

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PROCESSOS E TECNOLOGIAS**

VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS VITRIFICADOS DE  
ISOLADORES ELÉTRICOS CERÂMICOS NO PROCESSO DE OBTENÇÃO  
DE REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS PRODUZIDOS A PARTIR DE  
CONCRETO SÍLICO-ALUMINOSO

**Lucas Bonan Gomes**

**Lucas Bonan Gomes**

VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS VITRIFICADOS DE  
ISOLADORES ELÉTRICOS CERÂMICOS NO PROCESSO DE OBTENÇÃO  
DE REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS PRODUZIDOS A PARTIR DE  
CONCRETO SÍLICO-ALUMINOSO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Processos e Tecnologias.

Área de concentração: Processos Físico-Químicos.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Venina dos Santos.

Co-orientadora: Dr<sup>a</sup>. Rosmary Nichele Brandalise.

Agosto, 2012.

VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS VITRIFICADOS DE  
ISOLADORES ELÉTRICOS CERÂMICOS NO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE  
REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS PRODUZIDOS A PARTIR DE CONCRETO  
SÍLICO-ALUMINOSO

**Lucas Bonan Gomes**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos e Tecnologias, Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos e Produtos Industriais.

Caxias do Sul, 30 de agosto de 2012.

Banca Examinadora:

Dr.<sup>a</sup> Venina dosSantos (orientadora)  
Universidade de Caxias do Sul

Dr.<sup>a</sup> Rosmary Nichele Brandalise (co-orientadora)  
Universidade de Caxias do Sul

Dr. Calos Pérez Bergmann  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr.<sup>a</sup> Maria Fernanda de Oliveira Nunes  
Universidade de Caxias do Sul

Dr.<sup>a</sup> Lisete Cristine Scienza  
Universidade de Caxias do Sul

Dr. Frank Patrick Missell (suplente)  
Universidade de Caxias do Sul

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
Biblioteca Central

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
UCS - BICE - Processamento Técnico

G633v Gomes, Lucas Bonan

Viabilidade da incorporação de resíduos vitrificados de isoladores elétricos cerâmicos no processo de obtenção de revestimentos refratários produzidos a partir de concreto sílico-aluminoso / Lucas Bonan Gomes. 2012.

206 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de processos e Tecnologias, 2012.

“Orientação: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Venina dos Santos, Co-orientação: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rosmary Nichele Brandalise”

1. Materiais - Testes. 2. Reaproveitamento. 3. Materiais cerâmicos – Materiais isolantes. I. Título.

CDU : 620

Índice para catálogo sistemático:

- |  |             |
|--|-------------|
| 1. Materiais – Testes                        | 620         |
| 2. Reaproveitamento                          | 658.567.3   |
| 3. Materiais cerâmicos – Materiais isolantes | 621.315.612 |

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária  
Kátia Stefani – CRB 10/1683

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Gilda e Rogério, pelo apoio, incentivo e amor incondicional em todos os momentos da minha vida e por propiciarem apenas boas oportunidades ao longo desta trajetória.

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Venina dos Santos, pelo apoio indispensável e incansável ao longo destes meses de trabalho, pela experiência, acompanhamento, incentivo, amizade e carinho, me auxiliando sempre na busca dos melhores caminhos a serem trilhados e por proporcionar vivências e oportunidades às quais serei sempre grato.

Um agradecimento muito especial ao Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann, indispensável e imprescindível na realização deste trabalho, pelo acolhimento, experiência e excelência de seu trabalho, seus conselhos e dicas no intuito de buscar os melhores caminhos e por me oportunizar um grande crescimento profissional.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosmary Nichele Brandalise, pela co-orientação e acompanhamento ao longo deste trabalho.

À Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e à Rio Grande Energia (RGE), pelo financiamento do Projeto, concessão da bolsa de mestrado e pelo fornecimento de toda a matéria-prima necessária para a execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr.-Ing. José Luiz Piazza pela disponibilização do Laboratório de Areias de Fundação, sem o qual este trabalho não haveria como ser realizado. Meus sinceros e especiais agradecimentos.

À Dr<sup>a</sup>. Andrea Pokorny Chiappin pela amizade, acompanhamento, dicas e conselhos, fundamentais para a concretização deste trabalho. Meus especiais agradecimentos.

Aos bolsistas de iniciação científica Maicon Lamb Flores (UCS), Maick Meneguzzo Prado (UCS), Michele Savaris (UCS), Álvaro da Rosa Cunha (UFRGS), Franco Fragomeni Tagliari (UFRGS) e Raul Bica Carlos (UFRGS).

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) pela disponibilização de toda a infraestrutura necessária, sem a qual este trabalho não teria sido realizado.

A toda a equipe do LACER, mestrandos e doutorandos, que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho, em especial à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Annelise Kopp Alves.

À Universidade de Caxias do Sul (UCS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC).

Aos professores do PGEPROTEC, pelas importantes contribuições teóricas ao longo das disciplinas cursadas.

Ao Prof. M.Sc. Daniel Tregnano Pagnussat, pelas importantes contribuições. Ao Laboratório de Tecnologias Construtivas (LABTEC) da UCS e aos técnicos Cesar Augusto Herkert Barbosa, Cleicimara Cozen Colvara e Marcelo Saccol Meira.

À Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Mayta Fernanda Pasa e ao Laboratório de Escultura da UCS.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lisete Cristine Scienza, pelos aperfeiçoamentos sugeridos no momento da minha Qualificação de Mestrado.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Fernanda de Oliveira Nunes pelas importantes contribuições ao longo da realização deste trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Camila Baldasso, pelas contribuições neste trabalho.

Ao Laboratório de Química (LQUI) da UCS em especial às técnicas Roselaine Cristina Mignoni e Sonia Blankenburg.

Ao Laboratório de Engenharia Química (LENQ) da UCS em especial à técnica Julcimára Santos Rossi.

Ao Laboratório de Pesquisa em Química de Materiais (LPQM) da UCS, em especial à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mara Zeni Andrade.

À Oficina de Física da UCS e ao técnico Júlio César de Alves de Souza.

Aos colegas de mestrado Francine Isotton e Isaac Nunes, pela amizade e acompanhamento em tantos momentos importantes ao longo desta trajetória.

Ao Felipe Bialeski Peng pelo acompanhamento, suporte e auxílio durante a realização deste trabalho, especialmente com as ferramentas de cálculo numérico.

Às funcionárias Iara Negrini, Judite Oliveira Pereira e Marilene de Fátima da Silva da Conceição pela disponibilidade e gentileza nos tantos dias de convivência.

A todos os meus queridos amigos, pelo apoio, incentivo e compreensão.

A todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para a conclusão de mais uma etapa da minha vida acadêmica.

*Só o desejo inquieto, que não passa,  
Faz o encanto da coisa desejada...  
E terminamos desdenhando a caça  
Pela doida aventura da caçada.*

Da Eterna Procura – Mario Quintana

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XXVII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Objetivos Específicos .....</b>	<b>31</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Materiais Refratários .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Propriedade dos Sólidos Particulados .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3 Isoladores Elétricos Cerâmicos .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1 Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC).....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2 Utilização de Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC) como         Matéria-Prima .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4 Cominuição de Sólidos .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5 Separação de Partículas Sólidas – Peneiramento .....</b>	<b>46</b>
<b>3.6 Mistura de Sólidos .....</b>	<b>47</b>
<b>3.7 Secagem – Transferência Simultânea de Calor e Massa.....</b>	<b>49</b>
<b>3.8 Tratamento Térmico - Queima (Sinterização).....</b>	<b>51</b>



3.9 Fenômenos de Transferência de Calor – Condutividade Térmica .....	52
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
4.1 Materiais.....	56
4.2 Métodos.....	56
4.2.1 Cominuição dos Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC) .....	57
4.2.2 Determinação de Tamanho de Partícula – Análise Granulométrica.....	59
4.2.3 Caracterização Química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) .....	59
4.2.4 Preparação dos Corpos de Prova das Formulações dos Grupos A, B, C e D ..	60
4.2.5 Queima dos Corpos de Prova das Formulações dos Grupos B e D .....	62
4.2.6 Determinação da Densidade Aparente no Estado Endurecido .....	63
4.2.7 Determinação de Absorção de Água, Volume de Poros Abertos e Porosidade Aparente .....	64
4.2.8 Determinação da Resistência à Tração na Flexão e à Compressão a Temperatura Ambiente (23 °C).....	66
4.2.9 Resistência à Compressão Diametral sob Temperatura Elevada (500 °C) .....	67
4.2.10 Microscopia Óptica (MO) .....	68
4.2.11 Condutividade Térmica .....	68
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>72</b>
5.1 Propriedades Químicas .....	72
5.1.1 Análises da Composição Química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) .....	72
5.1.1.1 Resíduos dos Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC).....	72
5.1.1.2 Concreto Refratário Sílico-Aluminoso.....	73
5.2 Propriedades Físicas.....	75
5.2.1 Distribuição Granulométrica Diferencial (DGD) .....	75
5.2.1.1 Resíduos de Isoladores Cerâmicos (RIC).....	75
5.2.1.2 Concreto Refratário Sílico-Aluminoso.....	75
5.2.1.3 Formulações dos Grupos A e B.....	75

5.2.1.4 Formulações dos Grupos C e D.....	76
<b>5.2.2 Análise do Tamanho de Partícula por Dispersão a Laser.....</b>	<b>79</b>
5.2.2.1 Análise do Tamanho de Partícula dos Resíduos de Isoladores Cerâmicos	
Passantes pela Peneira de 200 tyler mesh.....	79
<b>5.2.3 Densidade Aparente dos Corpos de Prova no Estado Endurecido.....</b>	<b>80</b>
5.2.3.1 Formulações dos Grupos A e B.....	80
5.2.3.2 Formulações dos Grupos C e D.....	82
<b>5.2.4 Porosidade Aparente, Volume de Poros Abertos e Absorção de Água .....</b>	<b>85</b>
5.2.4.1 Formulações dos Grupos A, B, C e D Sem Cura Úmida .....	85
5.2.4.2 Formulações dos Grupos A, B, C e D Submetidas a 28 dias de Cura Úmida..	85
<b>5.3 Propriedades Morfológicas.....</b>	<b>91</b>
<b>5.3.1 Microscopia Óptica (MO).....</b>	<b>91</b>
5.3.1.1 Formulações do Grupo A .....	91
5.3.1.2 Formulações do Grupo B.....	94
5.3.1.3 Formulações do Grupo C.....	96
5.3.1.4 Formulações do Grupo D .....	98
<b>5.4 Propriedades Mecânicas .....</b>	<b>101</b>
<b>5.4.1 Resistência à Tração na Flexão à Temperatura Ambiente (23 °C).....</b>	<b>101</b>
5.4.1.1 Formulações dos Grupos A e B.....	101
5.4.1.2 Formulações dos Grupos C e D.....	102
<b>5.4.2 Resistência à Compressão à Temperatura Ambiente (23 °C).....</b>	<b>104</b>
5.4.2.1 Formulações dos Grupos A e B.....	104
5.4.2.2 Formulações dos Grupos C e D.....	106
<b>5.4.3 Resistência à Compressão Diametral à Temperatura Elevada (500 °C).....</b>	<b>111</b>
5.4.3.1 Formulações dos Grupos A e B.....	111
5.4.3.2 Formulações dos Grupos C e D.....	113
<b>5.5 Propriedades Térmicas .....</b>	<b>117</b>
<b>5.5.1 Condutividade Térmica .....</b>	<b>117</b>
5.5.1.1 Formulações do Grupo A .....	117
5.5.1.2 Formulações do Grupo B.....	121
5.5.1.3 Formulações do Grupo C.....	123

5.5.1.4 Formulações do Grupo D .....	125
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>130</b>
<b>Quanto às Propriedades Químicas.....</b>	<b>130</b>
<b>Quanto às Propriedades Físicas .....</b>	<b>130</b>
<b>Quanto às Propriedades Morfológicas .....</b>	<b>131</b>
<b>Quanto às Propriedades Mecânicas.....</b>	<b>131</b>
<b>Quanto às Propriedades Térmicas .....</b>	<b>131</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO 1. Aspecto Macroscópico dos Agregados de RIC após Cominuição nas     Diferentes Faixas Granulométricas .....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO 2. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do     Grupo A.....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO 3. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do     Grupo B .....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO 4. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do     Grupo C.....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO 5. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do     Grupo D.....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO 6. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas.....</b>	<b>165</b>
<b>ANEXO 7. Condutividade Térmica em Função da Temperatura para as Formulações     dos Grupos A, B, C e D por Método de Cálculo Numérico .....</b>	<b>179</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Natureza química dos componentes principais dos materiais refratários (CANNIO e HANUSKOVA, 2008). .....	33
Tabela 2. Classificação dos concretos refratários de acordo com sua concentração de CaO (KRIETZ, 2004). .....	35
Tabela 3. Composição química dos cimentos de aluminato de cálcio (CAC) e do cimento <i>Portland</i> (MONTGOMERY, 2003). .....	36
Tabela 4. Classificação dos sólidos particulados de acordo com seu tamanho de partícula (GOMIDE, 1983). .....	38
Tabela 5. Valores típicos de resistividade, resistência dielétrica e fator de perda dos principais isoladores cerâmicos (VAN VLACK, 1973). .....	40
Tabela 6. Propriedades físicas do concreto refratário CASTIBAR-N. ....	56
Tabela 7. Nomenclatura e significado das formulações. ....	57
Tabela 8. Composição estequiométrica das formulações estudadas. ....	61
Tabela 9. Composição química por Espectrometria por Fluorescência de Raios X dos RIC (% mássica de óxidos). .....	72
Tabela 10. Composição química por Espectrometria por Fluorescência de Raios X do concreto refratário sílico-aluminoso (% mássica de óxidos). .....	73
Tabela 11. Composição química do concreto refratário sílico-aluminoso de acordo com as informações do fabricante (em óxidos). .....	74
Tabela 12. Valores representativos da análise granulométrica por dispersão a <i>laser</i> dos RIC passantes pela peneira de 200 <i>tyler mesh</i> . .....	80
Tabela 13. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A0 com sem Cura Úmida. ....	149

<b>Tabela 14. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A10 sem Cura Úmida.....</b>	<b>149</b>
<b>Tabela 15. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A20 sem Cura Úmida.....</b>	<b>149</b>
<b>Tabela 16. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A30 sem Cura Úmida.....</b>	<b>150</b>
<b>Tabela 17. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A40 sem Cura Úmida.....</b>	<b>150</b>
<b>Tabela 18. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A50 sem Cura Úmida.....</b>	<b>150</b>
<b>Tabela 19. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A60 sem Cura Úmida.....</b>	<b>150</b>
<b>Tabela 20. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A0 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>151</b>
<b>Tabela 21. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A10 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>151</b>
<b>Tabela 22. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A20 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>151</b>
<b>Tabela 23. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A30 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>151</b>
<b>Tabela 24. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A40 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>152</b>
<b>Tabela 25. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A50 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>152</b>

<b>Tabela 26. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A60 com 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>152</b>
<b>Tabela 27. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B0 sem Cura Úmida.....</b>	<b>153</b>
<b>Tabela 28. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B10 sem Cura Úmida.....</b>	<b>153</b>
<b>Tabela 29. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B20 sem Cura Úmida.....</b>	<b>153</b>
<b>Tabela 30. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B30 sem Cura Úmida.....</b>	<b>154</b>
<b>Tabela 31. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B40 sem Cura Úmida.....</b>	<b>154</b>
<b>Tabela 32. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B50 sem Cura Úmida.....</b>	<b>154</b>
<b>Tabela 33. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B60 sem Cura Úmida.....</b>	<b>154</b>
<b>Tabela 34. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B0 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>155</b>
<b>Tabela 35. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B10 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>155</b>
<b>Tabela 36. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B20 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>155</b>
<b>Tabela 37. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B30 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>155</b>

<b>Tabela 38. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B40 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>156</b>
<b>Tabela 39. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B50 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>156</b>
<b>Tabela 40. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B60 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>156</b>
<b>Tabela 41. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C0 sem Cura Úmida.....</b>	<b>157</b>
<b>Tabela 42. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C10 sem Cura Úmida.....</b>	<b>157</b>
<b>Tabela 43. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C20 sem Cura Úmida.....</b>	<b>157</b>
<b>Tabela 44. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C30 sem Cura Úmida.....</b>	<b>158</b>
<b>Tabela 45. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C40 sem Cura Úmida.....</b>	<b>158</b>
<b>Tabela 46. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C50 sem Cura Úmida.....</b>	<b>158</b>
<b>Tabela 47. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C60 sem Cura Úmida.....</b>	<b>158</b>
<b>Tabela 48. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C0 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>159</b>
<b>Tabela 49. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C10 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>159</b>

<b>Tabela 50. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C20 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>159</b>
<b>Tabela 51. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C30 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>159</b>
<b>Tabela 52. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C40 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>160</b>
<b>Tabela 53. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C50 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>160</b>
<b>Tabela 54. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C60 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>160</b>
<b>Tabela 55. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D0 sem Cura Úmida.....</b>	<b>161</b>
<b>Tabela 56. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D10 sem Cura Úmida.....</b>	<b>161</b>
<b>Tabela 57. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D20 sem Cura Úmida.....</b>	<b>161</b>
<b>Tabela 58. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D30 sem Cura Úmida.....</b>	<b>162</b>
<b>Tabela 59. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D40 sem Cura Úmida.....</b>	<b>162</b>
<b>Tabela 60. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D50 sem Cura Úmida.....</b>	<b>162</b>
<b>Tabela 61. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D60 sem Cura Úmida.....</b>	<b>162</b>



<b>Tabela 62. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D0 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>163</b>
<b>Tabela 63. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D10 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>163</b>
<b>Tabela 64. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D20 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>163</b>
<b>Tabela 65. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D30 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>163</b>
<b>Tabela 66. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D40 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>164</b>
<b>Tabela 67. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D50 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>164</b>
<b>Tabela 68. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D60 após 28 dias de Cura Úmida.....</b>	<b>164</b>
<b>Tabela 69. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas dos Resíduos de Isoladores Cerâmicos - RIC.....</b>	<b>165</b>
<b>Tabela 70. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas do Concreto Refratário Sílico-Aluminoso comercial, também atribuídas às Formulações A0, B0, C0 e D0. ....</b>	<b>166</b>
<b>Tabela 71. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A10 e B10. ....</b>	<b>167</b>
<b>Tabela 72. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A20 e B20. ....</b>	<b>168</b>
<b>Tabela 73. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A30 e B30. ....</b>	<b>169</b>

