

Maiara Goulart Medeiros

**VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA ATRAVÉS  
DA SUA INCORPORAÇÃO EM MATRIZES DE CIMENTO  
PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha

Florianópolis  
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Medeiros, Maiara

VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA ATRAVÉS DA SUA  
INCORPORAÇÃO EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND / Maiara  
Medeiros ; orientador, Armando Borges de Castilhos Júnior  
; coorientadora, Janaíde Cavalcante Rocha. - Florianópolis,  
SC, 2015.

123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Resíduo industrial. 3.  
Cimento Portland. 4. Lã de rocha. I. Borges de Castilhos  
Júnior, Armando. II. Cavalcante Rocha, Janaíde. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

# VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA ATRAVÉS DA SUA INCORPORAÇÃO EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

MAIARA GOULART MEDEIROS

Dissertação julgada para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Florianópolis (SC) 04 de setembro de 2015.

---

Prof., Dr. Willian Gerson Matias  
Coordenador do Curso PPGEA

---

Prof., Dr. Armando Borges de Castilhos Junior  
Orientador

---

Prof., (a) Dr<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha  
Co-orientadora

## **Banca examinadora:**

---

Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize  
Examinador do PPGEC - UFSC

---

Prof. Dr. Marlon Capanema  
Examinador do PPGEA - UFSC

---

Prof., (a) Dr<sup>a</sup> Alexandra Rodrigues Finotti  
Examinador do PPGEA – UFSC



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Armando Castilho Borges Junior, meu agradecimento especial, pela orientação, pelo apoio, pela confiança, e pelos conselhos na qual não permitiu que eu desistisse no meio da jornada.

A Prof. Dr<sup>a</sup> Janaíde Rocha Cavalcante, pelos contínuos ensinamentos ao longo da pesquisa, e pelo apoio recebido do desenvolvimento de cada ensaio realizado. Ao apoio do Laboratório VaLores, e ao CNPq.

À empresa GRI – Gerenciamento de Resíduos Industriais S.A., por apoiar e possibilitar a realização desta pesquisa, em especial à pessoa do Sr. Valter Daniel Alvares.

Aos colegas de trabalho, em especial a pessoa do Marcelo Delpizzo Caneschi e Liliana dos Santos Dutra por acreditarem na realização do projeto e prover subsídios para sua realização.

Ao Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo e Ketlin Coelho do Laboratório CerTec - UNESC pela essencial ajuda nas atividades experimentais.

Aos colegas dos Laboratórios de VaLores e Nanotec: Julio Cesar Piaia, Luis Urbano Tamara, Lucas Onghero e Ronaldo Pilar na ajuda recebida, nos ensaios realizados, em especial a Paula Salum por toda ajuda e apoio mútuo, fatores importantes para o andamento e conclusão deste trabalho.

A minha mãe Maria Helena Mendes Goulart e minha irmã Taynara Goulart Medeiros, pelo eterno legado dos valores essenciais que norteiam minha vida e profissão, pelo apoio incondicional e pela fé em um futuro além das possibilidades.

Ao meu noivo, Dilnei Medeiros, por seu incansável apoio e pela decisão de caminhar mais esta jornada ao meu lado, por tantas vezes abrindo mão do tempo e do próprio bem-estar em prol desta conquista.

As minhas amadas “estagiarias” Nathalia dos Reis Vechi e Kamila Oliveira Almeida, por toda ajuda e suporte técnico recebido durante a jornada de estudo e trabalho.

Aos amigos: Fernando Maccari e Lucia Helena de Freitas, ambos que prontamente quando solicitados não mediram esforços para ajudar e contribuir com este trabalho.

Por fim, não mesmo importante, DEUS, o criador da vida e sustentador do meu universo.

“Tudo aquilo que o homem ignora, não existe para ele. Por isso o universo de cada um, se resume ao tamanho de seu saber.”  
(Albert Einstein).





## RESUMO

A propriedade pozolânica do resíduo industrial de lâ de rocha (RWP), bem como sua incorporação em matrizes de cimento Portland foi analisada nesta pesquisa. A lâ de rocha é um material isolante muito utilizado por diversas indústrias. Inicialmente caracterizou-se o resíduo através das técnicas: difratometria de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), análise térmica de Calorimetria Diferencial de Varredura e Termogravimetria (DSC/TG) na amostra comercial e no resíduo; classificação do resíduo segundo NBR 10.004 (2004), moagem, granulometria a laser e massa específica. Posteriormente, avaliou-se o potencial de atividade pozolânica do resíduo moído em 1 e 2 horas em pastas produzidas com RWP e hidróxido de cálcio, e identificou-se os compostos formados pela análise térmica (DSC/TG), (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para as idades de 28 e 90 dias, também para efeitos comparativos executou-se o ensaio de acordo com a NBR 5752 (2014) – Índice de atividade pozolânica Cimento Portland e NBR 15895 (2010) - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Os objetivos específicos desta pesquisa foram; caracterizar o resíduo de lâ de rocha com intenção de sua valorização como material pozolânico. Obter o índice de atividade pozolânica para as duas curvas granulométricas do resíduo em estudo. Investigar o efeito da substituição do cimento Portland por resíduo de lâ de rocha em argamassas. Pode-se concluir que, a utilização do resíduo industrial de lâ de rocha como material pozolânico não foi conclusiva, o resíduo apresentou um potencial desenvolvimento de pozolanicidade em idade avançadas. No efeito fíler a incorporação dos resíduos de lâ rocha trouxe efeitos benéficos, como aumento da resistência a compressão. Os resultados encontrados mostram que o resíduo de lâ de rocha utilizado nesta pesquisa pode ser classificado como classe II A – não inerte (não perigoso), possui característica de sólido amorfo e se enquadra como material pozolânico conforme estabelecido pela norma NBR 12653 (2014). Nas análises térmicas da amostra resíduo e comercial, apresentou contaminação por ferro no resíduo. A incorporação do resíduo nas pastas de hidróxido de cálcio, e nas argamassas aumenta a resistência à compressão, esta propriedade melhorada é o resultado da estrutura densa obtida pelo efeito de enchimento realizado pelas partículas do resíduo. Supostamente, os produtos da reação pozolânica começam a ser formados após 90 dias de idade conforme observações realizadas pelo MEV. O ensaio de Chapelle modificado não apresentou atividade pozolânica.

**Palavras-chaves:** Resíduo de lâ de rocha. Pozolana. Cimento Portland.

## ABSTRACT

The pozzolanic property of industrial waste rock wool (RWP) as well as its incorporation in Portland cement was analyzed in this research. The rock wool is an insulating material widely used by several industries. Initially, the residue was characterized by the techniques: X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), thermal analysis Differential Scanning Calorimetry and Thermogravimetry (DSC/TG) in commercial sample and its residue; classification of waste according to NBR 10004 (2004), grinding, laser granulometry and specific weight. Subsequently, we assessed the potential ground waste pozzolanic activity in 1 and 2 hours on ground produced by RWP and calcium hydroxide, and identified the compounds formed by thermal analysis (DSC / TG), (XRD) and (MEV ) to the ages of 28 and 90 days. Also for comparative purposes, it was executed the test according to NBR 5752 (2014) - pozolância Portland cement activity level and NBR 15895 (2010) - Determination of fixed calcium hydroxide content - modified Chapelle method. The objectives specific of this research were; characterize the rock wool waste with intention of upgrading them pozzolanic material. Get the pozzolanic activity index for the two size distribution curves of the residue in the study. To investigate the effect of replacing Portland cement for rock wool waste in mortars. It can be concluded that the use of industrial waste rock wool as a pozzolanic material was not conclusive, the residue showed a potential development of advanced age pozzolanic. In effect fillers the incorporation of rock wool waste brought beneficial effects, such as increase the compressive strength. The results show that the rock wool waste used in this study can be classified as class II A - not inert (non-hazardous) has amorphous solid feature and fits as pozzolanic material as established by NBR 12653 (2014). In the thermal analysis of the sample waste and commercial, showed contamination with iron in the waste. The incorporation of the waste on calcium hydroxide pastes, mortars and increases the compressive strength of this improved property is the result of dense structure obtained by filling effect achieved by the particulate waste. Supposedly of the pozzolanic reaction products begin to be formed after 90 days of age, according to observations made by SEM. The modified Chapelle test showed no pozzolanic activity.

**Keywords:** waste rock wool. Pozzolan. Portland cement.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Composição química de diversos materiais reciclados em comparação a composição química do cimento Portland (peso em %) ...	<b>22</b>
<b>Tabela 2</b> - Composição química, em % em massa, da lâ de rocha segundo diferentes autores.....	<b>31</b>
<b>Tabela 3</b> - Propriedades físicas e químicas da lâ de rocha.....	<b>32</b>
<b>Tabela 4</b> – Requisitos químicos estabelecidos para classificação de materiais pozolânicos.....	<b>37</b>
<b>Tabela 5</b> - Requisitos físicos estabelecidos para classificação de materiais pozolânicos.....	<b>37</b>
<b>Tabela 6</b> – Tipos de ensaios desenvolvidos, laboratórios e instituições utilizadas.....	<b>42</b>
<b>Tabela 7</b> - Dosagem das argamassas para determinação I.A.P - NBR 5752/2014 .....	<b>50</b>
<b>Tabela 8</b> - Traço para ensaio da determinação da reatividade pozolânica.....	<b>52</b>
<b>Tabela 9</b> - Resultados da classificação do resíduo de lâ de rocha: ferro e fluoreto encontrados na amostra estudada (RWP) e limites de máximos G - NBR 10.004 para o extrato solubilizado. ....	<b>54</b>
<b>Tabela 10</b> - Composição química, teores dos óxidos (%), do resíduo de lâ de rocha.....	<b>55</b>
<b>Tabela 11</b> - Distribuição granulométrica do resíduo de lâ de rocha moído em 1 e 2 horas.....	<b>61</b>
<b>Tabela 12</b> – Massa específica do resíduo de lâ de rocha, agregado miúdo e agregado graúdo. ....	<b>61</b>
<b>Tabela 13</b> - Análise estatística para os dados de resistência à compressão (MPa) das pastas de hidróxido de cálcio (% diferentes do resíduo de lâ de rocha moído por tempo de 1 hora).....	<b>62</b>
<b>Tabela 14</b> - Análise estatística para os dados de resistência à compressão (MPa) das pastas de hidróxido de cálcio (% diferentes do resíduo de lâ de rocha moído por tempo de 2 horas). ....	<b>63</b>
<b>Tabela 15</b> - Resistência à compressão média e IAP das argamassas e produzidas com 5%, 15% e 25% de RWP moído com tempo de 1 e 2 horas aos 28 dias.....	<b>75</b>
<b>Tabela 16</b> - Resultados obtidos pelo ensaio de Chapelle em amostras de RWP, de acordo com tempo de moagem e diâmetro das partículas.....	<b>77</b>
<b>Tabela 17</b> - legenda da nomenclatura de cada material pozolânico testado com ensaio de chapelle modificado.....	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Esquema geral para caracterização do resíduo.....	<b>26</b>
<b>Figura 2</b> - Aparência do resíduo de lâ de rocha, em forma de fibras.....	<b>29</b>
<b>Figura 3</b> - Diâmetro médio da partícula do resíduo de lâ de rocha observados no microscópio eletrônico de Varredura (MEV) (x2000). ....	<b>30</b>
<b>Figura 4</b> - Resíduo de lâ de rocha: (a) após processo de moagem; (b) in natura. ....	<b>43</b>
<b>Figura 5</b> - Fluxograma do programa experimental – Etapa 1 (caracterização) .....	<b>44</b>
<b>Figura 6</b> - Fluxograma do programa experimental – Etapa 2 (Atividade pozolânica).....	<b>45</b>
<b>Figura 7</b> - Fluxograma do programa experimental – Etapa 3 (Resistência à compreensão). ....	<b>46</b>
<b>Figura 8</b> - Resíduo de lâ rocha, proveniente do isolamento térmico de caldeiras e precipitadores eletrostáticos de uma usina termelétrica. Em A: imagem do resíduo de lâ de rocha; em B: imagem ampliada do mesmo resíduo para visualização dos grânulos de ferro (setas). ....	<b>54</b>
<b>Figura 9</b> – Comparação da composição química do resíduo de lâ de rocha utilizado no experimento em comparação com o resíduo de lâ de rocha da literatura e com outros materiais pozolânicos. ....	<b>56</b>
<b>Figura 10</b> – Difratoograma de raios-X do resíduo de lâ de rocha. ....	<b>57</b>
<b>Figura 11</b> - Difratoograma de raios-X do resíduo de lâ de rocha. Amostra de RWP da literatura utilizados para revestimento de fornos na indústria de beneficiamento de minérios. ....	<b>58</b>
<b>Figura 12</b> - Análise de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Em A; resíduo de lâ de rocha e B: lâ de rocha comercial.....	<b>59</b>
<b>Figura 13</b> - Percentual (%) de CaO que reagiu com RWP moído em 1 hora nas pastas com a idade de 28 e 90 dias.....	<b>64</b>
<b>Figura 14</b> - Percentual (%) de CaO que reagiu com RWP moído em 2 horas nas pastas com a idade de 28 e 90 dias.....	<b>65</b>
<b>Figura 15</b> - Curvas (DSC) das pastas de hidróxido de cálcio com resíduo de lâ de rocha moído com tempo de 1 hora e idade de 28 dias. ....	<b>67</b>
<b>Figura 16</b> - Curvas (DSC) das pastas de hidróxido de cálcio com resíduo de lâ de rocha moído com tempo de 2 horas e idade de 28 dias.....	<b>67</b>

<b>Figura 17</b> - Difratometria de raios-X das pastas hidróxido de cálcio com RWP moído (idade 28 dias). A: moído com tempo 1 hora e B: moído com tempo 2 horas.....	<b>69</b>
<b>Figura 18</b> - Difratometria de raios-X das pastas hidróxido de cálcio com RWP moído (idade 90 dias).A: moído em 1 hora e B: moído em 2 horas. ....	<b>70</b>
<b>Figura 19</b> -MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 horas para idade de 28 dias. ....	<b>71</b>
<b>Figura 20</b> -MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 2 horas para idade de 28 dias.....	<b>72</b>
<b>Figura 21</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 2 horas para idade de 28 dias.....	<b>73</b>
<b>Figura 22</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 2 hora para idade de 90 dias. ....	<b>74</b>
<b>Figura 23</b> - Resultados obtidos pelo ensaio de Chapelle e comparação do consumo de Ca (OH) <sub>2</sub> com valor de referência. ....	<b>78</b>
<b>Figura 24</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (REF). ....	<b>102</b>
<b>Figura 25</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (25% RWP). ....	<b>102</b>
<b>Figura 26</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (50% RWP). ....	<b>103</b>
<b>Figura 27</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (75% RWP). ....	<b>103</b>
<b>Figura 28</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (100% RWP). ....	<b>104</b>
<b>Figura 29</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (REF). ....	<b>104</b>
<b>Figura 30</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (25%RWP). ....	<b>105</b>
<b>Figura 31</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (50%RWP). ....	<b>105</b>
<b>Figura 32</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (75%RWP). ....	<b>106</b>
<b>Figura 33</b> – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (100%RWP). ....	<b>106</b>

<b>Figura 34</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (25% RWP).....	<b>107</b>
<b>Figura 35</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (50% RWP).....	<b>107</b>
<b>Figura 36</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (75% RWP).....	<b>108</b>
<b>Figura 37</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (100% RWP).....	<b>108</b>
<b>Figura 38</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (25% RWP).....	<b>109</b>
<b>Figura 39</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (50% RWP).....	<b>109</b>
<b>Figura 40</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (75% RWP).....	<b>110</b>
<b>Figura 41</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (100% RWP).....	<b>110</b>
<b>Figura 42</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (REF).....	<b>111</b>
<b>Figura 43</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (25%RWP).....	<b>111</b>
<b>Figura 44</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (50%RWP).....	<b>112</b>
<b>Figura 45</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (75%RWP).....	<b>112</b>
<b>Figura 46</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (100%RWP).....	<b>113</b>
<b>Figura 47</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (REF).....	<b>113</b>
<b>Figura 48</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (25%RWP).....	<b>114</b>
<b>Figura 49</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (50%RWP).....	<b>114</b>
<b>Figura 50</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (75%RWP).....	<b>115</b>
<b>Figura 51</b> - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (100%RWP).....	<b>115</b>

<b>Figura 52</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 1 hora para idade de 28 dias. ....	<b>116</b>
<b>Figura 53</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 1 hora para idade de 28 dias. ....	<b>116</b>
<b>Figura 54</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 1 hora para idade de 28 dias. ....	<b>117</b>
<b>Figura 55</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 1 hora para idade de 28 dias. ....	<b>117</b>
<b>Figura 56</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 1 hora para idade de 90 dias. ....	<b>118</b>
<b>Figura 57</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 1 hora para idade de 90 dias. ....	<b>118</b>
<b>Figura 58</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 1 hora para idade de 90 dias. ....	<b>119</b>
<b>Figura 59</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 1 hora para idade de 90 dias. ....	<b>119</b>
<b>Figura 60</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 2 hora para idade de 28 dias. ....	<b>120</b>
<b>Figura 61</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 2 hora para idade de 28 dias. ....	<b>120</b>
<b>Figura 62</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 hora para idade de 28 dias. ....	<b>121</b>
<b>Figura 63</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 hora para idade de 28 dias. ....	<b>121</b>
<b>Figura 64</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 2 hora para idade de 90 dias. ....	<b>122</b>
<b>Figura 65</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 2 hora para idade de 90 dias. ....	<b>122</b>
<b>Figura 66</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 hora para idade de 90 dias. ....	<b>123</b>
<b>Figura 67</b> - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 2 hora para idade de 90 dias. ....	<b>123</b>

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ABRALISO** - Associação Brasileira dos Fabricantes de Lãs Isolantes Minerais.

**CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

**CerTec** - Laboratório de Cerâmica Técnica.

**C (CaO)** - Óxido de cálcio

**C<sub>4</sub>AF** – Ferro-aluminato Tetracálcio

**C<sub>2</sub>S** – Belita, silicato de dicálcio.

**C<sub>3</sub>S** – Alita, silicato tricálcio.

**C-S-H** – Silicato de cálcio hidratado.

**CH** – Hidróxido de cálcio.

**DSC** – Calorimetria Diferencial de Varredura.

**DRX** – Difractometria de raio X.

**FRX** – Fluorescência de raio X.

**IPT** - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura.

**NBR** – Norma Brasileira.

**VaLores** – Laboratório Valorização e Reciclagem de Resíduos Industriais na Construção Civil da Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

**UFSC** – Universidade Federal de Santa Catarina.

**UNESC** – Universidade do Extremo Sul Catarinense.

**RWP** – Partículas de lã de rocha (rock wool particles).

**TGA ou TG** – Termogravimetria.

**SNIC** – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.

**S (SiO<sub>2</sub>)** – Dióxido de Silício, sílica



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
2.3 HIPÓTESES.....	21
<b>3. JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO .....</b>	<b>21</b>
<b>4. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>23</b>
4.1 NORMATIZAÇÃO GERAL NA ÁREA DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	23
4.2 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	25
4.5 LÃ DE ROCHA .....	28
4.6 POZOLANAS.....	36
4.6.1 Reação química.....	38
4.6.2 Fatores que influenciam a atividade pozolânica.....	39
4.6.3 Métodos para avaliação da atividade pozolânica .....	40
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
5.1 MATERIAL DE ESTUDO.....	43
5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	44
5.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL LÃ DE ROCHA.....	46
5.3.1 Classificação do resíduo de lã de rocha. ....	47
5.3.2 Fluorescência de raios-X (FRX).....	47
5.3.2 Difratomia de raio-X (DRX).....	47
5.3.3 Análise térmica diferencial (DSC) e termogravimetria (TGA) .....	48
5.3.4 Massa específica absoluta .....	48
5.3.5 Moagem do resíduo de lã de rocha .....	48
5.3.6 Distribuição granulométrica a laser .....	49
5.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA .....	49
5.4.1 Avaliação da pozolanicidade pelo método da NBR 5752 (2014) .....	49
5.4.2 Avaliação da pozolanicidade pelo método da NBR 15895 (2010).....	51

5.4.3	Avaliação da pozolanicidade - Consumo de hidróxido de cálcio .....	51
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE LÃ DE ROCHA ...	53
6.1.1	Resultados do ensaio de classificação .....	53
6.1.2	Fluorescência de raios-X (FRX).....	55
6.1.3	Difratometria de raios-X (DRX) .....	57
6.1.4	DSC/TG do material lã de rocha .....	58
6.1.5	Granulometria a laser .....	60
6.1.6	Massa específica.....	61
6.2	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO INDUSTRIAL DE LÃ DE ROCHA.....	61
6.2.1	Consumo de hidróxido de cálcio .....	61
6.2.2	Análise MEV nas pastas de hidróxido contendo RWP. ....	71
6.2.3	Índice de atividade pozolânica – NBR 5752/2014.....	74
6.2.4	Método do Chapelle – NBR 15895/2010.....	76
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO A – LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO – NBR 10.004/2004 .....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO B – ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA .....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXO C – ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER.....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO D – (DSC/TGA) PARA AS PASTAS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO CONTENDO AS MISTURAS DO RESÍDUO DE RWP MOÍDO COM TEMPO EM 1 HORA E 2 HORAS. ....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO E – (MEV) PARA AS PASTAS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO CONTENDO AS MISTURAS DE RWP MOÍDO COM TEMPO EM 1 HORA E 2 HORAS.....</b>	<b>116</b>
	<b>ANEXO F – PROPRIEDADES DO CIMENTO CP II-F-32 .....</b>	<b>124</b>

## 1. INTRODUÇÃO

---

O gerenciamento de resíduos industriais nas últimas décadas é um dos temas ambientais de grande repercussão, na medida em que a geração crescente de resíduos tem exigido soluções mais eficazes e investimentos maiores por parte de seus geradores. Em todo o mundo, políticas de gerenciamento de resíduos industriais foram e têm sido implementadas, buscando o equacionamento desta problemática, as indústrias têm realizado um reforço crescente para tornarem seus processos produtivos menos poluidor, principalmente no que refere a geração e gestão de resíduos sólidos industriais. No Brasil, em agosto de 2010 foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei Nº. 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que no artigo 7º estabelece os principais objetivos, com destaque para: a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos; bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos<sup>1</sup> (TONETO; SAIANI; DOURADO, 2014).

O material lã de rocha é composto de fibras finas amorfas, é largamente utilizada na indústria, possui suas características, como facilidade de se manusear e moldar aos equipamentos como tubulações, caldeiras, fornos e, principalmente, pela sua capacidade de isolamento térmico, e proteção contra incêndio, é muito usada principalmente em usina termelétrica e hidrelétrica. Porém, devido às manutenções necessárias nos equipamentos nos quais a lã rocha é usada, este material tem a sua propriedade de eficiência térmica alterada e se torna um resíduo industrial.

Este material atualmente é destinado a aterros industriais de classe II (não perigosos), onde é transportado a longas distâncias, e o que encarece sua disposição e ainda amplia as emissões por ele geradas. O reaproveitamento dos resíduos produzidos nos processos industriais constitui uma meta constante de seus geradores. A fim de buscar o

---

<sup>1</sup> Os rejeitos são resíduos sólidos de acordo com artigo 3º da PNRS que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. (TONETO; SAIANI; DOURADO, 2014).

equacionamento dos problemas relativos à disposição destes resíduos de lâ de rocha, a incorporação do mesmo como materiais cimentícios pode ser uma aplicação viável (Cheng et al. 2011)

Devido à ausência de um Inventário Nacional de Resíduos Industriais e desatualização das informações dos Inventários Estaduais de Resíduos Industriais existente, não foram encontrados dados consolidados nacionalmente, e nem o quantitativo do resíduo industrial de lâ de rocha gerados no Brasil. Foram encontrados dados de produção de lâ mineral, ou seja, lâ de rocha, lâ de vidro e lâs similares. De acordo com dados obtidos do e-SIC (Sistema de Acesso à Informação) usando como fonte o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2011 e 2012, o Brasil apresentou 15 e 13 unidades de produção de lâ mineral respectivamente. A quantidade produzida no País em 2011 e 2012 foi de 27.635,817 e 30.855,291 toneladas, sendo este o único dado existente mais recente sobre o material.

Segundo os pesquisadores Cheng et al., (2011) e Lin et al., (2013a), sugerem que as partículas de lâ de rocha podem ser consideradas como um material suplementar para substituir parte do cimento e aumentar as propriedades mecânicas e durabilidade de argamassa e concreto. A lâ de rocha, através da sua composição química, apresenta características pozolânicas de acordo com NBR 12653 (2014).

O reaproveitamento dos resíduos industriais, especificamente do resíduo de lâ de rocha na forma de adição e ou substituição do cimento Portland, além de gerar um possível ganho ambiental e econômico, pode proporcionar melhorias nas propriedades das matrizes cimentíceas. Uma das metas desta pesquisa é gerar uma alternativa para a disposição de resíduos sólidos industriais de lâ de rocha, através da avaliação da atividade pozolânica e sua incorporação em matrizes de cimento Portland.

## **2. OBJETIVOS**

---

### **2.1 Objetivo Geral**

A presente pesquisa tem por objetivo identificar o potencial de atividade pozolânica do resíduo industrial de lâ de rocha (RWP).

## 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o resíduo de lâ de rocha com intenção de sua valorização como material pozolânico.
- Obter o índice de atividade pozolânica para as duas curvas granulométricas do resíduo em estudo.
- Investigar o efeito da substituição do cimento Portland por resíduo de lâ de rocha em argamassas.

## 2.3 Hipóteses

O resíduo de lâ de rocha pode apresentar um potencial de atividade pozolânica e por outro lado, as argamassas confeccionadas com RWP podem melhorar resultados de resistência à compressão.

## 3. JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO

---

A pesquisa se justifica na medida em que busca uma aplicação do resíduo industrial de lâ de rocha que atualmente é destinado para aterro industrial de classe II (não perigosos). O estudo baseia-se na utilização do resíduo como matéria-prima pozolânica para a incorporação em matrizes cimentíceas, contribuindo para a redução de resíduos destinados a aterros em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, no que tange a gestão de resíduos no país.

Conforme estudos realizados por Cheng et al. (2011) e Lin et al. (2013a), o resíduo de lâ de rocha apresenta uma composição química semelhante a outros materiais pozolânicos, tais como; cinzas volantes, escória de alto forno (GGBS), pó de sílica, e pode ser considerada como um material complementar de cimento, como mostra a tabela 1.

Outros subprodutos industriais, tais como cinzas volantes, sílica ativa, GGBS e resíduos de lâ de rocha podem ser reutilizados e reciclados para reduzir os problemas ambientais gerados pela construção civil (LIN et al. 2013a); a aplicação destes materiais depende da composição química e do tamanho de grão (CHENG et al. 2011).

Materiais ricos em sílica e/ou alumina em granulometria fina com características de sólidos amorfos podem ser utilizados como pozolanas em pastas e argamassas, contribuindo para uma melhoria das características, como a sua durabilidade. Portanto, os resíduos de lâ de

rocha podem atuar tanto como um material cimentante ou material de enchimento inerte em compostos à base de cimento, dependendo do tamanho da partícula (CHENG et al., 2011).

Tabela 1 - Composição química de diversos materiais reciclados em comparação a composição química do cimento Portland (peso em %).

Composição química	Materiais Reciclados				Cimento Portland
	Lã de rocha	Cinza volante	GGBS	Sílica ativa	
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	38,7	54	33,5	91,5	21,2
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	28,6	24	9	0,2	5,4
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,3	8	3,6	0,7	3,2
Óxido de cálcio (CaO)	20,9	2	43,8	0,4	63,8
Óxido de magnésio (MgO)	7	1,3	2,7	1,5	2
Óxido de potássio + Óxido de sódio (K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O)	2	0,9	0,6	1,9	0,8
Outros	7,5	9,8	6,8	3,8	3,6

Fonte: adaptado de Cheng et al., (2011) e Lin et al. (2013a).

Materiais ricos em sílica e/ou alumina em granulometria fina com características de sólidos amorfos podem ser utilizados como pozolanas em pastas e argamassas, contribuindo para uma melhoria das características, como a sua durabilidade. Portanto, os resíduos de lã de rocha podem atuar tanto como um material cimentante ou material de enchimento inerte em compostos à base de cimento, dependendo do tamanho da partícula (CHENG et al., 2011).

