,031	mg Cr/L
Solubilizado - Fenóis Totais	0,01 mg/L	0,090	mg C ₆ H ₅ O/L
Solubilizado - Ferro	0,3 mg/L	0,496	mg Fe/L
Solubilizado - Manganês Total	0,1 mg/L	0,292	mg Mn/L
Solubilizado - Mercúrio	0,001 mg/L	< 0,001	mg Hg/L
Solubilizado - Nitrato	-	2,0	mg NO ₃ -/L
Solubilizado - Surfactantes Aniônicos	0,5 mg/L	0,450	mg/L
Solubilizado - Zinco	5,0 mg/L	0,321	mg Zn/L

Fonte: Empresa A, 2018.