<b>Tabela 74. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A40 e B40. ....</b>	<b>170</b>
<b>Tabela 75. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A50 e B50. ....</b>	<b>171</b>
<b>Tabela 76. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A60 e B60. ....</b>	<b>172</b>
<b>Tabela 77. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C10 e D10. ....</b>	<b>173</b>
<b>Tabela 78. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C20 e D20. ....</b>	<b>174</b>
<b>Tabela 79. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C30 e D30. ....</b>	<b>175</b>
<b>Tabela 80. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C40 e D40. ....</b>	<b>176</b>
<b>Tabela 81. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C50 e D50. ....</b>	<b>177</b>
<b>Tabela 82. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C60 e D60. ....</b>	<b>178</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equação química balanceada da hidratação do CAC (KRIETZ, 2004).....	36
Figura 2. Esquema da polarização eletrônica que ocorre nos dos materiais dielétricos (RICHERSON, 2006). .....	39
Figura 3. Triângulo da composição da porcelana de acordo com suas composições (MAMEDE FILHO, 1994).....	41
Figura 4. Gabiões para barreiras de contenção fabricados com RIC (FERREIRA <i>et al.</i> , 2010).....	45
Figura 5. Operação básica de peneiramento industrial sendo (A) sólido alimentado, (F) partículas finas que passam pelas aberturas das malhas, (G) as partículas grossas, retidas nas malhas e (D <sub>C</sub> ) o diâmetro de corte (GOMIDE, 1983). .....	47
Figura 6. Curva de secagem típica em condições constantes de secagem e teor de umidade em função do tempo sendo, (A-B) o regime não permanente, (B-C) o regime permanente à taxa constante, (C) o mínimo teor de umidade no sólido, (CD) taxa decrescente e (D) a ausência de área saturada no líquido, na superfície (FOUST <i>et al.</i> , 1982).....	50
Figura 7. Formação do contorno de grão típica de um material cerâmico, sendo (a) partículas antes da queima, com duas superfícies adjacentes, (b) contorno observado em grãos após a queima e (c) difusão dos átomos nos pontos de contato, para aumentar a área de contato (VAN VLACK, 1998). .....	52
Figura 8. Dependência da condutividade térmica em relação à temperatura para vários materiais cerâmicos (CALLISTER, 2008). .....	55
Figura 9. Resíduos de isoladores elétricos cerâmicos (a) quebrados e (b) intactos. ....	58

Figura 10. Resíduos dos isoladores cerâmicos após prensagem uniaxial de 40 toneladas. .....	58
Figura 11. Corpos de prova (a) antes e (b) após o processo de queima.....	63
Figura 12. Acessório construído para a medição das massas ( <i>W</i> ).....	64
Figura 13. Disposição do corpo de prova cilíndrico de uma das formulações no equipamento antes (a) e após (b) a realização do ensaio.....	68
Figura 14. (a) Esquematização do aparato experimental adotado para medição da condutividade térmica (POKORNY, 2006) e (b) fotografia de uma das amostras no aparato com os termopares acoplados.....	69
Figura 15. Distribuição granulométrica diferencial dos Resíduos dos Isoladores Elétricos Cerâmicos.....	75
Figura 16. Distribuição granulométrica diferencial do concreto refratário sílico-aluminoso, também atribuída às formulações controle, A0, B0, C0 e D0.....	75
Figura 17. DGD das formulações dos Grupos A e B, sendo (a) A10-B10, (b) A20-B20, (c) A30-B30, (d) A40-B40, (e), A50-B50 e (f) A60-B60. ....	76
Figura 18. DGD das formulações dos Grupos C e D, sendo (a) C10-D10, (b) C20-D20, (c) C30-D30, (d) C40-D40, (e) C50-D50 e (f) C60-D60. ....	77
Figura 19. Distribuição granulométrica por dispersão a <i>laser</i> dos RIC.....	79
Figura 20. Densidade aparente das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida.....	81
Figura 21. Densidade aparente das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida. ....	81
Figura 22. Densidade aparente das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida.....	82
Figura 23. Densidade aparente das formulações dos Grupos C e D submetidos a 28 dias de cura úmida. ....	82

<b>Figura 24. Porosidade aparente das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 25. Porosidade aparente das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 26. Volume dos poros abertos das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 27. Volume dos poros abertos das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 28. Absorção de água das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 29. Absorção de água das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 30. Micrografias ópticas das formulações do Grupo A sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 31. Micrografias ópticas das formulações do Grupo A submetidas 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 32. Micrografias ópticas das formulações do Grupo B sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 33. Micrografias ópticas das formulações do Grupo B submetidas a 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ...</b>	<b>95</b>
<b>Figura 34. Micrografias ópticas das formulações do Grupo C sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 35. Micrografias ópticas das formulações do Grupo C submetidas a 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ...</b>	<b>97</b>

<b>Figura 36. Micrografias ópticas das formulações do Grupo D sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 37. Micrografias ópticas das formulações do Grupo D submetidas a 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal. ...</b>	<b>99</b>
<b>Figura 38. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 39. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 40. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 41. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 42. Resistência à compressão das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 43. Resistência à compressão das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 44. Resistência à compressão das formulações dos Grupos C e D com sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 45. Resistência à compressão das formulações dos Grupos B e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado. ....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 46. Esquema de propagação de trincas para materiais refratários, sendo (A) as pontes de fluxo dos silicatos, (B) as pontes de agregados, (C) as microtrincas e (D) o fluxo de propagação das trincas (figura adaptada) (DUNCAN e BRADT, 2003). ....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 47. Resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida a 23 e 500 °C. ....</b>	<b>112</b>

<b>Figura 48. Resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida a 23 e 500 °C. ....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 49. Resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida a 23 e 500 °C.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 50. Resistência à compressão das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida a 23 e 500 °C.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 51. Condutividade térmica das formulações A0, A10, A30 e A60 sem cura úmida em função da temperatura.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 52. Condutividade térmica das formulações A0, A10, A30 e A60 submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura. ....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 53. Condutividade térmica das formulações B0, B10, B30 e B60 sem cura úmida em função do tempo.....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 54. Condutividade térmica das formulações B0, B10, B30 e B60 submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura. ....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 55. Condutividade térmica das formulações C0, C10, C30 e C60 sem cura úmida em função da temperatura.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 56. Condutividade térmica das formulações C0, C10, C30 e C60 submetidas a 28 dias de cura úmida.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 57. Condutividade térmica das formulações D0, D10, D30 e D60 sem cura úmida em função da temperatura.....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 58. Condutividade térmica das formulações D0, D10, D30 e D60 submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura. ....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 59. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 4 tyler mesh. ....</b>	<b>143</b>

<b>Figura 60. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 6 tyler mesh.....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 61. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 9 tyler mesh.....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 62. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 10 tyler mesh.....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 63. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 16 tyler mesh.....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 64. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 28 tyler mesh.....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 65. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 48 tyler mesh.....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 66. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 60 tyler mesh.....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 67. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 65 tyler mesh.....</b>	<b>147</b>
<b>Figura 68. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 100 tyler mesh.....</b>	<b>147</b>
<b>Figura 69. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 200 tyler mesh.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 70. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC passantes na peneira de 200 tyler mesh.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 71. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações A0/C0 sem Cura Úmida.....</b>	<b>179</b>



<b>Figura 72. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações A0/C0 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>180</b>
<b>Figura 73. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A10 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>181</b>
<b>Figura 74. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A10 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>182</b>
<b>Figura 75. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A30 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>183</b>
<b>Figura 76. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A30 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>184</b>
<b>Figura 77. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A60 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 78. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A60 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 79. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações B0/D0 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 80. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações B0/D0 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>188</b>
<b>Figura 81. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B10 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>189</b>
<b>Figura 82. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B10 com 28 dia de Cura Úmida. ....</b>	<b>190</b>
<b>Figura 83. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B30 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>191</b>

<b>Figura 84. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B30 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>192</b>
<b>Figura 85. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B60 sem Cura Úmida.....</b>	<b>193</b>
<b>Figura 86. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B60 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>194</b>
<b>Figura 87. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C10 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>195</b>
<b>Figura 88. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C10 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>196</b>
<b>Figura 89. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C30 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>197</b>
<b>Figura 90. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C30 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>198</b>
<b>Figura 91. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C60 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>199</b>
<b>Figura 92. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C60 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>200</b>
<b>Figura 93. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D10 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>201</b>
<b>Figura 94. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D10 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>202</b>
<b>Figura 95. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D30 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>203</b>

<b>Figura 96. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D30 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>204</b>
<b>Figura 97. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D60 sem Cura Úmida. ....</b>	<b>205</b>
<b>Figura 98. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D60 com 28 dias de Cura Úmida. ....</b>	<b>206</b>

## RESUMO

Com a aprovação da Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos gerados em território brasileiro devem ser reduzidos, tratados e reutilizados dentro do conceito de desenvolvimento sustentável. Os isoladores elétricos cerâmicos, após sua vida útil, perdem suas funções isoladoras, sendo necessária sua substituição. O descarte anual, pelas concessionárias energéticas brasileiras, atinge cerca de 30.000 toneladas. Neste aspecto, a proposição de um destino ambientalmente adequado para os mesmos mostra-se uma importante área de estudo. Neste trabalho, foi proposta a verificação da viabilidade técnica da incorporação de resíduos de isoladores elétricos cerâmicos em concreto refratário sílico-aluminoso, na produção de revestimentos refratários. Os resíduos cerâmicos foram cominuídos, assim como realizadas formulações com diferentes granulometrias sendo os efeitos da operação de queima e da cura úmida avaliados. Foram caracterizadas as propriedades químicas das matérias-primas e determinadas às propriedades físicas (densidade aparente, volume dos poros abertos e absorção de água), mecânicas (resistência à tração na flexão e à compressão à temperatura ambiente e resistência à compressão diametral à temperatura elevada), térmicas (condutividade térmica em diferentes temperaturas) e morfológicas (por microscopia óptica). Os resultados obtidos não indicaram a utilização dos revestimentos refratários produzidos para aplicações estruturais, uma vez que, com aumento da incorporação de resíduo foi observada uma considerável diminuição das propriedades mecânicas do material. Foram observadas pelas micrografias ópticas, que a forma, tamanho e distribuição dos agregados de resíduo na matriz foram responsáveis pela fratura frágil das formulações. No entanto, a utilização dos revestimentos produzidos mostrou-se promissora em aplicações em que o isolamento térmico seja requerido.

**Palavras-chave:** resíduos de isoladores elétricos cerâmicos, concreto refratário sílico aluminoso, materiais alternativos, reciclagem.

## ABSTRACT

With the approval of the 12.305/2010 law establishing the National Policy on Solid Waste (NPSW), all waste generated in Brazilian territory should be reduced, treated and reused within the concept of sustainable development. Electrical ceramic insulators, after its life cycle, lose their insulating functions, being necessary its replacement and statistics shows its disposal by the Brazilian energy concessionaires up to 30.000 tons every year. In this aspect, the proposal of an environmental more suitable destination is shown as an important field of study. In this work, it was proposed the technical evaluation of the incorporation of electrical ceramic waste in silico-aluminous refractory concrete for the production of refractory coatings. The electrical ceramic waste was comminuted, as well as analyzed the use of different particle sizes and the effects of heat treatment and hydraulic cures. The chemical properties of raw materials were characterized and it was determined physical properties (bulk density, apparent porosity, open pore volume and water absorption), mechanical properties (tensile and compressive strength at room temperature and diametrical compressive strength at high temperature), thermal properties (thermal conductivity in different temperatures), and morphological properties (by optical microscopy). The results did not advise the use of the refractory coatings produced for structural applications, since, with an increase of the electrical ceramic waste in the refractory concrete it was observed a significant decrease on mechanical properties. By optical micrographs, it was noticed that the shape, size and waste aggregate distribution in the ceramic matrix were responsible for the brittle-fracture of the formulations. However, the use of the produced coatings showed to be promising in applications in which the thermal insulation is required.

**Key-words:** electrical ceramic waste, silico-aluminous refractory concrete, alternative materials, recycling.

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos são importantes pela ampla possibilidade de aplicações que perfazem o nosso cotidiano, desde a fabricação de utensílios decorativos até peças de engenharia, sendo sua utilização indispensável nas atividades realizadas no cenário em que se vive (ANDERSSON *et al.*, 2011).

A indústria cerâmica gera uma grande quantidade de resíduos a cada ano, sendo a maior parte destes descartados em aterros. A reutilização destes resíduos no processo de obtenção de outros artefatos possibilita minimizar o problema da geração de resíduos da indústria cerâmica e, ao mesmo tempo, leva a uma solução sustentável para a fabricação de artefatos que necessitam o uso de fontes não renováveis, como no caso dos agregados utilizados para a produção de concreto refratário (TORGAL e JALALI, 2010).

Aproximando-se do conceito de desenvolvimento sustentável, a indústria cerâmica carece de significativas transformações, tanto na redução de desperdício quanto na otimização de processos, visando uma melhor qualidade e durabilidade de seus produtos, sendo a reutilização de seus resíduos, ações e projetos voltados à sustentabilidade ambiental, exemplos de preocupações no campo da pesquisa (ANGULO, 2000).

Os isoladores elétricos cerâmicos são amplamente utilizados pelas concessionárias de energia de todo o país, estando presentes em subestações de energia e nos postes de condução da fiação elétrica. Após sua vida útil são enterrados, por serem classificados como resíduo inerte Classe II – B, segundo NBR 10.004-04 (ABNT, 2004), baseada no *Code of Federal Regulations (CRF) – Title 40 – Protection of Environmental – Part 260-265 – Hazardous Waste Management* (ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, 2000).

Estima-se que a produção de isoladores elétricos cerâmicos no interior de São Paulo seja de 35.000 toneladas/ano, com um descarte da ordem de 5 %, sendo que 75 % do total produzido é utilizado como material de substituição das instalações já existentes. Neste sentido, tem-se um descarte na ordem de 30.000 toneladas/ano de isoladores (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

Com a aprovação da Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos gerados em território brasileiro devem ser reduzidos, tratados e reutilizados dentro do conceito de desenvolvimento sustentável. Desta forma, a reutilização dos resíduos de isoladores cerâmicos mostra-se uma promissora fonte de matéria-prima à produção de novos artefatos cerâmicos.

## 1. INTRODUÇÃO

---

A reutilização dos resíduos de isoladores elétricos cerâmicos, infelizmente, não é fonte de extensas pesquisas atualmente, sendo que os trabalhos encontrados na literatura, em sua maioria, estão relacionados à fabricação de concreto com cimento tipo *Portland*, em substituição aos agregados de fontes não-renováveis.

Em face da questão, e na busca de melhores alternativas para a utilização deste resíduo, o presente estudo busca viabilizar, do ponto de vista tecnológico, a utilização de resíduos de isoladores elétricos cerâmicos gerados pela Rio Grande Energia – RGE (Grupo CPFL Energia) como matéria-prima para fabricação de revestimentos refratários, propondo um destino ambientalmente mais adequado para os mesmos, uma vez que estudos relacionados com a reutilização deste tipo de resíduo com materiais refratários não foram encontrados na literatura até o presente momento.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduos de isoladores elétricos cerâmicos (RIC), como matéria-prima para fabricação de revestimentos refratários.

### **2.1 Objetivos Específicos**

- Desenvolver uma metodologia de cominuição de resíduos de isoladores elétricos cerâmicos (RIC), para posterior incorporação em concreto refratário sílico-aluminoso, visando à obtenção de revestimentos refratários;
- Avaliar a influência da incorporação de diferentes percentuais de RIC em concreto refratário sílico-aluminoso nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas dos revestimentos produzidos;
- Avaliar a influência de diferentes granulometrias de RIC nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas dos revestimentos produzidos;
- Avaliar a influência do tratamento térmico (operação de queima) nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas dos revestimentos produzidos;
- Avaliar a influência do tempo de cura úmida nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas dos revestimentos produzidos.



### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Materiais Refratários

Os materiais cerâmicos ocupam um importante espaço entre os materiais utilizados pela engenharia. São classificados como materiais inorgânicos, não-metálicos, compostos de elementos metálicos e não-metálicos, para os quais as ligações interatômicas são de caráter iônico-covalentes. Suas propriedades desejadas são obtidas por meio de tratamento térmico a elevadas temperaturas (ANDERSSON *et al.*, 2011).

Os refratários são materiais cerâmicos caracterizados pela capacidade de suportar altas temperaturas sem fundir ou decompor e a de permanecerem não-reativos e inertes quando expostos a ambientes severos, além de proporcionar isolamento térmico. Precisam resistir à corrosão/erosão de sólidos, líquidos e gases, à difusão de gases e à abrasão mecânica em diferentes temperaturas. Entre suas aplicações mais comuns destacam-se o revestimento de fornos, lareiras e churrasqueiras, fôrmas para o refino de metais, indústria de vidros, tratamentos térmicos para materiais metálicos e geração de energia (BANERJEE, 2004); (GARCIA *et al.*, 2007); (CALLISTER, 2008); (CANNIO e HANUSKOVA, 2008).

Banerjee (2004) classifica os materiais refratários como:

- Com forma definida: tijolos e peças fundidas (*cast shapes*);
- Sem forma definida - refratários monolíticos: concreto refratário, argamassa refratária, revestimentos, pastas entre outros (*castables*).

Cannio e Hanuskova (2008) complementam a classificação dos materiais refratários como:

- Tradicionais: refratários constituídos por grãos ligados por uma matriz cerâmica ou vítrea e que apresentam uma porosidade residual aberta entre 10 e 30 %;
- Especiais sinterizados: refratários caracterizados por um alto grau de sinterização e porosidade quase nula;
- Especiais eletrofundidos: refratários com grau de sinterização e densidade ainda mais alta que os especiais sinterizados.

Com relação ao aspecto físico-morfológico dos materiais refratários, Cannio e Hanuskova (2008) os classificam como:

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

- Sílico-aluminosos: materiais refratários com 20 a 44 % de alumina;
- Aluminosos: com alto teor de alumina, utilizados em altas temperaturas e condições extremas de operação;
- Isolantes e refratários isolantes: utilizados em contato direto com a chama pela baixa condutividade térmica, sendo sua principal característica o isolamento à altas temperaturas.

Os materiais refratários podem, também, ser classificados pela sua natureza química. A Tabela 1 apresenta a natureza química dos principais componentes dos materiais refratários.

**Tabela 1. Natureza química dos componentes principais dos materiais refratários (CANNIO e HANUSKOVA, 2008).**

Natureza Química	Componentes
Ácidos	Sílicosos ( $\geq 94$ % de $\text{SiO}_2$ )
	Sílico-aluminosos (20 – 44 % de $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
	Aluminosos ( $\geq 50$ % de $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
Básicos	Magnésíticos ( $\geq 82$ % de $\text{MgO}$ )
	Forsteríticos (30 – 75 % de $\text{MgO}$ )
	Magnésio-cromíticos (10 – 45 % de $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )
	Dolomíticos (40 – 55 % de $\text{CaO}$ )
Neutros	Cromíticos (35 – 50 % de $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )
	De carbono semi-amorfo ( $\text{C} > 90\%$ )
	Grafíticos ( $\text{C}$ variável)

Os materiais refratários sílico-aluminosos, apresentam boas propriedades refratárias, sendo amplamente utilizados para aplicações industriais em condições severas (BAKER *et al.*, 2006); (GARCIA *et al.*, 2007).