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura referente ao uso do resíduo de lã de rocha com seu aproveitamento em matrizes de cimento. Sendo este estudo uma contribuição para conhecimento da área, fornecendo dados pouco estudados até o momento, como a influência da incorporação do resíduo de lã de rocha nas propriedades do cimento Portland.

A presente pesquisa busca avaliar atividade pozolânica do resíduo de lã de rocha e investiga o efeito da substituição do cimento Portland por resíduo de lã de rocha em argamassas.

## 4. REVISÃO DA LITERATURA

---

### 4.1 Normatização geral na área de resíduos sólidos

Conhecer o resíduo gerado na indústria permite o planejamento de estratégias de gerenciamento, que intervenham nos processos de geração, transporte, tratamento e disposição e/ou destinação final, buscando garantir a curto, médio e longo prazo, a preservação da qualidade do meio ambiente, bem como a recuperação da qualidade das áreas degradadas (IPEA, 2012).

Nesse sentido, um conjunto de normas NBR 10004 – Classificação (ABNT, 2004), NBR 10005/2004 - Obtenção de lixiviado (ABNT, 2004); NBR 10006 - Obtenção solubilizado (ABNT, 2004); e NBR 10007 – amostragem (ABNT, 2004), se constituem ferramentas importante para classificar os resíduos industriais visando o gerenciamento dos mesmos (IPEA, 2012). De acordo com a NBR 10004 define os resíduos sólidos como:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

A referida norma classifica o resíduo sólido quanto à sua periculosidade, considerando os riscos potenciais ao meio ambiente, saúde pública, para que possam ser gerenciados de forma adequada. A classificação dos resíduos sólidos envolve algumas etapas; identificação do processo industrial, de seus constituintes e suas características, segundo as matérias primas e insumos usados, em seguida a comparação desses constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são reconhecidos, ou quanto à concentração de seus poluentes em suas matrizes (ABNT, 2004).

Segundo a NBR 10004, os resíduos sólidos são classificados em dois grupos: Classe I - perigosos e Classe II - não perigosos, conforme abaixo:

- Classe I (perigoso): apresentam ao menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade ou que constem nos anexos A ou B da referida norma.
- Classe II (não perigoso), os quais são subdivididos em classe IIA não inertes e classe IIB – inertes.
  - Os resíduos classe II A – Não inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I – perigosos, e podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
  - Os resíduos classe II B – Inertes, são os resíduos que quando submetidos a contato dinâmico ou estático com água deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006/2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G.

A NBR 10004 apresenta anexos que auxiliam o processo de caracterização dos resíduos, sendo eles: anexo A contém resíduos de processos industriais de fontes não específicas (código de identificação descrito na norma F), por exemplo, solventes resíduos contendo não halogenados, dioxinas; enquanto o anexo B apresenta resíduos de fontes específicas (código de identificação descrito na norma K), por exemplo resíduos de produtos químicos orgânicos. O anexo C contém substâncias que conferem periculosidades aos resíduos, ou seja, que são potencialmente prejudiciais ao homem, enquanto no anexo D são listados as substâncias agudamente tóxicas encontradas nos resíduos (código de identificação descrito na norma P); no anexo E, as substâncias tóxicas (código de identificação descrito na norma U); no anexo F abrange o limite de concentração máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviado, em valores acima das concentrações estabelecidas torna o resíduo perigoso (classe I).

A NBR 10005 estabelece procedimento para obtenção do lixiviado do resíduo, fixando condições, buscando diferenciar os resíduos classe I



– perigosos e classe II não perigosos. A NBR 10006 esclarece o procedimento para obtenção do extrato solubilizado do resíduo.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei Federal 12.305/10 em seu artigo 13, define “resíduos industriais”; como aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais. Os resíduos industriais são classificados de acordo NBR 10004/2004 em perigoso e não perigosos, onde a destinação dos resíduos e/ou rejeitos é obrigação do gerador. Se o gerador é o responsável pelo tratamento e destinação final e/ou disposição final dos resíduos e rejeitos, ele pode executar este serviço por si próprio ou contratar serviços de empresas especializadas. Os resíduos e rejeitos industriais apresentam composição complexa e variada, dependendo do processo industrial.

O gerador necessita de um gerenciamento para desenvolver a melhoria contínua, através das seguintes etapas; não geração, redução, segregação na origem, coleta, transporte interno, armazenamento temporário, acondicionamento, identificação, registros, controle dos resíduos e/ou rejeitos gerados e destinados, escolha de fornecedor, transporte externo e destinação e/ou disposição final. A valorização dos resíduos industriais gerados nos processos de produção permite que o resíduo de uma empresa seja utilizado como matéria prima para outra, possibilitando o reaproveitamento de materiais com baixo custo, disponíveis localmente, através da investigação de suas potencialidades.

#### **4.2 Reaproveitamento de resíduos sólidos na construção civil**

As formas mais usuais de aproveitamento de resíduos na construção civil, muitas vezes, baseiam-se em aspectos qualitativos, como textura, granulometria, forma, cor, capacidade de aglutinar, sem qualquer tipo de investigação de características que fornece justificativas para avaliar o comportamento ao longo do tempo, causando não somente danos ao meio ambiente como exposto a edificação a riscos de contaminação, além do comprometimento devido à exposição (ROCHA; CHERIAF, 2003). Conforme descreve Rocha e Cheriaf (2003), as formas adequadas de aproveitamento de resíduos, ou de subprodutos industriais, como matéria-prima secundária, devem envolver um completo conhecimento do processo de geração, a caracterização completa dos resíduos e identificação do potencial de aproveitamento, identificando as características limitantes do uso e da aplicação.

Já com os resíduos originados no setor industrial, de acordo com diversos ramos de atividades e nas diferentes formas, devem ser aprimoradas tecnologias de minimização da geração na fonte, e quando possível, a introdução deste resíduo novamente na cadeia produtiva. Segundo Rocha e Cheriaf (2003), existem atualmente soluções visando o reaproveitamento dos resíduos, com tecnologias e procedimentos diversos, mais ou menos sofisticados, mão-de-obra ou capital intensivo, processos importados e desenvolvidos no país. Sua escolha, entretanto, deve ser feita tendo em vista o aproveitamento ambiental adequado, com menor custo possível, dependendo do investimento financeiro, disponibilidade e respeitando as características socioeconômicas de cada local para a destinação final do resíduo.

Por sua vez, demonstrando uma avaliação do potencial de aproveitamento de resíduos, Cheriaf et al. (1997) apud Rocha e Cheriaf (2003), estabeleceram a necessidade de identificação dos parâmetros estruturais, geométricos e ambientais dos resíduos, conforme procedimento esquematizado na Figura 1 e descrição nos itens (a) à (d).

Figura 1 - Esquema geral para caracterização do resíduo.

Parâmetros estruturais	Parâmetros geométricos
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Difractometria de raios X</li> <li>▪ Análises termogravimétricas</li> <li>▪ Análise química</li> <li>▪ Espectrometria infravermelho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Granulometria</li> <li>▪ Microscopia eletrônica de varredura</li> <li>▪ Densidade</li> <li>▪ Superfície específica</li> </ul>
Parâmetros ambientais	Outros parâmetros
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lixiviação de resíduos (NBR 10005/2004)</li> <li>▪ Solubilização de resíduos (NBR 10006/2004)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Consistência</li> <li>▪ Matéria orgânica</li> <li>▪ Reologia</li> <li>▪ Pureza</li> </ul>

Fonte: adaptado de Cheriaf et al. (1997) apud Rocha e Cheriaf (2003).

- a) Parâmetros estruturais: identificação e conhecimento da estrutura e composição dos resíduos através da realização de ensaios: análise química, difractometria de raios X, análise térmica diferencial, condutibilidade térmica, perda de massa ao fogo.
- b) Parâmetros geométricos: identificação da morfologia e textura do resíduo, através de análises de microscopia eletrônica de varredura, granulometria, superfície específica.
- c) Parâmetros ambientais: identificação dos constituintes que podem ser potencialmente lixiviados e/ou solubilizados, pH.
- d) Outros parâmetros: identificação das propriedades relacionadas à unidade de geração do resíduo, e das formas de beneficiamento que podem ser associadas: reologia, presença de óleos, graxas, conteúdo orgânico, pureza, consistência, capacidade de retenção de umidade, capacidade de moagem.

Quanto ao aproveitamento de resíduos como materiais de construção, só nos últimos anos iniciaram-se discussões mais consistentes do problema e do potencial de aproveitamento. Alguns centros de pesquisa, com maior capacidade instalada, conseguiram envolver os geradores de resíduos e aplicar os resultados em processos industriais. Entretanto, pontos delicados da questão precisam ser mais atacados: estabelecimento de normas e de procedimentos que auxiliem na validação dos materiais desenvolvidos com resíduos e mapeamento da disponibilidade dos resíduos. Além disso, a forma de avaliação do potencial de liberação de poluentes ainda não é consensual, tendo sido empregados os procedimentos estabelecidos para lixiviação e solubilização de resíduos (CURTIUS; FIEDLER, 2002).

Na área de construção civil, o reaproveitamento de resíduos sólidos industriais pode ajudar a diminuir os custos e prejuízos ambientais relativos à destinação e/ou disposição final desses resíduos, além de reduzir os impactos ambientais decorrentes da extração de matéria-prima diretamente do meio ambiente, contribuindo de forma relevante, para uma menor degradação ambiental. Destarte, a indústria da construção civil pode contribuir de forma significativa como receptora de resíduos sólidos no tocante à sua destinação final. A valorização desses resíduos em matrizes cimentícias com objetivo de produção de artefatos para construção civil, se feita de maneira criteriosa, permite proporcionar um destino ambientalmente correto aos resíduos gerados, que de outra forma poderiam ser fontes de poluição.

A utilização do resíduo industrial de lã de rocha, em substituição parcial do cimento, pode ser um caminho alternativo para minimização deste problema. Há inúmeros estudos a respeito do tema,

reaproveitamento de resíduos sólidos na construção civil, porém poucos com tema resíduo de lâ de rocha e merecem destaque no texto. Todos, em sua essência, demonstram a importância e necessidade da valorização do resíduo, através da aplicação e incorporação no setor da construção civil.

Os trabalhos de Lin et al., (2013) e Cheng et al. (2011) buscaram estudar o reaproveitamento do resíduo de lâ de rocha, sendo Cheng et al. (2011) concentraram-se a pesquisar principalmente a avaliação mecânica e a durabilidade de compósitos à base de cimento contendo o resíduo de lâ de rocha. E Lin et al. (2013b) estudaram a microestrutura das amostras de argamassas produzidas com incorporação do resíduo de lâ de rocha.

Segundo Rocha e Cheriaf (2003), a importância do aproveitamento do resíduo, possibilita o desenvolvimento de materiais de baixo custo a partir de subprodutos industriais, disponíveis localmente, através da investigação de suas potencialidades.

O concreto de cimento Portland é capaz de incorporar com segurança cinza volantes, escórias e outros subprodutos industriais (METHA; MONTEIRO 1994). Além disso, a composição dos resíduos de lâ de rocha é semelhante a outros materiais de pozolana tal como cinzas volantes, escória de alto forno e sílica, e pode ser considerado um material complementar de cimento (CHENG et al., 2011). Ainda, o material de lâ de rocha dependendo o tamanho da partícula, poderá fornecer resultados satisfatórios quando aplicado em matrizes de cimento Portland.

#### **4.5 Lã de rocha**

Segundo a Associação Brasileira dos Fabricantes de Lãs Isolantes Minerais – ABRALISO (2013), a estrutura formada pelo entrelaçamento das fibras nos isolantes em lãs minerais dificulta a movimentação do ar no seu interior (Figura 2), 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. Devido às suas características, este material atende aos mercados industrial, automotivo, civil, entre outros.

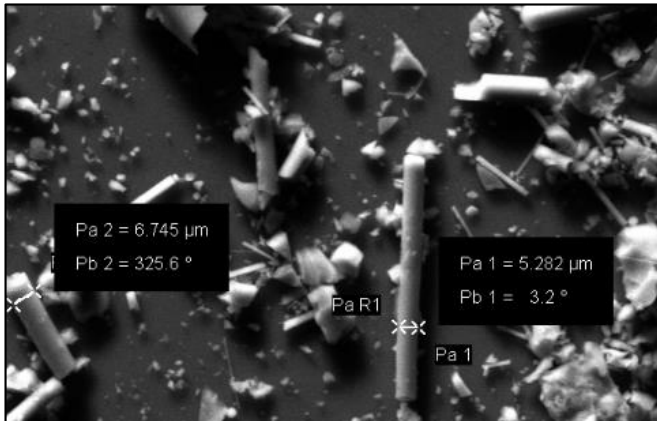
Figura 2 - Aparência do resíduo de lã de rocha, em forma de fibras.



Fonte: Autora.

Lã de rocha é frequentemente usada para isolamento térmico, constituída de finas fibras; com diâmetro médio em torno de 6 a 7 micra e comprimento no máximo 20 mm, aglomerada por resinas sintéticas. A figura 3 apresenta imagem de observações realizadas no equipamento MEV.

Figura 3 - Diâmetro médio da partícula do resíduo de lã de rocha observados no microscópio eletrônico de Varredura (MEV) (x2000).

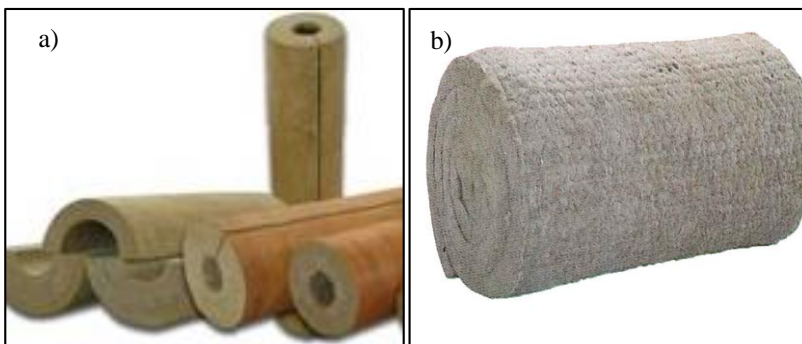


Fonte: Autora.

De acordo a imagem as fibras apresentaram diâmetro médio de 6,745  $\mu\text{m}$  e 5,282 $\mu\text{m}$  (Pa).

Desenvolvida para melhorar o isolamento térmico de instalações, é comercializada em rolos, painéis, havendo uma diversidade de tamanhos, espessura, que se adequam a cada especificidade. O material fibroso resulta na dissipação do calor e proporciona redução do gasto de energia. Na figura 4, mostra a) painel e b) manta produzidos com lã de rocha.

Figura 4 - Produtos de lã de rocha: a) painel b) manta.



Fonte: ROCKFIBRAS DO BRASIL IND. E COM. LTDA (2014).

A lã de rocha, por suas propriedades físicas e químicas é usada para aplicações de coberturas de equipamentos como caldeiras, tanques, tubulações, estufas, aquecedores dentre outros, através da diminuição da dissipação de calor. Possui algumas características:

- É incombustível, não apresenta risco de incêndio.
- Imputrescível e antiparasitas.
- Não tem interação com a superfície que está em contato.
- Não corrosiva.
- Leve, fácil de manusear e cortar.

Conforme a Tabela 2, a lã de rocha é composta principalmente por  $\text{SiO}_2$  (sílica),  $\text{CaO}$  (cal) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina). Pode apresentar ainda outros constituintes como  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Tabela 2 - Composição química, em % em massa, da lã de rocha segundo diferentes autores.

Composição da lã de rocha	Autores					
	ALEIXO et al. (2014)	CHENG et al. (2011)	LUOTO et al. (1998)	BUCK et al. (1997)	JURY et al. (1997)	LIDDELL; MILLER (1991)
$\text{SiO}_2$	56,07	38,7	45,9	45,0 - 52,0	41,0 - 44,0	47,2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,98	18,6	11,9	8,0 - 13,5	14,0 - 15,0	14
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,74	5,3	8,2	5,5 - 6,5	12,0 - 13,0	11,7
$\text{CaO}$	6,73	20,9	18,5	10,0-12,0	10,0-12,0	11,2
$\text{MgO}$	3,03	7	11,6	8,0 - 15,00	6,0 - 7,0	10,7
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	13,77	2	2,4	0,8 - 3,3	1,0 - 4,0	3,5
Outros	14,48	7,5	1,5	—	—	1,7

Fonte: adaptado de Rodrigues (2009), Cheng et al. (2011) e Aleixo et al. (2014).

A tabela 3 apresenta as propriedades físicas e químicas da lã de rocha, segundo o fabricante Rockfibras, o qual produz a lã de rocha utilizada pela usina termelétrica que cedeu os resíduos para estudo.

Tabela 3 - Propriedades físicas e químicas da lã de rocha.

<b>Propriedades</b>	<b>Resultado</b>
Estado físico	Sólida
Forma	Lã mineral de textura homogênea, em forma de: painel, manta ou rolos
Diâmetro médio das fibras	(6 – 8) micras
Comprimento das fibras	Máximo 20 mm
Temperatura de fusão	Superior a 1100° C
Cor	Cinza / Verde / Marrom
pH	Ligeiramente básico
Solubilidade em água	Nenhum
Estabilidade	Quimicamente estável

Fontes: Adaptado de ROCKFIBRAS DO BRASIL IND. E COM. LTDA (2015).

A lã de rocha foi classificada no Grupo III (material não cancerígeno), segundo relatório da IARC (Internacional Agency for Research on Cancer). A IARC, sediada em Lyon (França), é um órgão pertencente à Organização Mundial da Saúde da ONU. A produção de lã de rocha implica na emissão de CO<sub>2</sub> entre outros impactos ambientais relacionados ao ciclo vida do produto. Por possuir as características de isolante térmico, a economia de energia gerada poderá atenuar o impacto ambiental negativo neste caso.

Para aplicação da lã de rocha, o local de trabalho deve assegurar boa ventilação. Exaustão deve ser utilizada se o manuseio produzir poeira em excesso. É recomendável a utilização de máscaras contra poeiras, luvas, camisas de manga longa e calças compridas e óculos de proteção (ROCKFIBRAS, 2015).

Os processos de produção das lãs de rocha, de vidro e de escória são semelhantes. A diferença entre esses três materiais se deve à matéria-prima utilizada em cada caso (RODRIGUES, 2009). No caso da lã de rocha: a principal matéria prima utilizada na produção deste material são as rochas basálticas e escória. Pode ser necessário adicionar calcário ou outros elementos, de modo a corrigir eventuais desvios na composição química do basalto (DNPM, 2001; JURY, 1997; TRDIC et al., 1999 apud RODRIGUES, 2009).

Conforme descreve Hočevár et al., (2005), existem diversos processos de produção de lãs minerais e fibras com grande variação da



qualidade e da quantidade do produto final. O processo mais comum é o processo *Melt Spinning*. O material fundido neste processo rapidamente é disposto em cilindros metálicos rotativos para a fabricação de fibras.

As características do processo podem ser descritas da seguinte forma: quantidades de matérias-primas são medidas, homogeneizadas e enviadas a um forno que opera a temperaturas em torno 1300°C a 1500°C (RODRIGUES, 2009). Após a fusão, o material fundido é ejetado por orifícios, devido à pressão de um gás (argônio ou nitrogênio), sobre um cilindro giratório de metal resfriado, que gira com determinada velocidade angular.

Assim, o material é resfriado bruscamente, originando as fibras. Estas são extraídas dos cilindros (através de um jato ar) e posteriormente lançadas em uma câmara coletora, na qual são pulverizadas com aglutinante (dependendo do produto final desejado também pode ser utilizada uma mistura de óleo solúvel, água e silicone) (LABRINHA, 2006; ROCHA, 1998; UEDA et al., 1999). A figura 6 apresenta o processo de produção da lã de rocha.

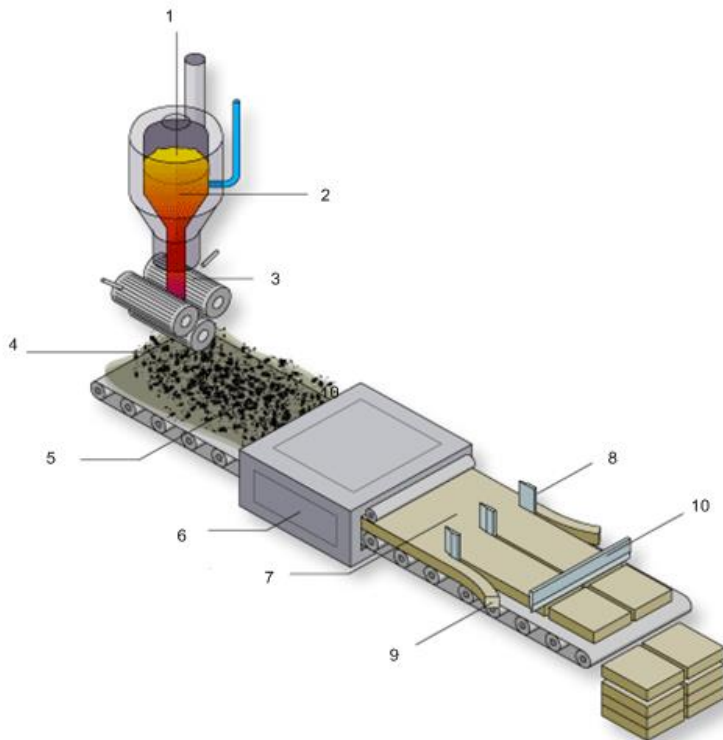
Figura 6 - Processo de produção de lã de rocha (Rockfibras, Guararema – SP). a) Matéria prima; b) Matéria prima sendo pesada; c) Matéria prima homogeneizada e sendo enviada ao forno; d) Fusão do material; e) Fibras pulverizadas e aglutinadas f) Formação das fibras.



Fonte: Autora

Na figura 7 segue uma esquematização do processo do produtivo da lã de rocha.

Figura 7 - Esquematização do processo produtivo da lã de rocha.



Fonte: (EURIMA, 2015).

- 1 – Matéria prima
- 2 – Fusão
- 3 – Formação das fibras
- 4 – Recepção
- 5 – Pedacos de lã de rocha reciclados
- 6 – Cura: Fibras são pulverizadas e aglutinadas.
- 7 – Lã cinza / marrom
- 8 – Corte longitudinal
- 9 – Resíduos e aparas para reciclagem
- 10 – Corte transversa.

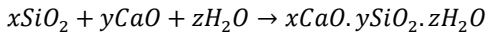
## 4.6 Pozolanas

Segundo a norma NBR 12653 (2014) materiais pozolânicos são:

materiais silicosos ou sílicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente subdividido e na presença da água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedade ligantes.

Da mesma forma, TAYLOR (1997) define material pozolânico como aquele que além de apresentar altos teores de silicatos e também aluminatos, são suficientes reativos, quando misturados com óxido de cálcio e água, para produzir silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A reação 1 ilustra simplificada as reações que ocorrem entre as pozolanas e o óxido de cálcio em presença da água:



Reação 1

As pozolanas quando incorporadas ao cimento e misturadas com água irão reagir com o hidróxido de cálcio (CH – portlandita) formado pela hidratação da alita (C<sub>3</sub>S) e da belita (C<sub>2</sub>S), formando novos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), conforme reação 1. Quando a quantidade de aluminatos (AlO<sub>2</sub>) é elevada pode haver a formação de compostos como aluminato de cálcio hidratado e sílicoaluminato de cálcio hidratado (ISAIA, 2007).

As pozolanas, utilizadas como adições minerais ao cimento, podem trazer vantagens técnicas e ambientais, por isso, atualmente são utilizadas em grande escala. De acordo com Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC 2012), o cimento brasileiro emite em torno de 600 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada produzida, e com as adições de pozolanas, evita a necessidade de produção de clínquer, trazendo grande impacto de redução das emissões de CO<sub>2</sub> geradas no processo de calcinação do calcário e queima dos combustíveis.

Existem fatores que favorecem a reação pozolânica, o arranjo estrutural pode ser considerado um deles, quanto mais desorganizada a microestrutura da pozolana, maior será sua capacidade de reação. Esta desordem na estrutura pode ser chamada fase amorfa.

A norma NBR 12653 (2014) preconiza que a soma das porcentagens de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  seja de no mínimo de 50% para materiais pozolânicos Classe E, para as demais classes N e C, mínimo de 70%. No entanto, cada material proporciona diferentes resultados, de acordo com suas características específicas. A requerida norma classifica os materiais pozolânicos segundo três classes:

- Classe N: são as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe C: são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas.
- Classe E: é qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Desta forma, para que um material seja considerado pozolânico ele deve atender as exigências químicas e físicas estabelecidas pela referida norma, conforme tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Requisitos químicos estabelecidos para classificação de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico (% em massa)		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
$\text{SO}_3$	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor Umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$

Fonte: NBR 12653 (2014)

Tabela 5 - Requisitos físicos estabelecidos para classificação de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico (% em massa)		
	N	C	E
Material retido na peneira $45\mu\text{m}$	$< 20\%$	$< 20\%$	$< 20\%$
Índice de desempenho com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$
Atividade pozolânica com cal, aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$

Fonte: NBR 12653 (2014)

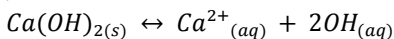
A reatividade da pozolana é influenciada pelo teor de material vítreo (amorfo) presente, assim como a granulometria da partícula adicionada (maior superfície específica) e composição química (rica em sílica e alumina). Materiais amorfos tendem a ser reativos, quanto maior o caráter amorfo da pozolana, maior será sua interação com o hidróxido de cálcio e mais rápido ocorre a reação (PONTES 2011 *apud* CAJJEJAS, 1958).

Por outro lado, materiais finos apresentam maior superfície de contato, que facilita a ocorrência das reações químicas. Alguns autores consideram que partículas abaixo de 0,015 mm possuem atividade pozolânica (ISAIA, 2007; CHENG et al. 2011).

As partículas finas podem preencher os espaços vazios promovendo efeito fíler, (preenchimento) desde que não implique em aumento da relação de água/cimento, pois quanto mais fino for o material, maior será a quantidade de água requerida na mistura (RODRIGUES, 2008). Outro fator importante para a reação pozolânica é o pH do meio, ele permite a solubilização da fase amorfa contendo sílica, alumínio e ferro. Segundo HOPPE FILHO (2008), as reações pozolânicas ocorrem somente quando pH da solução é superior a 12. Mas, para determinadas pozolanas, para que a solubilização seja mais rápida, o pH deve-se manter acima de 13,3 (FRAAY, BIJEN e HAAN; 1989 *apud* HOPPE FILHO, 2008).

#### 4.6.1 Reação química

A reatividade pozolânica baseia-se em dois parâmetros: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que uma pozolana consome e a velocidade a que a reação ocorre [Massazza, 1993]. A reação pozolânica é uma reação complexa que envolve um meio aquoso com diferentes materiais sólidos. Quanto maior a estrutura amorfa da pozolana, maior será a sua interação com a portlandite e mais rápido ocorre a reação. Desta vão originar-se os seguintes produtos em diferentes percentagens mássicas: silicatos de cálcio hidratado (CSH), silicoaluminatos de cálcio hidratados (CASH) e aluminatos de cálcio hidratado (CAH) (PONTES, 2011 *apud* CALLEJAS, 1958). Segundo NEVILLE (1997), para considerar a contribuição do hidróxido de cálcio para a reação pozolânica, deve-se compreender o seguinte mecanismo químico:



Reação 2

Em solução, o íon  $\text{OH}^-$  ataca os silicatos da pozolana, dissociando os seus componentes principais;  $\text{SiO}_2$  - sílica e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - alumina, os óxidos formados reagirão com o íon  $\text{Ca}^{2+}$  resultando em aluminados e silicatos de cálcio hidratados. Conforme descreve Pontes (2011), após o ataque do íon hidroxila à estrutura da pozolana, os produtos de reação formados estarão relacionados com a composição química dos materiais de partida.