A utilização de artefatos cerâmicos refratários para aplicações de isolamento térmico é de fundamental importância, uma vez que questões relacionadas ao consumo de energia são cada vez mais críticas, particularmente do ponto de vista ambiental (GUALTIERI *et al.*, 2010).

O comportamento térmico do concreto, especialmente do concreto refratário, é relevante para sua utilização, principalmente quando seu uso requer baixa condutividade

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

térmica, estabilidade dimensional e alto calor específico (DEMIRBOGA e GUL, 2003); (KOVLER e ROUSSEL, 2011).

Com o desenvolvimento dos concretos refratários, o processo de aplicação de revestimentos que suportem elevadas temperaturas de operação tem sido otimizado. Diferentemente dos tijolos refratários convencionais, os quais oferecem possibilidades finitas de aplicações, os concretos refratários podem ser aplicados por diversos métodos, como socagem, vibração, auto-escoamento, bombeamento e projeção, entre outros, apresentando diversas possibilidades de emprego (INNOCENTINI *et al.*, 2001).

O concreto pode ser definido como uma mistura físico-química ou um aglomerado artificial obtido pelo endurecimento de uma pasta de cimento, agregados e água (FLATT *et al.*, 2012); (ZHUTOVSKY e KOVLER, 2012).

Os cimentos são compostos químicos que, ao reagirem quimicamente com a água, formam produtos de hidratação complexos, com propriedades adesivas (MEHTA, 1994); (UKRAINCZYK e MATUSINOV, 2010); (TERMKHAJORNKIT e BARBARULO, 2012).

Os agregados são considerados materiais de enchimento, inertes para alguns autores, por não participarem de reações químicas com a água. No entanto, outros autores adotam um ponto de vista oposto e consideram os agregados como um material de construção totalmente preenchido, por meio de uma pasta de cimento, sendo suas propriedades físicas, térmicas e por vezes químicas, influentes no desempenho do concreto (FRITZ, 1977); (MEHTA, 1994); (NEVILLE, 1997); (FLATT *et al.*, 2012).

De acordo com a norma ASTM C33-03 (ASTM, 2003), os agregados são definidos como materiais sem forma ou volume definidos, geralmente inertes, com dimensões e propriedades adequadas à produção de argamassas e concretos. No item 3.2 é apresentada uma maior abordagem sobre os agregados.

A fabricação de materiais cerâmicos refratários pode partir da utilização de concretos refratários, materiais adequados para o uso em elevadas temperaturas, compostos por cimento de aluminato de cálcio (CAC) como principal ligante (MONTGOMERY, 2003); (GARCIA *et al.*, 2007).

Os concretos refratários são revestimentos monolíticos compostos por cimento refratário, como o CAC, agregados apropriados para suportar elevadas temperaturas e uma quantidade mínima de água, responsável pela trabalhabilidade do concreto e pelas reações químicas de hidratação, que conferirão suas propriedades finais (KRIETZ, 2004); (GARCIA *et al.*, 2007); (OUEDRAOGO *et al.*, 2011).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Concretos refratários são utilizados em diversas aplicações industriais, especialmente nas quais diversos ciclos de temperaturas sejam requeridos. Revestimentos de fornos, conchas para o manuseio de metais fundidos em indústrias siderúrgicas e plantas de reatores para a produção de eletricidade são exemplos da utilização de concretos refratários (FREDMAN e SAXEN, 1998); (PROMPT e OUEDRAOGO, 2008); (OUEDRAOGO *et al.*, 2011); (SILVA *et al.*, 2012).

O CAC, também chamado cimento aluminoso, foi desenvolvido no início do século XX, por Jules Bied na França, como solução ao ataque das estruturas de concreto de cimento *Portland* por águas contendo sulfatos. São cimentos diferentes do cimento *Portland*, embora as técnicas de concretagem sejam semelhantes (NEVILLE, 1997); (GARCIA *et al.*, 2007).

A Tabela 2 apresenta a classificação dos concretos refratários de acordo com sua concentração de óxido de cálcio (CaO).

**Tabela 2. Classificação dos concretos refratários de acordo com sua concentração de CaO (KRIETZ, 2004).**

<b>Classificação</b>	<b>Concentração de CaO (% m/m)</b>
Convencionais	> 2,5
Baixo cimento	1 – 2,5
Ultra Baixo Cimento	0,2 – 1
Cimento Livre	< 0,2

O CAC difere-se do cimento *Portland*, pela sua capacidade de suportar elevadas temperaturas. A portlandita, hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$ , presente em proporções significativas no cimento *Portland*, em temperaturas superiores a 500 °C sofre uma reação reversível de desidratação, formando óxido de cálcio, também conhecido como cal. A exposição à umidade atmosférica é suficiente para a reidratação do CaO, em uma reação expansiva, que pode romper o concreto. Além desse fator, o cimento *Portland* apresenta altas concentrações de cal e sílica, responsáveis pelo baixo ponto de fusão, em comparação às temperaturas de uso do CAC (MONTGOMERY, 2003); (SCRIVENER e CAPMAS, 2003); (WANG e XU, 2012).

Além de suportar altas temperaturas, os CAC são amplamente utilizados em aplicações que exigem alta resistência ao ataque químico, resistência a abrasão e adensamento a baixas ou altas temperaturas (UKRAINCZYK e MATUSINOVIC, 2010).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os CAC possuem o aluminato monocálcico ( $\text{CaAl}_2\text{O}_3$ ), principal fase mineralógica, em concentrações acima de 40 % em massa. Apresentam pequenas concentrações de óxidos ferrosos e dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), entre outros componentes, sendo o sistema  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  o principal constituinte (SCRIVENER e CAPMAS, 2003); (KRIETZ, 2004); (GARCIA *et al.*, 2007).

O CAC com a adição de água forma reações de hidratação, de acordo com a equação química balanceada apresentada na Figura 1.



Figura 1. Equação química balanceada da hidratação do CAC (KRIETZ, 2004).

A hidratação do CAC é uma reação exotérmica, na qual temperaturas de até 75 °C são frequentemente observadas. Em temperaturas acima de 35 °C, a fase mineralógica mais comum encontrada é a  $[(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{H}_2\text{O})_6]$ , especialmente para formulações com composições de CAC acima de 20 % (KRIETZ, 2004); (GARCIA *et al.*, 2007).

A composição química dos CAC em comparativo ao cimento *Portland* pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química dos cimentos de aluminato de cálcio (CAC) e do cimento *Portland* (MONTGOMERY, 2003).

Cor Variedade	Cinza	Cinza CAC	Amarelo CAC	Branco CAC
	<i>Portland</i> (%)	Faixa baixa (%)	Faixa média (%)	Faixa alta (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4 – 6	36 – 42	48 – 60	80 – 82
CaO	63 – 67	36 – 40	36 – 40	15 – 20
$\text{SiO}_2$	19 – 23	3 – 8	3 – 8	< 0,2
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2 – 3,5	12 – 20	1 – 3	< 0,2
$\text{TiO}_2$	< 0,5	~ 2	~ 3	–
MgO	~ 1	~ 1	~ 0,1	–

Em comparação ao cimento *Portland*, a produção do CAC é muito menor e também considerada mais dispendiosa. No entanto, esta variedade de cimento não compete diretamente com as aplicações comuns do cimento *Portland*, justamente pelas propriedades singulares que o CAC apresenta como Scrivener e colaboradores (2003) descrevem:

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

- Rápido desenvolvimento de suas propriedades mecânicas (mesmo a baixas temperaturas);
- Elevada refratariedade;
- Elevada resistência a uma grande variedade de condições químicas agressivas.

Um concreto refratário é composto, basicamente, por uma matriz contendo CAC e finos agregados, constituindo uma primeira fase, e uma segunda fase dispersa de agregados maiores, formando, assim, uma matriz heterogênea, cujas partículas possuem diâmetros que variam de 4 a 6 mm (HARMUTH *et al.*, 1996); (PRATA *et al.*, 2003).

Após o endurecimento, quando o concreto refratário é aquecido pela primeira vez, a temperaturas de 210 a 370 °C, um processo de desidratação do CAC é observado, que, no caso de um aquecimento muito rápido com liberação de vapor proveniente da desidratação do CAC, pode ser verificada a ruptura do concreto devido à pressão interna exercida pelo vapor d'água. Neste sentido, o primeiro ciclo térmico ao qual o material é submetido deve ser cuidadosamente monitorado (SINGH *et al.*, 1979); (KRIETZ, 2004); (OUEDRAOGO *et al.*, 2011).

#### 3.2 Propriedade dos Sólidos Particulados

O estudo das propriedades dos sólidos particulados é de fundamental importância para diversas operações unitárias, como por exemplo, a cominuição e o peneiramento (GOMIDE, 1983).

Em cada mistura do concreto são incorporadas partículas com tamanhos variados, sendo a distribuição desses tamanhos chamada de granulometria (NEVILLE, 1997).

A granulometria é a distribuição percentual das partículas de diferentes tamanhos, considerando o material em seu estado seco (MAGALHÃES, 1977).

Como comentado anteriormente, os sólidos particulados utilizados para a fabricação de um concreto são chamados de agregados, não possuindo forma e volume definidos, porém de acordo com uma caracterização granulométrica, podem ser classificados pelos seus tamanhos, conforme apresentado na Tabela 4.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

**Tabela 4. Classificação dos sólidos particulados de acordo com seu tamanho de partícula (GOMIDE, 1983).**

<b>Classificação</b>	<b>Tamanho de Partícula</b>
Pós	1 $\mu$ m a 0,5 mm
Sólidos granulares	0,5 a 10 mm
Blocos pequenos	10 a 50 mm
Blocos médios	50 a 150 mm
Blocos grandes	> 150 mm

Os agregados podem ser classificados pela dimensão de suas partículas, massa específica ou origem. O termo agregado graúdo classifica as partículas maiores que 4,8 mm, enquanto que o termo agregado miúdo classifica partículas menores que 4,8 mm (MEHTA, 1994); (NEVILLE, 1997); (ASTM C33-03, 2003).

A origem dos agregados pode ser natural ou artificial. Compreende-se como agregado natural, aquele advindo de rochas e/ou minerais. As rochas são compostas basicamente por três grupos principais: ígneas, sedimentares e metamórficas, enquanto que os minerais constituintes mais comuns são: de sílica (quartzo, opala, calcedônia), de silicato (feldspatos), ferro-magnesianos, argilominerais, carbonáticos (calcita, dolomita), sulfatados (gipsita, anidrita). Os agregados artificiais são agregados reciclados não contaminados, como por exemplo, agregados de escória de alto-forno, agregados de cinza volante e agregados de concreto reciclado e de resíduos de rejeitos urbanos (MEHTA, 1994); (NEVILLE, 1997).

Os resíduos de isoladores cerâmicos, portanto, fazem parte do grupo dos agregados artificiais.

Diversas características dos agregados são importantes para a tecnologia dos concretos, tais como: absorção de água, composição granulométrica, forma e textura das partículas, módulo de elasticidade, porosidade e resistência à compressão (MEHTA, 1994).

### 3.3 Isoladores Elétricos Cerâmicos

Materiais cerâmicos com boas propriedades de isolamento elétrico são chamados de materiais dielétricos. Embora esta classe de materiais não conduza eletricidade quando um campo elétrico é aplicado, não são propriamente inertes ao campo elétrico. São denominados materiais dielétricos, devido à leve mudança no balanço das cargas elétricas quando submetidos a um campo elétrico, originando a formação de um dipolo elétrico. Exige-se que

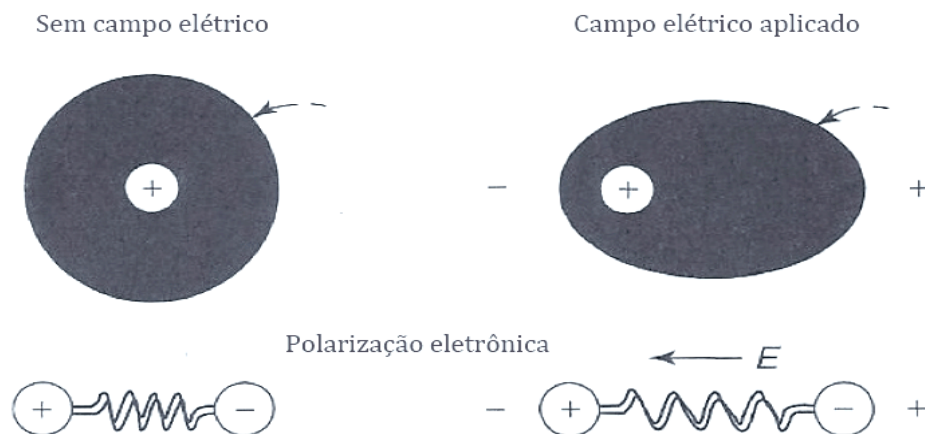
### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

estes materiais possuem uma grande capacidade de se opor à passagem de corrente elétrica, além de elevada resistência mecânica (SOUSA *et al.*, 2004); (RICHERSON, 2006).

Nestes materiais, as ligações iônico-covalentes restringem a mobilidade dos elétrons e as tornam bons isolantes elétricos, possuindo um grande número de aplicações, tais como na indústria eletroeletrônica e nas redes de distribuição de energia elétrica para a transmissão de energia a longas distâncias (NODA *et al.*, 1996); (STUDART *et al.*, 1996); (CHINELATTO e SOUZA, 2004).

Em todos os materiais dielétricos ocorre a formação de um fenômeno físico chamado de polarização eletrônica, na qual os elétrons de cada núcleo são ligeiramente deslocados das cargas positivas em direção às cargas negativas. Quando o campo elétrico é removido, todos os elétrons retornam para suas distribuições originais e a polarização desaparece (RICHERSON, 2006).

A Figura 2 ilustra o esquema da polarização eletrônica que ocorre nos materiais dielétricos.



**Figura 2. Esquema da polarização eletrônica que ocorre nos dos materiais dielétricos (RICHERSON, 2006).**

Isoladores elétricos cerâmicos são materiais utilizados para isolar eletricamente e suportar mecanicamente os esforços gerados em um corpo condutor. Apresentam elevada resistividade, alta resistência dielétrica e baixo fator de perdas. A resistividade ( $\rho$ ) corresponde ao inverso da condutividade ( $\sigma$ ), a resistência dielétrica é o gradiente de voltagem (tensão), que é capaz de produzir colapso elétrico em um material, e o fator de perdas é o produto da constante dielétrica ( $k'$ ) pelo fator de dissipação ( $\text{tg } \delta$ ), sendo  $\delta$  o ângulo de perda  $90^\circ$  menos o ângulo de fase (VAN VLACK, 1973), (FERREIRA *et al.*, 2010).



### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

A Tabela 5 apresenta os valores típicos de resistividade, resistência dielétrica e fator de perdas para os principais isoladores cerâmicos.

**Tabela 5. Valores típicos de resistividade, resistência dielétrica e fator de perda dos principais isoladores cerâmicos (VAN VLACK, 1973).**

Material	Resistividade (ohm·cm)	Resistência dielétrica (V·mm <sup>-1</sup> )	Fator de perdas	
			<i>k'</i> tg $\delta$	
			60 cps	10 <sup>6</sup> cps
Vidro "duro"	10 <sup>16</sup>	350	0,007	0,02
Vidro "mole"	10 <sup>15</sup>	250	0,4	0,08
Alumina - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 <sup>16</sup>	250	0,01	0,006
Sílica - SiO <sub>2</sub>	10 <sup>19</sup>	250	0,0025	0,0004
Mica - KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	10 <sup>13</sup>	≥ 1000	0,018	0,003
Porcelana de cordierita - Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>	10 <sup>13</sup>	100	0,01	0,05
Porcelana de esteatita - MgSiO <sub>3</sub>	10 <sup>14</sup>	300	0,007	0,005
Porcelana de mulita - Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	10 <sup>13</sup>	300	0,006	0,03
Porcelana de zirconita - ZrSiO <sub>4</sub>	10 <sup>14</sup>	300	0,04	0,01

Os isoladores de porcelana são classificados como cerâmica branca, pois possuem um corpo de massa recoberto por uma camada vítrea de esmalte. São constituídos basicamente de argila, que não deve apresentar altas concentrações de ferro, para não comprometer as funções isoladoras do produto. Possuem concentrações de feldspato, responsável pela geração da fase vítrea e do elevado ponto de fusão, sendo manufacturados a frio em sua forma plástica e posteriormente submetidos a operações de queima em temperaturas de até 2000 °C (SCHMIT, 1979); (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010); (ABCERAM, 2012).

Nestas cerâmicas, as ligações iônicas restringem a mobilidade dos elétrons, apresentando propriedades de isolamento elétrico. As porcelanas formadas por alumina, feldspato e caulim são utilizadas na fabricação de isoladores elétricos de alta tensão, por possuírem boas propriedades dielétricas e propriedades mecânicas superiores às porcelanas que utilizam quartzo (CHINELATTO e SOUZA, 2004).

Os isoladores elétricos cerâmicos são compostos basicamente de 30 % de caulim associado à argila, 30 % de feldspato e 40 % de quartzo, sendo chamados de cerâmicas triaxiais. Ao passo que os isoladores especiais, isto é, isoladores para subestações elétricas, recebem adição de alumina, em substituição parcial ao quartzo, recebendo o nome de

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

isoladores de alumina. Outras substâncias também são misturadas em porcentagens reduzidas influenciando na qualidade dielétrica e mecânica do isolador, sendo as principais substâncias o hidróxido de ferro, o silicato de cálcio e o silicato de magnésio (MAMEDE FILHO, 1994).

De acordo com Mamede Filho (1994), com a modificação das concentrações das matérias-primas básicas dos isoladores é possível obter-se artefatos com propriedades diferentes, como:

- Aumento no teor de quartzo: maior resistência em temperaturas elevadas, maior resistência mecânica e menor rigidez dielétrica;
- Aumento no teor de feldspato: maior capacidade isolante;
- Aumento de caulim e argila: maior resistência a choques térmicos e menor rigidez dielétrica.

A mudança das propriedades dos isoladores, de acordo com suas composições, pode ser observada pelo triângulo da composição da porcelana, Figura 3.

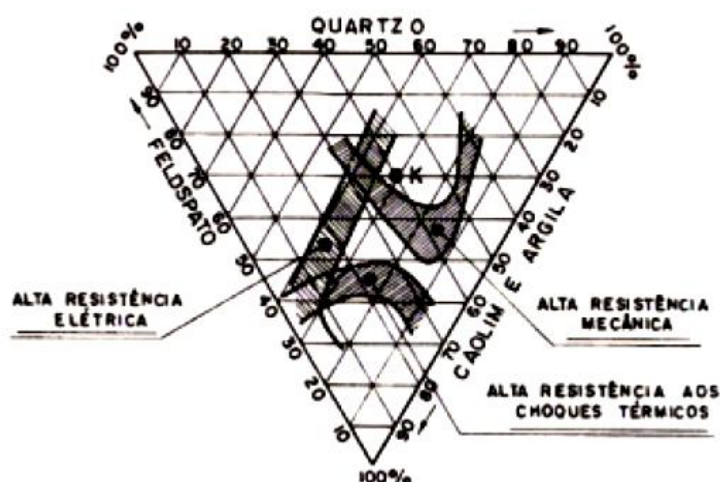


Figura 3. Triângulo da composição da porcelana de acordo com suas composições (MAMEDE FILHO, 1994).

A fabricação da porcelana crua consiste na mistura das matérias-primas selecionadas de acordo com a aplicação do isolador em moinho de bolas por aproximadamente 30 horas. Esta mistura em meio aquoso tem por finalidade a homogeneização da massa, que então é submetida a um processo de filtro-prensagem, no qual se tem a retirada da água em excesso da massa, permitindo sua posterior moldagem (MAMEDE FILHO, 1994); (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

A extrusão permite que a massa seja transferida por meio de uma extrusora com câmara de vácuo, na qual o ar é retirado e a massa é compactada em formas cilíndricas. Estes cilindros, por sua vez, passam pela torneação sem fôrmas ou moldes. Neste processo, são obtidos isoladores do tipo pilar, bucha, roldanas, suportes cilindros para chaves seccionadoras e chaves fusíveis (MAMEDE FILHO, 1994); (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

Os cilindros de massa compactada pós-extrusão podem, também, ser moldados com o formato externo do isolador, por meio de moldes de gesso e então torneados. Nesta etapa, os isoladores passam por uma queima prévia a baixa temperatura, para retirada da água restante. Neste processo, são produzidos isoladores como discos de suspensão, isoladores pino e dielétricos para montagem de suportes tipo pedestal e multicones (MAMEDE FILHO, 1994); (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

Na vitrificação, as peças cerâmicas recebem, por imersão, a aplicação de uma camada de esmalte sintético nas cores marrom ou branco. Este esmalte tem uma espessura que varia de 0,07 a 0,3 mm propiciando ao isolador uma camada lisa, que impedirá a retenção de partículas e líquidos e facilitará a sua limpeza pela água da chuva (MAMEDE FILHO, 1994); (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

Na operação de queima, as peças vitrificadas são sinterizadas em fornos de alta temperatura a 1300 °C por aproximadamente 24 horas (MAMEDE FILHO, 1994); (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

#### 3.3.1 Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC)

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos é um dos principais desafios enfrentados pelo governo do Brasil, tendo em vista a geração crescente e inesgotável de materiais, oriundos da produção e descarte de bens cujo descarte é inevitável (CARNEIRO, 2000).

Os resíduos elétricos cerâmicos tradicionalmente são dispostos em aterros sanitários. No entanto, alternativas de reuso e reciclagem destes resíduos devem ser investigadas e propriamente implementadas (PEREIRA *et al.*, 2007).

Com o aumento dos resíduos gerados, o esgotamento de espaços apropriados para seu destino final e a mudança das políticas para a destinação dos resíduos sólidos, em muitos países desenvolvidos tem sido praticado o reuso desses resíduos como matéria-prima para a produção de novos materiais (PORTELLA *et al.*, 2006).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

Estima-se que a produção de isoladores elétricos cerâmicos no interior de São Paulo seja de 35.000 toneladas/ano, com um descarte da ordem de 5 %, sendo que 75 % do total produzido são utilizados como material de substituição das instalações já existentes. Tem-se um descarte na ordem de 30.000 toneladas/ano de isoladores (CAMPOS, 2009); (FERREIRA *et al.*, 2010).

Os isoladores cerâmicos, após sua vida útil, perdem funções isolantes e são substituídos por novas unidades. Atualmente, as concessionárias de energia de todo o país geram dezenas de unidades destes isoladores cerâmicos (FERREIRA *et al.*, 2010).

Os isoladores cerâmicos, rejeitados no processo de fabricação após a queima ou provenientes de desmantelamento das redes de concessionárias elétricas, são classificados de acordo com a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004) como classe II B – inertes, baseada no *Code of Federal Regulations (CRF) – Title 40 – Protection of Environmental – Part 260-265 – Harzarduos Waste Management* (ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, 2000).

Com a aprovação da Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos gerados em território brasileiro devem ser reduzidos, tratados e reutilizados dentro do conceito de desenvolvimento sustentável. Desta forma, a reutilização dos resíduos de isoladores cerâmicos mostra-se uma promissora fonte de matéria-prima à produção de novos artefatos cerâmicos.

#### **3.3.2 Utilização de Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC) como Matéria-Prima**

A reciclagem pode ser conceituada como um conjunto de técnicas cuja principal finalidade é o aproveitamento de detritos e rejeitos de forma a reintroduzi-los no ciclo de produção, trazendo benefícios em relação à utilização de recursos naturais, tais como, redução do volume da extração de matérias-primas virgens, redução do consumo de energia e menores emissões de poluentes, com conseqüente melhoria da saúde e da segurança da população. A principal vantagem dos processos de reciclagem é a preservação dos recursos naturais e a redução da destruição da paisagem, fauna e flora (MENEZES *et al.*, 2002).

Os resíduos cerâmicos são duráveis e altamente resistentes a forças químicas, físicas e biológicas. Ao mesmo tempo em que há uma preocupação com a geração de resíduos das indústrias cerâmicas, as reservas de rochas utilizadas como agregados para a fabricação de concretos diminuem a uma velocidade cada vez maior (SENTHAMARAI e MANOHARAN, 2005).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

A utilização de resíduos elétricos cerâmicos e, em especial os RIC não está descrita em normas técnicas até o presente momento, embora já existam trabalhos científicos incorporando resíduos cerâmicos, em geral, em cimento *Portland*, como substituição aos agregados naturais utilizados na indústria de concretos (MEDINA *et al.*, 2011).

Senthamarai e colaboradores (2005) estudaram a utilização de RIC como substitutos aos agregados graúdos na composição de concreto com cimento *Portland*. Seus resultados sugerem a viabilidade da utilização desses resíduos, especialmente quando analisada a textura da superfície dos RIC em comparação com as rochas cominuídas, que favorece a trabalhabilidade do concreto devido a sua baixa absorção de água. Neste mesmo estudo, os autores obtiveram valores de resistência à tração na flexão e resistência à compressão das formulações com RIC semelhantes aos valores obtidos com agregados de rocha fragmentada.

Portella e colaboradores (2006) propuseram o estudo da reciclagem e incorporação de RIC em concreto, em substituição parcial aos agregados graúdos e miúdos naturais. Seus resultados não foram inteiramente satisfatórios, pois foram observados indícios de reações expansivas que poderiam prejudicar determinadas aplicações. Desta forma, os autores estudaram as condições ideais de dosagem para atenuar os efeitos de tais reações pela presença de contaminantes presentes nos resíduos.

Campos (2009) propôs estudar as dosagens e propriedades de concretos e argamassas de cimento *Portland* nos estados fresco e endurecido, a fim de viabilizar o emprego de RIC em substituição aos agregados convencionalmente empregados na construção civil. Seus principais resultados apontam a viabilidade da substituição dos agregados graúdos e miúdos em concretos e argamassas não estruturais com propriedades mecânicas até 30 % superiores às referências utilizadas.

Ferreira e colaboradores (2010) utilizaram os RIC íntegros e não cominuídos como substituição à rocha basáltica na construção de gabiões para barreiras de contenção. Os resultados obtidos demonstraram que a substituição foi satisfatória, porém deve-se levar em consideração a geometria dos isoladores para que haja um encaixe perfeito.

A Figura 4 ilustra os gabiões produzidos com a utilização dos RIC.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---



**Figura 4. Gabiões para barreiras de contenção fabricados com RIC (FERREIRA *et al.*, 2010).**

Em outro estudo, Senthamarai e colaboradores (2011) verificaram a permeabilidade à água do concreto produzido com RIC e obtiveram resultados similares a permeabilidade à água do concreto obtido com agregados rochosos. Nas duas composições, a permeabilidade à água aumentou com o aumento da taxa água/cimento.

#### **3.4 Cominuição de Sólidos**

A cominuição de partículas sólidas é uma operação de significant importância industrial, pois permite a obtenção de partículas com dimensões trabalháveis a partir de grandes blocos sólidos (GOMIDE, 1983).

O processo de cominuição consiste em quebrar sólidos em fragmentos menores e pode ser obtido pela propagação de múltiplas fraturas em diferentes escalas de comprimento. Tais fraturas podem ser induzidas pelo crescimento dinâmico da quebra durante a aplicação de uma força de carregamento, que pode ser por meio de tensão ou compressão (PERFECT, 1997); (HERRMANN *et al.*, 2006).

Os sólidos são cristalinos e sua fratura ocorre em superfícies preferenciais, denominadas superfícies de clivagem. Para que ocorra a cominuição é necessário que a energia aplicada seja suficiente para romper as ligações da grade cristalina. Caso a energia não seja suficiente, o limite de elasticidade do material não será ultrapassado. De forma ideal, a fratura de cada partícula deveria ser realizada com a menor carga possível, relativa à resistência do material (RANDOLPH e LARSON, 1971); (GOMIDE, 1983).

As operações de cominuição apresentam rendimentos muito baixos. Apenas 0,1 a 2 % da energia fornecida são realmente utilizados para fragmentar um sólido. Entre os fatores responsáveis pelo baixo rendimento das operações de cominuição, a irregularidade das

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

superfícies das partículas cominuídas e a mudança do ponto de aplicação da energia após a primeira fratura podem ser destacadas (GOMIDE, 1983); (MCCABE, 1993).

A distribuição granulométrica das partículas de um sólido fragmentado depende essencialmente da energia fornecida para sua cominuição (GOMIDE, 1983).

O modelo de aplicação da energia necessária para se fragmentar um sólido é de fundamental importância. Diversos autores vêm apresentado modelos matemáticos complexos visando o aperfeiçoamento das operações de cominuição (DENOVAL e HILD, 2000); (GRADY, 2008); (BAKER e WARNER, 2012); (KYPRIANOU e PARDO, 2012).

A cominuição de sólidos em escala industrial pode ser realizada com a utilização de equipamentos específicos para esta finalidade. Diversos britadores e moinhos possibilitam a cominuição de sólidos de acordo com suas características e possibilidades de utilização (GOMIDE, 1983).

#### **3.5 Separação de Partículas Sólidas – Peneiramento**

Uma das operações mecânicas de separação de partículas sólidas mais práticas e comumente utilizadas é o peneiramento, cujo princípio consiste em passar as partículas sólidas através de uma série de peneiras com tamanhos de malhas progressivamente menores, as quais manterão uma parte da amostra retida em sua malha (GOMIDE, 1983).

O peneiramento visa, essencialmente, dividir o sólido granular em frações homogêneas e obter frações com partículas de mesmo tamanho.

Por meio do peneiramento é possível se realizar uma análise granulométrica, ou seja, separar partículas sólidas com diferentes dimensões em frações cujas partículas apresentem uniformidade de tamanho (GOMIDE, 1983); (PERRY, 1984).

A análise granulométrica é realizada com peneiras padronizadas quanto à abertura das malhas e à espessura dos fios de que são feitas.

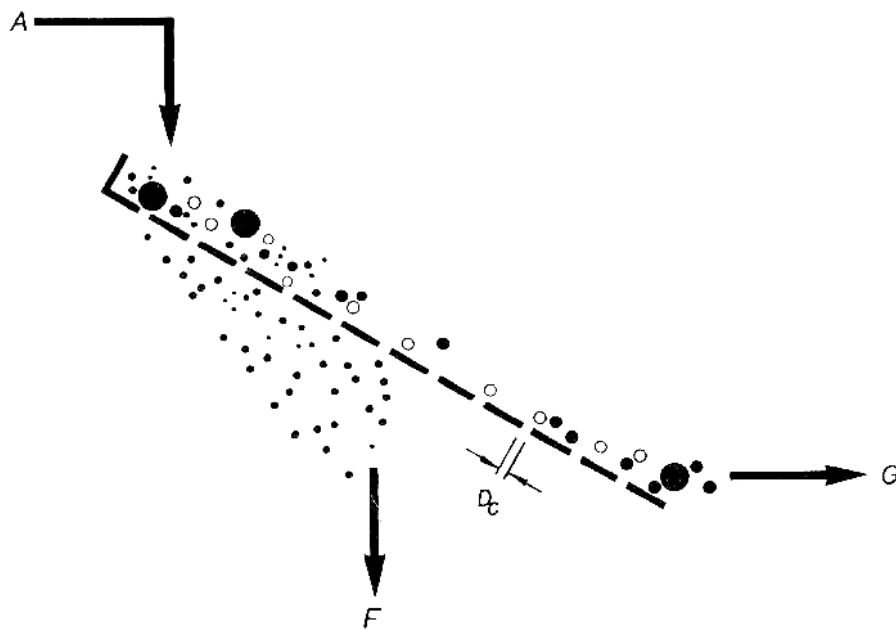
De acordo com o manual ASTM MNL-98 (ASTM, 1998) o ensaio deve consistir em colocar a amostra sobre a peneira com maior abertura de malhas e agitar, em ensaio padronizado, por meio de peneirador eletromagnético ou eletromecânico, onde as peneiras são colocadas umas sobre as outras na ordem decrescente da abertura das malhas. Abaixo da última peneira há um recipiente (fundo) que recolhe a fração contendo as partículas mais finas do material que conseguem passar através de todas as peneiras da série. Assim, o peneiramento visa separar um sólido granular em frações uniformes. A fração que passa pela

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

peneira constitui o material fino e a que fica retida constitui o material grosso (GOMIDE, 1983).

Após o término do ensaio, as quantidades retidas nas diversas peneiras utilizadas e no recipiente (fundo) são determinadas por pesagem e as frações retidas podem ser calculadas dividindo as massas retidas pela massa total da amostra. Os resultados de uma análise granulométrica são apresentados como uma Análise ou Distribuição Granulométrica Diferencial (GOMIDE, 1983).

A Figura 5 ilustra a operação básica de peneiramento industrial, sendo A o sólido alimentado movimentado pela peneira, F as partículas finas que passam pelas aberturas das malhas, G as partículas grossas, retidas nas malhas e  $D_C$  o diâmetro de corte, que limita o tamanho máximo das partículas da fração fina e o mínimo da grossa (GOMIDE, 1983).



**Figura 5. Operação básica de peneiramento industrial sendo (A) sólido alimentado, (F) partículas finas que passam pelas aberturas das malhas, (G) as partículas grossas, retidas nas malhas e ( $D_C$ ) o diâmetro de corte (GOMIDE, 1983).**

### 3.6 Mistura de Sólidos

Os sólidos particulados, diferentemente dos fluidos em geral, não atingem um estado de perfeita uniformidade ao serem misturados e sim um estado de desordem global média, isto é, um estado de dispersão das partículas (GOMIDE, 1983).



### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

De acordo com Gomide (1983), a mistura de sólidos particulados pode ser definida por três mecanismos distintos:

- Convecção: grupos de partículas movem-se de um ponto a outro do sólido granular, como na convecção fluída;
- Difusão: partículas isoladas movimentam-se através das interfaces criadas na massa do sólido em uma operação semelhante à difusão fluída;
- Cisalhamento: planos de escorregamento são formados no seio do sólido granular durante a mistura, provocando o deslocamento relativo de porções maiores ou menores de material de um ponto a outro da massa de material.

Infelizmente a literatura atual não aborda a operação de mistura de sólidos particulados para a obtenção de concreto refratário especificamente, sendo necessária a busca em literatura específica da engenharia civil, uma vez que as técnicas utilizadas são semelhantes.

A literatura acerca de operações unitárias também fornece informações relevantes para a compreensão deste tipo de operação.

A mistura de sólidos particulados deve começar com as matérias-primas secas, pós ou partículas apresentando fluxo livre. Com a adição de um líquido (água no caso do concreto refratário), as matérias-primas transformam-se em uma pasta que apresenta maior viscosidade com o decorrer da operação (MCCABE, 1993).

A água ( $H_2O$ ) é o principal líquido utilizado no processamento de materiais cerâmicos, devido a sua disponibilidade e o seu baixo custo comparado a outros fluídos utilizados como ligante. A água pura contém moléculas polares de  $H_2O$  e íons hidrônio ( $H_3O^+$ ) e hidroxila ( $OH^-$ ). A 20 °C a água deve possuir pH igual a 7, condutividade específica de  $0,055 \mu mho \cdot cm^{-1}$  e viscosidade de  $1 MPa \cdot s^{-1}$  (REED, 1995).

Faz-se necessário que o cimento e a água sejam misturados e que a pasta resultante seja uniformemente distribuída na massa dos agregados, que também devem ser misturados (FRITZ, 1977); (MAGALHÃES, 1977); (HELENE e TERZIAN, 1993).

O tipo de misturador escolhido deve levar em consideração o tipo de material a ser misturado. Misturadores com recipientes estacionários, como uma batedeira planetária podem misturar líquidos viscosos e massas leves. São frequentemente utilizados em escala laboratorial e em aplicações industriais para a mistura de pigmentos e no processamento de alimentos. Neste tipo de misturador, o recipiente no qual se despejam os materiais a serem

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

misturados encontra-se parado ou em estado estacionário. Pás ligadas a um motor rotativo vertical são responsáveis pela movimentação dos materiais. As pás movimentam-se por rotação planetária (rotação simultânea em seu eixo e ao redor do recipiente), de modo que, por repetidas vezes, as pás passam por toda a área do recipiente, permitindo a movimentação total dos materiais durante a operação (MCCABE, 1993).

De forma geral, diversos fatores podem contribuir para as propriedades finais do concreto obtido, como a qualidade das matérias-primas utilizadas, o proporcionamento adequado entre as matérias-primas selecionadas e a água, a correta manipulação do concreto no estado fresco, incluindo seu transporte e sua concretagem e uma cura cuidadosa do material depois de endurecido (FRITZ, 1977); (MAGALHÃES, 1977); (HELENE e TERZIAN, 1993).

#### 3.7 Secagem – Transferência Simultânea de Calor e Massa

Na operação de secagem ocorre a transferência de um líquido presente em um sólido úmido para uma fase gasosa não saturada (BLACKADDER e NEDDERMAN, 1982); (FOUST *et al.*, 1982).

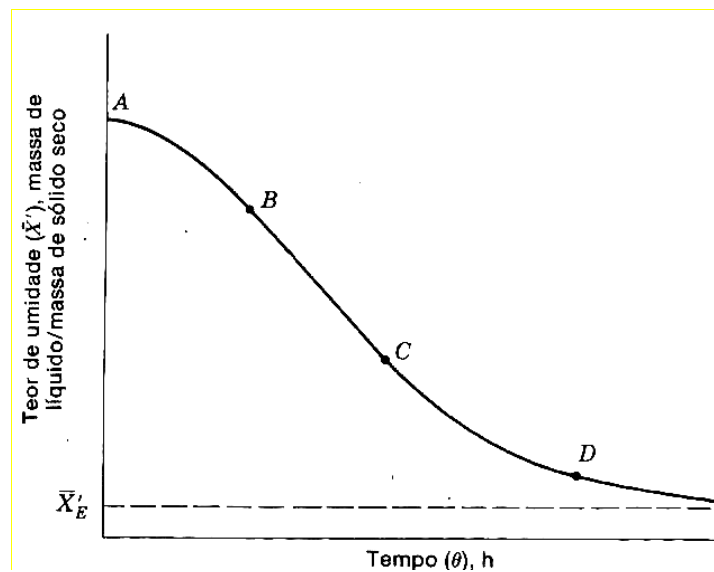
Durante a operação de secagem, um transporte de energia é envolvido, de modo que o líquido é transportado através dos poros do material sólido. Em um sistema de secagem, a energia do calor deve ser levada à superfície do material e os vapores devem ser afastados, a temperaturas geralmente inferiores a sua ebulição (VIAN e OCÓN, 1972); (REED, 1991); (MCCABE, 1993); (POKORNY, 2006).