#### 4.6.2 Fatores que influenciam a atividade pozolânica

Massaza (1993) refere que os principais fatores que influenciam a reatividade pozolânica são:

- A natureza das fases ativas: de modo a exemplificar o papel das diferentes fases ativas dá o exemplo entre cristobalite e o quartzo, minerais constituídos por sílica, porém a cristobalite apresenta uma maior reatividade, comparado ao quartzo.
- Percentagem de fases ativas na pozolana: a percentagem de fases ativas contidas numa pozolana vai influenciar na quantidade de cal consumida.
- Percentagem de  $\text{SiO}_2$  presente nas fases ativas: verificou-se que a percentagem de  $\text{Si}_2\text{O}$ , que pode ser entre 45% e 85%, presente nas fases ativas vai influenciar a quantidade de cal consumida, porém não se deve negligenciar a influência de outros compostos, como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Superfície específica: verifica-se que a reatividade a curto prazo dependente da superfície específica da pozolana, e a reatividade a longo prazo está mais dependente da composição química e mineralógica das pozolanas.
- Temperatura: o aumento da temperatura aumenta a velocidade da reação cal-pozolana mas não altera as diferenças de comportamento devido às diferentes naturezas de cada pozolana.

Conforme Pontes (2011), através de ataque ácido ao material sólido que resulta da reação pozolânica, é possível determinar a fração da pozolana que reagiu. Essa determinação é possível porque os compostos hidratados são solúveis em ácido, enquanto a pozolana é insolúvel.

### 4.6.3 Métodos para avaliação da atividade pozolânica

Atividade pozolânica de um material é definida como a habilidade de materiais naturais ou subprodutos produzirem componentes que possuem propriedades ligantes, como resultados de sua reação com o hidróxido de cálcio presente na mistura (MASSAZZA, 1993). Existem diversos métodos para determinação da atividade pozolânica descritos em normas e na literatura.

Segundo DONATELLO et al. (2010) estes métodos podem ser categorizados como diretos e indiretos. Os métodos diretos acompanham a presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e sua subsequente redução em relação ao tempo. Nos métodos indiretos mede-se uma propriedade física da amostra que indica o desenvolvimento da atividade pozolânica. Alguns métodos foram selecionados de acordo com sua relevância na literatura:

- **Consumo de hidróxido de cálcio** – Utilizado para determinação da atividade pozolânica de um material, destaca-se a metodologia desenvolvida por Cheriaf et al. (1999) a qual avalia atividade pozolânica de um material através do consumo de hidróxido de cálcio em pastas contendo quantidades iguais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e proporções em percentuais do material em estudo, utilizando-se de análise térmica diferencial na investigação dos composto formados na reação pozolânica.
- **Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (NBR 5752, 2014)**. De acordo com a referida norma, o índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) é calculado para um traço de 1:3, utilizando areia normal, pela relação (3):

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100$$

Equação 3

Onde:

$f_{cB}$  é a resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos de prova moldados com cimento Portland e substituição de 25% da massa de cimento por volume de material pozolânico,

$f_{cA}$  é a resistência média, aos 28 dias de três corpos-de-prova moldados apenas com o cimento.



- **Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado.** O método é baseado na fixação de CaO pelo material pozolânico analisado. A atividade pozolânica é avaliada através da capacidade do material de fixar o hidróxido de cálcio quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio. A solução com 2 g de óxido de cálcio, 1 g pozolana e 250 g de água isenta CO<sub>2</sub> aquecida a 90°C durante 16 horas de ensaio, sob agitação. Ao final, o teor de CaO livre é medido, por titulação cerca de 50 mL da solução com HCl 0,1 N e fenolftaleína (1g/L), e calcula-se a quantidade de CaO que foi combinada com a pozolana (NBR 15895, 2010).

Todos os métodos baseiam-se na capacidade da pozolana em combinar-se com hidróxido de cálcio formando silicatos e aluminatos de cálcio com propriedades ligantes. A diferença entre os procedimentos encontra-se essencialmente nas proporções dos reagentes e na forma de como é medida o consumo da pozolana.

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

---

Os experimentos foram realizados na UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, situada em Criciúma (SC) e na UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, situada em Florianópolis (SC), nos receptivos laboratórios conforme Tabela 6 apresentando um resumo dos ensaios desenvolvidos:

Tabela 6 – Tipos de ensaios desenvolvidos, laboratórios e instituições utilizadas.

<b>Nº</b>	<b>Ensaio realizado</b>	<b>Laboratório – Universidade</b>
1	Classificação do resíduo segundo NBR 10004 (2004)	Laboratório de Resíduos Sólidos – UNESC
2	Moagem e peneiramento	
3	Difratometria de Raios X (DRX)	
4	Análise Térmica Diferencial / Análise Termogravimétrica (DSC/TG)	Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec - UNESC
5	Massa específica	
6	Granulometria a laser	
7	Avaliação da atividade pozolânica por consumo de hidróxido de cálcio (pastas) (Cheriat et al., 1999).	Laboratório de VaLores – UFSC
8	Avaliação de propriedade mecânica (pastas de hidróxido)	Laboratório Nanotecnologia Construção civil – UFSC
9	DRX (pastas de hidróxido de cálcio)	Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) da Engenharia Mecânica da UFSC
10	MEV (pastas de hidróxido de cálcio)	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica de Varredura (LCME) da UFSC
11	Avaliação da atividade pozolânica conforme NBR 5752 (2014) e método Chapelle modificado NBR 15895 (2010)	Laboratório de VaLores – UFSC
12	Avaliação de propriedade higroscópica	Laboratório de VaLores – UFSC
13	Avaliação de resistência à compressão das argamassas	Laboratório de Materiais de Construção civil - UFSC

Fonte: Autora.

## 5.1 Material de Estudo

As amostras de lã de rocha comercial foram cedidas pela empresa Rockfibras Brasil Indústria Comércio S.A., situada na cidade de Guararema - SP e as amostras do resíduo de lã de rocha foram cedidas por uma usina termelétrica, após utilização no isolamento térmico de suas caldeiras e precipitadores eletrostáticos.

Por se tratar de um resíduo homogêneo, conforme definição do item 2.2 da norma NBR 10007 (2004), o resíduo utilizado nos ensaios provém de uma parcela do material coletado durante um carregamento do mesmo, ou seja, amostra obtida pela melhor mistura possível das alíquotas do resíduo. E toda pesquisa foi realizada com o mesmo material.

O resíduo foi submetido a um processo de moagem, criando-se assim, dois lotes de resíduo de lã de rocha moídos. Assumiu-se como única diferença entre os lotes de resíduo, seu tempo de moagem (1 e 2 horas). A Fig.4 (a) mostra o aspecto visual do resíduo de lã de rocha na forma *in natura* e após processo de moagem. O resíduo, conforme Fig. 4(b) apresenta aspecto de uma manta (camadas) de cor marrom com aspereza em função do teor de sílica presente.

A coloração marrom-escuro apresentada pela RWP é devido ao teor de  $Fe_2O_3$  presente, pois elevados teores de ferro fazem com que a lã de rocha tenha uma coloração marrom escuro, enquanto baixos teores de ferro fornecem uma coloração amarelada (ALEIXO et al. 2014).

Figura 4 - Resíduo de lã de rocha: (a) após processo de moagem; (b) *in natura*.



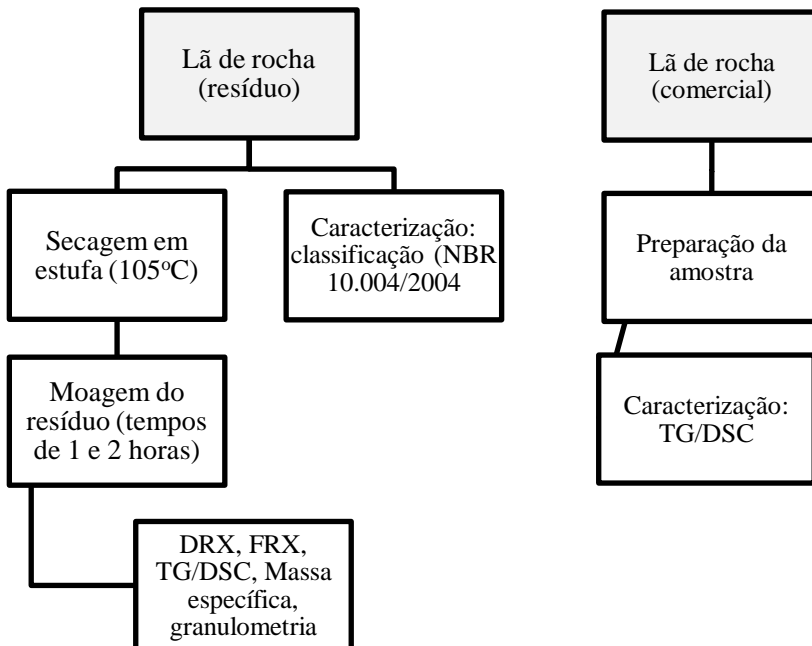
Fonte: Autora.

## 5.2 Programa Experimental

O programa experimental foi composto de três etapas:

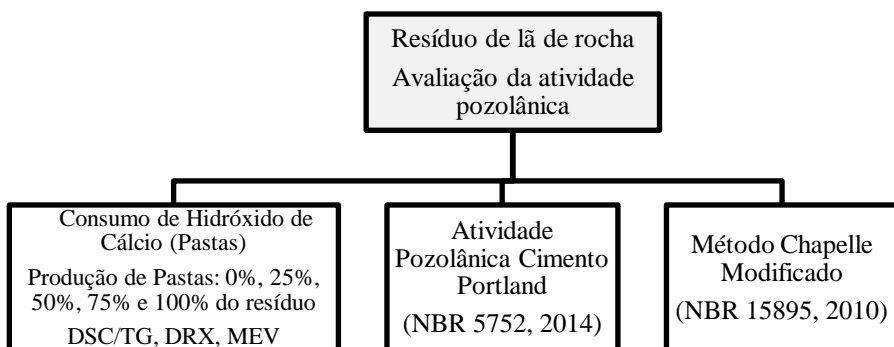
1) Caracterização do resíduo: busca determinar as principais características físico-químicas do resíduo. Neste estudo, foram feitos os seguintes ensaios no material com dimensões inferiores à  $150\mu\text{m}$ : Difractometria de raios X (DRX), Fluorescência de raios X (FRX), Análise Térmica (DSC/TG) da amostra comercial e resíduo visando comparar as possíveis diferenças, massa específica, granulometria a laser dos resíduos RWP moídos em 1 e 2 horas e por fim classificação de acordo com procedimentos estabelecidos NBR 10004 (2004). A figura 5 apresenta as principais atividades experimentais usadas no desenvolvimento da etapa 1 (caracterização).

Figura 5 - Fluxograma do programa experimental – Etapa 1 (caracterização)



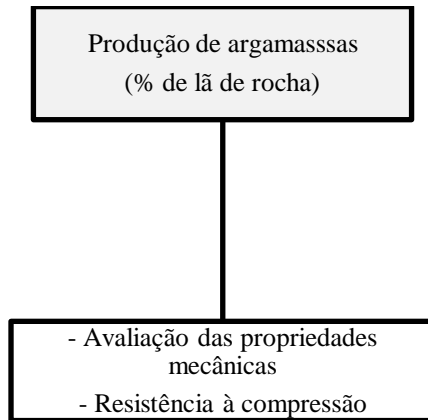
2) Estudo comparativo do potencial de atividade pozolânica do resíduo moído em 1 e 2 horas. Neste estudo, a análise foi realizada com a verificação da reatividade de pastas, compostas por RWP e hidróxido de cálcio, através da identificação dos compostos pela análise térmica diferencial (TG/DSC) e difratometria de raios X, realizadas nas pastas com idade de 28 e 90 dias. O procedimento foi estabelecido por Ambroise et al. (1985) e adaptado por Cheriaf et al. (1999). A avaliação da atividade pozolânica também foi realizada conforme o critério de procedimento estabelecido pela NBR 5752 (2014) – Índice de atividade pozolância Cimento Portland e NBR 15895 (2010), Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. A figura 6 apresenta um fluxograma das principais atividades experimentais para avaliação da atividade pozolânica do resíduo.

Figura 6 - Fluxograma do programa experimental – Etapa 2 (Atividade pozolânica).



3) Avaliação do efeito do resíduo de lâ de rocha quando em substituição ao cimento em teores 5%, 15% e 25% de RWP em uma argamassa normalizada. Nesta pesquisa, buscou-se identificar a participação do resíduo de RWP nas substituições parciais ao cimento Portland. A avaliação foi realizada através do ensaio de resistência à compressão das argamassas produzidas com diferentes teores de RWP. Na figura 7 mostra o programa experimental de cada atividade metodológica usada na etapa 3.

Figura 7 - Fluxograma do programa experimental – Etapa 3 (Resistência à compressão).



### 5.3 Caracterização do material lâ de rocha

Para caracterizar o resíduo de lâ de rocha foram empregadas as técnicas e ensaios:

- Classificação do resíduo sólido NBR 10004/2014.
- Análise por fluorescência de raios-X, para determinar a composição química.
- Difratometria de raios-X, para determinar fase cristalina e/ou fase amorfa.
- Análise térmica (DSC/TG) para investigar o comportamento endotérmico e exotérmico da amostra, bem como a entalpia.

- Distribuição granulométrica realizada através de granulometria a laser, para determinar o diâmetro médio das partículas.

### **5.3.1 Classificação do resíduo de lã de rocha.**

Por se tratar de um resíduo industrial é necessário classificá-lo quanto aos seus potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Portanto, a classificação do resíduo industrial de lã de rocha, como perigoso ou não perigoso, seguiu os procedimentos estabelecidos na norma NBR 10004/2004.

### **5.3.2 Fluorescência de raios-X (FRX)**

Neste trabalho a análise química do resíduo foi realizada pela técnica de fluorescência de raios-X, utilizou-se o equipamento de análise industrial, Sorter S1 da marca Bruker. As amostras foram preparadas na forma de pastilha prensada (camada dupla), utilizando base de ácido bórico, seguindo o procedimento abaixo:

- Separou-se aproximadamente 20g da amostra do resíduo de lã de rocha por “quarteamento”, posteriormente secou-se a 105°C por 24 horas. Reduziu-se o tamanho das fibras para 74µm, por meio de trituração em almofariz e peneiramento.
- Em seguida, pesou-se 1,5g de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (ácido bórico) e 0,5g da amostra (resíduo) e para completar 1,0g cera (Hoechst Wax C Micropowder).
- Misturou-se a amostra e a cera num frasco de plástico 25 mL e homogeneizou-se por 5 minutos.
- Após, prensou-se primeiro a base com 5 Ton por 10s e posteriormente a amostra, 1 Ton por 10s.
- Acondicionou-se amostra no porta-amostra do equipamento de FRX.

### **5.3.2 Difractometria de raio-X (DRX)**

A técnica de difratometria de raios-X é importante para caracterização de materiais, neste trabalho essa técnica foi empregada com intuito de verificar se o resíduo usado na pesquisa possui o caráter amorfo. A preparação das amostras foi iniciada com a pulverização destas

em um Pulverizador (Fritsch), durante 10min no nível de intensidade 6 do equipamento. Em seguida, as amostras em pó, com granulometria inferior a 45 $\mu$ m, foram compactadas em um porta-amostra para leitura da superfície inversa à de compactação, de modo a minimizar efeitos de orientação preferencial. A técnica foi realizada no Laboratório de Cerâmica Técnica - CerTec - UNESC com equipamento da marca Shimadzu Corporation modelo XRD-600, com fonte radiação  $K\alpha$  do cobre (1,5405 Å) com um intervalo angular de 5 a 80° com um passo de 0,02° e uma velocidade angular de 2°/min.

### **5.3.3 Análise térmica diferencial (DSC) e termogravimetria (TGA)**

O método de análise calorimetria diferencial de varredura avalia o comportamento endotérmico e exotérmico dos minerais existentes na amostra, bem como a entalpia. Por sua vez, a análise termogravimétrica baseia-se na perda de massa com a variação da temperatura. Nesta etapa, foi utilizado equipamento TA instrument, do modelo Q600 Simultaneous TGA/DSC, equipado com um programador de temperatura e uma microbalança eletrônica, que permite a realização simultânea de análise térmica diferencial e análise termogravimétrica.

O ensaio foi realizado em atmosfera de ar sintético, uma taxa de aquecimento de 10°C/min em temperatura máxima de 700°C em cadinho de alumina. Nesta pesquisa, a análise térmica forneceu informações adicionais à difratometria de raios-X, para atividade pozolânica do resíduo de lã de rocha pelo método de consumo de hidróxido de cálcio proposto por Ambroise et al. (1985) e adaptado por Cheriaf et al. (1999).

### **5.3.4 Massa específica absoluta**

A massa específica da amostra do resíduo de lã de rocha foi medida pelo Picnômetro a Hélio (ULTRAPYC, 1200e da Quantachrome Instruments), após um tratamento térmico de 100°C por 24 horas para que se eliminasse qualquer água residual da amostra. Cada valor de massa específica é resultado médio de três medições consecutivas realizadas pelo equipamento.

### **5.3.5 Moagem do resíduo de lã de rocha**

A moagem do resíduo de lã de rocha foi realizada utilizando um moinho de bolas. Como inicialmente não se tinha o conhecimento da



produção do moinho, padronizaram-se alguns parâmetros como: número de bolas, massa de resíduo a ser moído e rotação do jarro. Adotou-se como padrão uma massa de 333 g por batelada, (sendo o resíduo muito volumoso e com pouco peso) utilizando Jarro Cienlab com capacidade de 5 l, com velocidade de 55 rpm, carga de 2 kg de esferas de 14 mm e 2 kg de esferas de 20 mm, o tempo para cada batelada foi de 1 e 2 horas respectivamente.

### **5.3.6 Distribuição granulométrica a laser**

De posse das 2 amostras (moídas por 1 e 2 horas), foram realizadas análises de distribuição granulométricas a laser, a fim de comparar as granulometrias dos resíduos. O equipamento utilizado foi o modelo CILAS 1064L marca ACL WEBER, com intervalo de detecção compreendido entre 0,04 e 500  $\mu\text{m}$ .

## **5.4 Atividade pozolânica do resíduo de lâ de rocha**

### **5.4.1 Avaliação da pozolanicidade pelo método da NBR 5752 (2014)**

Para a determinação do índice de atividade pozolânica (NBR 5752, 2014) utilizou-se o cimento Portland CII-F-32 conforme estabelecido na norma. A atividade pozolânica foi avaliada conforme procedimentos estabelecidos pela norma. Foi utilizado agregado miúdo normal IPT e cimento CP II F. Produziram-se argamassas com cimento Portland, no traço 1: 3 (cimento: areia); argamassa substituindo 25% do seu volume absoluto de cimento pelo resíduo de lâ de rocha, potencialmente pozolânico. Além dessas argamassas, produziram-se outras utilizando diferentes teores do resíduo industrial de lâ de rocha, em proporções 5% e 15% em substituição em massa do cimento Portland, conforme Tabela 7. A quantidade de material, em massa, foi para moldagem para cinco corpos-de-prova cilíndricos de cada mistura de argamassa.

A norma recomenda moldar três corpos-de-prova cilíndricos (50x 100 mm) para cada argamassa. A quantidade de água utilizada na mistura foi suficiente para produzir argamassas com índices de consistência de  $225 \pm 5$  mm.

Tabela 7 - Dosagem das argamassas para determinação I.A.P - NBR 5752/2014

<b>Material</b>	Referência	Resíduo moído	
		Resíduo moído 1h	2h
	Argamassa A	Argamassa B (25%)	Argamassa C (25%)
Cimento CP II-F32 (g)	832	624	624
Material pozolânico (g)	0	208	208
Areia normal (g)	2496	2496	2496
Água (g)	400	400	400
Aditivo (%)	0	0,28	0,28
<b>Material</b>	Argamassa A	Argamassa B (15%)	Argamassa C (15%)
Cimento CP II-F32 (g)	832	707,2g	707,2g
Material pozolânico (g)	0	124,8	124,8
Areia normal (g)	2496	2496	2496
Água (g)	400	400	400
Aditivo (%)	0	0,15	0,15
<b>Material</b>	Argamassa A	Argamassa B (5%)	Argamassa C (5%)
Cimento CP II-F32 (g)	832	790,4	790,4
Material pozolânico (g)	0	41,6	41,6
Areia normal (g)	2496	2496	2496
Água (g)	400	400	400
Aditivo (%)	0	0,07	0,07

Fonte: Autora.

Após a desmoldagem os corpos de prova foram retirados das formas, identificados, e separados entre si no tanque de água (não corrente) saturada de cal da câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio compressão. O índice de atividade pozolânica foi calculado através da relação entre as resistências à compressão das argamassas com a pozolana e a argamassa sem material pozolânico, ou

seja, argamassa de referência. Para o resíduo de lâ de rocha ser considerado pozolânico, a argamassa deve atingir uma resistência de, no mínimo 75%, em relação à argamassa de referência.

#### **5.4.2 Avaliação da pozolanicidade pelo método da NBR 15895 (2010)**

Com objetivo de avaliar a reatividade das duas granulometrias distintas do resíduo de lâ de rocha moído em 1 e 2 horas, foi realizado o ensaio de Chappelle Modificado, conforme procedimentos estabelecidos pela norma NBR 15895 (2010). Nesta norma, o resultado obtido corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, em miligramas (mg) de  $\text{Ca(OH)}_2$  por grama (g) de material pozolânico. Para cada uma das granulometrias, foram realizadas 2 repetições, sendo que, tinha-se o volume de soluções suficiente para realizar três titulações. Assim, para cada granulometria do resíduo industrial de lâ de rocha, pode-se fazer a média das 6 medidas do resultado encontrado.

#### **5.4.3 Avaliação da pozolanicidade - Consumo de hidróxido de cálcio**

Para o ensaio de pozolanicidade do resíduo de lâ de rocha utilizou o procedimento proposto por Ambroise et al. (1985) e adaptado por Cheriaf et al. (1999). Foram definidas as porcentagens de substituição em massa do resíduo de lâ de rocha como 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100% em substituição ao material granular fino natural. Para tal, foram realizadas pastas misturando 50% de  $\text{Ca(OH)}_2$  de padrão analítico P.A. e 50% do material granular fino, para a referência, foi utilizado como material fino uma sílica não reativa (quartzo). Para efeito de comparação, a quantidade de hidróxido de cálcio foi mantida constante para todas as misturas (50% do material total), assim como, a relação de água mantida constante em 0,45. A tabela 8 apresenta os traços e as porcentagens em massa de cada material utilizado para confecção das pastas.

Os corpos-de-prova foram moldados em moldes cilíndricos de dimensões 2,0cm de diâmetro e 4,0cm de altura. As pastas permaneceram dentro dos moldes hermeticamente fechados e foram mantidas em sala de temperatura controlada e umidade relativa ( $24 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR de  $50 \pm 3\%$ ) até o momento do ensaio. Após os períodos de hidratação: 7, 28, 60 e 90 dias, as amostras foram desmoldadas e secas em estufa à temperatura de  $50^\circ\text{C}$  durante um período de 24 horas, moídas nas dimensões inferiores à

150 $\mu$ m utilizando-se um almofariz. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em sala com temperatura controlada e umidade relativa ( $24 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR de  $50 \pm 3\%$ ) até serem submetidas à análise térmica (DSC/TG).

Tabela 8 - Traço para ensaio da determinação da reatividade pozolânica

% Subst.	Traço (Ca(OH) <sub>2</sub> : SiO <sub>2</sub> : lã rocha)* e água	Total massa seca (g)	% Ca(OH) <sub>2</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% lã de rocha	% água
REF.	1:1:0:0,45	200	50	50	0	45
25	1:0,75:0,25:0,45	200	50	37,5	12,5	45
50	1:0,5:0,5:0,45	200	50	25	25,5	45
75	1:0,25:0,75:0,45	200	50	12,5	37,5	45
100	1:0:1:0,45	200	50	0	50	45

\*Traço em massa.

Para o ensaio de resistência à compressão das pastas, foi utilizada uma célula de carga de capacidade máxima de 500 kgf, um software de aquisição de dados Bluehill versão 2.17 e uma prensa de ruptura tipo Instron modelo 5569. A análise térmica (DSC/TG) foi realizada com o seguinte procedimento: variação na temperatura 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ , e temperatura máxima 700 $^\circ\text{C}$  em atmosfera normal.

Através do ensaio (DSC/TG) foram determinados os termogramas para cada amostra e analisados os picos característicos de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio. Para estimar o consumo de hidróxido de cálcio, foi calculado através das equações 4 e 5 os percentuais de perda do CaO segue-se o seguinte procedimento de cálculo:

Equação 4

$$\text{CH}(\%) = WL_{CH}(\%) \cdot \frac{MW_{CH}}{MW_H}$$

Equação 5

$$\text{C}\bar{\text{C}}(\%) = WL_{C\bar{\text{C}}}(\%) \cdot \frac{MW_{C\bar{\text{C}}}}{MW_{\bar{\text{C}}}}$$

Onde:

$C\bar{C}$  (%)= percentagem de  $CaCO_3$

$CH$  (%)= percentagem de  $Ca(OH)_2$

$WL_{C\bar{C}}$  (%)= perda de massa de carbonato de cálcio

$WL_{CH}$  (%)= perda de massa de hidróxido de cálcio

$MH_{C\bar{C}}$  (%)= peso molar do carbonato de cálcio

$MH_{CH}$  (%)= peso molar do hidróxido de cálcio

$MW_{\bar{C}}$  (%)= peso molar do dióxido de carbono

$MW_H$  (%)= peso molar da água

Após o romper os corpos-de-prova a identificação dos fragmentos das pastas de hidróxido foram realizados:

- Laboratório Central de Microscopia Eletrônica de Varredura (LCME) da UFSC usando o equipamento (MEV) Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JEOL JSM-6390LV, com cobertura de ouro.
- Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) da Engenharia Mecânica da UFSC, usando o equipamento difratômetro de raios-X modelo X-Pert, as amostras foram reduzidas em pó para uma dimensão inferior à  $150\mu\text{m}$ , onde foram usados steps de  $0,05^\circ/\text{s}$  e intervalo de análise de  $2\theta$  variando de  $3^\circ$  a  $60^\circ\text{C}$ .

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 6.1 Caracterização do resíduo industrial de lã de rocha

Por se tratar de um resíduo homogêneo, conforme definição do item 2.2 da norma NBR 10007 (2004) – Amostragem de resíduos sólidos, a amostra foi obtida pela melhor mistura possível das alíquotas do resíduo.

#### 6.1.1 Resultados do ensaio de classificação

O resíduo não apresentou nenhuma das características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade, portanto não se enquadrada como resíduo perigoso (Anexo A). Quanto ao ensaio de lixiviação não foi encontrado nenhum parâmetro fora do limite, considerando assim o resíduo como não perigoso. Já no ensaio de solubilidade os parâmetros da tabela 9 apresentaram-se acima do limite de detecção, classificando o resíduo como classe II-A não inerte.

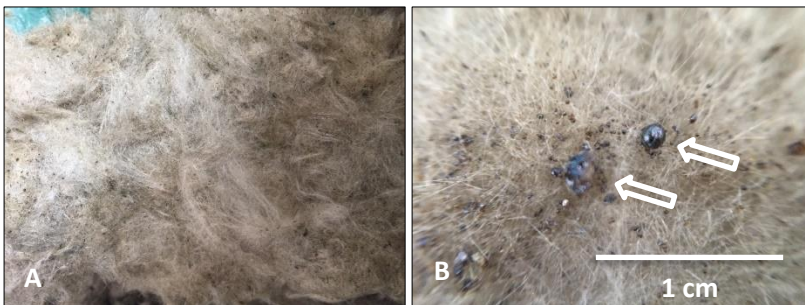
Tabela 9 - Resultados da classificação do resíduo de lã de rocha: ferro e fluoreto encontrados na amostra estudada (RWP) e limites de máximos G - NBR 10.004 para o extrato solubilizado.

Parâmetro analisado	Resultados (mg/L)	VMP (mg/L)*	L.Q (mg/L)**
Ferro	0,6	0,3	0,02
Fluoreto	8,8	1,5	1

\*VMP: Valor Máximo Permitido. \*\*LQ: Limite de Quantificação.