Após o contato entre o sólido molhado e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir um regime permanente. Tanto a temperatura do sólido, quanto a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições de regime permanente. Uma vez que a temperatura do sólido tenha atingido a temperatura do meio secante, um sistema de estabilidade pode ser observado e a taxa de secagem também permanecerá constante. O período terminará quando o sólido atingir seu teor de umidade crítico e, além deste ponto, a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente (FOUST *et al.*, 1982).

A Figura 6 ilustra uma curva de secagem típica em condições constantes de secagem e teor de umidade em função do tempo, sendo o período de secagem em regime não permanente representado pelo segmento A-B durante o qual a temperatura do sólido atinge o

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

valor da temperatura de bulbo úmido do ar circundante. No segmento B-C, o período ocorre à taxa constante e toda a superfície exposta do sólido está saturada de água. No ponto C o teor de umidade do sólido é o mínimo para suprir a totalidade da superfície. Entre os pontos C e D a taxa é decrescente e a superfície do sólido fica mais pobre em líquido. No ponto D, por fim, não há, na superfície, qualquer área significativamente saturada no líquido e o vapor, nos níveis mais internos da amostra sólida, difunde-se para a parte da superfície que não está saturada e continua a difundir-se para a corrente gasosa (FOUST *et al.*, 1982).



**Figura 6.** Curva de secagem típica em condições constantes de secagem e teor de umidade em função do tempo sendo, (A-B) o regime não permanente, (B-C) o regime permanente à taxa constante, (C) o mínimo teor de umidade no sólido, (CD) taxa decrescente e (D) a ausência de área saturada no líquido, na superfície (FOUST *et al.*, 1982).

O transporte térmico no sólido pode ocorrer por convecção, condução ou radiação. O aquecimento convectivo do sólido é limitado pelo coeficiente de transmissão de calor para a camada limite estática entre o ar em movimento e o líquido estático na superfície (REED, 1991); (POKORNY, 2006).

A operação de secagem deve ser cuidadosamente controlada devido à tensão produzida pela contração diferencial, podendo provocar defeitos no sólido (REED, 1991).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

#### 3.8 Tratamento Térmico - Queima (Sinterização)

Tradicionalmente os materiais cerâmicos necessitam de uma operação de queima ou sinterização após conformação e secagem para o desenvolvimento da microestrutura e das propriedades desejadas (VAN VLACK, 1973); (REED, 1995); (SHACKELFORD, 2000); (RICHERSON, 2006).

O termo sinterização é utilizado para descrever a consolidação de um produto durante a queima (REED, 1995).

Segundo Reed (1995) e Van Vlack (1998), o processo compreende três estágios principais, sendo eles:

- Reações preliminares à sinterização: eliminação de ligantes orgânicos ou inorgânicos e eliminação de produtos gasosos de decomposição ou de oxidação;
- Sinterização: aglomeração de partículas finamente divididas até o formato desejado;
- Resfriamento: resfriamento do artefato sinterizado, podendo ser lento ou rápido e em atmosfera que pode ser diferente da atmosfera de sinterização.

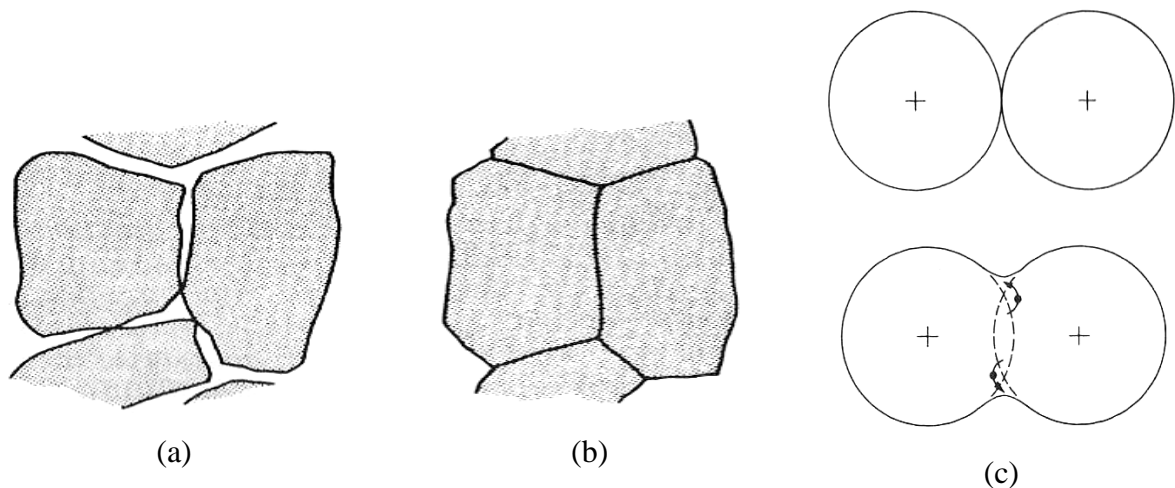
As operações de queima trazem alterações significativas ao artefato cerâmico, de acordo com Van Vlack (1973) e Richerson (2006):

- Redução na área específica total;
- Redução no volume aparente total;
- Aumento na densidade (densificação);
- Diminuição da porosidade;
- Aumento na resistência mecânica.

No entanto, materiais cerâmicos refratários podem apresentar menores densidades após a operação de queima (REED, 1995).

A Figura 7 ilustra a formação do contorno de grão típica de um material cerâmico após a operação de queima (VAN VLACK, 1998).

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO



**Figura 7. Formação do contorno de grão típica de um material cerâmico, sendo (a) partículas antes da queima, com duas superfícies adjacentes, (b) contorno observado em grãos após a queima e (c) difusão dos átomos nos pontos de contato, para aumentar a área de contato (VAN VLACK, 1998).**

A força motriz para a operação de queima é a redução da área superficial, crescendo as partículas maiores às custas das menores. A microestrutura resultante é composta de grãos individuais, separados pelos contornos de grão e, frequentemente, por uma porosidade residual (VAN VLACK, 1998); (POKORNY, 2006).

### 3.9 Fenômenos de Transferência de Calor – Condutividade Térmica

A condutividade térmica pode ser definida como o fenômeno pelo qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as de baixa temperatura de um determinado material ou como o fluxo de calor que passa por uma determinada área (VAN VLACK, 1973); (BANERJEE, 2004); (AMIRTHAN *et al.*, 2011).

A condutividade térmica em regime estacionário pode ser expressa pela Equação 1.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

- $q$  correspondente ao fluxo de calor por unidade de tempo por unidade de área, sendo a área tomada como aquela perpendicular à direção do fluxo, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;
- $k$  correspondente à condutividade térmica, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

- $dT/dx$  correspondente ao gradiente de temperatura através do meio de condução.

O mecanismo de transporte de calor nos materiais pode ocorrer tanto por meio de vibrações da rede cristalina (fônons) quanto por elétrons livres. A condutividade térmica está associada a cada um desses mecanismos, sendo a condutividade total a soma das duas, conforme demonstrado na Equação 2.

$$k = k_r + k_e \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

- $k_r$  correspondente a condutividade térmica devido a vibração da rede cristalina, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;
- $k_e$  correspondente a condutividade térmica devido aos elétrons livres, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Nos materiais cerâmicos, com exceção aos semicondutores, a quantidade de elétrons livres é pequena, de forma que o principal mecanismo de condução térmica se dá por meio dos fônons, sendo  $k_e$  muito menor do que  $k_r$  (VAN VLACK, 1977); (KLEMES, 1993); (CALLISTER, 2008).

O espalhamento dos fônons é mais efetivo quando a estrutura atômica é altamente desordenada, por isso o vidro e outras cerâmicas amorfas possuem condutividades menores do que as cerâmicas cristalinas. Com o aumento da temperatura este espalhamento se torna maior, assim, a condutividade térmica de grande parte dos materiais cerâmicos diminui em função do aumento da temperatura (KLEMES, 1993); (IVANOV *et al.*, 1999); (CALLISTER, 2008).

A porosidade nos materiais cerâmicos tem uma grande influência sobre a condutividade térmica. O aumento no volume dos poros diminui a condutividade térmica. Isso ocorre, porque a condutividade térmica acontece de forma muito lenta e ineficiente através dos poros. Outro motivo é a presença de ar estagnado, que possui uma condutividade térmica extremamente baixa, na ordem de  $0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (NEWMAN e OWENS, 2003); (CALLISTER, 2008); (SCHULLER *et al.*, 2008).

Os materiais cerâmicos podem apresentar dois tipos de porosidade: aberta e fechada. A porosidade aberta tem contato com a superfície externa do material enquanto que a

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

---

porosidade fechada encontra-se dentro do material, sendo a segunda, mais relevante para a fabricação de materiais com propriedades de isolamento térmico (SCHULLER *et al.*, 2008).

A condutividade térmica nos concretos aumenta com o aumento de umidade dos compostos, uma vez que a água possui condutividade térmica 25 vezes maior que a do ar, aproximadamente. Estudos realizados afirmam que o aumento de 1 % na densidade do concreto, devido à absorção de água, eleva em 5 % os valores de condutividade térmica do material. O aumento do teor de cimento utilizado para a fabricação do concreto, também influencia no aumento da condutividade térmica (STEIGER e HURD, 1978); (MORABITO, 1989); (DEMIRBOGA e GUL, 2003), (UYSAL *et al.*, 2004).

A condutividade térmica dos materiais cerâmicos tradicionais depende, essencialmente, da porosidade e densidade aparente, porém outros fatores podem influenciar esta propriedade física, como a geometria do sólido após conformação, a composição mineralógica, microestrutura, natureza e distribuição dos poros, umidade e a presença de sais solúveis na composição do material (ERKER, 2002); (AKIYOCHI *et al.*, 2003); (SANTOS, 2003); (DONDI *et al.*, 2004); (GARCÍA-TEN *et al.*, 2010); (GUALTIERI *et al.*, 2010).

De acordo com Pal e colaboradores (2012) o efeito da fase vítrea presente nos refratários também influencia na condutividade térmica do material, assim como a forma a qual a temperatura é aplicada.

A condutividade térmica, apesar de ser uma propriedade relativamente difícil de ser medida, determina o intervalo de temperatura ao qual material poderá ser utilizado, sendo esta informação de extrema importância para a aplicação destes materiais. Além disso, é uma propriedade calculada para uma temperatura específica, ou seja, não se pode atribuir um único valor de condutividade térmica para os materiais refratários (SANTOS, 2003).

A Figura 8 ilustra a dependência da condutividade térmica em relação à temperatura para vários materiais cerâmicos.

## 3. REFERENCIAL TEÓRICO

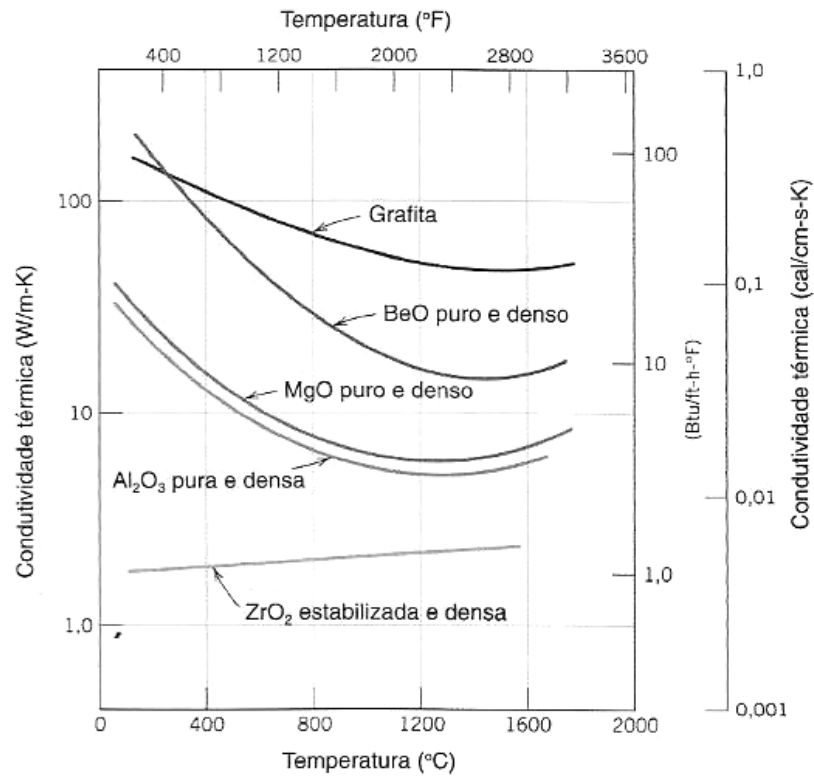


Figura 8. Dependência da condutividade térmica em relação à temperatura para vários materiais cerâmicos (CALLISTER, 2008).



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Para a manufatura dos corpos de prova, na forma de artefatos refratários, foi utilizado um concreto refratário sílico-aluminoso IBAR CASTIBAR-N, comercializado pela Indústria Brasileira de Artigos Refratários – IBAR LTDA., lote 44457702.

As propriedades físicas do concreto, segundo o fabricante, estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6. Propriedades físicas do concreto refratário CASTIBAR-N.**

<b>Massa Específica Aparente (110 °C x 24 h) (g·cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Tempo de Pega (min)</b>	<b>Água de Amassamento (% m/m)</b>	<b>Resistência à Compressão (110 °C x 24 h) (MPa)</b>
2,11	227	12	26,7

Os Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos – RIC, provenientes da RGE, foram incorporados como agregados no concreto refratário em diferentes faixas granulométricas.

A água da rede de abastecimento foi utilizada como agente de mistura entre o concreto refratário sílico-aluminoso e os RIC.

### 4.2 Métodos

A Tabela 7 apresenta a nomenclatura utilizada para cada formulação e seu significado.

Para as formulações dos Grupos A e B, foram utilizados agregados de RIC retidos nas peneiras 9, 10, 16, 28, 48 *tyler mesh* em quantidades iguais, juntamente com o concreto refratário comercial.

Para as formulações dos Grupos C e D, foram utilizados agregados de RIC retidos nas peneiras 9, 10, 16, 28, 48, 100, 200 e passantes pela peneira de 200 *tyler mesh* em quantidades iguais, juntamente com o concreto refratário comercial.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 7. Nomenclatura e significado das formulações.

Nomenclatura	Proporção de RIC/Concreto refratário sílico-aluminoso (% m/m)	Operação de Queima
A0	0/100	–
A10	10/90	–
A20	20/80	–
A30	30/70	–
A40	40/60	–
A50	50/50	–
A60	60/40	–
B0	0/100	5 h a 1100 °C
B10	10/90	5 h a 1100 °C
B20	20/80	5 h a 1100 °C
B30	30/70	5 h a 1100 °C
B40	40/60	5 h a 1100 °C
B50	50/50	5 h a 1100 °C
B60	60/40	5 h a 1100 °C
C0	0/100	–
C10	10/90	–
C20	20/80	–
C30	30/70	–
C40	40/60	–
C50	50/50	–
C60	60/40	–
D0	0/100	5 h a 1100 °C
D10	10/90	5 h a 1100 °C
D20	20/80	5 h a 1100 °C
D30	30/70	5 h a 1100 °C
D40	40/60	5 h a 1100 °C
D50	50/50	5 h a 1100 °C
D60	60/40	5 h a 1100 °C

## 4.2.1 Cominuição dos Resíduos de Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC)

Os RIC foram recebidos na Universidade de Caxias do Sul sob a forma de peças intactas e/ou quebradas, sem metais acoplados, de acordo com a Figura 9.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---



**Figura 9. Resíduos de isoladores elétricos cerâmicos (a) quebrados e (b) intactos.**

Os RIC foram lavados com água corrente para a eliminação do pó e da sujeira superficial. Após, foram aquecidos durante 3 horas a 300 °C em forno marca Sanchis, seguido de banho de gelo até o resfriamento parcial das peças, possibilitando o manuseio das mesmas. Este choque térmico tem como proposta a geração de tensões internas com a intenção de facilitar sua cominuição.

Em sequência ao tratamento proposto foi realizada a cominuição dos RIC por meio de prensagem uniaxial em prensa marca VEB Thüringer Industriewerk, modelo 282 SP com pressão exercida de 40 toneladas.

Os RIC, após prensagem, podem ser observados na Figura 10.



**Figura 10. Resíduos dos isoladores cerâmicos após prensagem uniaxial de 40 toneladas.**

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

As fotografias com o aspecto macroscópico dos RIC, após cominuição, separados por faixas granulométricas, podem ser observadas no Anexo 1.

### 4.2.2 Determinação de Tamanho de Partícula – Análise Granulométrica

Foram realizadas análises granulométricas do concreto refratário sílico-aluminoso, dos RIC e de cada formulação estudada pelo método de peneiramento de acordo com o manual ASTM MNL 32-98 (ASTM, 1998).

O método consistiu no peneiramento a seco dos materiais no estado sólido, em peneirador eletromecânico, marca Pavitest, com capacidade para oito peneiras de 50,8 mm de altura x 203,2 mm de diâmetro. O peneiramento foi realizado durante 25 minutos utilizando-se as peneiras de número 4, 6, 9, 10, 16, 28, 48, 60, 65, 100 e 200 *tyler mesh*.

As análises granulométricas diferenciais para todas as formulações estudadas, podem ser visualizadas no Anexo 6 deste trabalho.

A distribuição do tamanho das partículas dos RIC passantes pela peneira de 200 *tyler mesh* foi realizada de acordo com a norma ASTM E2651-10 (ASTM, 2010), em um granulômetro por dispersão a *laser*, marca CILAS, modelo 1180 LIQUID, com faixa de análise de 0,04 a 2500  $\mu\text{m}$ .

A análise consistiu em dispersar aproximadamente 5 mg do pó em um banho em água, agitado e circulado por meio de uma célula de medida metálica. A célula é iluminada por um *laser* e a luz dispersa é focalizada em um detector multi-elementar. O sinal derivado do detector, de acordo com a intensidade da luz, é coletado e digitalizado por um processador de computador (ALLEN, 1990); (BRITO, 2005).

### 4.2.3 Caracterização Química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

Os RIC, após cominuição e o concreto refratário sílico-aluminoso foram caracterizados quimicamente por meio de Espectrometria por Fluorescência de Raios X de acordo com a norma ASTM C1605-04 (ASTM, 2009).

O equipamento utilizado foi um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios-X, marca Shimadzu, modelo XRF 1800.

A perda ao fogo (LOI) foi determinada de acordo com a norma ASTM D7348-08 (ASTM, 2008). A análise consistiu em calcinar aproximadamente 1 g de pó

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

passante em peneira 325 *tyler mesh* a 950 °C durante 1 hora em mufla, marca Quimis, modelo Q318.24.

A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C·min<sup>-1</sup>.

A perda ao fogo foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$LOI = \left[ \left( \frac{W - B}{W} \right) \right] \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

- *LOI* correspondente a perda ao fogo, em % (m/m);
- *W* correspondente a massa do pó antes da calcinação, em g;
- *B* correspondente a massa do pó após a calcinação, em g.

##### 4.2.4 Preparação dos Corpos de Prova das Formulações dos Grupos A, B, C e D

A preparação do concreto refratário e das formulações elaboradas foi realizada de acordo com uma adaptação da norma ASTM C862-02 (ASTM, 2002).

A Tabela 8 apresenta a composição estequiométrica das formulações estudadas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 8. Composição estequiométrica das formulações estudadas.

Formulação	Concreto refratário (% m/m)	Agregados de RIC – peneiras série tyler mesh (% m/m)								Água (% m/m)
		9	10	16	28	48	100	200	< 200	
		#	#	#	#	#	#	#	#	
A0 / B0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	12
A10 / B10	90	2	2	2	2	2	0	0	0	12
A20 / B20	80	4	4	4	4	4	0	0	0	12
A30 / B30	70	6	6	6	6	6	0	0	0	12
A40 / B40	60	8	8	8	8	8	0	0	0	12
A50 / B50	50	10	10	10	10	10	0	0	0	12
A60 / B60	40	12	12	12	12	12	0	0	0	12
C0 / D0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	12
C10 / D10	90	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	12
C20 / D20	80	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	12
C30 / D30	70	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	12
C40 / D40	60	5	5	5	5	5	5	5	5	12
C50 / D50	50	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	12
C60 / D60	40	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	12

Os componentes foram misturados em uma bateadeira planetária, marca G. Paniz, modelo 12 LTS (BP.15) com a quantidade de água de amassamento, 12 % em massa, informada pelo fabricante do concreto refratário.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma NBR 13.279-05 (ABNT, 2005), na qual foram produzidos 06 corpos de prova para cada formulação, em moldes prismáticos, com as dimensões de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>. O adensamento do concreto nos moldes foi realizado com 30 quedas em mesa de adensamento, marca VEB Thüringer Industriewerk.

Após o adensamento, os moldes contendo as respectivas composições, conforme descrito na Tabela 8, foram colocados em uma capela de fluxo contínuo, fechada e cobertos com folhas de jornal molhadas para evitar o ressecamento superficial. Os corpos de prova permaneceram durante 24 horas na capela para o endurecimento do concreto refratário.

Posteriormente, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados em estufa elétrica, marca Tecnolab, modelo N480D, pré-aquecida a 65 °C e aquecidos a uma taxa de aquecimento de 0,47 °C·min<sup>-1</sup> até a temperatura de patamar de 110 °C, na qual permaneceram por 15 horas com resfriamento lento dentro da estufa. Neste estágio, as

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

medidas de altura, largura e comprimento dos corpos de prova foram determinadas com o auxílio de um paquímetro digital, e sua massa com uma balança semi-analítica, marca Marte, modelo AS 5500, com precisão de 0,1 g.

Após a operação de secagem, os corpos de prova seguiram a seguinte sequência:

- 03 corpos de prova de cada formulação dos Grupos A e C foram encaminhados para os ensaios de resistência mecânica sem cura úmida;
- 03 corpos de prova de cada formulação dos Grupos A e C foram encaminhados para a Cura Úmida por 28 dias;
- 06 corpos de prova de cada formulação dos Grupos B e D foram encaminhados para a operação de queima, descrito no item 4.2.5. Após, 03 corpos de prova de cada formulação foram encaminhados para os ensaios de resistência mecânica sem Cura Úmida e os 03 restantes, encaminhados para a cura úmida por 28 dias.

A cura úmida foi realizada de acordo com a norma NBR 9.479-94 (ABNT, 1994) em tanques de Cura Úmida a  $23 \pm 2$  °C durante 28 dias.

As dimensões e massas de todos os corpos de prova podem ser observadas nos Anexos 2, 3, 4 e 5 ao final deste trabalho.

##### **4.2.5 Queima dos Corpos de Prova das Formulações dos Grupos B e D**

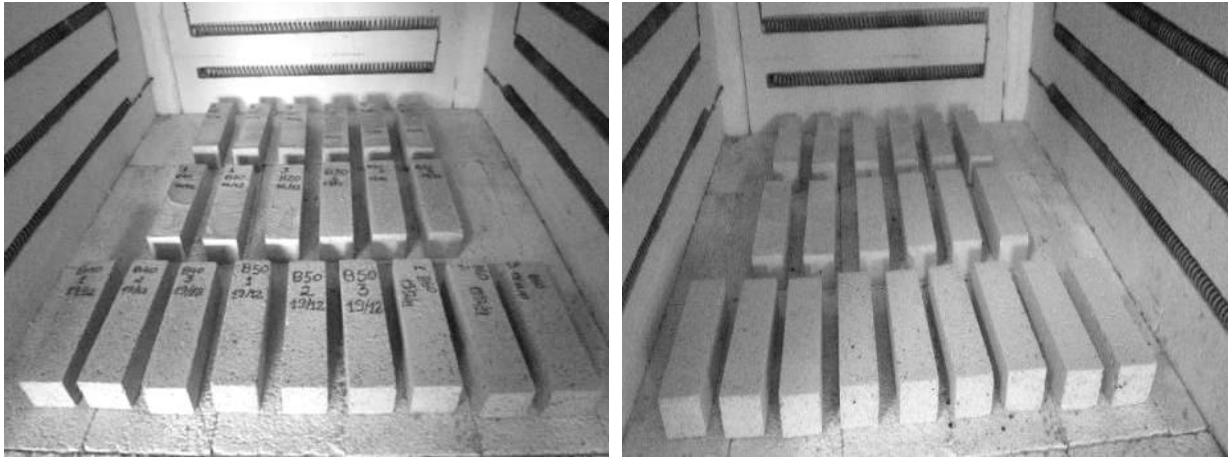
Com o objetivo de avaliar a influência da operação de queima nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas dos corpos de prova dos Grupos B e D, em comparação aos corpos de prova não submetidos à operação de queima, Grupos A e C, foi desenvolvido um ensaio de queima específico para materiais refratários de acordo com a norma ASTM C865-02 (ASTM, 2002).

Os corpos de prova dos Grupos B e D, após conformados de acordo com item 4.2.4, foram acondicionados em fornos elétricos de escala laboratorial e submetidos a uma taxa de aquecimento de  $6,5$  °C·min<sup>-1</sup> até a temperatura de patamar de 1100 °C, onde permaneceram durante 5 horas, com posterior resfriamento lento dentro do forno.

Após a operação de queima, foram tomadas as medidas de altura, largura e comprimento dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro digital, e sua massa com uma balança semi-analítica, marca Marte, modelo AS 5500, com precisão de 0,1 g.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 11 ilustra a disposição dos corpos de prova dentro do forno antes e depois do processo de queima.



(a)

(b)

**Figura 11. Corpos de prova (a) antes e (b) após o processo de queima.**

#### 4.2.6 Determinação da Densidade Aparente no Estado Endurecido

A densidade aparente dos corpos de prova no estado endurecido foi determinada de acordo com a norma NBR 13.280-05 (ABNT, 2005). Após a secagem dos corpos de prova durante 24 horas em estufa a 110 °C, foram realizadas as medições de altura, largura e comprimento com o auxílio de um paquímetro digital. A massa de cada corpo de prova foi determinada utilizando-se uma balança semi-analítica marca Marte, modelo AS 5500C, com precisão de 0,1 g.

A densidade aparente foi calculada a partir da Equação 4.

$$\rho_{\max} = \frac{m}{v} 1000 \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo:

- $\rho_{\max}$  correspondente a densidade aparente no estado endurecido, em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- $m$  correspondente a massa do corpo de prova, em g;
- $v$  correspondente ao volume do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ .



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.2.7 Determinação de Absorção de Água, Volume de Poros Abertos e Porosidade Aparente

A determinação da absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma ASTM C373-06 (ASTM, 2006).

Os corpos de prova foram secos em estufa a 110 °C, até massa constante, resfriados em dessecador e, em seguida, foram determinadas suas massas ( $D$ ).

Após resfriados, os corpos de prova foram fervidos em água destilada por 2 horas, em um equipamento de banho termostático com 6 bocas, garantindo que todas as amostras estivessem cobertas por água durante todo o período do ensaio. Decorridas às 2 horas, os corpos de prova permaneceram submersos durante 24 horas.

Após a impregnação em água durante 24 horas, foram determinadas as massas ( $W$ ) de cada amostra. As massas foram determinadas utilizando-se o Princípio de Arquimedes, colocando-se as amostras em um cesto metálico suspenso em água destilada e preso nos braços laterais da balança. Foi utilizada uma balança semi-analítica, marca Marte, modelo AS 5500, com precisão de 0,1 g.

A Figura 12 ilustra o acessório construído para a medição das massas ( $W$ ) de cada amostra.

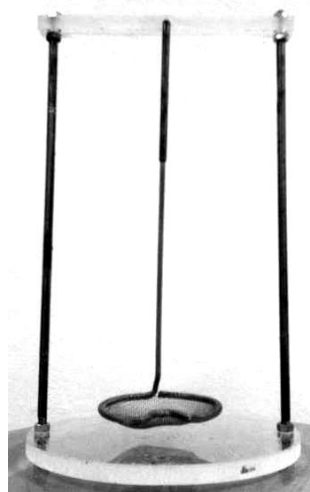


Figura 12. Acessório construído para a medição das massas ( $W$ ).

A próxima etapa foi determinar a massa saturada ( $S$ ) de cada corpo de prova, secando cuidadosamente a superfície dos mesmos com o auxílio de um pano levemente úmido, para a retirada do excesso de água superficial.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

O volume exterior ( $V$ ) de cada corpo de prova foi calculado de acordo com a Equação 5 para posterior utilização no cálculo de porosidade aparente.

$$V = W - S \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo:

- $V$  correspondente ao volume exterior, em  $\text{cm}^3$ ;
- $W$  correspondente à massa saturada, em g;
- $S$  correspondente à massa suspensa em água, em g;

A porosidade aparente ( $P$ ) de cada corpo de prova foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$P = \left[ \left( \frac{W - D}{V} \right) \right] \times 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

- $P$  correspondente à porosidade aparente, em %;
- $W$  correspondente à massa saturada, em g;
- $D$  correspondente à massa a seco, em g;
- $V$  correspondente ao volume exterior, em  $\text{cm}^3$ .

O volume dos poros abertos ( $V_{PA}$ ) de cada corpo de prova foi calculado de acordo com a Equação 7.

$$V_{PA} = W - D \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo:

- $V_{PA}$  correspondente ao volume dos poros abertos, em  $\text{cm}^3$ ;
- $W$  correspondente à massa saturada, em g;
- $D$  correspondente à massa a seco, em g.

A absorção de água ( $A$ ) de cada corpo de prova foi calculada de acordo com a Equação 8.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

$$A = \left[ \left( \frac{W - D}{D} \right) \right] \times 100 \quad \text{Equação (8)}$$

Sendo:

- $A$  correspondente à absorção de água, em %;
- $W$  correspondente à massa saturada, em g;
- $D$  correspondente à massa a seco, em g;

#### 4.2.8 Determinação da Resistência à Tração na Flexão e à Compressão a Temperatura Ambiente (23 °C)

Os corpos de prova após desmoldagem sem Cura Úmida, e, 28 dias de Cura Úmida, foram submetidos aos testes de resistência à tração na flexão e à compressão à temperatura de 23 °C, de acordo com a norma ASTM C133-97 (ASTM, 1997), adaptada no Brasil pela norma NBR 13.279-05 (ABNT, 2005).

Os testes foram realizados em uma máquina para ensaios de resistência à tração na flexão e de compressão marca EMIC, modelo PC200.

A resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação 9.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad \text{Equação (9)}$$

Sendo:

- $R_f$  correspondente à resistência à tração na flexão, em MPa;
- $F_f$  correspondente à carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;
- $L$  correspondente à distância entre os suportes, em mm.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a Equação 10.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Equação (10)}$$

Sendo:

- $R_c$  correspondente à resistência à compressão, em MPa;
- $F_c$  correspondente à carga máxima aplicada, em N;
- 1600 correspondente à área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 x 40 mm, em mm<sup>2</sup>.

##### 4.2.9 Resistência à Compressão Diametral sob Temperatura Elevada (500 °C)

O ensaio de resistência à compressão sob temperatura elevada foi realizado de acordo com uma adaptação a norma ASTM C16-03 (ASTM, 2003). O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaios mecânicos, marca Shimadzu, modelo AG-X, adaptada com um dispositivo de resistências elétricas (forno) específico para ensaios sob temperaturas elevadas.

A temperatura utilizada para a realização do ensaio foi de 500 °C e a taxa de aquecimento de 16 °C·min<sup>-1</sup>.

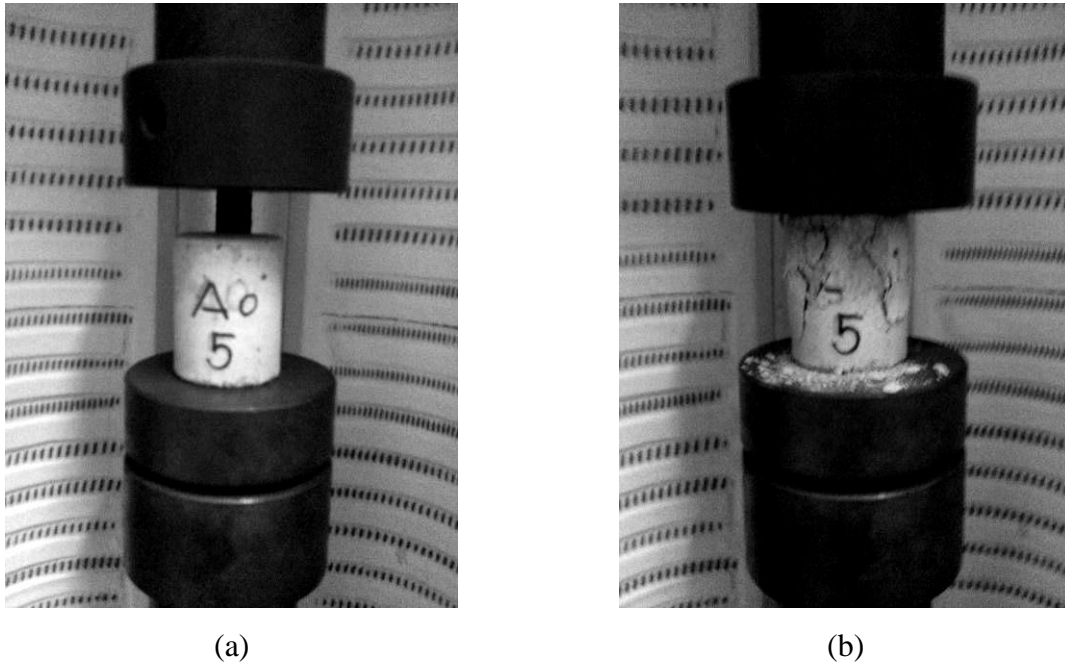
Para a realização dos ensaios de resistência à compressão sob temperatura elevada, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 25 mm. A técnica de concretagem utilizada foi estritamente manual.

Considerando que o equipamento, o formato do corpo de prova e a técnica de concretagem utilizados foram diferentes das adotadas nos testes mecânicos descritos anteriormente, foram realizados, também, ensaios de resistência à compressão diametral à temperatura ambiente (23 °C).

A Figura 13 ilustra a disposição do corpo de prova de uma das formulações no equipamento antes e após a realização do ensaio de resistência à compressão diametral.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---



**Figura 13.** Disposição do corpo de prova cilíndrico de uma das formulações no equipamento antes (a) e após (b) a realização do ensaio.

##### 4.2.10 Microscopia Óptica (MO)

A verificação da distribuição dos RIC no concreto refratário em escala microscópica foi realizada em um microscópio óptico marca Olympus, modelo SZ61, com aumentos de 12 a 90 vezes. As imagens foram geradas com aumento de 13 vezes e tratadas automaticamente pelo *software* do equipamento.

##### 4.2.11 Condutividade Térmica

A condutividade térmica dos corpos de prova das formulações dos Grupos A, B, C e D foi determinada de acordo com a norma ASTM E1225-09 (ASTM, 2009). Este método, conhecido como método do fluxo quente, utiliza o processo de condução de calor unidirecional, em regime estacionário, em um sistema de paredes compostas ou sanduíche, e utiliza uma fonte quente, que alimenta referências acopladas à amostra a ser testada, conforme ilustrado na Figura 14.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

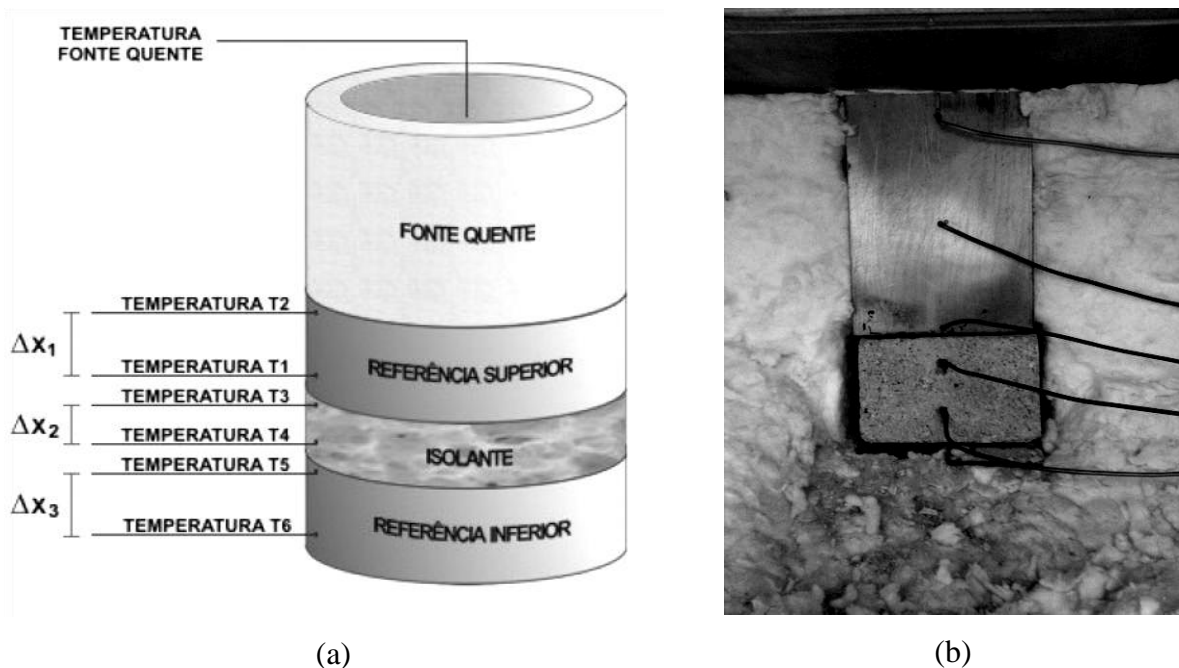


Figura 14. (a) Esquemática do aparato experimental adotado para medição da condutividade térmica (POKORNY, 2006) e (b) fotografia de uma das amostras no aparato com os termopares acoplados.