Os parâmetros que classificaram a amostra em resíduo não inerte foram ferro e fluoreto. O excesso de ferro pode ser explicado a partir do processo de fabricação da lã de rocha, já que um pouco do que é adicionado acaba não fundido, ficando em forma de grânulos no meio da lã, conforme figura 6. Igualmente, pelo contato da lã com paredes das tubulações de forno e caldeiras, precipitadores eletrostáticos, contato com a cinza gerada na queima do carvão mineral contendo ferro, e durante o armazenamento temporário do resíduo em caçambas metálicas.

Figura 8 - Resíduo de lã rocha, proveniente do isolamento térmico de caldeiras e precipitadores eletrostáticos de uma usina termelétrica. Em A: imagem do resíduo de lã de rocha; em B: imagem ampliada do mesmo resíduo para visualização dos grânulos de ferro (setas).



Fonte: Autora.

O valor encontrado para concentração de fluoreto, acima do limite estabelecido pela NBR 10004 (2004), pode estar relacionado ao contato da lã de rocha com outros refratários (“tijolos” de silicato de cálcio) que contêm fluoretos, pois de acordo com o fabricante Rockfibras, na matéria-prima não há registros de dosagem de fluoreto.

### 6.1.2 Fluorescência de raios-X (FRX)

Na análise de FRX realizada, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 10. Seu principal constituinte é o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) com 43,27% do total, seguido de em torno de 13% de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e também por 9,77% referente ao óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Tabela 10 - Composição química, teores dos óxidos (%), do resíduo de lâ de rocha.

Compostos	Quantidade (%Massa)
$\text{SiO}_2$	43,27%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9,77%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,87%
$\text{CaO}$	13,53%
$\text{K}_2\text{O}$	0,96%
$\text{MgO}$	13,39%
$\text{Na}_2\text{O}$	0,59%
$\text{MnO}$	N.D
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,10%
$\text{TiO}_2$	3,49%
$\text{SrO}$	N.D
P.F.	0,02%

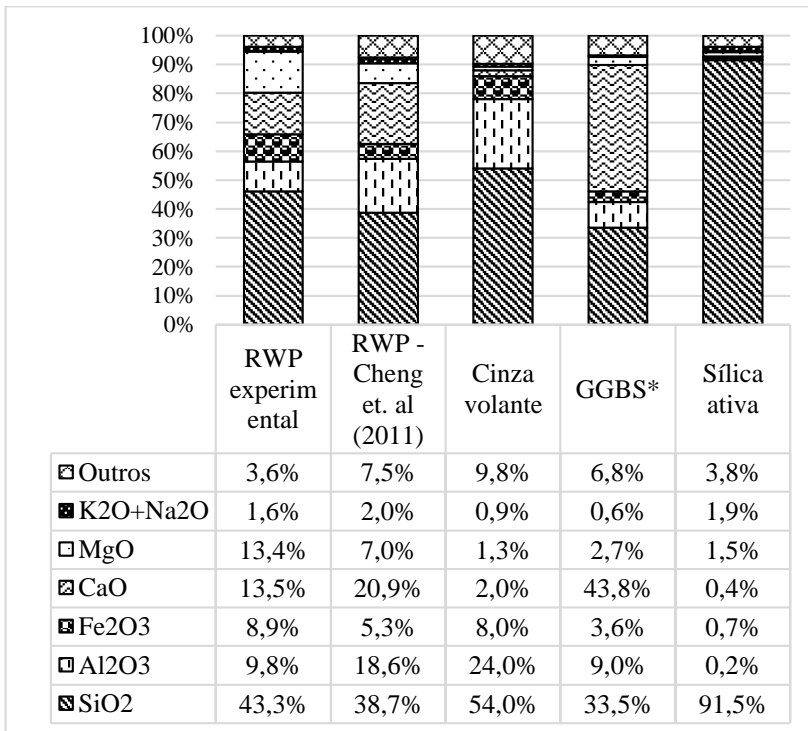
N.D: Não detectado.

De acordo com a composição química apresentada é possível determinar que segundo a norma NBR 12356/2014 o resíduo industrial de lâ de rocha apresenta características pozolânicas. Uma vez que, aproximadamente 62% da massa da lâ de rocha é constituída de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , além de uma concentração inferior a 1,5% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , permitindo o prévio enquadramento do resíduo à classe E, de acordo com a Tabela 5.

É possível ainda comparar a composição química do resíduo com os diferentes autores (ALEIXO et al. (2014); CHENG et al. (2011); LUOTO et al. (1998); BUCK et al. (1997); JURY, et al. (1997); LIDDELL; MILLER (1991)). A figura 9 apresenta a comparação da

composição química do resíduo de lâ de rocha com outros materiais pozolânicos. Nos dados encontrados por Cheng et al. (2011) compara-se os resultados obtidos de FRX do resíduo RWP experimental. O mesmo material estudado pelos autores, tem-se pequenas diferenças na composição química do resíduo. As quantidades podem variar de acordo com a matéria prima para a fabricação da lâ, como o tipo de rocha e outros minerais.

Figura 9 – Comparação da composição química do resíduo de lâ de rocha utilizado no experimento em comparação com o resíduo de lâ de rocha da literatura e com outros materiais pozolânicos.



\*GGBS: escória de alto forno

Fonte: Adaptado de Cheng et al., (2011).

Comparando o resíduo RWP experimental com outros materiais que são utilizados em argamassas e concretos, tem a quantidade de sílica (SiO<sub>2</sub>) em torno de 43,3% tornando-se intermediária entre cinza volante 54% e escória de alto forno (GGBS) 33,5%. A maior diferença encontrada

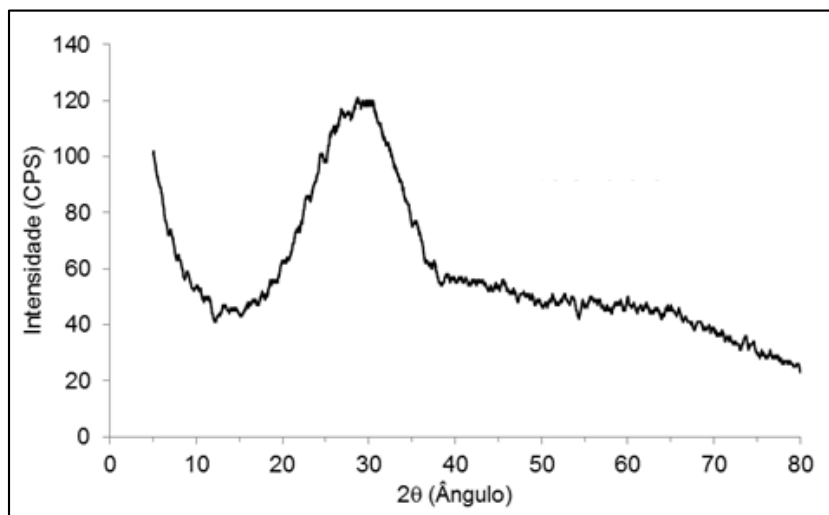


foi na quantidade de CaO comparando-se a cinza volante e a escória de alto forno, sendo 2% e 43% encontrados respectivamente, tendo a lâ de rocha ficado novamente como intermediária entre as duas, em quantidade menor totalizando 13%, tendo o resíduo de lâ de rocha um possível potencial para ser classificado como material pozolânico.

### 6.1.3 Difratomia de raios-X (DRX)

No difratograma de raios-X apresentado na figura 10, é possível observar ausência de picos de fases cristalinas, o que evidencia a característica predominantemente amorfa da fibra. Tal comportamento é atribuído ao processo de aquecimento seguido de rápido resfriamento, afim de garantir ausência de ordenação espacial a longa distância, característica estrutural dos materiais amorfos.

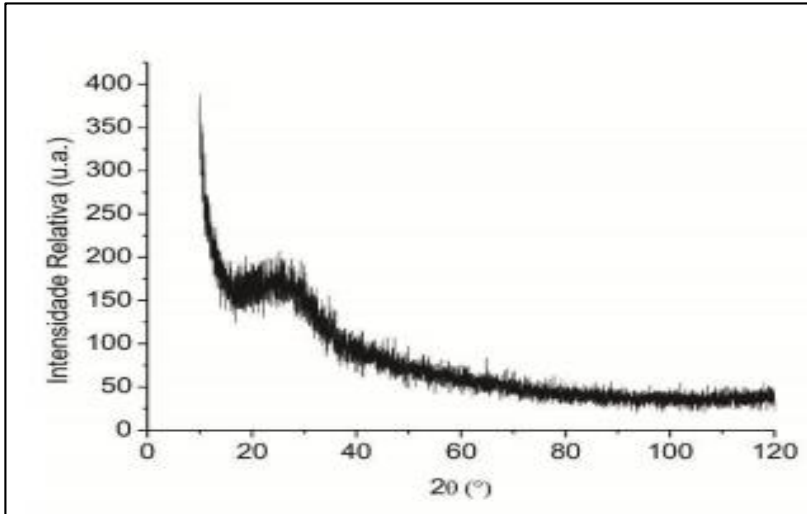
Figura 10 – Difrátograma de raios-X do resíduo de lâ de rocha.



Fonte: Autora.

O comportamento obtido está de acordo com o observado pelos autores (NEVES et al. (2012), ALEIXO et al. (2014) e ALVES et al. (2015) para a lâ de rocha no qual o halo principal tende a aproximar-se ao pico principal da sílica, conforme pode ser observado na Figura 11. Essa tendência está associada ao fato de esse ser um dos principais constituintes do material, conforme já observado na análise de FRX.

Figura 11 - Difratoograma de raios-X do resíduo de lâ de rocha. Amostra de RWP da literatura utilizados para revestimento de fornos na indústria de beneficiamento de minérios.



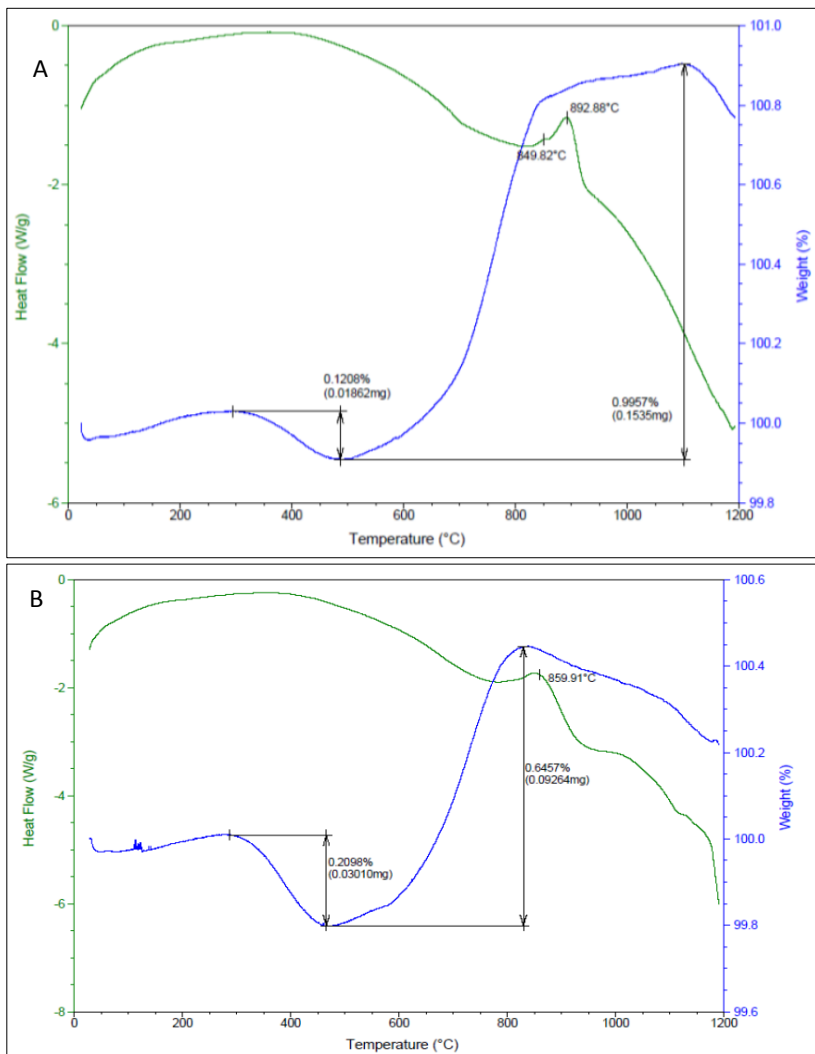
Fonte: Aleixo et al. (2014).

Confirma-se então, que o resíduo de lâ de rocha apresenta características estruturais derivadas de um processo de resfriamento suficientemente rápido a fim de garantir a máxima ausência de ordenação de longo alcance, que é uma característica do processo de obtenção destas lâs minerais (RODRIGUES, 2009).

#### **6.1.4 DSC/TG do material lâ de rocha**

As análises térmicas de TGA e DSC foram realizadas tanto no resíduo como na amostra comercial de lâ de rocha (Figura 12) para comparar o comportamento térmico das amostras e temperatura de fusão.

Figura 12 - Análise de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Em A; resíduo de lã de rocha e B: lã de rocha comercial.



Fonte: Autora.

Na figura 12 (A: RWP resíduo) observa-se inicialmente na temperatura em torno de 250 a 450 °C uma pequena perda de 0,12%

enquanto na figura 12 (B: RWP comercial) essa perda de massa é de 0,2%. Esse decréscimo pode estar associado à resina aplicada na lâ, degradada nesta faixa de temperatura. Como o resíduo RWP já sofreu aquecimento durante seu uso nas tubulações de caldeiras, fornos e outros, esta perda tende a ser menor. Destaca-se que os valores das perdas por aquecimento são pequenos, não chegando a 1%, motivo pelo qual essa diferença não seja considerada significativa, sendo necessário uma maior amostragem, para se considerar diferenças relevante entre os valores encontrados nas duas amostras (comercial e resíduos).

Com o aumento da temperatura a lâ de rocha igualmente aumenta um pouco seu peso, 0,99% para o resíduo RWP e 0,65% para a lâ comercial, o que se justifica pela oxidação de alguns compostos presentes na lâ de rocha, especialmente o ferro que tem presença comprovada conforme a análise de classificação de resíduos e visualmente (Figura 8). Essa oxidação é possível uma vez que a análise foi realizada sob uma atmosfera de ar sintético, que contém aproximadamente 20% Oxigênio e 80% de Nitrogênio. O maior valor encontrado foi na amostra resíduo, e pode ser justificado pela presença de ferro ser proveniente da sua aplicação em tubulações e o armazenamento em caçambas de ferro.

Com relação à análise térmica, a amostra RWP resíduo apresenta dois picos exotérmico, 849,8°C e 892,8°C, enquanto na RWP comercial este é 859,9°C. Os picos exotérmicos referem-se à cristalização da fibra, pois aproximadamente em 1200°C ocorre a fusão do material lâ de rocha. Dados apresentados, assemelham-se ao pico de 874°C encontrado por Rodrigues et al. (2012) em estudos com fibras de lâs minerais.

### **6.1.5 Granulometria a laser**

Os resultados da composição granulométrica do resíduo industrial de lâ de rocha foram obtidos pelo método de difração a laser e são apresentados no anexo C. De acordo com a Tabela 11 os diâmetros médios foram 18,29 µm e 16,41 µm para o resíduo moído em 1 e 2 horas respectivamente e o passante na peneira de 45 µm conforme o anexo C foi de 92,86% e 94,03% respectivamente. Os resultados de granulometria do resíduo de lâ de rocha enquadram-se como material pozolânico.

Tabela 11 - Distribuição granulométrica do resíduo de lâ de rocha moído em 1 e 2 horas

Amostra	D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>médio</sub> ( $\mu\text{m}$ )
RWP (1 hora)	2,9	13,67	40,41	18,29
RWP (2 horas)	2,34	12,05	37,07	16,41

Fonte: Autora.

### 6.1.6 Massa específica

A lâ de rocha moída apresentou massa específica de 2,88 g/cm<sup>3</sup> valor próximo aos resultados apresentado por Cheng et al. (2011) e Lin et al. (2013b) conforme tabela 12 abaixo. Comparando os resultados com a literatura, o valor RWP experimental estão apresentados e disponíveis no Anexo B.

Tabela 12 – Massa específica do resíduo de lâ de rocha, agregado miúdo e agregado graúdo.

Propriedade	RWP experimental	RWP (Lin. et al 2013b)	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2.88	2.80	2.68*	2.62*

\*Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2011) e Lin et al. (2013b).

## 6.2 Avaliação da atividade pozolânica do resíduo industrial de lâ de rocha.

### 6.2.1 Consumo de hidróxido de cálcio

Para a avaliação da atividade pozolânica do resíduo industrial de lâ de rocha foram produzidas pastas constituídas de 50 % de hidróxido de cálcio com variação em percentuais de sílica inerte e o resíduo de lâ de rocha (duas faixas de granulometria); 25%, 50%, 75% e 100%, também foi confeccionada uma amostra referência (REF), conforme tabela 8.

Manteve-se a relação de água/sólido de 0,45 todas as amostras com uso 2%, 1%, 0,8% e 0,4% de aditivo Hiperplastificante (TEC-FLOW 8000 – Fabricante: Rheoset ) para mistura 100%, 75%, 50%, 25% de RWP respectivamente. Os dados foram submetidos a análise de variância

(ANOVA) e, quando necessário, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% (Ferreira, 2003), utilizando o software Assistat 7.7 para análises estatísticas e os softwares Excel 2013, para elaboração de gráficos.

✓ **Consumo de hidróxido de cálcio para resíduo de lã de rocha com tempo de moagem de 1 hora e 2 horas.**

Na tabela 13 são apresentados os resultados da análise estatística para os dados de resistência à compressão dos corpos-de-prova em relação à amostra de referência (sem adição de RWP), para cada amostra foram obtidos 3 resultados para aplicação da ferramenta estatística.

Tabela 13 - Análise estatística para os dados de resistência à compressão (MPa) das pastas de hidróxido de cálcio (% diferentes do resíduo de lã de rocha moído por tempo de 1 hora)

RWP (%)	Idade (dias)					$\bar{X}$
	7	14	28	60	90	
0	0.2970 bA	0.3027 cA	0.3100 bA	0.3967 cA	0.4233 cA	0,3459
25	0.3083 bB	0.3137 cB	0.3267 bB	0.4767 cB	0.7400 bA	0,4331
50	0.4103 bC	0.4413 cC	0.4633 bC	0.6867 bB	0.9900 aA	0,5983
75	0.7033 aC	0.7733 bBC	0.8200 aBC	0.9533 aAB	1.0667 aA	0,8633
100	0.8900 aB	0.9967 aAB	1.0000 aAB	1.0567 aAB	1.1467 aA	1,0180
$\bar{X}$	0,5218	0,5655	0,5820	0,7140	0,8733	

Letras minúsculas representam dms para colunas e letras maiúscula dms para linhas. As médias seguidas pela letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Em geral, menores teores de RWP, diminuem a resistências a compressão, quando comparados com as misturas contendo percentuais de RWP e o aumento do teor de substituição do resíduo na mistura, resulta em maior índice de resistência à compressão.

Quando comparado o efeito do aumento de concentração de RWP na resistência a compressão, verificou-se que até 28 dias não houve diferença estatística significativa entre as amostras com até 50% de RWP, apresentando aumento na resistência a compressão com 75 e 100% de RWP. Aos 60 dias de idade o aumento da resistência já é percebido com 50% de RWP alcançando as maiores médias de resistência a compressão

com 75 e 100% de RWP e aos 90 dias apresenta aumento gradativo da resistência a compressão de 0 a 50 % de RWP, mantendo-se sem diferença estatística significativa após 50% de RWP.

Na comparação do efeito da idade na resistência a compressão observou-se que, após adição de até 50% do resíduo, 90 dias apresentou as maiores médias, diferenciando estatisticamente das idades inferiores (7, 14, 28 e 60 dias). Com o aumento da concentração de RWP, observou-se este efeito anteriormente 75% de RWP aos 60 dias e 100% de RWP aos 14 dias.

Tais resultados indicam que, em amostras de RWP moídas por 1 hora, o aumento da concentração, resulta em melhores índices de resistência a compressão em um menor espaço de tempo.

Na Tabela 14 apresentam os resultados da análise estatística para os dados de resistência a compressão das pastas contendo RWP moído em 2 horas.

Tabela 14 - Análise estatística para os dados de resistência à compressão (MPa) das pastas de hidróxido de cálcio (% diferentes do resíduo de lã de rocha moído por tempo de 2 horas).

RWP (%)	Idade (dias)					$\bar{X}$
	7	14	28	60	90	
0	0.2123 cB	0.2284 cB	0.1084 cB	0.4232 cA	0.4297 cA	0,2804
25	0.2649 bcB	0.3146 bcAB	0.1844 bcB	0.3071 cAB	0.4278 cA	0,29976
50	0.5695 aB	0.4107 abC	0.2543 bcD	0.6476 bB	1.4175 abA	0,65992
75	0.3238 bcBC	0.2777 bcC	0.3124 bBC	0.4343 cB	1.2721 bA	0,52406
100	0.3935 bD	0.5404 aCD	0.6165 aC	1.0455 aB	1.5370 aA	0,82658
$\bar{X}$	0,3528	0,35436	0,2952	0,57154	1,01682	

Letras minúsculas representam dms para colunas e letras maiúscula dms para linhas. As médias seguidas pela letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Quando comparado o efeito do aumento de concentração de RWP na resistência a compressão, verificaram-se comportamentos diferenciados e pouco conclusivos correlacionando a idade.

Aos 7 dias a maior resistência foi obtida com 50% de RWP; aos 14 e 90 dias a maior resistência foi obtida com 50 e 100% de RWP e aos 28 e 60 dias as maiores resistências foram obtidas com 100% de RWP.

Na comparação do efeito da idade na resistência a compressão observou-se que, após adição de RWP, 90 dias apresentou as maiores médias para todos os tratamentos propostos.

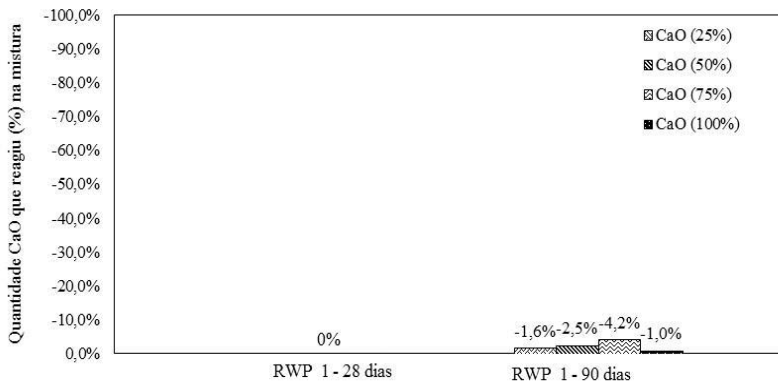
O aumento da resistência à compressão também pode ser explicado pelo efeito filler do resíduo, ou seja, uma vez que o material se encontra finamente dividido, contribui para diminuir o volume de vazios (preenchimento dos poros) dentro de corpo-de-prova. Além disso, o tamanho das partículas utilizada nesta pesquisa são inferiores a  $75\mu\text{m}$ , conforme Cheng et al. (2011) sugerem em estudo anterior.

### ✓ Avaliação da atividade pozolânica através da TG.

Através da análise de termogravimetria (TG) foi possível medir o teor de hidróxido de cálcio consumido na reação cal com RWP. Durante a hidratação do cimento Portland com adições minerais, a reação pozolânica consome portlandita (CH) para a formação C-S-H.

Em cada curva da decomposição térmica das pastas com resíduo de lã de rocha, pode-se obter os percentuais de perda para o CaO individualmente pela relação entre hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio. O consumo de CH foi estimado através das relações apresentadas nas equações 4 e 5, e a perda de massa do hidróxido de cálcio (CH) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) foram extraídos das análises térmicas (DSC/TGA).

Figura 13 - Percentual (%) de CaO que reagiu com RWP moído em 1 hora nas pastas com a idade de 28 e 90 dias.



Fonte: Autora.

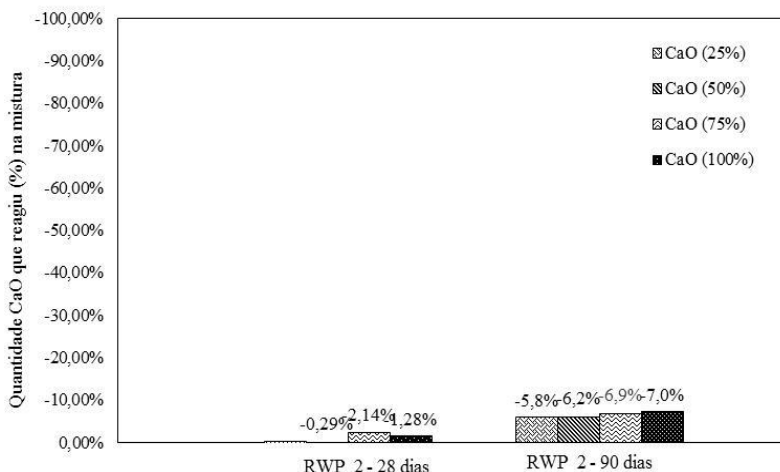
A figura 13 apresenta os percentuais de CaO que reagiram nas pastas de hidróxido na idade de 28 e 90 dias, contendo o resíduo moído com tempo de 1 hora.



Observa-se que aos 28 dias as pastas produzidas com RWP moído em 1 hora não apresentou consumo de CH. Para a idade de 90 dias houve pouca atividade pozolônica, ou seja, do total de hidróxido cálcio utilizado para a produção das pastas (conforme Tabela 8), em torno de 99% a 96% não reagiu, indicando que o resíduo de lã de rocha apresenta baixa reatividade pozolônica.

A figura 14 apresenta os dados de CaO em percentagens que reagiram com a pasta de hidróxido contendo o RWP moído em 2 horas nas idades de 28 e 90 dias.

Figura 14 - Percentual (%) de CaO que reagiu com RWP moído em 2 horas nas pastas com a idade de 28 e 90 dias.



Fonte: Autora.

Para os resultados das pastas contendo resíduo moído em 2 horas nas idades de 28 e 90 dias (Figura 14), os valores obtidos foram maiores quando comparados com RWP moído em 1 hora, este resultado pode estar relacionando também a granulometria das partículas, as pastas confeccionadas com o resíduo moído em 1 e 2 horas apresentam diâmetro médio da partícula de lã de rocha de 18,29  $\mu\text{m}$  e 16,41  $\mu\text{m}$ , respectivamente. A pasta contendo o RWP moído em 2 horas obteve maior percentual de reação do CaO, pode-se atribuir este aumento, ao efeito físico das partículas, que em geral apresentam tamanho micrométrico menor quando comparado com resíduo RWP moído em 1

hora, diminuindo assim do tamanho da partícula e aumentando área de contato para reação.

Lin et al. (2013b) apresentam resultados realizados através TGA em amostras de argamassas produzidas com a incorporação de RWP em diferentes proporções com a variando a taxa de água e cimento, onde mostram que, as maiores perdas de massa acontecem aos 91 dias quando comparado, com a idade de 28 dias. De acordo com autores os resultados mostram que o aumento na perda de massa deveu-se através da reação pozolânica, indicando que a adição de RWP promove a atividade pozolânica, estando condizentes com resultados obtidos nas pesquisas de Cheng et al. (2011) e Lin et al. (2013a).

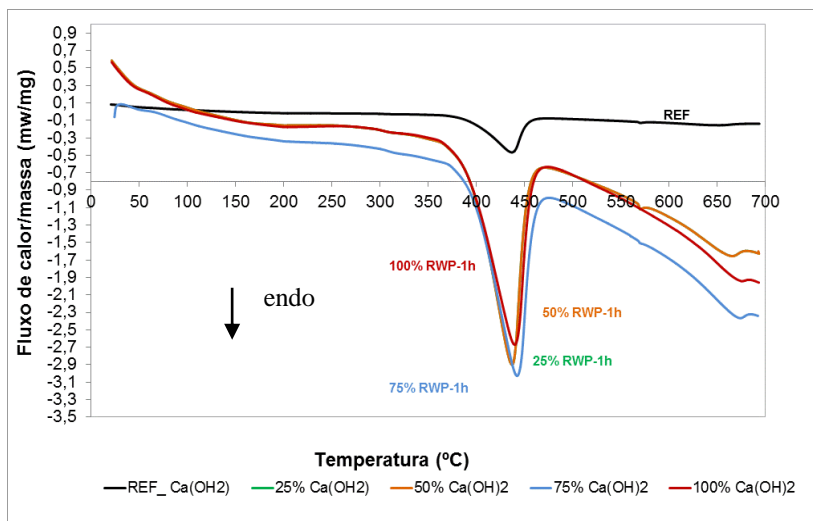
### ✓ **Avaliação da atividade pozolânica através da DSC.**

As figuras 15 e 16 apresentam as curvas de (DSC) das pastas de hidróxido de cálcio com resíduo de lã de rocha moído com tempos de 1 e 2 horas respectivamente, nas misturas de 0% (referência), 25%, 50% e 75% e 100% de lã de rocha, para as idades de 28 de dias.