Para o cálculo da condutividade térmica, foi utilizada a equação fundamental de Fourier, que determina a condutividade térmica para um sistema de paredes compostas, Equação 11 e, resumidamente representada pela Equação 12. O emprego destas equações reduz a propagação de erros em medidas experimentais, visto que determina diretamente o valor da condutividade térmica, sem a necessidade da determinação de outras propriedades térmicas, como o calor específico e a difusividade térmica dos materiais (POKORNY, 2006).

$$Q = \frac{k_1(T_1 - T_2)}{\Delta X_1} = \frac{k_2(T_3 - T_4)}{\Delta X_2} = \frac{k_3(T_5 - T_6)}{\Delta X_3} \quad \text{Equação (11)}$$

$$k_2 = \frac{k_1(T_1 - T_2)\Delta X_2}{(T_3 - T_4)\Delta X_1} \quad \text{Equação (12)}$$

Sendo:

- $Q$  correspondente ao fluxo de calor unidirecional, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;
- $k_1$  correspondente à condutividade térmica do material referência 1, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;
- $k_2$  correspondente à condutividade térmica do material referência 2, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

- $T_{1, 2, 3, 4, 5, 6}$  correspondentes à temperatura da interface dos termopares  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ , respectivamente, em K;
- $\Delta X_1$  e  $\Delta X_3$  correspondentes à distância dos termopares no material usado como referência, em m;
- $\Delta X_2$  correspondente à distância dos termopares no material testado, em m.

O cálculo da condutividade térmica foi realizado a partir da leitura das temperaturas obtidas nos seis termopares ( $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  e  $T_6$ ) que, aplicadas à Equação 12, deram origem a dois valores de condutividade térmica para cada amostra testada, o  $k_{superior}$  (Equação 13) e o  $k_{inferior}$  (Equação 14) (POKORNY, 2006).

$$k_{superior} = \frac{k_1(T_1 - T_2)\Delta X_2}{(T_3 - T_4)\Delta X_1} \quad \text{Equação (13)}$$

$$k_{inferior} = \frac{k_3(T_5 - T_6)\Delta X_2}{(T_3 - T_4)\Delta X_3} \quad \text{Equação (14)}$$

Para se constatar que a condutividade térmica do isolante padrão foi elevada para o  $k_{superior}$ , fato este decorrente de que a metade superior do sistema está sujeita a outros modos de transferência de calor que não somente a condução (como a convecção, por exemplo), o  $k_{inferior}$  foi adotado como o valor de condutividade medida. Desta forma, evitaram-se maiores erros nas simplificações adotadas (POKORNY, 2006).

Para a realização dos testes de condutividade térmica foi necessária a conformação de corpos de prova com dimensões de 70 x 70 x 40 mm<sup>3</sup>. A técnica de concretagem foi estritamente manual.

Cada um dos termopares foi ligado ao *software* FIELDCHART 1.73 NOVUS, programado para realizar aquisições de temperaturas a cada 5 segundos, durante toda a realização dos testes de condutividade térmica, com duração aproximada de 48 horas para cada formulação estudada.

Ao final do teste, foram obtidas aproximadamente 35 mil medidas de temperatura para cada termopar, que com o auxílio do *software* de cálculo numérico MATLAB puderam ser utilizadas para o cálculo da condutividade térmica, evidenciando o comportamento térmico de cada formulação estudada durante todas as temperaturas medidas pelos termopares no intervalo de 100 a 700 °C.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

O comportamento térmico de cada formulação estudada pelo método de cálculo numérico pode ser observado no Anexo 7 deste trabalho.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos no presente trabalho. A nomenclatura e significado de cada formulação estudada podem ser visualizados no item 4.2, Tabela 7.

### 5.1 Propriedades Químicas

#### 5.1.1 Análises da Composição Química por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

##### 5.1.1.1 Resíduos dos Isoladores Elétricos Cerâmicos (RIC)

A Tabela 9 apresenta a caracterização química dos RIC, realizada por Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX), em porcentagem mássica de óxidos.

**Tabela 9. Composição química por Espectrometria por Fluorescência de Raios X dos RIC (% mássica de óxidos).**

Óxidos	Teor (% m/m)
SiO <sub>2</sub>	75,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,86
K <sub>2</sub> O	4,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03
CaO	0,79
Na <sub>2</sub> O	0,39
TiO <sub>2</sub>	0,27
MgO	0,18
PbO	0,11
MnO	0,08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07
Rb <sub>2</sub> O	0,05
ZnO	0,03
ZrO <sub>2</sub>	0,02
CuO	0,01
SrO	0,01
Perda ao Fogo (LOI)	0,44
Total	99,85

A composição química dos RIC pela análise de FRX apresentou elevados valores de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), 75,09 % seguido de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 16,86 % sendo os valores esperados para este tipo de material, tendo em vista as matérias-primas utilizadas para sua fabricação (MAMEDE FILHO, 1994).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor obtido para a perda ao fogo (LOI), aparentemente baixo, também se mostrou condizente, por tratar-se de um material inorgânico, já sinterizado no momento de sua fabricação.

### 5.1.1.2 Concreto Refratário Sílico-Aluminoso

A Tabela 10 apresenta a caracterização química do concreto refratário sílico-aluminoso, realizada por Espectrometria por Fluorescência de Raios X, dada em % mássica de óxidos.

**Tabela 10. Composição química por Espectrometria por Fluorescência de Raios X do concreto refratário sílico-aluminoso (% mássica de óxidos).**

<b>Óxidos</b>	<b>Teor (% m/m)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,41
SiO <sub>2</sub>	48,17
CaO	7,56
TiO <sub>2</sub>	2,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,26
K <sub>2</sub> O	0,66
SO <sub>3</sub>	0,16
MgO	0,15
ZrO <sub>2</sub>	0,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12
SrO	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12
MnO	0,02
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01
NiO	0,01
Perda ao Fogo (LOI)	3,98
Total	99,98

A composição química do concreto refratário comercial pela análise de FRX também se mostrou condizente, por tratar-se de um concreto sílico-aluminoso, sendo o SiO<sub>2</sub> e a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> os óxidos presentes em maior proporção 48,17 % e 35,41 %, respectivamente.

Os valores obtidos pela análise de FRX mostraram-se similares aos valores da composição química informada pelo fabricante do concreto refratário, os quais são apresentados na Tabela 11.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Tabela 11. Composição química do concreto refratário sílico-aluminoso de acordo com as informações do fabricante (em óxidos).**

<b>Óxidos</b>	<b>Teor (%)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46,6
SiO <sub>2</sub>	42,9
CaO	6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2
Total	96,7

De acordo com Cannio (2008), as concentrações de SiO<sub>2</sub> e de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> classificam este tipo de concreto refratário como ácido.

Cabe ressaltar, que a concentração de óxido de cálcio identificada, também permite a classificação deste tipo de concreto refratário como convencional (KRIETZ, 2004).

A presença do CaO está intimamente ligada às propriedades mecânicas finais de concretos hidráulicos, sendo este o componente químico responsável pelas reações de hidratação durante a Cura Úmida que, por sua vez, dão origem a diferentes fases mineralógicas oriundas da hidratação (KRIETZ, 2004).

O CaO também influencia na resistência do material a altas temperaturas, conforme mencionado anteriormente, sendo desejável sua mínima presença na composição química dos concretos refratários (MONTGOMERY, 2003); (SCRIVENER e CAPMAS, 2003); (WANG e XU, 2012).

De acordo com Krietz (2004), os concretos refratários não necessitam de cura úmida, uma vez que as concentrações de CaO são consideravelmente inferiores ao concreto tipo *Portland*, porém visto que o concreto refratário adotado para a realização deste trabalho está classificado como convencional, ou seja, com as maiores concentrações de CaO aceitas para um concreto refratário, o estudo da influência da cura úmida foi proposto.

Quando comparadas as composições químicas dos RIC e do concreto refratário sílico-aluminoso, verificou-se que são quimicamente similares, favorecendo o potencial de incorporação de um no outro para a obtenção de novos artefatos cerâmicos.

A maioria dos trabalhos descritos na literatura, apresentam a incorporação dos RIC em concreto com cimento tipo *Portland*, cujo teor de CaO é de 60 – 70 %, enquanto que no concreto refratário utilizado neste trabalho, o teor é de 7,56 % (PORTELLA *et al.*, 2006); (CAMPOS, 2011); (SENTHAMARAI e GOBINATH, 2011).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.2 Propriedades Físicas

#### 5.2.1 Distribuição Granulométrica Diferencial (DGD)

##### 5.2.1.1 Resíduos de Isoladores Cerâmicos (RIC)

A Figura 15 ilustra a distribuição granulométrica diferencial (DGD) dos RIC.

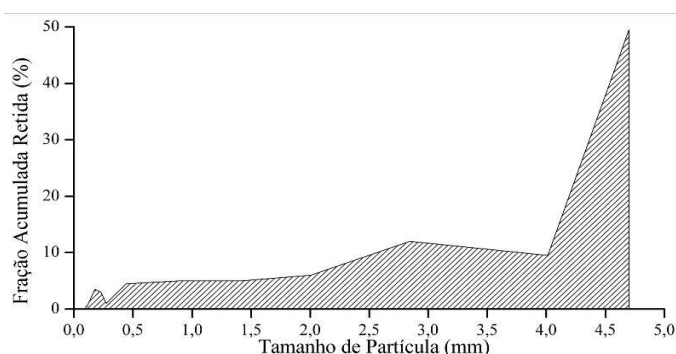


Figura 15. Distribuição granulométrica diferencial dos Resíduos dos Isoladores Elétricos Cerâmicos.

##### 5.2.1.2 Concreto Refratário Sílico-Aluminoso

A Figura 16 ilustra a DGD do concreto refratário sílico-aluminoso sem a incorporação de RIC. Esta DGD também se refere às formulações controle de cada Grupo estudado, isto é, A0, B0, C0 e D0.

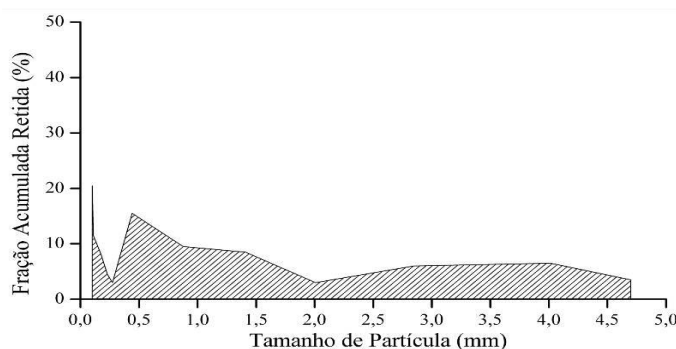
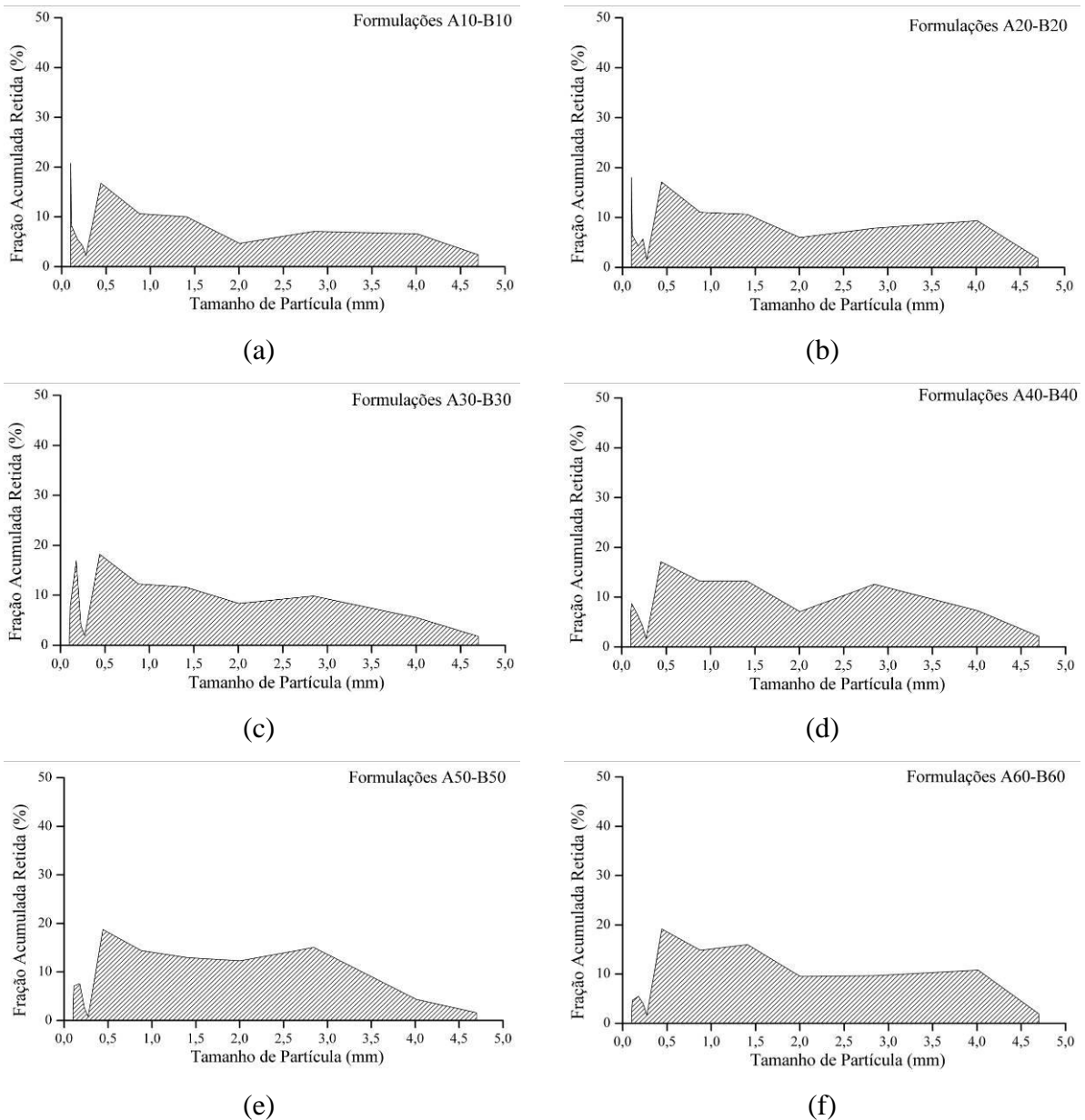


Figura 16. Distribuição granulométrica diferencial do concreto refratário sílico-aluminoso, também atribuída às formulações controle, A0, B0, C0 e D0.

##### 5.2.1.3 Formulações dos Grupos A e B

A Figura 17 ilustra as DGDs das formulações dos Grupos A e B.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

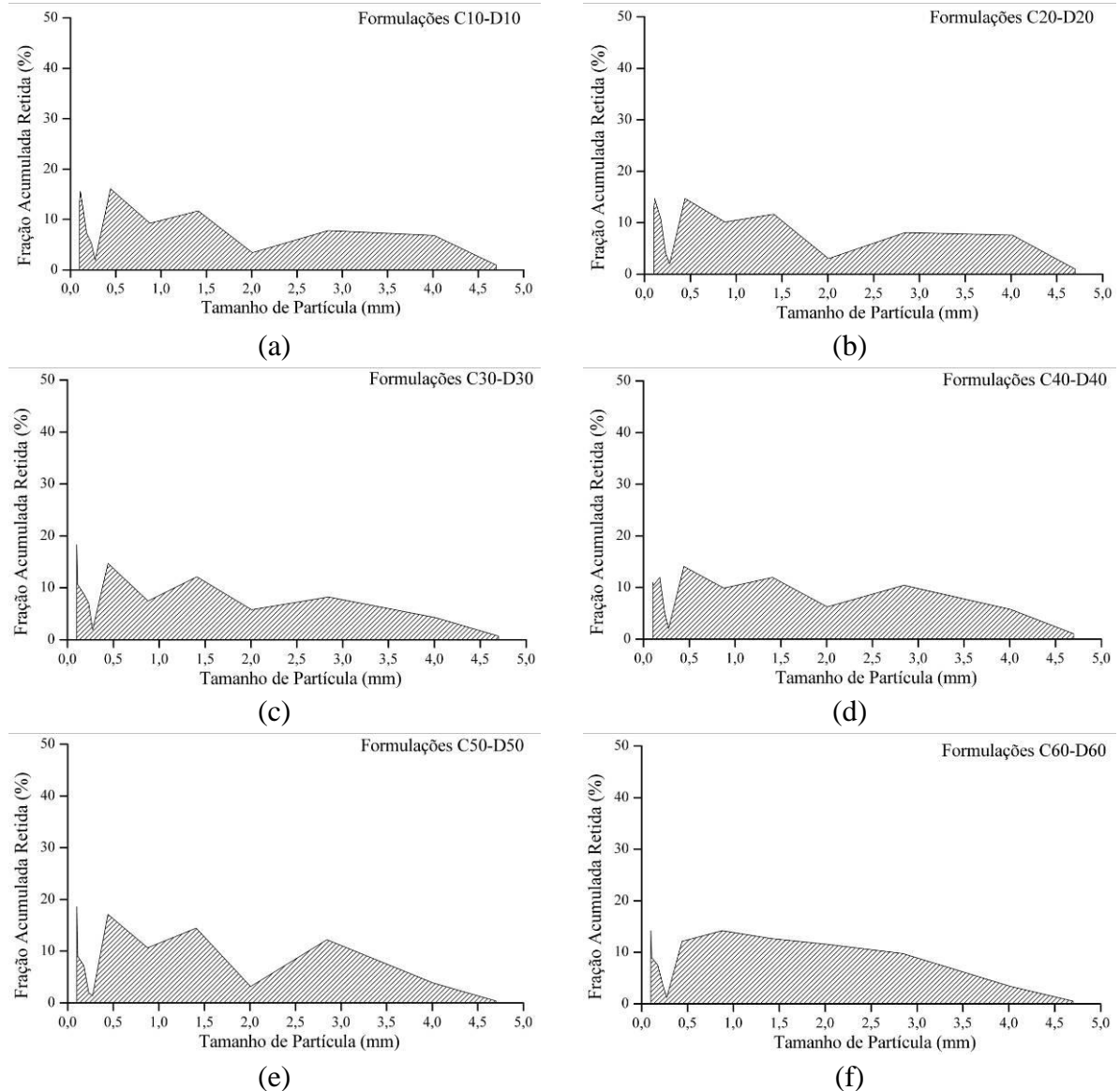


**Figura 17. DGD das formulações dos Grupos A e B, sendo (a) A10-B10, (b) A20-B20, (c) A30-B30, (d) A40-B40, (e), A50-B50 e (f) A60-B60.**

#### 5.2.1.4 Formulações dos Grupos C e D

A Figura 18 ilustra as DGDs das formulações dos Grupos C e D.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 18.** DGD das formulações dos Grupos C e D, sendo (a) C10-D10, (b) C20-D20, (c) C30-D30, (d) C40-D40, (e) C50-D50 e (f) C60-D60.