De acordo com a curva típica da DSC apresentada na Figura 15 e 16, permite identificar o processo de decomposição térmica do  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCO}_3$ . O ponto mais baixo da curva indica uma diminuição de entalpia, correspondendo a um pico endotérmico causado pela decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  em  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  e caracterizada por uma perda de massa entre faixas de temperatura de 405°C a 450°C. O segundo pico endotérmico aproximadamente 700°C refere-se ao  $\text{CaCO}_3$ . Observa-se ainda que, entre os picos principais destacados, existe uma pequena curva em torno de 573°C que pode ser atribuído ao valor do quartzo.

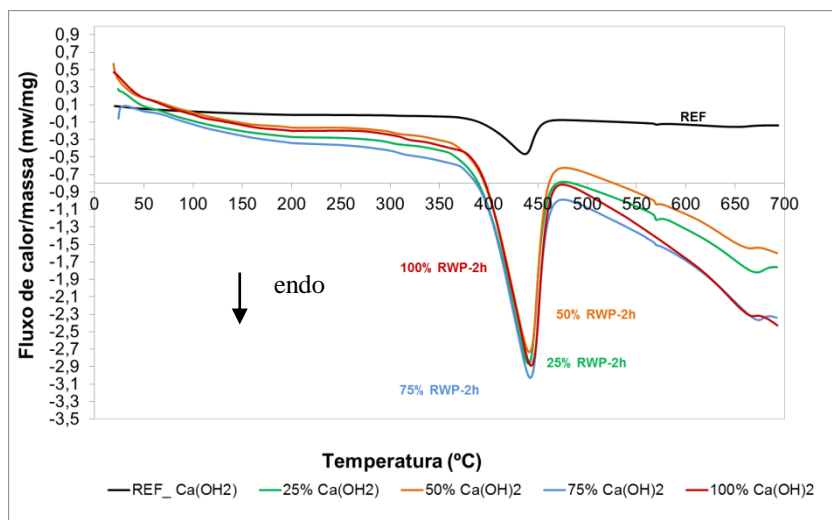
Estas faixas de temperatura para os dois picos principais também foram detectados em estudos na literatura (TAYLOR, 1997 e CHAIPANICH el. at 2010). Os autores encontraram picos endotérmico observados na gama de temperatura de 455° C, que é atribuído a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  e na temperatura de 697°C como um resultado de decomposição  $\text{CaCO}_3$ .

Figura 15 - Curvas (DSC) das pastas de hidróxido de cálcio com resíduo de lâ de rocha moído com tempo de 1 hora e idade de 28 dias.



Fonte: Autora.

Figura 16 - Curvas (DSC) das pastas de hidróxido de cálcio com resíduo de lâ de rocha moído com tempo de 2 horas e idade de 28 dias.



Fonte: Autora.

As curvas referente C-S-H não foi encontrada nos resultados das Figura 15 e 16, onde a faixa de temperatura específica é atribuída 80°C-90°C (CHAIPANICH el. at 2010), indicando baixa atividade pozolânica do resíduo aos 28 dias.

#### ✓ **Avaliação da atividade pozolânica através da DRX.**

O ensaio de difratometria de raios-X foi realizado nas pastas de referência e nas misturas de 25%, 50%, 75% e 100% de RWP na idade de 28 dias e 90 dias (Figura 17 e 18) com a incorporação do resíduo (RWP) moído em 1 e 2 horas.

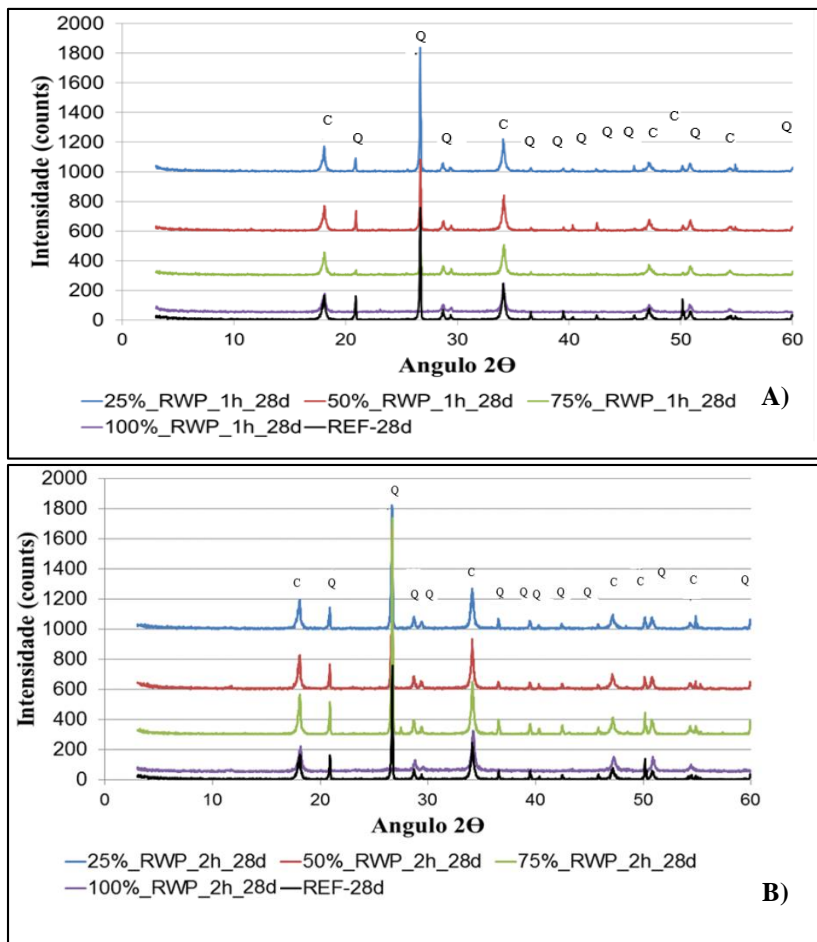
As pastas produzidas com resíduo de lã de rocha e as pastas de referências não apresentaram produtos de hidratação, verifica-se nos difratogramas de DRX das pastas com idade 28 dias (Figura 17) a presença de quartzo [ $\text{SiO}_2$ ] em destaque  $2\theta=26,63^\circ$  e portlandita com os picos [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] ( $2\theta = 18^\circ$  e  $34^\circ$ ).

Os picos destacados indicam que houve poucas mudanças na formação dos produtos da reação pozolânica, ou poucos produtos foram formados com incorporação do RWP, corroborando com resultados encontrados nos estudos desenvolvidos por Lin el. al. (2013b).

Para as idades avançadas (90 dias) observa-se na Figura 18 observa-se pouca diferença.

De acordo com os resultados acima descritos na Figura 18, observa-se que para as pastas de hidróxido contendo RWP moído com tempo de 1 e 2 horas em idades de 90 dias, não apresenta diferença significativa nos resultados. Valores semelhante também foram encontrados em estudos anteriores realizados por Lin et al. (2013b) que através de difratogramas de raio X para argamassas contendo RWP e sem RWP na idade de 91 dias, que apresentam picos principais que corresponderam ao quartzo com os ângulos de difração de  $21,0^\circ$ ,  $26,5^\circ$  e  $36,5^\circ$  e hidróxido de cálcio com os ângulos de difração de  $18,0^\circ$  e  $34,0^\circ$  formadas nas argamassas de cimento.

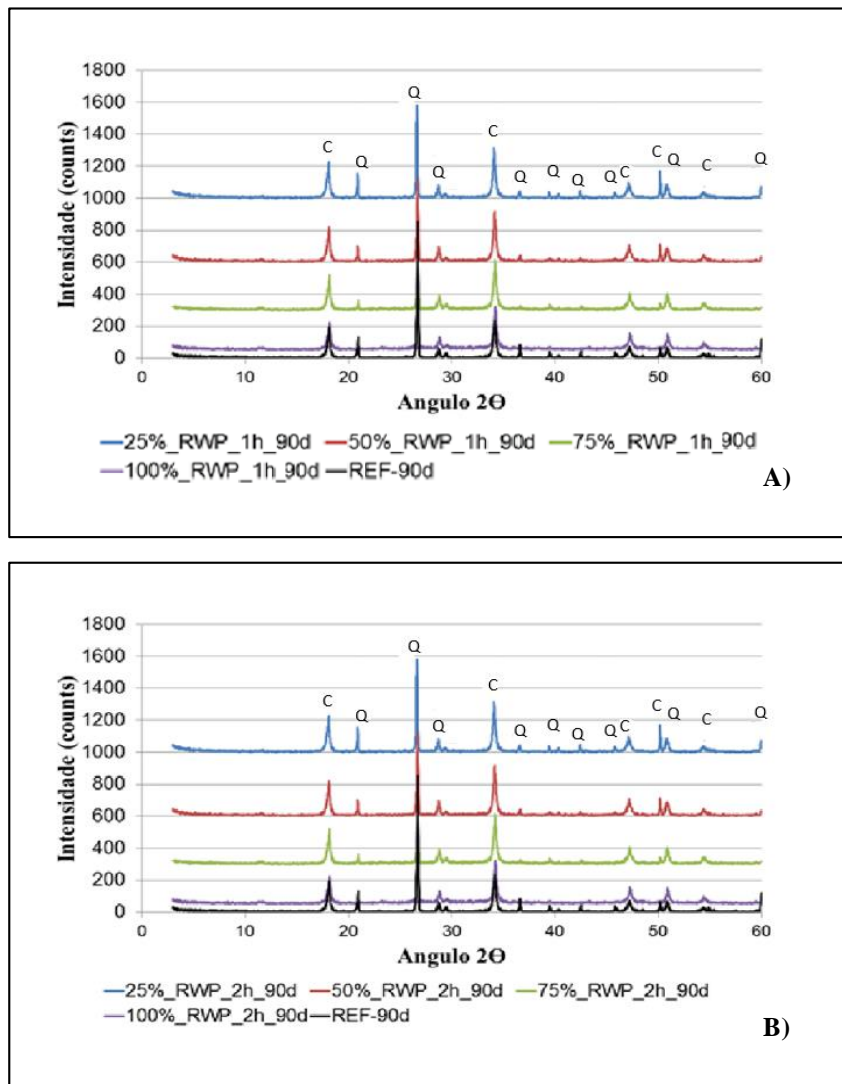
Figura 17 - Difratomia de raios-X das pastas hidróxido de cálcio com RWP moído (idade 28 dias). A: moído com tempo 1 hora e B: moído com tempo 2 horas.



Q – Quartzo / C – Hidróxido de cálcio

Fonte: Autora.

Figura 18 - Difratoimetria de raios-X das pastas hidróxido de cálcio com RWP moído (idade 90 dias).A: moído em 1 hora e B: moído em 2 horas.



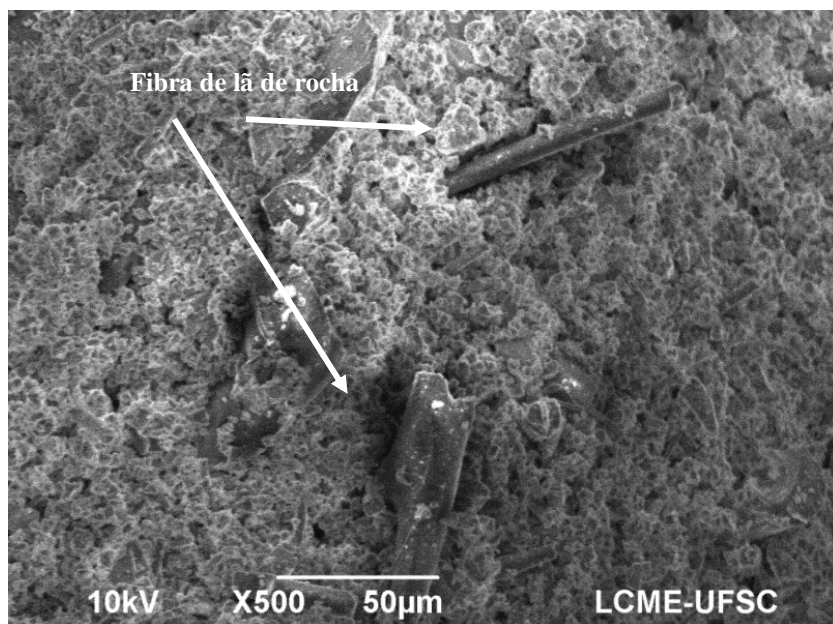
Q – Quartzo / C – Hidróxido de cálcio

Fonte: Autora.

### 6.2.2 Análise MEV nas pastas de hidróxido contendo RWP.

A reação pozolânica entre  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e sílica reativa da lâ de rocha formaram partículas mais densas, com incorporação do RWP resultou na formação de estruturas internas mais compactas, conforme ilustrado na Figura 19 abaixo.

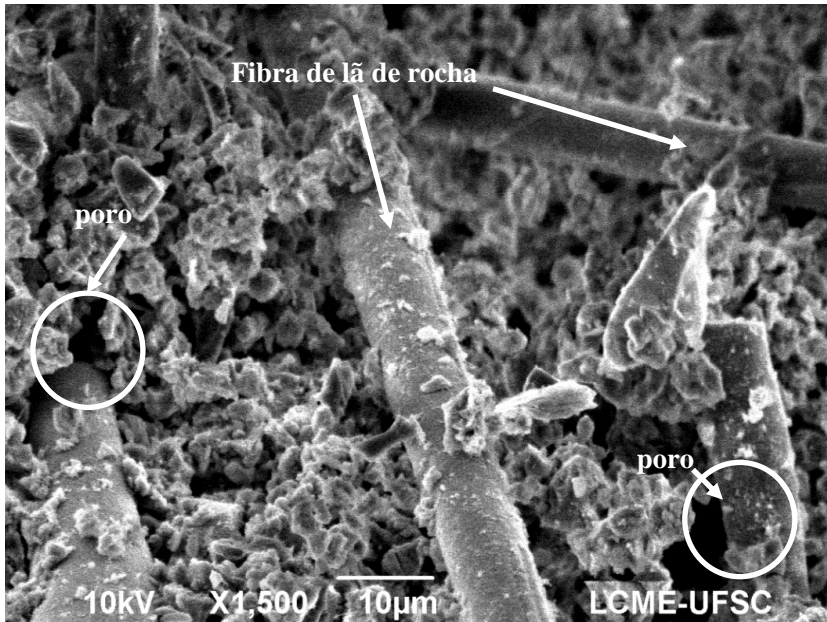
Figura 19 -MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 horas para idade de 28 dias.



Fonte: Autora.

A adição de RWP pode levar a formação de pequenos poros capilares, isto devido a forma de fibras, como apresenta Figura 20.

Figura 20 -MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 2 horas para idade de 28 dias.



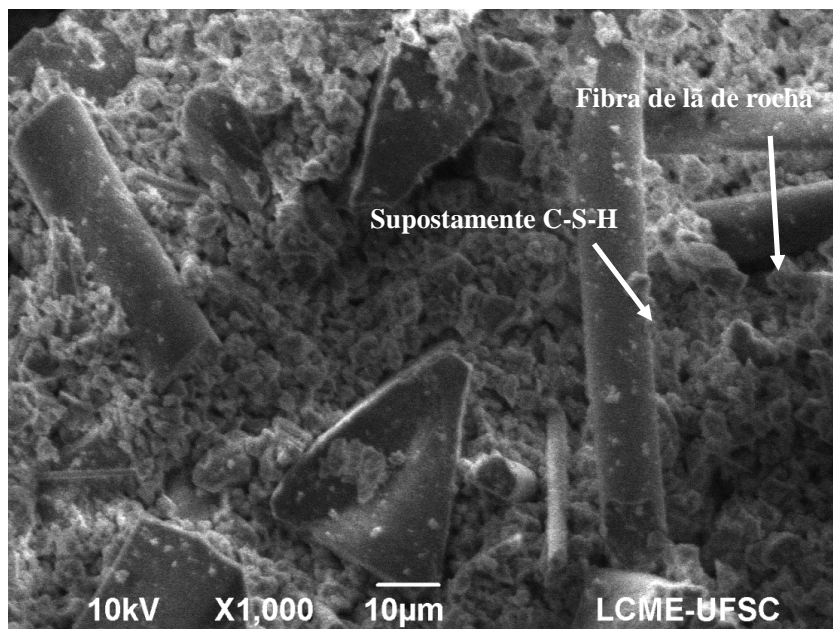
Fonte: Autora.

Além disso, a fig. 20 mostra a morfologia da fibra do resíduo de lã de rocha (RWP) e a superfície com a reação de hidratação. Através das observações feitas pelo MEV pode-se verificar a formação de alguns compostos. Acredita-se, ser uma pequena formação de C-S-H iniciando aos 28 e aos 90 dias de idade, conforme apresenta figuras abaixo 21 e 22.

As observações feitas no MEV mostram que tanto a hidratação e a reação pozolânica ocorre em partículas mais finas do resíduo, as imagens obtidas nesta pesquisa foram similares aos resultados encontrados por Cheng et al. (2010), na qual também utilizou o resíduo de lã rocha, o mesmo autor se reporta ao estudo feito por Jiang et al. (2007) e descreve que a hidratação e a reação pozolânica da lã de rocha é semelhante ao aparecimento de fibras de basalto.



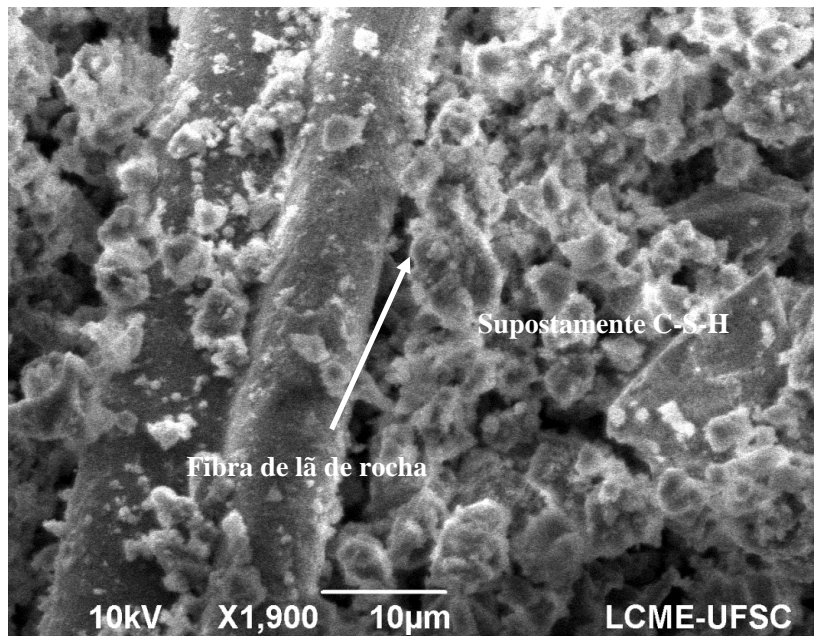
Figura 21 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 2 horas para idade de 28 dias.



Fonte: Autora.

A RWP incorporada nas pastas continha  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  o que supostamente levou a uma reação secundária de hidratação com o CH resultando podendo resultar na produção de C-S-H, o que aumentou a assim, a sua resistência à compressão. O restante das imagens que ilustram a incorporação da lã de rocha nas pastas de hidróxido está disponível no anexo D.

Figura 22 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 2 hora para idade de 90 dias.



Fonte: Autora.

### 6.2.3 Índice de atividade pozolânica – NBR 5752/2014

Os índices de atividade pozolânica do resíduo de lã de rocha também foram determinados utilizando-se metodologia descrita na NBR 5752/2014. Com intuito de verificar o índice de atividade pozolânica das amostras feitas de acordo com a norma (25% de material pozolânico), optou-se pela realização do ensaio com variações em percentuais diferente do material do pozolânico (lã de rocha) em 5%, 15% com as duas faixas de granulometria. A Tabela 15 apresenta a resistência à compressão média e IAP (Índice de Atividade Pozolânica) aos 28 dias das argamassas com 5%, 15% e 25% de RWP moído com tempo 1 e 2 horas e argamassa de referência.

Tabela 15 - Resistência à compressão média e IAP das argamassas e produzidas com 5%, 15% e 25% de RWP moído com tempo de 1 e 2 horas aos 28 dias.

<b>Amostra 1h</b>	<b>Resistência Média (MPa)</b>	<b>D.P (MPa)</b>	<b>I.A.P (%)</b>
Ref	36,03	0,21	N.A
RWP 5%	36,33	2,14	99,17
RWP 15%	37,93	0,12	95,78
RWP 25%	37,90	0,23	100,09
<b>Amostra 2 h</b>	<b>Resistência Média (MPa)</b>	<b>D.P (MPa)</b>	<b>I.A.P (%)</b>
Ref	36,03	0,21	N.A
RWP 5%	36,58	2,12	98,50
RWP 15%	35,50	1,08	103,05
RWP 25%	33,05	0,75	107,41

Fonte: Autora.

As argamassas confeccionadas com 5% e 15% de RWP moído em 1 hora e 2 horas apresentaram valores de resistência à compressão maiores, quando comparados aos valores de resistência à compressão encontrados na amostra de referência. Porém todos os valores obtidos para IAP (Índice da atividade pozolânica) ficaram acima do estipulado pela norma 5752/2014 que é de 75% em relação ao resultado encontrado na argamassa referência.

As argamassas com 25% de RWP apresentaram maiores valores de IAP, quando comparadas com as demais amostras. Apesar do menor efeito pozolânico da RWP aos 28 dias, conforme discutido nos resultados anteriores, um efeito fíler parece ter melhorado a resistência à compressão destas amostras, ou seja, com aumento do teor substituição (lã de rocha) aumenta possibilidade de preencher os espaços vazios dentro da matriz de cimento, de forma eficaz a melhora IAP. Os resultados de resistência à compressão das argamassas contendo RWP podem estar relacionados com os valores encontrados com a resistência a compressão dos corpos-de-prova das pastas produzidas com hidróxido de cálcio, que no geral, foi verificado um aumento da resistência à compressão das pastas com aumento do teor de substituição.

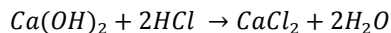
Os resultados encontrados corroboraram com os valores obtidos por Cheng et al. (2011) e Chai et al. (2011), que mostram que quanto menor é a partícula de lâ de rocha, melhores resultados de resistência à compressão são encontrados, partículas mais finas também melhora o desenvolvimento da resistência à compressão. Pode-se observar na Tabela 11 que as partículas com menor diâmetro médio em torno de 16,21µm, ou seja, RWP moído com tempo de 2 horas, apresentaram um IAP maior, do que a RWP moída em 1 hora com diâmetro médio 18,29µm.

Os resultados encontrados foram para idade de 28 dias conforme estabelece a norma 5752/2014, podendo em idade avançada apresentar IAP ainda maior. Segundo Lin et al. (2013) descrevem que com o aumento da idade, o IAP pode aumentar significativamente ultrapassando o valor mínimo de 75%, necessário para classificar um material como pozolânico por ASTM C618.

#### **6.2.4 Método do Chapelle – NBR 15895/2010**

O ensaio de Chapelle modificado apresentado pela norma brasileira NBR 15895/2010 e citado por Quarcioni et al. (2015) baseia-se na reação química cal-pozolana e quantifica a reatividade pozolânica de materiais destinados à aplicação pela indústria do cimento. A reação é dada pelo consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  pelo material pozolânico, ou seja, na realização deste estudo, o material pozolânico (RWP) foi mantido em solução aquosa com óxido de cálcio, que em contato com a  $\text{H}_2\text{O}$  presente na solução resultou em  $\text{Ca(OH)}_2$ , onde parte deste hidróxido foi consumido pelo material pozolânico (RWP) e a outra parte dosada através de análise titulométrica, representado pela reação ácido/base descrita abaixo, que na presença de indicador fenolftaleína, indicou a concentração do mg de  $\text{Ca(OH)}_2$  não consumido pelo material pozolânico (RWP).

Equação 1:



A NBR 15895/2010 descreve o método, porém não referência o limite de consumo para ser considerado um material pozolânico. Segundo Pontes (2012), na bibliografia são descritos vários métodos para determinar este parâmetro, no entanto a sua viabilidade para cada tipo de

pozolanas não está ainda devidamente estabelecida e sua utilização necessita ser bem fundamentada.

Para metacaulino a norma francesa NF P18-513 (2010) define como uma das exigências químicas o consumo de 700 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  de amostra, e Raverdy et al. (1980) apud. Cinotto et al. (2011), em trabalho realizado com cinzas, consideram o material pozolânico quando apresentar um índice de consumo mínimo de 330 mg  $\text{CaO}/\text{g}$  de amostra (436 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  de amostra). Pontes (2011), em trabalho realizado com a técnica de chapelle para 9 materiais agrupados, consoante a sua origem, em 3 grupos (argilas, cinzas volantes e vidro), encontrou os seguintes resultados para o grupo das argilas: Metacaulino 1, Metacaulino 2, Metacaulino 3 e pó de argila expandida; com consumo de 859,9; 430,6; 265,2 e 309,0 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ , respectivamente. Já para cinzas volantes: Cinza volante de carvão, Cinza de cascas de arroz, Cinza de cascas de eucalipto e Cinzas de biomassa; com consumo de 504,0; 625,7; 108,0 e 276,1 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ , respectivamente e para Pó de vidro; consumo de 363,8 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ .

De acordo com Norma NBR 12653/2014, o resíduo industrial de lâ de rocha apresentou características pozolânicas, exigências químicas (Tabela 4), porém através dos resultados obtidos no ensaio do Chapelle modificado conforme Tabela 16 para ambas as amostras em estudo, não foram alcançados os valores estipulados na literatura para classificá-lo como pozolânico. As amostras de RWP moído por 1 e 2 horas, apresentaram respectivamente, consumo de 44,4 e 62,8 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  de amostra.

Tabela 16 - Resultados obtidos pelo ensaio de Chapelle em amostras de RWP, de acordo com tempo de moagem e diâmetro das partículas.

Material RWP	Chapelle		
	Consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$		
Tempo de moagem	D <sub>95</sub>	D <sub>70</sub>	(mg/g de amostra)
1 h	52 $\mu\text{m}$	22,5 $\mu\text{m}$	44,4
2 h	48 $\mu\text{m}$	19,02 $\mu\text{m}$	62,8

Fonte: Autora.

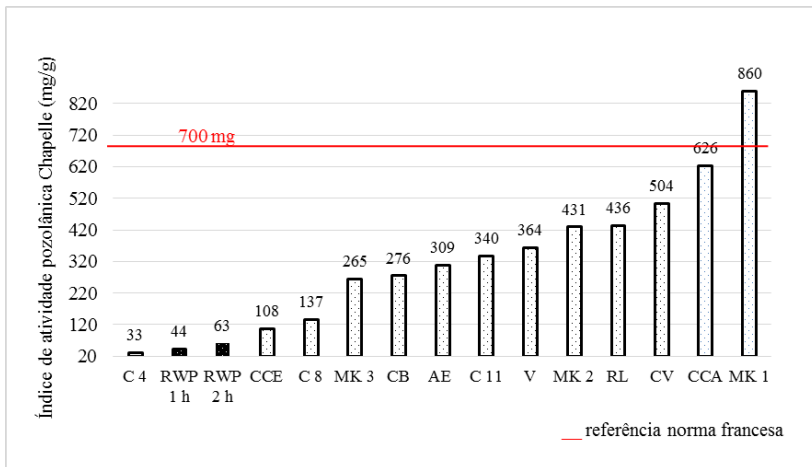
Sobre a granulometria do metacaulino, a norma Francesa estabelece que 70% ou 95% das partículas devem ser inferiores a 65  $\mu\text{m}$ .

Percebe-se, conforme Tabela 14 que as granulometrias estudadas ficaram dentro do limite estipulado pela norma.

Pilar (2012) encontrou resultados pela análise de Chappelle que variaram entre 33 e 340 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de amostra, em estudo realizado com cinzas pesadas geradas pela queima do carvão mineral de usinas termelétricas. Apesar dos resultados estarem abaixo do indicado pelas referências NF P18-513 e Raverdy (1980) apud Cincotto (2011), o autor conclui que a cinza pesada possui potencial como uma adição ao clínquer Portland para composição do cimento pozolânico, evidenciando assim, diferenças existentes, em termos de resultado para Chappelle, de acordo com o material pozolânico testado.

Na Figura 23 os resultados encontrados (Tabela 16) foram comparados com valores encontrados na literatura e normatizados, para diferentes tipos de materiais pozolânicos, e explicitou a alta variabilidade existente para o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de amostra. Por não haver estudos para referenciar o RWP na análise de Chappelle, não se pode descartar a pozolanicidade do material RWP. Além disso, esta é uma contribuição a mais deste estudo para comunidade técnica e científica.

Figura 23 - Resultados obtidos pelo ensaio de Chappelle e comparação do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  com valor de referência.



Fonte: Autora.

A tabela 17 apresenta a legenda dos materiais testados com ensaio de chapelle, descritos no gráfico acima.

Outro fator importante a ser ressaltado diz respeito a determinação do consumo de cal pela pozolana que ocorre por meio da reação química, empregando-se as proporções em massa cal: pozolana 1:1, como proposto originalmente por Chapelle, e gerando diferenças quando comparado ao método da norma ABNT 159895/2010 que indica a proporção ou 2:1 cal: pozolana. Esta divergência gerou um estudo realizado por Quarcioni, V. A. et al. (2015), onde se fez ensaios comparando resultados com os dois métodos, usando materiais com características semelhantes; cinza de casca de arroz (CCA), cinza volante (CV) e metacaulim (MC), os ensaios realizados com apenas 1 g de CaO podem estar subestimando os valores obtidos de CaO consumidos por grama de material pozolânico.

As normas brasileiras (ABNT NBR 15895/2010) e francesa (P 18 – 513/ 2010) foram discutidas com base nos resultados de ensaios Chapelle e enfatizou-se a quantificação do consumo de cal, em massa, pela fase amorfa destes materiais, que pode ser determinada pela análise de difração de raios-X por meio do método de refinamento de Rietvel.

Tabela 17 - legenda da nomenclatura de cada material pozolânico testado com ensaio de chapelle modificado.

<b>AE</b>	Pó de Argila Expandida
<b>C 11</b>	Cinza pesada moída 11 ciclos
<b>C 4</b>	Cinza pesada moída 4 ciclos
<b>C 8</b>	Cinza pesada moída 8 ciclos
<b>CB</b>	Cinzas de Biomassa
<b>CCA</b>	Cinza de Casca de arroz
<b>CCE</b>	Cinza de Casca de Eucalipto
<b>CV</b>	Cinza Volante de Carvão
<b>MK 1</b>	Metacaulino – 1
<b>MK 2</b>	Matacaulino – 2
<b>MK 3</b>	Metacaulino – 3
<b>RL</b>	Valores encontrado na literatura ( Raverdy et al. 1980 apud Cinotto et al. 2011)
<b>RWP - 1 h</b>	Resíduo de lâ de rocha moído em 1 hora
<b>RWP - 2 h</b>	Resíduo de lâ de rocha moído em 2 hora
<b>V</b>	Pó de Vidro

Fonte: Autora.



## 7 CONCLUSÕES

---

O resíduo de lâ de rocha desta pesquisa segundo classificação da NBR 10004/2004 pode ser enquadrado como resíduo de classe II – A, não inerte, ou seja, não apresentando nenhum indicativo de periculosidade, facilitando sua valorização em matrizes de cimento. Quanto ao tipo de material, pode ser considerado como um material amorfo devido sua composição química e falta de ordem de longo alcance. De acordo com a análise de FRX apresentando neste estudo, o resíduo de lâ de rocha se enquadra como material pozolânico conforme estabelecido pela norma NBR 12653/2014.

A técnica de difratometria de raios-X nas pastas de hidróxido de cálcio, apresentou quartzo e hidróxido de cálcio como os principais picos, mostrando que houve pouca formação de produtos da reação pozolânica. Nas observações realizadas no MEV identificou-se supostamente uma pequena formação de C-S-H, sendo necessário realização de técnicas complementar para se confirmar tal resultado. Na análise TGA mostra que não houve perda de massa aos 28 dias para RWP moído em 1 hora e RWP moído em 2 horas apresentou pouco consumo de CH, evidenciando a assim pouca atividade pozolânica até a idade de (28 dias) e aos 90 dias o consumo de CH foi maior com a partícula de menor diâmetro, ou seja, para RWP moído em 2 horas. Na idade de 90 dias pode-se notar o desenvolvimento do potencial de pozolanicidade.

O aumento na resistência à compressão aos 28 dias pode estar relacionado ao efeito filer das partículas de lâ de rocha, que através resultados apresentados evidenciou que, quanto mais finas as partículas melhores são os resultados alcançados. O resultado obtido para ensaio do Chapelle modificado o resíduo não apresentou atividade pozolânica, de acordo com a literatura.

Por fim, a utilização do resíduo industrial de lâ de rocha como material pozolânico não foi conclusiva, o resíduo apresentou um potencial desenvolvimento de pozolanicidade em idade avançadas, conforme descrito também em literatura. No efeito filer a incorporação dos resíduos de lâ rocha trouxe efeitos benéficos, como o preenchimento de espaços vazios dentro do corpo de prova, contribuindo para durabilidade mecânica, além de reduzir a disposição do resíduo em aterros industriais e

também contribuir com despesas relacionadas ao transporte e destinação do resíduo, além dos custos e materiais envolvidos nas indústrias produtoras de cimento.

## **8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

---

- ✓ Estudar o comportamento do resíduo de lã de rocha avaliando sua atividade pozolânica, variando apenas um dos fatores que mais influenciam o seu desempenho, idade (7, 28, 90, 180 dias), e composição química.
- ✓ Analisar ambientalmente e economicamente a incorporação do resíduo de lã de rocha em escala industrial por ex. blocos de concreto seco.
- ✓ Estudar o aproveitamento do resíduo em outras alternativas, por ex. cerâmica.
- ✓ Estudar a incorporação do resíduo de lã de rocha juntamente com outros materiais pozolânicos (combinações binárias) para conseguir o máximo de benefícios (curto e longo prazo).

## 9. REFERÊNCIAS

---

ALEIXO, F.C; FILOGÔNICO, P.H.C; DOS REIS, A.S; LOUZADA, D.M.; DELLA, V.P; **Formulação de Vidros Sodo-Cálcicos com Incorporação de Resíduos de Lã de Rocha**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 58°. 2014, Bento Gonçalves - RS. Anais, 2014. p. 1 – 11

ALVES, J.O; ESPINOSA, D.C.R; TENÓRIO, J.A.S. **Recovery of Steelmaking Slag and Granite Waste in the Production of Rock Wool**. Materials Research, São Paulo, v. 1, n. 18, p.204-211, jan. 2015.

AMBROISE, P.; MURAL, M.; PERA, J. **Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals**. IV: Experimental condition fro strength improvement of metakaolinite. Cement and Concrete Research, v. 15, pp. 83-88, 1984.

ANDRADE, L.B.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M. **Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete**. Cement and Concrete Research, volume 37, pages 231 – 241, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014

\_\_\_\_\_. **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. NBR **15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chapelle modificado. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira dos Fabricantes de Lãs Isolantes Minerais – ABRALISO Disponível em < <http://www.abraliso.org.br/>> Acesso em: 04 Out. 2013.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2 de agosto de 2010. Brasília, DF, 2010.

BUCK, R. L. **Man-made Vitreous Fibers**. Techinal Manual NEHC-TM6290.91-1, Ver. A Navy Environmental Health Center, USA, 1997.

CANCER, **International Agency for Reserch**. Disponível em <<http://www.iarc.fr/>> Acesso em: 02 Out. 2013.

CINCOTTO, M. A.: **Reações de Hidratação e Pozolânicas**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Editor, Geraldo C. Isaia. 1º Edição, v. 01. Editora Ibracon. São Paulo. 2011. p.185-233.

CHAI, J., JATUPHON, T., SAWANG; S. and KRAIWOOD, K. (2011), **“Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash”**, Constr. Build. Mater., **25**(11), 4287-4293.

CHAIPANICH, A., NOCHAIYA T. **Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes**. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.99, n.2, 2010, pp. 487-493

CHENG, AN; LIN, WEI-TING. **Application of rock wool waste in cement-based composites**. Materials And Design, Taiwan, n. , p.1-7, 2011.

CHERIAF, M.; ROCHA, J.C.; PERA, J. **Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash**. Cement and Concrete Research, v. 29, pp. 1387-1391, 1999.

CURTIUS, A. J.; FIEDLER, H. D. **Análise de metais e qualidade analítica. Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p. 211-227.

DONATELLO, S.; TYRER, M; CHEESEMAN, C.R (2010) **Comparison of test methods to assess pozzolanic activity**. Cement and Concrete Composites 32 p. 121 – 127.

EURIMA, Eurima – **European Insulation Manufacturers Association**. Disponível em < <http://www.eurima.org/about-mineral-wool/production-process>> Acesso em: 21 Jun. 2015.

E-SIC, Sistema de Acesso à informação. **Quantitativo de lã de rocha**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <nao-responder.esic@cgu.gov.br>. em: 24 out. 2014.

FERREIRA, Daniel Furtado; BORGES, Lívia Costa. **Poder e Taxa de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-Newmankeuls sob distribuição normal e não normais dos resíduos**. Matemática Estatística, São Paulo, p.53-67, jan. 2003.

HOČEVAR, M.; ŠIROK, B.; BLAGOJEVIĆ, B. **Mineral Wool Production Monitoring Using Neural Networks International**. Journal of Information Technology v.11, N.9, p.64-72, 2005.

ISAIA, G. E., **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, IBRACON, 2007.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012. Caderno de diagnóstico, **Resíduos Sólidos Industriais**. IPEA 2012.

JIANG CH, ZHAO H, CHEN D, ZHANG W. **Comparing and analyzing influence of basalt and polypropylene fibers on the cement mortar**. Bull Chin Ceram Soc 2007;26(6):1084–8.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos**. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP. cap.6, p.145-190, 2003.

JURY, J. B. R. B. **Cinétique de Crystallisation et Altération Post-Magmatique d' une Cheminée Basaltique du Complexe Volcanique de Lisbonne**. Tese (Doutorado), Université POITIERS, França, 1997.

LABRINCHA, J. **Sub Projeto de Isolamento Térmico: 1º Relatório de Progresso.** Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2006.

LIDDELL, D; MILLER, K. **Mineral fibers and health.** Boca Raton: CRC Publishers; 1991.

LIN, W; A. CHENG; R. HUANG; Y. C. WU; T.Y. HUAN. **Rock wool wastes as a supplementary cementitious material replacement in cement-based composites.** Computers And Concrete, Taiwan, v. 11, n. 2, p.93-104, 2013a.

LIN, W; A.CHENG; R. HUANG; S. ZOU. **Improved microstructure of cement-based composites through the addition of rock wool particles.** Materials Characterization, Taiwan, v. 84, n. , p.1-9, 17 jun. 2013b.

LOMAS, M.G; SÁNCHEZ, M.I.R; FRÍAS, M. **Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in fcc-cement mortars.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,v.90, pp. 443-447, 2007.

LUOTO, K.; HOLOPAINEN, M.; KANGAS, J.; KALLIOKOSKI, P.; SAVOLAINEN, K. **Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flowthrough cell culture.** Environ. Res. Sect. A 78, pp. 25 – 37., 1998.

MASSAZZA F. (1993) Pozzolanic cements. **Cement & Concrete composites** 15, p. 185-214, England, Elsevier.

MOESGAARD, M.; PEDERSEN, H.D.; YUE, Y.Z.; NIELSEN, E.R.; Crystallization in stone wool fibres. **Journal Of Non Crystalline Solids**, Denmark, p.1101-1108, 06 fev. 2007.

METHA, P. K; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Editora Pini Ltda., 1994.

MERTENS, G.; SNELLINGS, R.; BALEN, K. V.; SIMSIR, B. B.; VERLOOY, P.; ELSEN, J. **Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity.** Cement and Concrete Research, v. 39, pp.233-240, 2009.

NEVES, D. D; KNISS, C. T; DELLA, V. P. **Caracterização de Lãs Industriais (Lã de Rocha e Lã de Vidro) para Obtenção de Cerâmicas Vítreas**. Vitória, ES, p. 1 – 8. 2012. CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais 04 a 08 nov. 2012.

NEVILLE, Adam M.. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini Ltda, 1997. 827 p. Tradução Eng. Salvador E. Giammusso.

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais Pozolânicos**. 2006. 149 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2006.

NORME FRANÇAISE. **NF P18-513**. Métakaolin, addition pouzzalannique pour bétons – Définitions, spécifications, critères de conformité. Norme Française. 2010.

PILAR, Ronaldo. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pastas de cimento portland**. 2012. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PONTES, Jorge Miguel Pires do Nascimento. **Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SANTOS, Maria Luiza Lopes de Oliveira. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SANTOS, Sílvia **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 288 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006

SMEDSKJAER, Morten M.; SOLVANG, Mette; YUE, Yuanzheng. **Crystallisation behavior and high-temperature stability of stone wool fibres**. Journal Of The European Ceramic Society, Denmark, p.1287-1295, 06 jan. 2010

TRDIC, F.; SIROK, B.; BULLEN, P. R.; PHILPOTT, D. R. **Monitoring Mineral Wool Production Using Real-Time Machine Vision**. Real-Time Imaging 5, 125-145, Academic Press, USA, 1999.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F.F.; COELHO A.C.V.; CINCOTTO, M.A; Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais: IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JORNAL**, São Paulo, v. 8, n. 1, p.1-7, fev. 2015

ROCHA, C. V.; **Preparação e Caracterização de Vidros à Base de Escória de Auto-Forno**. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto, 1998.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Florianópolis: Coletânea Habitare, 2003. 22 p. (Vol. 4)

ROCKFIBRAS, FDS - **Ficha de Dados de Segurança – Produto: LÃ DE ROCHA THERMAX**. Disponível em < <http://www.rockfibras.com.br/> > Acesso em 20 maio 2015.

RODRIGUES, Girley Ferreira. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lã mineral**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto, 2009.

RODRIGUES, Girley Ferreira. **Fabricação de lãs de rocha a partir da escória da produção de ligas FeSiMn** (Manufacture of mineral wool from slag of ferroalloy production FeSiMn). Cerâmica. V.58, p.529-533. 2012

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO (SNIC), Relatório anual da indústria de cimento. Disponível em < [http://www.snic.org.br/relatorio\\_anual\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp) > Acesso em: 20 Jun. 2015.



OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.490–496, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a34.pdf>> Acesso em: 04 Fev. 2014.

PEDROZO, Ruben Francisco Esteche. **Influência da Substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedade de argamassas e concretos.** 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PONTES, Jorge Miguel Pires do Nascimento. **Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões.** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

UEDA, M; MURASE, F.; TAKAHASHI, F.; MATSUMOTO, T. **An Optical System for Measuring the Eccentricity of Glass Wool Pipe – for Industrial Use.** Optics and Lasers in Engineering, issue 6, v. 31, p. 493-500, 1999.

WENDHAUSEN, P. A. P; RODRIGUES G.V; MARCHETTO O. **Análises Térmicas.** Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica Curso de Graduação em Engenharia de Materiais Caracterização de Materiais III, Florianópolis, 2004. 47p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** London, 2ªed. Ed. Academic Press, 1997.

TONETO JÚNIOR, Rudnei; SAIANI, Carlos César Santejo; DOURADO, Juscelino. **Resíduos Sólidos no Brasil: Oportunidades e desafios da Lei Federal n 12.305.** São Paulo: Editora Manole, 2014.

## **ANEXO A – Laudo de classificação – NBR 10.004/2004**

---

### **CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - NBR 10004:2004**

**Cliente:** GRI – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS LTDA

**Endereço:** Av. Paulo Santos Mello, S/N – Capivari de Baixo – SC

**CEP:** 88745-000

**Telefone:** (48) 9949-7175 /9942-1833

**Atividade da empresa:** Gerenciamento de resíduos sólidos

**Responsável:** Kamila Almeida de Oliveira

**REALIZADO POR:** Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnologias – IPAT/UNESC

**Endereço:** Rodovia Jorge Lacerda, km 4,5 – Bairro Sangão – Criciúma – Santa Catarina.

**CEP:** 88805 – 350

**Caixa Postal:** 3167

**Telefone:** (48) 3444-3731

**CRQ:** 0992 - 13ª Região – SC

#### **DADOS DA AMOSTRA**

**Resíduo:** Lã de rocha descartada

**Gerador do Resíduo:** GRI – Gerenciamento de Resíduos Industriais Ltda.

**Origem do Resíduo:** Processo de manutenção do precipitador eletrostático e caldeira da queima de carvão.

**Descrição do Resíduo:** Lã de rocha descartado do precipitador eletrostático e caldeira.

**Forma de estocagem:** Sacos plásticos

**Ponto de coleta:** Sacos plásticos localizados na GRI.

**Data da coleta:** 21/09/2013

**Hora da Coleta:** Não Consta

**Data da entrada no laboratório:** 09/10/2013

**Nº da amostra no laboratório:** 81311

**Número da ficha de coleta:** Não Consta

**Coletor:** Kamila Almeida de Oliveira

**Metodologia:** As metodologias utilizadas pelo Laboratório de Solos são baseadas "SW 846-3050B (USEPA 1986, *Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number SW-846*, Washington, DC)." e as referências:

Norma NBR 10004 da ABNT – Classificação de Resíduos Sólidos.

Norma NBR 10005 da ABNT – Ensaio de Lixiviação.

Norma NBR 10006 da ABNT – Ensaio de Solubilização.

Norma NBR 10007 da ABNT – Amostragem de Resíduos.

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO RESÍDUO**

**Aspecto:** Sólido (Lã de rocha)

**Coloração:** Marrom

**Odor:** Inodoro

**Umidade a 105°C (%):** 0,18

**Densidade (g/mL):** 0,1

**Perda ao Fogo (PF) à 950°C (%):** ND

**Líquidos Livres:** Ausente (Método de acordo com a norma ABNT NBR 12988).



*Foto do resíduo*

## RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

## NBR 10004:2004 – MASSA BRUTA

Parâmetros	Unidades	Resultados	Valor Recomendado	L.Q.
Oleos e Graxas	mg/kg	< 1	Ausência	1
Sólidos Suspensos	% p/p	ND	-	0,05
Sólidos Secos	% p/p	99,82	-	0,05

## Corrosividade

Parâmetro	Unidade	Resultado	Valor Recomendado	L.Q.
pH em água (1:1)	---	7,0	2 a 12,4	0,01

## Reatividade

Parâmetros	Unidades	Resultados	Limite Liberável por kg de Resíduo	L.Q.
Ácido Cianídrico (HCN) <sup>(1)</sup>	mg/kg	< 0,05	250mg de HCN	0,05
Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	mg/kg	307	500mg de H <sub>2</sub> S	40

## NBR 10005:2004 – LIXIVIADO

## Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
Arsênio	< 0,01	1,0	0,01
Bário	0,39	70,0	0,01
Cádmio	0,014	0,5	0,005
Chumbo	< 0,01	1,0	0,01
Cromo Total	< 0,01	5,0	0,01
Fluoreto	0,1	150,0	0,1*
Merúrio	< 0,001	0,1	0,001
Prata	< 0,01	5,0	0,01
Selênio	< 0,01	1,0	0,01

## Dados do ensaio de lixiviação

Solução Extratora N°	1
pH do extrato lixiviado obtido	7,23
Tempo total de Lixiviação (Hora)	18
Volume do líquido obtido (extrato) (mL)	400

## NBR 10006:2004 – SOLUBILIZADO

## Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
Alumínio	0,1	0,2	0,1
Arsênio	< 0,01	0,01	0,001
Bário	0,02	0,7	0,01
Cádmio	< 0,005	0,005	0,005
Chumbo	< 0,01	0,01	0,01
Cianeto	NA	0,07	0,05
Cloreto	7	250,0	5*
Cobre	< 0,005	2,0	0,005
Cromo Total	< 0,01	0,05	0,01
Fenóis Totais	< 0,01	0,01	0,01
Ferro	0,6	0,3	0,02
Fluoreto	8,8	1,5	1,0*
Manganês	0,07	0,1	0,01
Mercurio	< 0,001	0,001	0,001
Nitrato (expresso em N)	< 1	10,0	1*
Prata	< 0,01	0,05	0,01
Selênio	12,62	0,01	0,001
Sódio	18,88	200,0	0,01
Sulfato (expresso em SO <sub>4</sub> )	85	250,0	5*
Surfactantes	0,6	0,5	0,1
Zinco	0,08	5,0	0,01

## Dados do ensaio de solubilização

Umidade a 42°C (%)	0,01
pH do extrato solubilizado (inicial)	7,23
pH do extrato solubilizado (final)	7,29

## Observações:

- <sup>(1)</sup> Ensaio terceirizado.
- L.Q: Limite de Quantificação.
- NA: Não Analisado.
- VMP: Valor Máximo Permitido.

## AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 1. Corrosividade

O resíduo é caracterizado como **não corrosivo**, pois apresenta pH = 7,00 em sua mistura com água na proporção de 1:1 em peso, não ultrapassando o limite estabelecido pela norma **ABNT NBR 10004:2004**, letra **a** do item **4.2.1.2 Corrosividade**. Portanto, o resíduo é classificado como **não perigoso** neste ensaio.

### 2. Reatividade

O resíduo ensaiado é caracterizado como **não reativo**, pois não apresenta em sua constituição íons cianeto e sulfeto acima dos limites estabelecidos pela norma **ABNT NBR 10004:2004**, letra **e** do item **4.2.1.3 Reatividade**. Portanto, o resíduo é classificado como **não perigoso** neste ensaio.

### 3. Toxicidade

#### 3.1 Ensaio de Lixiviação

Os parâmetros analisados no extrato do resíduo obtido segundo a **ABNT NBR 10005:2004**, não apresentam concentrações acima dos limites máximos permitidos do item **4.2.1.4 toxicidade**, letra **a**, anexo **F** da norma **ABNT NBR 10004:2004**, caracterizando o resíduo como **não tóxico**, sendo classificado como **não perigoso – classe II** neste ensaio.

#### 4. Ensaio de Solubilização

Dos parâmetros analisados no extrato do resíduo obtido segundo a **ABNT NBR 10006:2004**, ferro, fluoreto e surfactantes apresentam concentrações superiores ao padrão para o ensaio de solubilização, anexo **G** da **ABNT NBR 10004:2004**, caracterizando o resíduo como **não inerte** neste ensaio e classificando-o como **não perigoso - classe II A – não inerte**.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

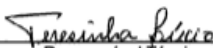
O resíduo não consta nos anexos A ou B.

Não é inflamável.

Considerando os resultados obtidos no decorrer dos ensaios da massa bruta, lixiviação, solubilização e das características Físico-Químicas do resíduo, o mesmo (**Lã de rocha descartada**) é classificado como **Classe II A – Não Inerte** segundo a norma **ABNT NBR 10004:2004**, nos parâmetros analisados.

A identificação dos constituintes (parâmetros) avaliados na caracterização foi estabelecida de acordo com o processo que deu origem ao resíduo, matérias-primas, insumos e a segregação do mesmo. Dados fornecidos pelo interessado.

**CLASSIFICAÇÃO: RESÍDUO NÃO PERIGOSO - CLASSE II A - NÃO INERTE.**

  
\_\_\_\_\_  
Responsável Técnico  
Química Teresinha Lúcio - CRQ 13200109

Criciúma, 02 de outubro de 2013.

## ANEXO B – Ensaio de massa específica

---



QUANTACHROME CORPORATION  
 Ultrapyc 1200e V5.01  
 Analysis Report

Wed Mar 12 16:34:39 2014  
 User ID: UNESC

Sample Parameters

Sample ID: LR-1H  
 Weight: 3.9592 g

Analysis Parameters

Cell Size - Small  
 V Added - Small: 12.7329 cc  
 V Cell: 19.2835 cc  
 Analysis Temperature: 23.7 C  
 Target Pressure: 17.0 psig  
 Type of gas used: Helium  
 Equilibration Time: Auto  
 Flow Purge: 1.0 min.  
 Maximum Runs: 5  
 Number Of Runs Averaged: 3  
 Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.1031 %  
 Average Volume: 1.3709 cc  
 Volume Std. Dev.: 0.0016 cc  
 Average Density: 2.8881 g/cc  
 Density Std. Dev.: 0.0035 g/cc  
 Coefficient of Variation: 0.1200 %



-----  
 Run Data  
 -----

RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	1.3635	2.9037
2	1.3661	2.8982
3	1.3687	2.8926
4	1.3711	2.8876
5	1.3727	2.8841

-----



## ANEXO C – Ensaio de granulometria a laser

	<b>Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC</b> <b>Instituto de Engenharia e Tecnologia – I.DT</b>  <b>Laboratório de Materiais</b>	
<b>Relatório de Ensaio nº 249/2014</b>		
<b>Criciúma: 11 de Novembro de 2014</b>		<b>pag. 1/5</b>
<b>Cliente:</b>	GRI - GERENCIAMENTO DE RESIDUOS INDUSTRIAIS LTDA	
<b>Endereço:</b>	Av Paulo santos Mello, s/n – Capivari de Baixo / SC.	
<b>Fone/Contato:</b>	(55 48) 3623 - 4663	
<b>E-mail:</b>	mgoulart.gri@solvi.com	
<b>Data de Solicitação:</b>	05 de Novembro de 2014	
<b>Ensaio solicitado:</b>	Ensaio de Determinação de Tamanho de Partículas por	
<b>Data de conclusão do ensaio:</b>	11 de Novembro de 2014	
<p><b>Objetivo:</b> Realizar ensaio de determinação do tamanho de partículas por difração de raios laser em duas amostras identificadas como "RWP_2horas_1111" e "RWP_1horas_1111".</p> <p><b>Desenvolvimento:</b> Determinação do tamanho de partícula por difração de raios laser em analisador de tamanho de partículas Cilas, modelo 1064.</p> <p><b>Resultados:</b> A análise de tamanho de partícula das amostras são apresentados nas Figuras 01 e 02, e nas Tabelas 01, 02, 03 e 04.</p>		



	<b>Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC</b> <b>Instituto de Engenharia e Tecnologia – I.D.T</b>	
	<b>Laboratório de Materiais</b>	
11/11/14   Relatório n° 249/2014   pág. 2/5		

Figura 01. RWP\_1hora\_1111.

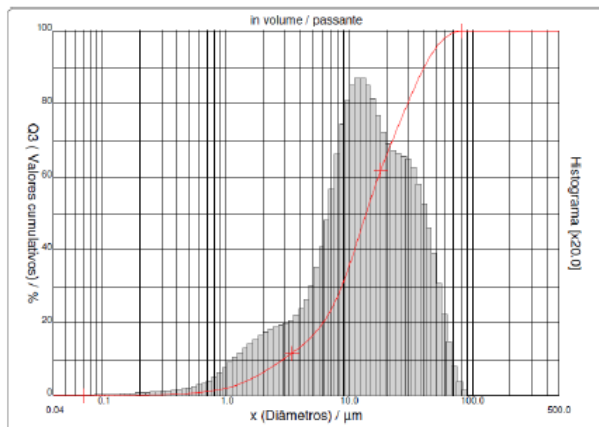


Tabela 02.RWP\_1hora\_1111.

Ref da amostra	: RWP_1hora_1111	Ultrassom	: 60 s (+durante)
Cliente	: Maiara_GRI	Ocureção	: 9%
Amostra	: Desconhecida	Diâmetro a 10%	: 2.90 µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 13.67 µm
Líquido	: Água	Diâmetro a 90%	: 40.41 µm
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 18.29 µm
Operador	: Letícia	Fraunhofer	
Empresa	: Inst. de Eng. e Tecnologia	Densidade/Fator	-----
Localização	: Lab. Caracterização	Superfície específica	-----
Data	: 11/11/2014 Hora : 08:03:57	Diluição automática	: Não / Não
Índice med.	: 1244	Medida/Limp.	: 60s/60s/4
Database name	: Granulog	SOP name	: unesc



	<b>Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC</b> <b>Instituto de Engenharia e Tecnologia – I.D.T</b>  <b>Laboratório de Materiais</b>	
	11/11/14   Relatório nº 249/2014   pág. 3/5	

Tabela 02.RWP\_1hora\_1111.

		Valores cumulados característicos									in volume / passante									
x	0,04	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80										
Q3	0,01	0,05	0,08	0,21	0,37	0,54	0,72	0,82	1,15	1,41										
q3	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,14										
x	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20										
Q3	1,72	2,07	2,46	2,88	3,32	3,77	4,68	5,58	6,46	7,31										
q3	0,18	0,23	0,29	0,34	0,38	0,42	0,47	0,53	0,58	0,62										
x	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00	4,30										
Q3	8,13	8,90	9,64	10,34	11,00	11,64	12,25	12,86	13,46	14,34										
q3	0,66	0,67	0,70	0,71	0,71	0,74	0,76	0,77	0,82	0,85										
x	4,60	5,00	5,30	5,60	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50										
Q3	15,23	16,43	17,36	18,32	19,66	21,40	23,24	25,18	27,21	29,34										
q3	0,92	1,00	1,11	1,21	1,35	1,51	1,73	1,96	2,19	2,45										
x	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00										
Q3	31,50	35,84	40,04	44,01	47,71	51,11	54,22	57,04	59,60	61,93										
q3	2,63	2,87	3,07	3,18	3,22	3,20	3,14	3,04	2,94	2,84										
x	19,00	20,00	21,00	22,00	23,00	25,00	28,00	30,00	32,00	34,00										
Q3	64,05	66,00	67,81	69,50	71,03	74,05	78,02	80,41	82,63	84,67										
q3	2,73	2,65	2,59	2,53	2,49	2,47	2,44	2,41	2,40	2,34										
x	36,00	38,00	40,00	43,00	45,00	50,00	53,00	56,00	60,00	63,00										
Q3	86,53	88,21	89,72	91,71	92,96	95,22	96,33	97,22	98,13	98,65										
q3	2,27	2,17	2,05	1,92	1,76	1,55	1,33	1,13	0,92	0,74										
x	66,00	71,00	75,00	80,00	85,00	90,00	95,00	100,00	112,00	125,00										
Q3	99,05	99,51	99,72	99,88	99,96	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00										
q3	0,60	0,44	0,27	0,17	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00										
x	130,0	140,0	150,0	160,0	170,0	180,0	190,0	200,0	212,0	224,0										
Q3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00										
q3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00										
x	240,0	250,0	280,0	300,0	315,0	355,0	400,0	425,0	450,0	500,0										
Q3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00										
q3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00										

x : diâmetro /  $\mu\text{m}$  Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



	<b>Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC</b> <b>Instituto de Engenharia e Tecnologia – I.D.T</b> <b>Laboratório de Materiais</b> 11/11/14   Relatório nº 249/2014   pág. 4/5	
---	---	---

Figura 02. RWP\_2horas\_1111.

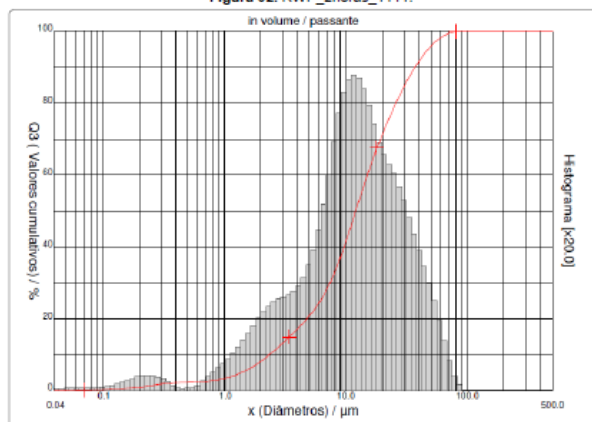


Tabela 03. RWP\_2horas\_1111.

Ref da amostra : RWP_2hora_1111 Cliente : Maiara_GRI Amostra : Desconhecida Comentários : Líquido : Água Agente dispersante : Nonium Operador : Leticia Empresa : Inst. de Eng. e Tecnologia Localização : Lab. Caracterização Data : 11/11/2014 Hora : 08:32:17 Índice med. : 1245 Database name : Granulog	Ultrassom : 60 s (+durante) Obscuration : 9 % Diâmetro a 10% : 2.34 µm Diâmetro a 50% : 12.05 µm Diâmetro a 90% : 37.07 µm Diâmetro médio : 16.41 µm Fraunhofer : Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Não / Não Medida./Limp. : 60s/60s/4 SOP name : unesc
---	---



	<b>Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC</b> <b>Instituto de Engenharia e Tecnologia – I.D.T</b>	
	<b>Laboratório de Materiais</b>	
	11/11/14   Relatório n° 249/2014   pág. 5/5	

Tabela 04. RWP\_2horas\_1111.

x	0,04	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
C3	0,05	0,21	0,33	0,99	1,87	2,30	2,99	2,45	2,56	2,80
q3	0,01	0,02	0,02	0,07	0,15	0,11	0,03	0,02	0,05	0,13
x	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20
C3	3,11	3,46	3,84	4,25	4,69	5,15	6,13	7,15	8,20	9,26
q3	0,19	0,24	0,28	0,33	0,39	0,44	0,52	0,62	0,71	0,79
x	2,40	2,60	2,90	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00	4,30
C3	10,30	11,31	12,28	13,21	14,09	14,92	15,72	16,50	17,25	18,34
q3	0,85	0,90	0,93	0,96	0,97	0,97	0,96	1,03	1,04	1,07
x	4,60	5,00	5,30	5,60	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50
C3	19,41	20,82	21,90	22,98	24,46	26,36	28,35	30,41	32,66	34,78
q3	1,13	1,20	1,29	1,39	1,52	1,69	1,91	2,12	2,37	2,60
x	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00
C3	37,03	41,50	45,79	49,81	53,52	56,91	59,98	62,74	65,23	67,48
q3	2,80	3,01	3,20	3,28	3,29	3,25	3,16	3,04	2,92	2,80
x	19,00	20,00	21,00	22,00	23,00	25,00	26,00	30,00	32,00	34,00
C3	89,52	71,38	73,10	74,79	75,19	78,94	82,49	84,52	85,32	87,91
q3	2,88	2,58	2,51	2,44	2,38	2,34	2,23	2,09	1,98	1,86
x	36,00	38,00	40,00	43,00	45,00	50,00	53,00	56,00	60,00	63,00
C3	89,32	90,58	91,70	93,17	94,03	95,82	96,69	97,42	98,19	98,66
q3	1,75	1,66	1,55	1,44	1,34	1,21	1,06	0,94	0,79	0,68
x	66,00	71,00	75,00	80,00	85,00	90,00	95,00	100,00	112,00	125,00
C3	99,03	99,47	99,69	99,86	99,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
q3	0,57	0,43	0,29	0,19	0,11	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
x	130,00	140,00	150,00	160,00	170,00	180,00	190,00	200,00	212,00	224,00
C3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
q3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
x	240,00	250,00	280,00	300,00	315,00	355,00	400,00	425,00	450,00	500,00
C3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
q3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

x : diâmetro /  $\mu\text{m}$  C3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

## Cláusulas de responsabilidade

- O Laboratório não se torna responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que se possa fazer deste documento, cuja reprodução parcial ou total, sem autorização expressa, está totalmente proibida.
- Os resultados obtidos somente se referem à amostra do material submetido ao(s) ensaio(s).
- Não é de responsabilidade do laboratório a representatividade da amostragem realizada pelo solicitante.

**Laboratorista:**  
Leticia Patricio Ferreira

**Responsável Técnico:**  
Eng. Mateus Milanez

## ANEXO D – (DSC/TGA) para as pastas de hidróxido de cálcio contendo as misturas do resíduo de RWP moído com tempo em 1 hora e 2 horas.

Figura 24 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (REF).

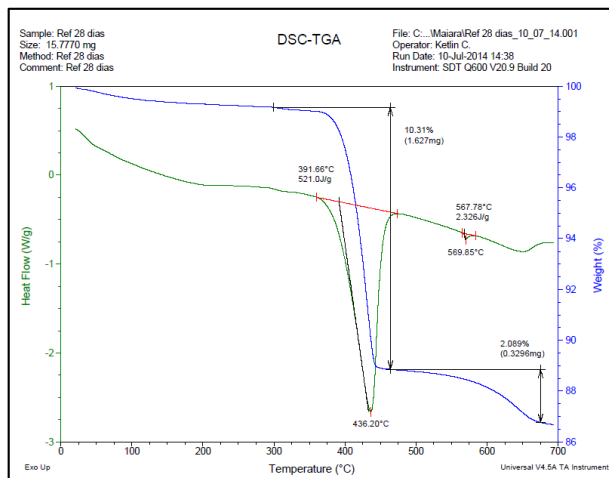


Figura 25 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (25% RWP).

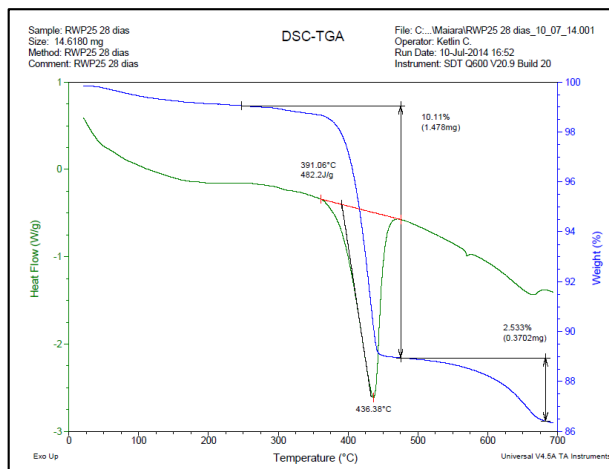


Figura 26 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (50% RWP).

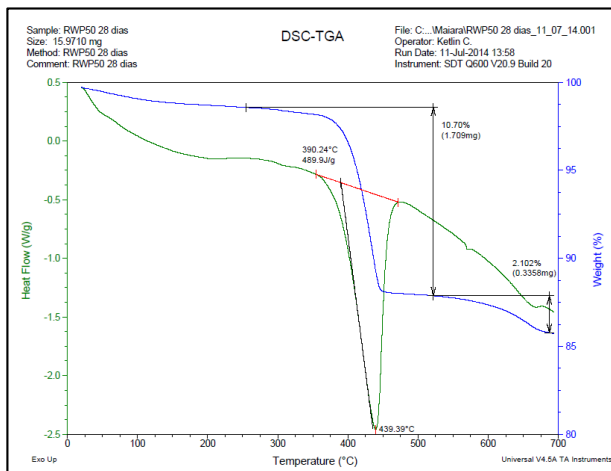


Figura 27 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (75% RWP).

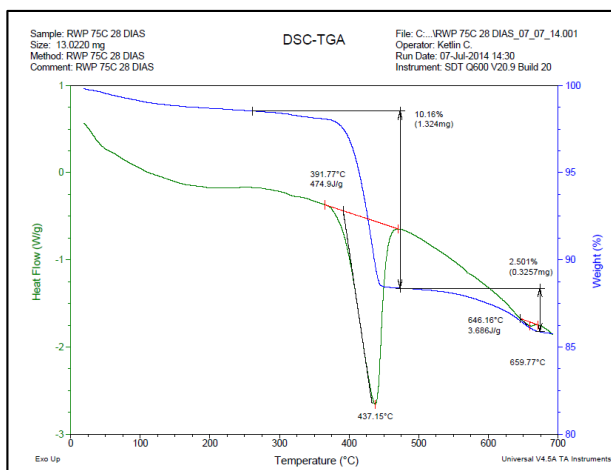


Figura 28 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 28 dias (100% RWP).

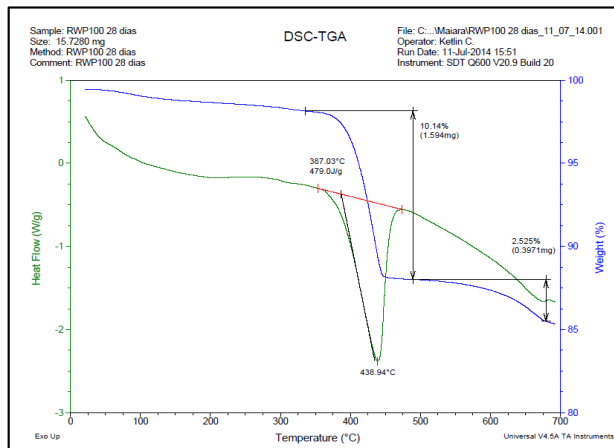


Figura 29 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (REF).

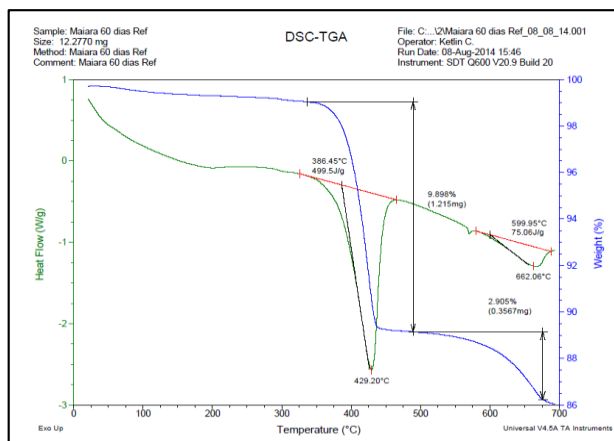




Figura 30 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (25% RWP).

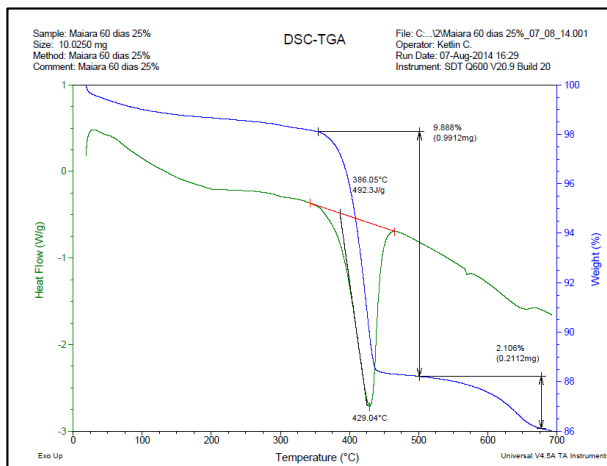


Figura 31 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (50% RWP).

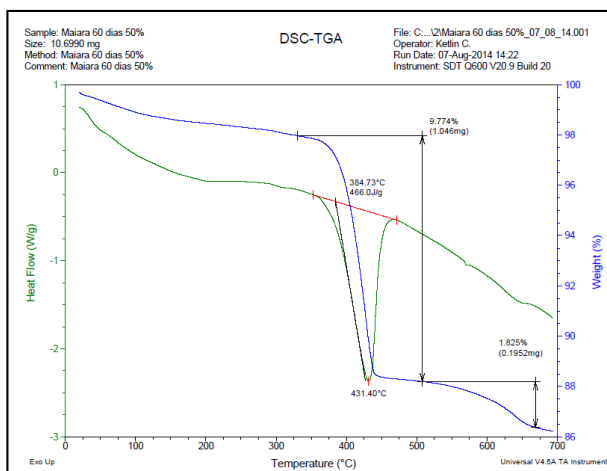


Figura 32 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (75% RWP).

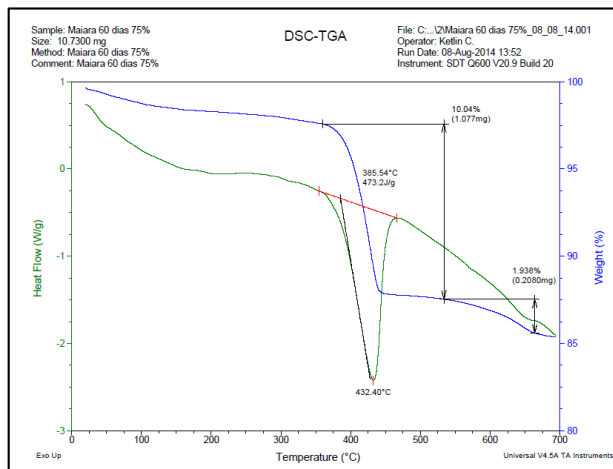


Figura 33 – DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 60 dias (100% RWP).

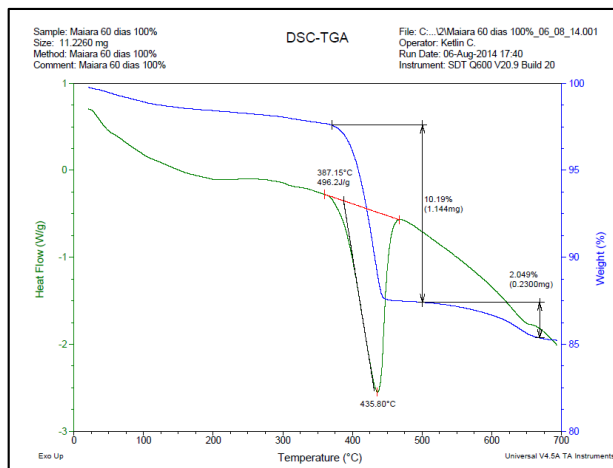


Figura 34 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (25% RWP).

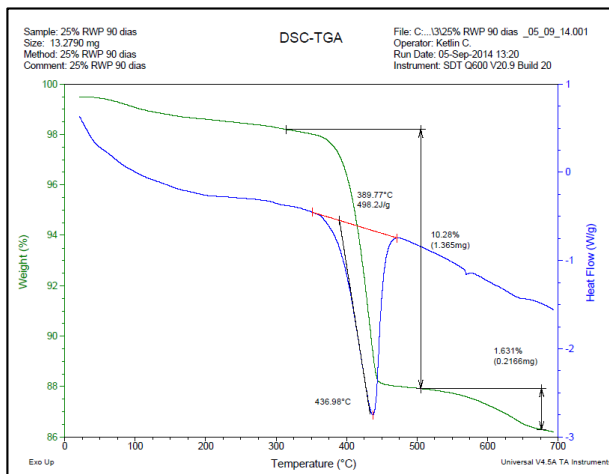


Figura 35 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (50% RWP).

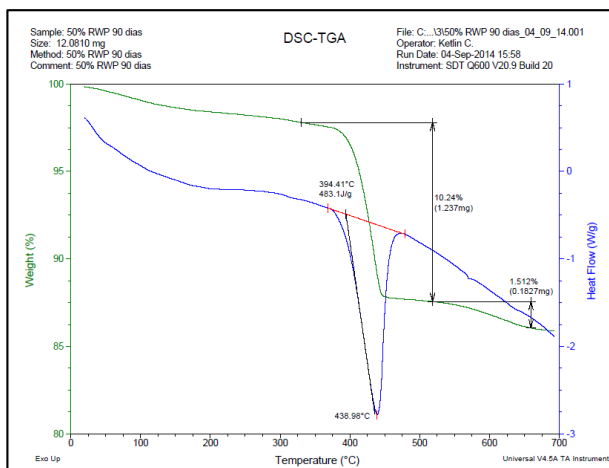


Figura 36 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (75% RWP).

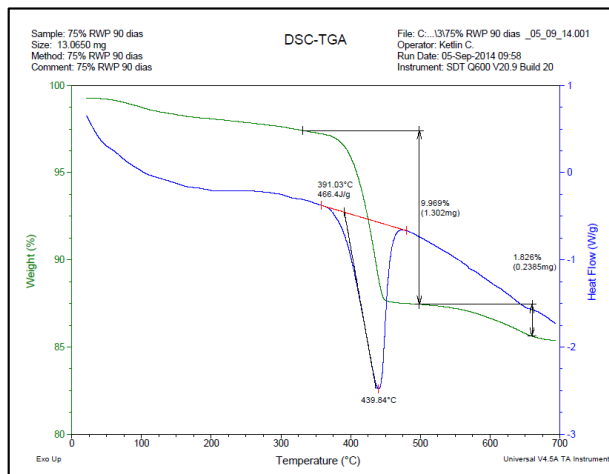


Figura 37 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 1 hora idade de 90 dias (100% RWP).

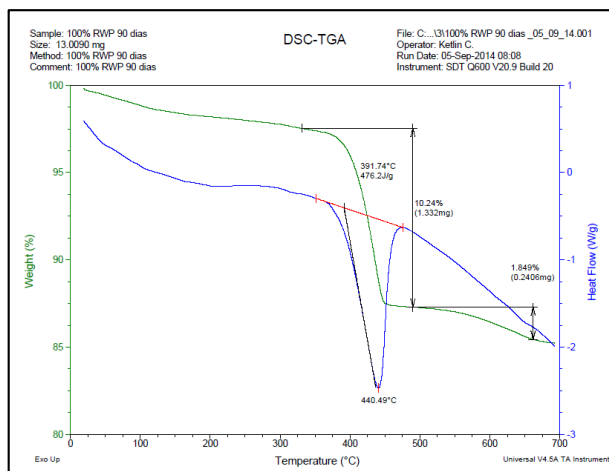


Figura 38 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (25% RWP).

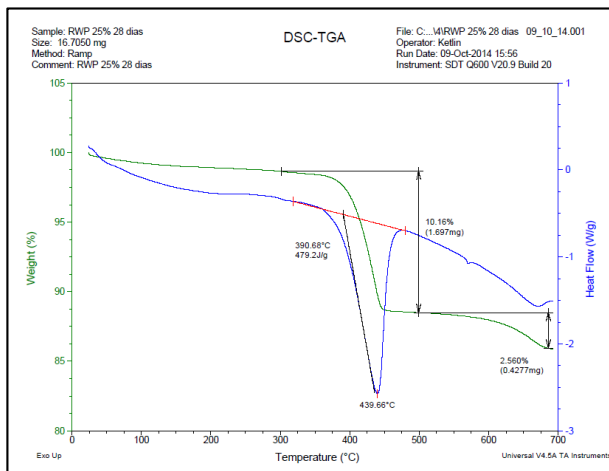


Figura 39 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (50% RWP).

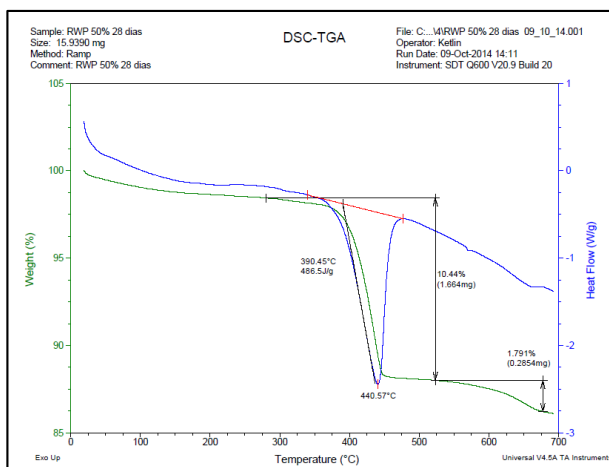


Figura 40 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (75% RWP).

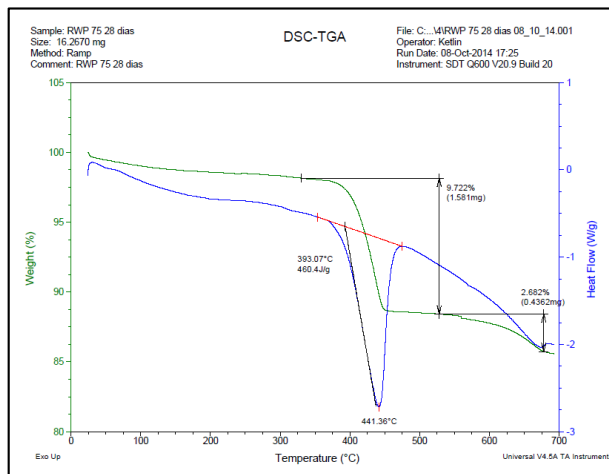


Figura 41 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 28 dias (100% RWP).

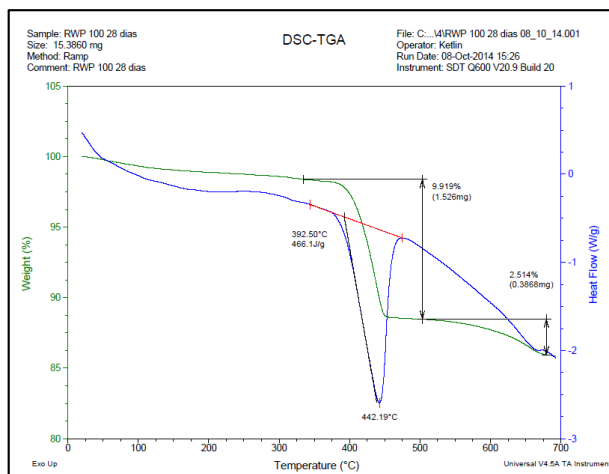


Figura 42 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (REF).

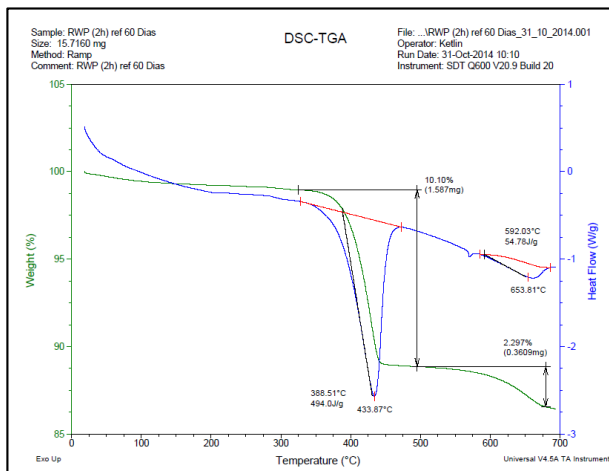


Figura 43 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (25% RWP).

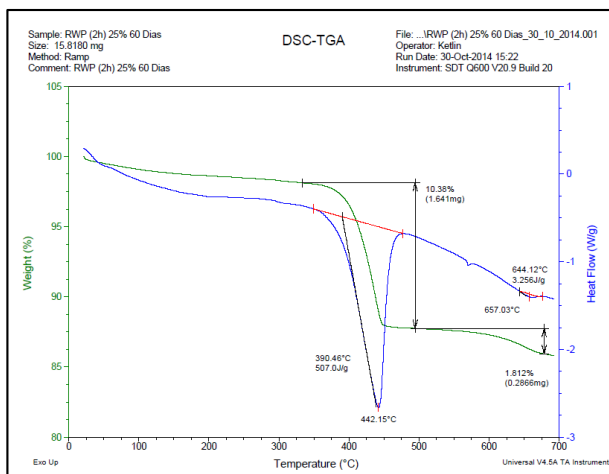


Figura 44 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (50%RWP).

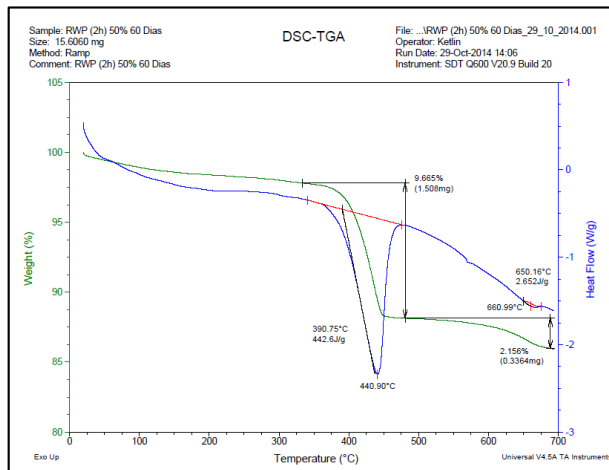


Figura 45 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (75%RWP).

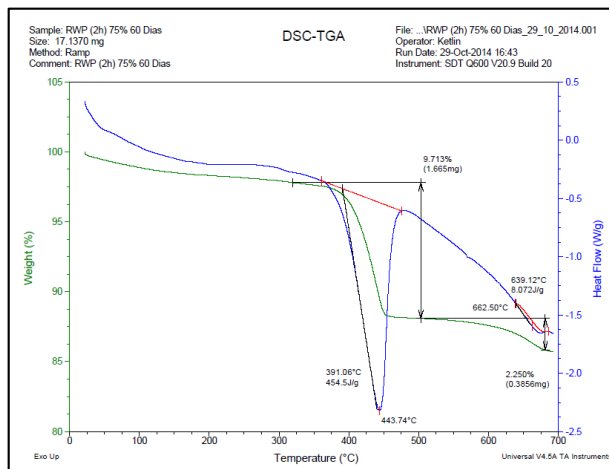




Figura 46 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 60 dias (100%RWP).

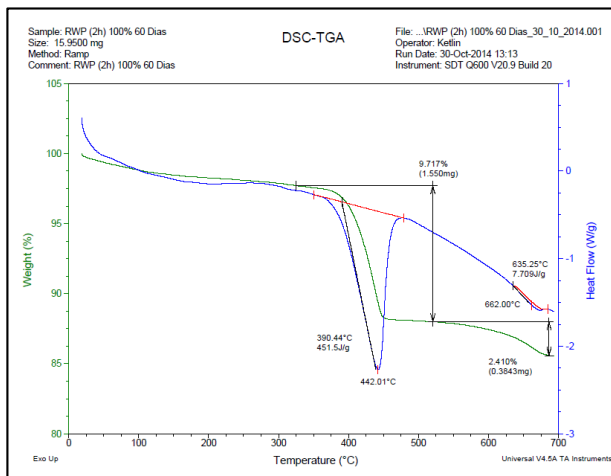


Figura 47 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (REF).

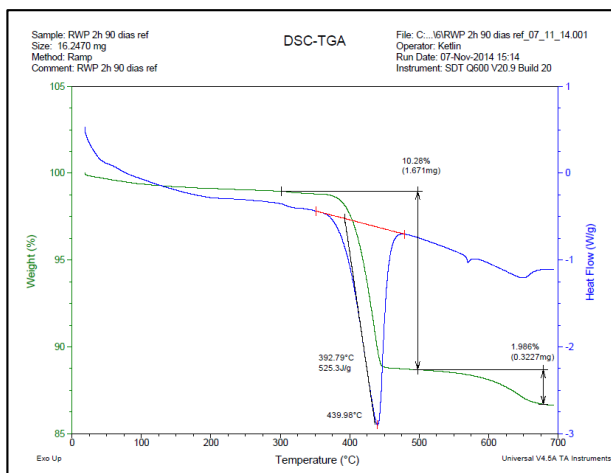


Figura 48 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (25% RWP).

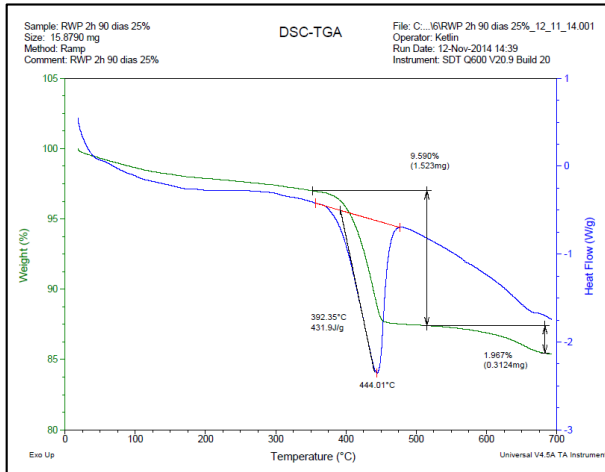


Figura 49 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (50% RWP).

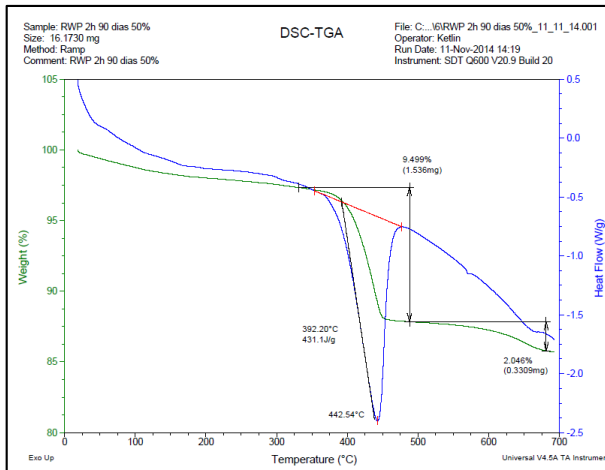


Figura 50 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (75%RWP).

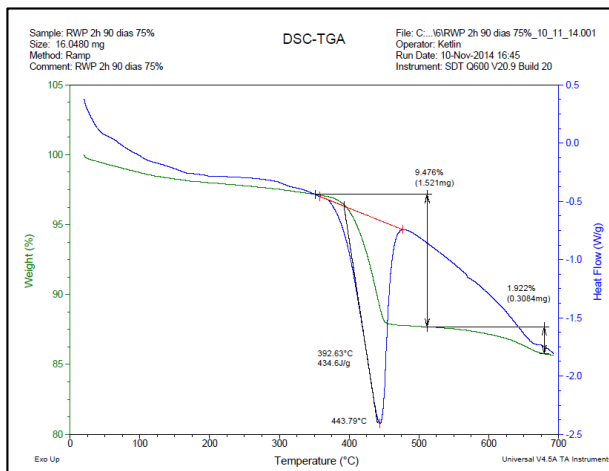
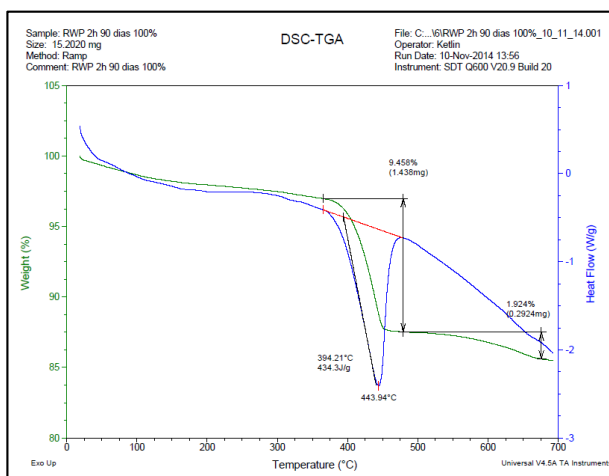


Figura 51 - DSC/TGA do resíduo RWP moído em 2 horas idade de 90 dias (100%RWP).



**ANEXO E – (MEV) para as pastas de hidróxido de cálcio contendo as misturas de RWP moído com tempo em 1 hora e 2 horas.**

---

Figura 52 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 1 hora para idade de 28 dias.

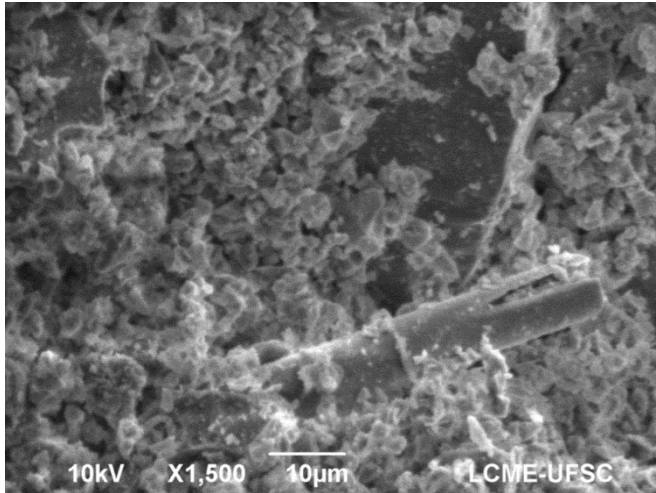


Figura 53 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 1 hora para idade de 28 dias.

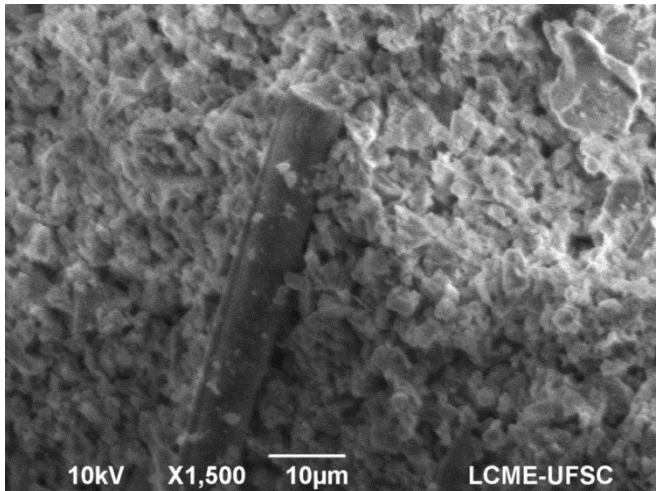


Figura 54 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 1 hora para idade de 28 dias.

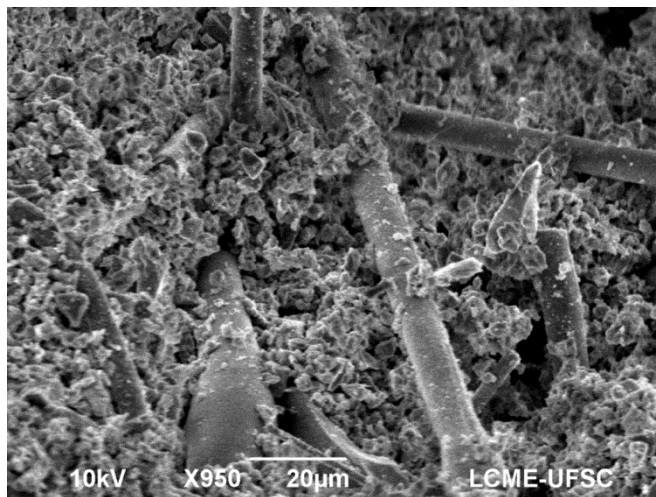


Figura 55 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 1 hora para idade de 28 dias.

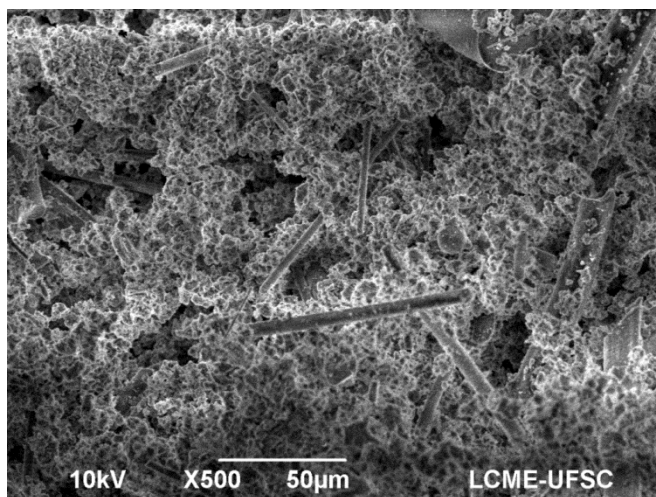


Figura 56 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 1 hora para idade de 90 dias.

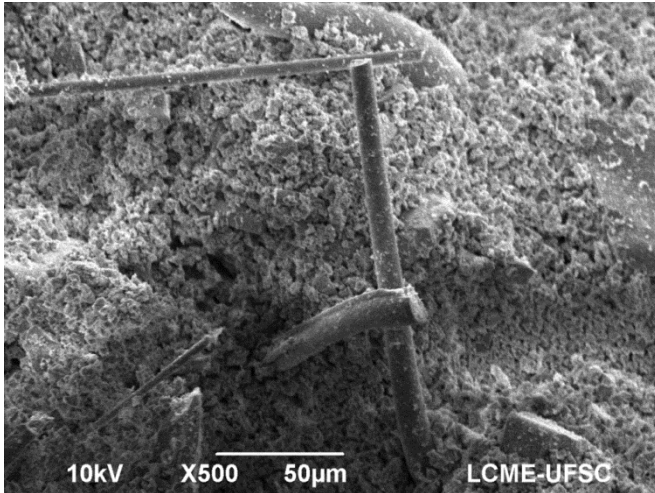


Figura 57 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 1 hora para idade de 90 dias.

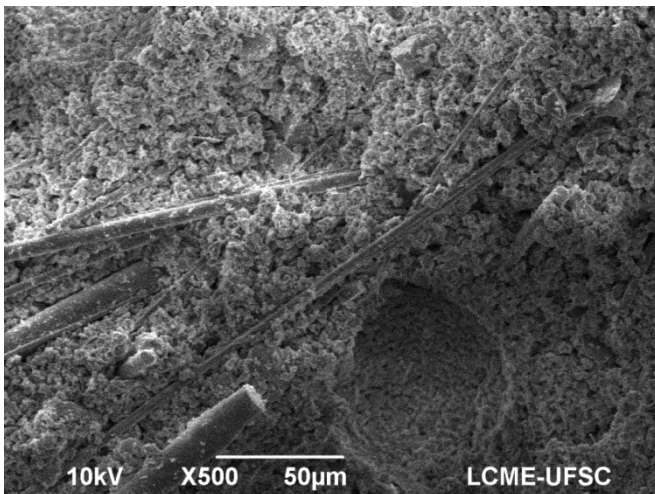


Figura 58 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 1 hora para idade de 90 dias.

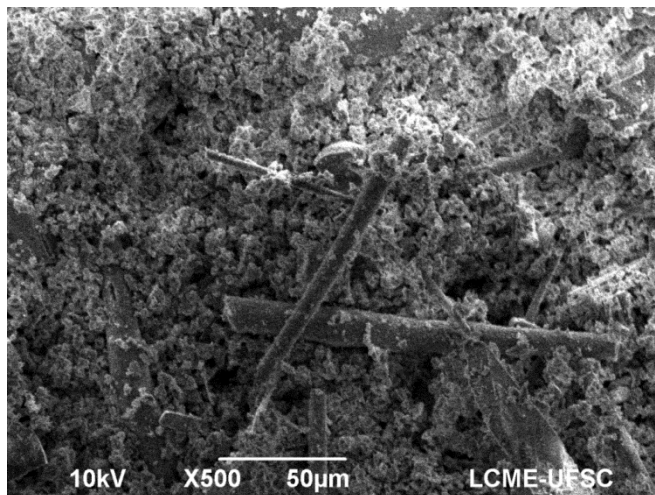


Figura 59 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 1 hora para idade de 90 dias.

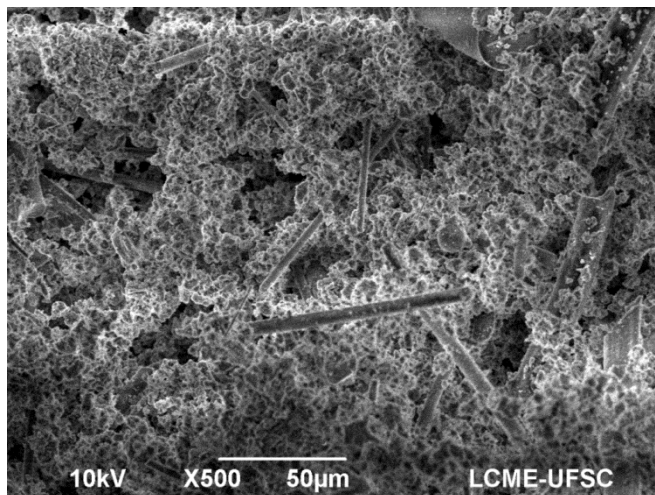


Figura 60 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 2 hora para idade de 28 dias.

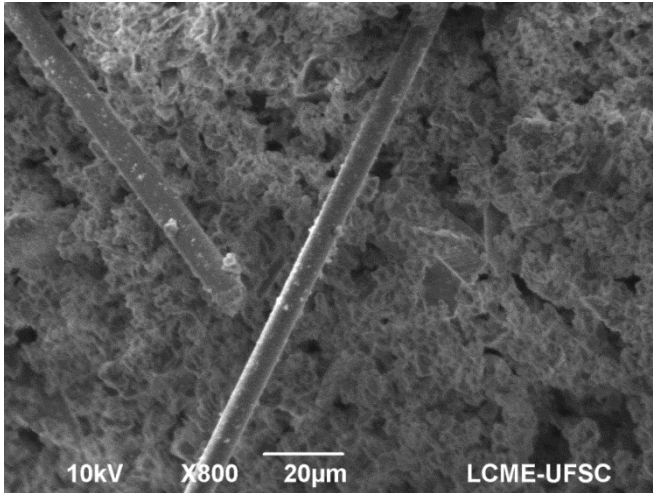


Figura 61 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 2 hora para idade de 28 dias.

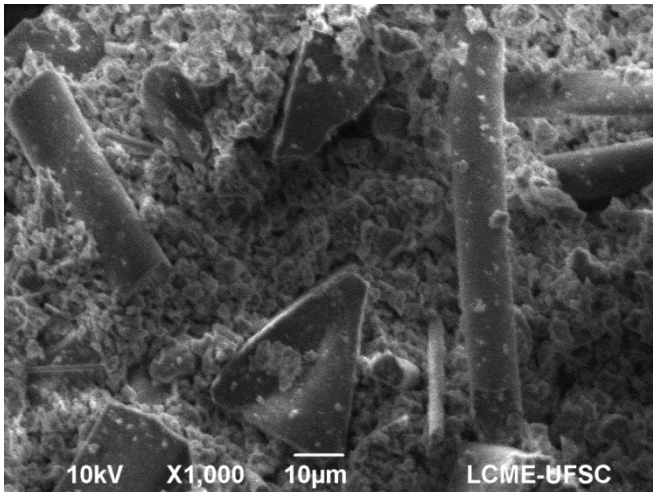




Figura 62 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 hora para idade de 28 dias.

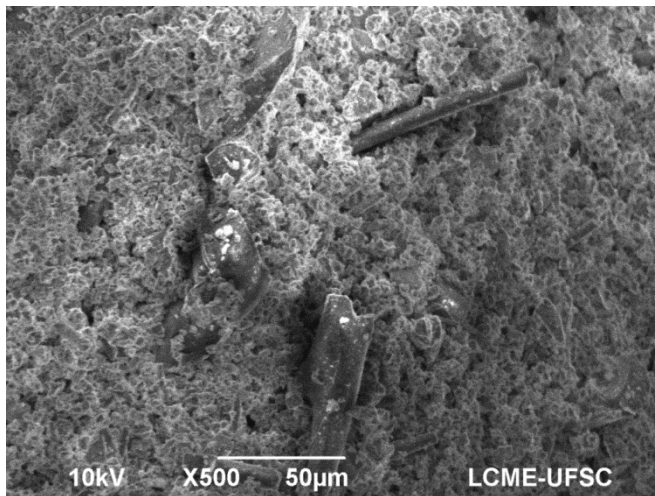


Figura 63 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 hora para idade de 28 dias.

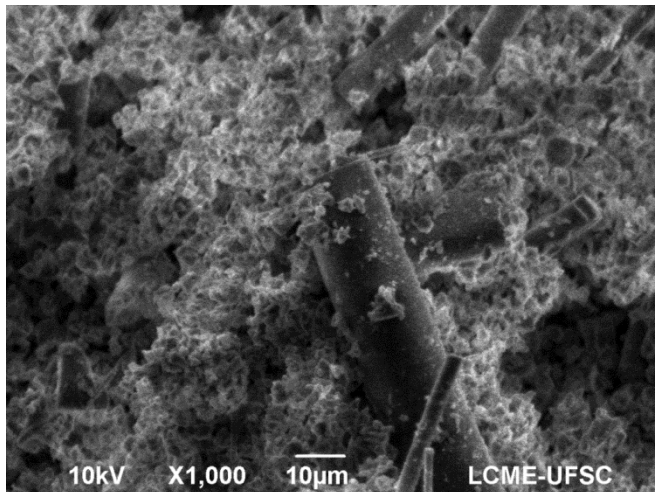


Figura 64 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (25%) moído em 2 hora para idade de 90 dias.

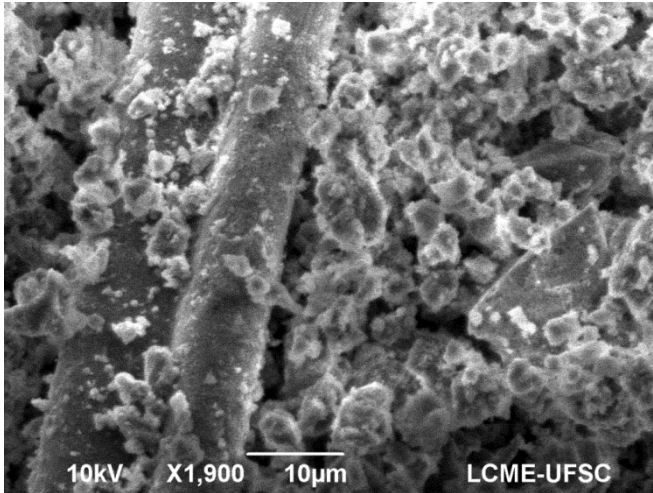


Figura 65 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (50%) moído em 2 hora para idade de 90 dias.

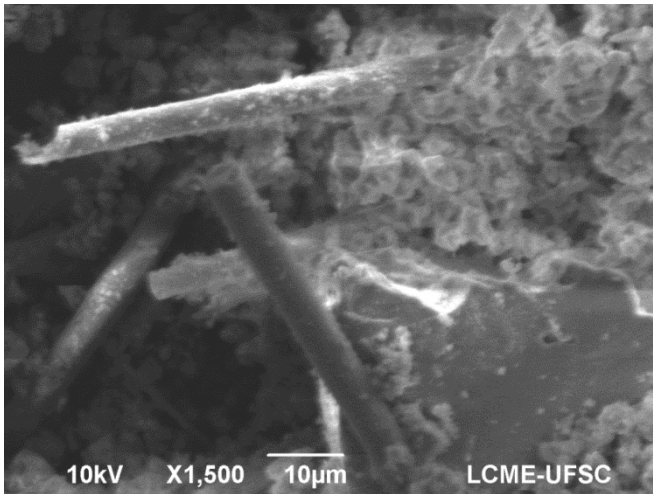


Figura 66 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (75%) moído em 2 hora para idade de 90 dias.

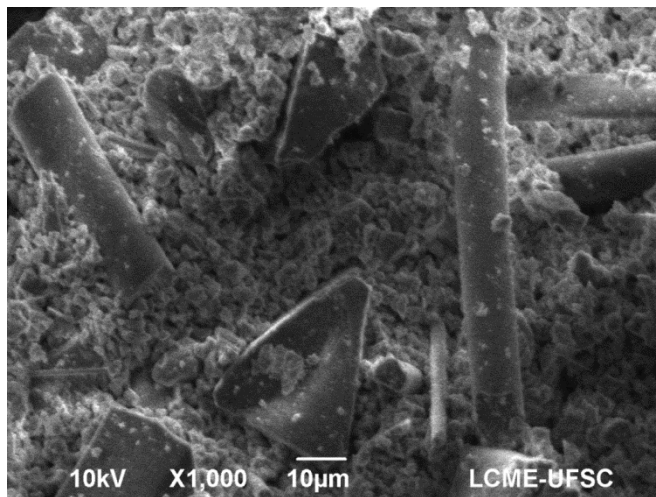
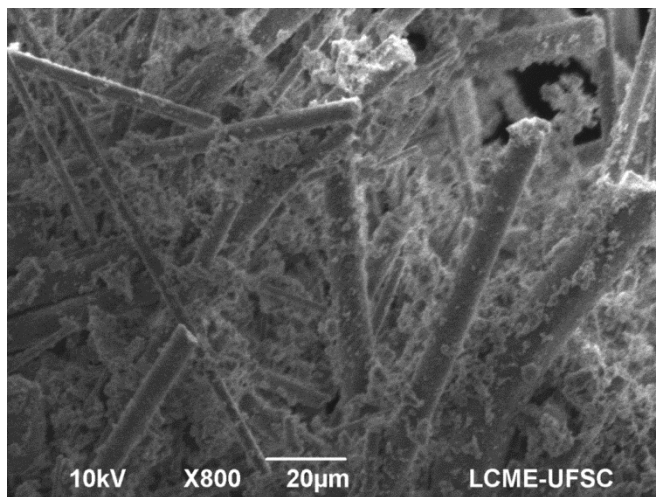


Figura 67 - MEV para pasta de hidróxido de cálcio do RWP (100%) moído em 2 hora para idade de 90 dias.



## ANEXO F – Propriedades do cimento CP II-F-32

ITAMBÉ

## RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

TIPO / CLASSE: CP II-F-32

PERÍODO : dez/13  
missão : 30/01/14

Data	Químicos										Físicos										
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda Fogo	CaO Livre	Reaid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	h : min	h : min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
02	4,47	18,11	3,01	61,30	5,20	2,66	4,86	1,21	1,01	0,73	0,50	03:20	04:00	27,0	3.390	2,40	10,90	16,0	32,8	37,2	43,0
04	4,59	18,12	3,02	60,77	5,18	2,65	4,68	0,95	1,37	0,75	0,00	03:20	04:00	27,0	3.460	3,00	13,50	16,1	31,1	37,8	42,3
06	4,35	17,71	2,95	61,19	4,76	2,83	4,62	0,87	1,19	0,71	0,50	03:20	04:00	27,2	3.380	3,00	14,00	14,9	31,2	35,9	42,4
10	4,34	18,59	2,89	61,37	4,84	2,84	4,76	1,18	1,21	0,72	0,50	03:20	04:00	27,1	3.270	2,50	12,90	14,3	29,4	34,6	42,2
12	4,45	18,84	2,92	60,52	4,63	2,66	4,69	1,07	1,58	0,71	0,50	03:15	04:00	26,3	3.300	2,90	12,70	16,6	30,1	34,3	42,8
16	4,33	18,52	2,89	60,68	5,07	2,74	4,84	1,29	1,53	0,71	0,00	03:15	04:00	26,5	3.390	2,20	11,80	15,4	31,4	37,0	42,7
18	4,33	18,46	2,92	60,73	5,17	2,65	4,62	0,95	1,00	0,70	0,00	03:20	04:00	26,3	3.380	2,10	12,50	17,0	31,1	37,2	43,2
20	4,66	18,65	2,91	60,10	4,95	2,62	4,81	0,87	2,20	0,72	0,50	03:20	04:00	26,4	3.290	2,60	13,50	15,1	29,8	36,4	42,8
24	4,26	18,31	2,89	61,56	4,94	2,69	4,71	0,84	1,15	0,70	0,50	03:05	03:45	26,7	3.240	2,50	12,90	15,7	30,3	34,6	41,4
27	4,23	18,12	2,87	61,17	4,81	2,63	4,74	0,95	1,23	0,68	0,50	03:10	04:00	26,6	3.230	2,50	13,90	15,5	29,2	34,5	41,1
Média	4,40	18,34	2,93	60,94	4,96	2,70	4,73	1,02	1,35	0,71	0,35	03:17	03:59	26,7	3.333	2,57	12,85	15,6	30,6	35,9	42,4
Sd	0,14	0,33	0,05	0,45	0,20	0,08	0,08	0,16	0,36	0,02	0,24	00:05	00:05	0,3	76,89	0,31	0,96	0,8	1,1	1,4	0,7
Min	4,23	17,71	2,87	60,10	4,63	2,62	4,62	0,84	1,00	0,68	0,00	03:05	03:45	26,3	3.230	2,10	10,90	14,3	29,2	34,3	41,1
Max	4,66	18,84	3,02	61,56	5,20	2,84	4,86	1,29	2,20	0,75	0,50	03:20	04:00	27,2	3.460	3,00	14,00	17,0	32,8	37,8	43,2

Obs.: A Norma da ABNT não prevê a determinação da Resistência à Compressão a um dia para o CP II-F-32.  
A massa específica média do CP II-F-32 ITAMBÉ é 3,11 g/cm<sup>3</sup> (NBR NM 23).  
As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.

carimboassinatura