A DGD dos RIC sugere que, após a operação de cominuição dos mesmos, aproximadamente 50 % dos resíduos obtidos possuem um tamanho de partícula de 4,75 mm, retidos na peneira de número 4 *tyler mesh*, encontrando-se, portanto, no limite da classificação de agregado graúdo e miúdo, como previamente discutido (ASTM C33, 2003).

Verificou-se que, 12 % da fração acumulada retida apresentaram tamanho de partícula de 2,8 mm. As demais frações apresentaram pequenas flutuações, sendo os menores tamanhos de partícula de 0,11 e 0,10 mm correspondentes a apenas 0,5 % da fração retida.

Estas informações são relevantes para a pesquisa envolvendo a incorporação de RIC como matéria-prima para a produção de materiais diferenciados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Primeiramente, verificou-se que, a partir da operação de cominuição utilizada neste trabalho, as melhores opções de incorporação dos RIC seriam aquelas para a produção de artefatos que utilizassem os maiores tamanhos de partícula como agregados. Neste caso, a incorporação dos RIC para a produção de concreto com cimento *Portland* parecia a melhor opção a se estudar. No entanto, verificando-se a existência de literatura incorporando os RIC para esta finalidade, propôs-se nova aplicação, utilizando agregados com menores tamanhos de partícula para a produção de concreto refratário, com a intenção de se utilizar a maior faixa granulométrica possível.

Cabe ressaltar que, quando se estuda a viabilidade da incorporação de resíduos para novas aplicações, a maior quantidade de resíduo utilizada, com o menor gasto necessário para sua transformação em novo material, apresenta-se como a melhor e ambientalmente correta alternativa.

Desta forma, dependendo da aplicação sugerida para a incorporação de RIC como matéria-prima para a produção de novos materiais, mais de uma operação de cominuição faz-se necessária, visando obter-se tamanhos de partícula específicos para a dada aplicação.

A DGD do concreto refratário apresentou diferenças significativas, quando comparada com a DGD dos RIC.

Verificou-se que, cerca de 20,5 % da fração acumulada retida possui tamanho de partícula de 0,10 mm, sendo esta a maior faixa granulométrica encontrada. O segundo maior pico observado, refere-se a 15,5 % da fração retida, com tamanho de partícula de 0,44 mm, aproximadamente.

Na sequência, foi observada uma diminuição na fração acumulada, até o valor mínimo encontrado, de 3 % para partículas com tamanho aproximado de 2 mm. A partir deste ponto, as frações acumuladas elevaram-se com pequenas flutuações, até o maior tamanho de partícula encontrado, de 4,75 mm, correspondendo a 3,5 % do total da fração acumulada retida.

Quando observadas as DGDs das formulações dos Grupos A e B, Figura 17, verificou-se, de forma geral, uma tendência decrescente da fração acumulada retida das partículas com menores tamanhos, com o aumento do teor de RIC incorporado.

Foi possível observar, também, que o pico referente a partículas com aproximadamente 0,5 mm manteve-se praticamente constante, em 16,5 % do total da fração acumulada, demonstrando que a incorporação de RIC não afetou de forma significativa, esta fração em particular.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As maiores modificações puderam ser observadas nas regiões de tamanho de partícula variando de 1 a 3 mm. Nesta região, verificou-se maiores frações acumuladas com o aumento do teor de RIC incorporado.

As DGDs referentes às formulações dos Grupos C e D, Figura 18, apresentaram menor uniformidade, quando comparadas às formulações dos Grupos A e B.

De forma geral, verificou-se um pico inicial de partículas finas para todas as formulações estudadas.

Observou-se uma tendência de maior uniformidade nas frações acumuladas com tamanho de partícula variando entre 2 e 3 mm, com o aumento do teor de RIC incorporado, assim como uma diminuição na fração retida das partículas com maiores dimensões.

### 5.2.2 Análise do Tamanho de Partícula por Dispersão a Laser

#### 5.2.2.1 Análise do Tamanho de Partícula dos Resíduos de Isoladores Cerâmicos Passantes pela Peneira de 200 tyler mesh

A Figura 19 e a Tabela 12 apresentam os resultados da distribuição granulométrica por dispersão a laser dos RIC passantes pela peneira de 200 tyler mesh.

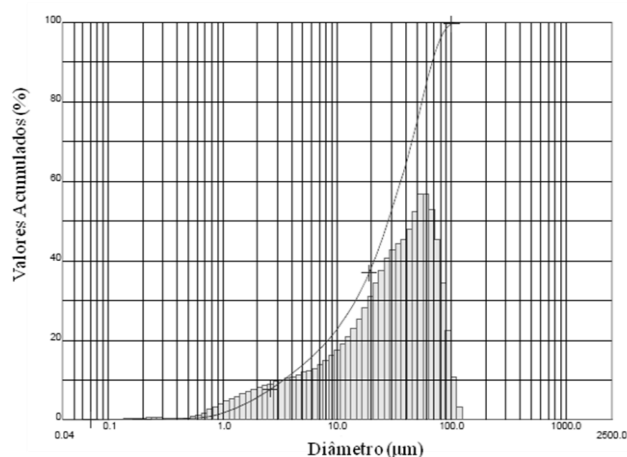


Figura 19. Distribuição granulométrica por dispersão a laser dos RIC.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Tabela 12. Valores representativos da análise granulométrica por dispersão a laser dos RIC passantes pela peneira de 200 tyler mesh.**

<b>Material</b>	<b>D<sub>10</sub></b> <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>50</sub></b> <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>90</sub></b> <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>médio</sub></b> <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>
RIC passante pela peneira de 200 tyler mesh	3,38	27,94	67,88	32,43

Os resultados aqui observados mostram o tamanho mínimo de partícula obtido por meio da operação de cominuição adotada, sendo um referencial para futuras aplicações dos RIC, nas quais o tamanho de partícula necessária seja na ordem de grandeza dos valores apresentados.

Cabe-se destacar, que a distribuição granulométrica das matérias-primas está correlata com as propriedades finais dos refratários, como propriedades mecânicas e térmicas. Um aumento de partículas finas propicia um aumento na taxa de sinterização do material o que ocasiona, na maioria dos casos, em um aumento nos valores das propriedades mecânicas e no aumento da condutividade térmica. Já partículas mais grosseiras, apresentam comportamentos opostos (GUALTIERI *et al.*, 2010).

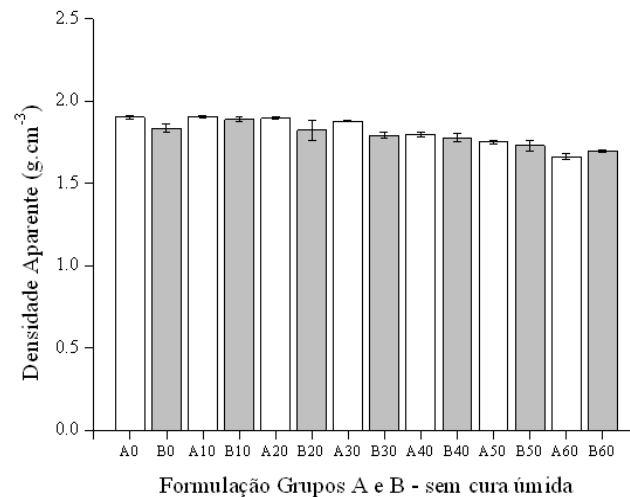
### 5.2.3 Densidade Aparente dos Corpos de Prova no Estado Endurecido

Embora o cálculo da densidade aparente no estado endurecido segundo a norma NBR 13.280/05 (ABNT, 2005) seja dado em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , para a apresentação dos resultados foi realizada a conversão dos valores para  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  com o intuito de facilitar a compreensão dos resultados.

#### 5.2.3.1 Formulações dos Grupos A e B

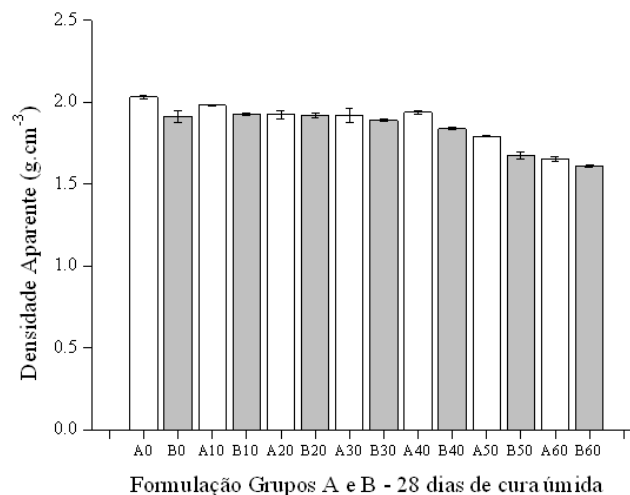
A Figura 20 ilustra a densidade aparente dos corpos de prova das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 20. Densidade aparente das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida.**

A Figura 21 ilustra a densidade aparente dos corpos de prova das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida.



**Figura 21. Densidade aparente das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida.**

Como pode ser observado, os corpos de prova das formulações dos Grupos A e B sem Cura Úmida apresentaram pequenas flutuações nos valores de densidade aparente, embora foram evidenciados menores valores de densidade aparente nas formulações do Grupo B quando comparadas ao Grupo A.

Para o Grupo A, os maiores valores,  $1,90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foram encontrados para os corpos de prova das formulações A0, A10 e A20, desconsiderando-se o desvio padrão. O menor valor,  $1,66 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foi observado para a formulação A60.

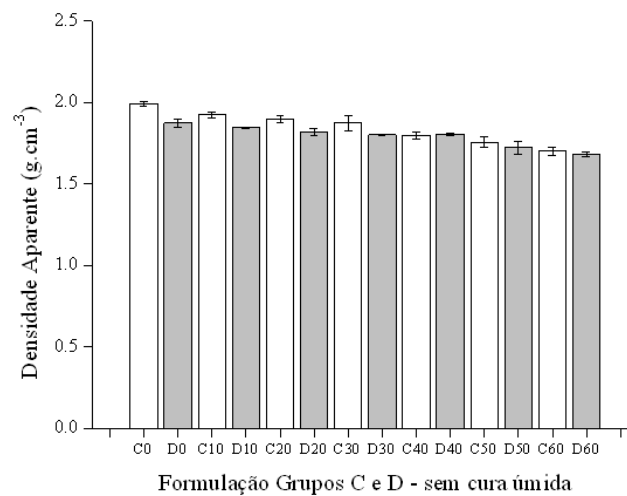
Em relação ao Grupo B, o maior valor de densidade aparente,  $1,89 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foi observado para a formulação B10. O menor valor acompanhou a tendência do Grupo A, tendo a formulação B60 apresentado densidade aparente de  $1,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As diferenças na densidade aparente dos corpos de prova submetidos a 28 dias de Cura Úmida foram mais pronunciadas. A maior densidade no Grupo A,  $2,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foi verificada para a formulação A0 e a menor,  $1,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , para a formulação A60. Já no Grupo B, o maior valor,  $1,93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foi obtido para B10 e o menor,  $1,61 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , para B60.

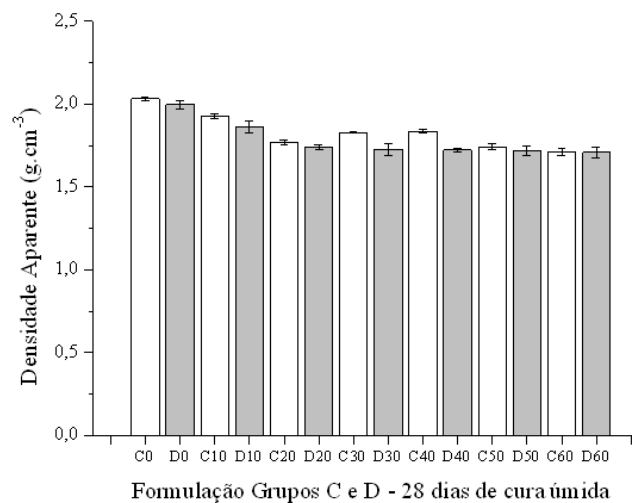
### 5.2.3.2 Formulações dos Grupos C e D

A Figura 22 ilustra a densidade aparente dos corpos de prova das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida.



**Figura 22. Densidade aparente das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida.**

A Figura 23 ilustra a densidade aparente dos corpos de prova das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida.



**Figura 23. Densidade aparente das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Quando observadas as densidades aparentes para as formulações dos Grupos C e D sem Cura Úmida, verificou-se a mesma tendência das formulações dos Grupos A e B, com uma diminuição da densidade aparente com o aumento do teor de RIC incorporado. A formulação C0 apresentou maior densidade aparente,  $1,99 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , mesmo valor encontrado para a formulação A0, uma vez que ambas as formulações são iguais, sem a incorporação de RIC.

A menor densidade aparente para o Grupo C,  $1,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foi encontrada para a formulação C60.

Para o Grupo D, a formulação D0 apresentou a maior densidade aparente,  $1,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , similar a B0, confirmando se tratar da densidade aparente da formulação controle. A menor densidade aparente para o Grupo D,  $1,68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , foi para a formulação D60.

Para as formulações dos Grupos C e D submetidos a 28 dias de Cura Úmida, as tendências foram muito semelhantes às tendências já observadas.

Em geral, ocorreu um aumento nas densidades dos corpos de prova submetidos a 28 dias de Cura Úmida quando comparados às formulações sem cura.

As formulações C0 e D0 apresentaram densidades de  $2,03$  e  $2,00 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectivamente.

Ocorreu a tendência da diminuição da densidade aparente com o aumento do teor de RIC, porém os valores praticamente se estabilizaram a partir de 30% de RIC incorporado.

Os menores valores de densidade aparente foram encontrados para as formulações C60 e D60,  $1,71$  e  $1,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectivamente.

Os poros no material, sendo abertos ou fechados, geralmente são formados e/ou eliminados durante a operação de queima. Dessa forma, a porosidade do material após a queima influencia na diminuição da densidade aparente dos corpos de prova (QUESADA *et al.*, 2011).

Para materiais refratários, a diminuição da densidade aparente após a operação de queima é um fenômeno frequentemente observado (REED, 1995).

De forma geral, observou-se uma tendência decrescente na densidade aparente dos corpos de prova para todos os Grupos estudados sem cura e os submetidos a 28 dias de Cura Úmida com o aumento do teor de RIC incorporado.

Pode-se observar, também, que a Cura Úmida possibilitou o aumento da densidade aparente para as formulações com menor teor de RIC (maior teor de concreto refratário) e a diminuição da densidade aparente para formulações com maior teor de RIC (menor teor de

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

concreto refratário). A tendência observada era esperada, uma vez que a diminuição da densidade aparente está relacionada com o aumento dos espaços vazios e aumento da porosidade no material após conformação. Com o aumento da quantidade de resíduo incorporado ocorre uma diminuição na superfície de contato das partículas de resíduo com o concreto refratário, o que provoca um aumento nos espaços vazios no material e consequente redução na densidade aparente (MUNZ e FETT, 2001); (AKIYOCHI *et al.*, 2003); (DONDI *et al.*, 2003); (GARCÍA-TEN *et al.*, 2010).

A leve diminuição da densidade aparente das diversas formulações estudadas indica que, o concreto refratário sílico-aluminoso tem, provavelmente, uma adequada relação entre as partículas finas e grosseiras e a adição de RIC com partículas mais grosseiras pode prejudicar o empacotamento das partículas do concreto refratário (VIEIRA *et al.*, 2009).

A densidade é uma propriedade correlata à condutividade térmica, porém variações na condutividade térmica de materiais cerâmicos com a mesma densidade devem ser consideradas (DONDI *et al.*, 2004).

Mudanças na densidade aparente podem afetar a condutividade térmica do material, especialmente quando observados elevados valores de perda ao fogo (LOI) (GARCÍA-TEN *et al.*, 2010).

De forma genérica, uma redução da densidade, reduz a condutividade térmica e as propriedades mecânicas do material. A redução da porosidade de um material cerâmico pode, também, ser um efeito de uma operação de queima (GUALTIERI *et al.*, 2010).

De acordo com Dondi e colaboradores (2004) e Gualtieri e colaboradores (2010), a densidade aparente é retratada como o maior fator que regula a condutividade térmica, considerando que, outros fatores como a porosidade também influenciam na densidade aparente dos materiais.

A distribuição das partículas tem efeito na densidade aparente do artefato a verde, uma vez que depende da forma como as partículas estão empacotadas. Um melhor empacotamento das partículas é obtido quando os sólidos particulados finos preenchem os espaços vazios entre as partículas maiores (DINGER e FUNK, 1992); (HALL e HOLFF, 2002);

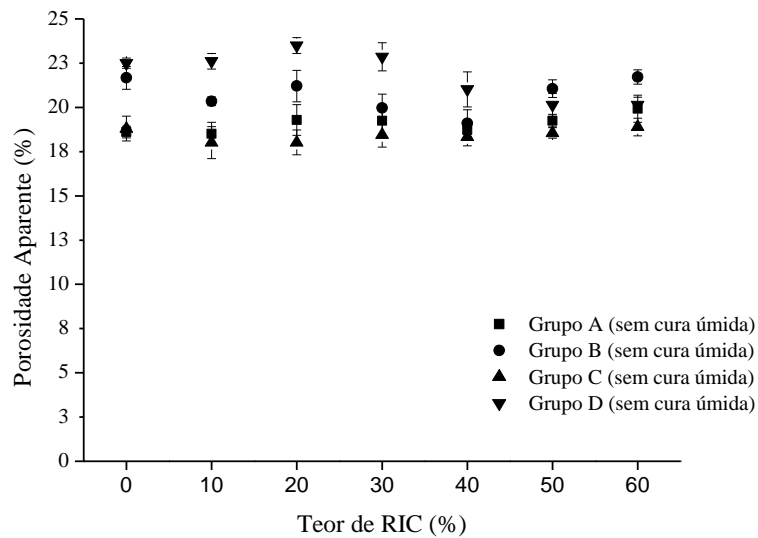
Como a incorporação de RIC em concreto refratário sílico-aluminoso ainda não foi descrita pela literatura, não foi possível comparar os valores de densidade aparente encontrados com outros autores.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.2.4 Porosidade Aparente, Volume de Poros Abertos e Absorção de Água

#### 5.2.4.1 Formulações dos Grupos A, B, C e D Sem Cura Úmida

A Figura 24 ilustra a porosidade aparente das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

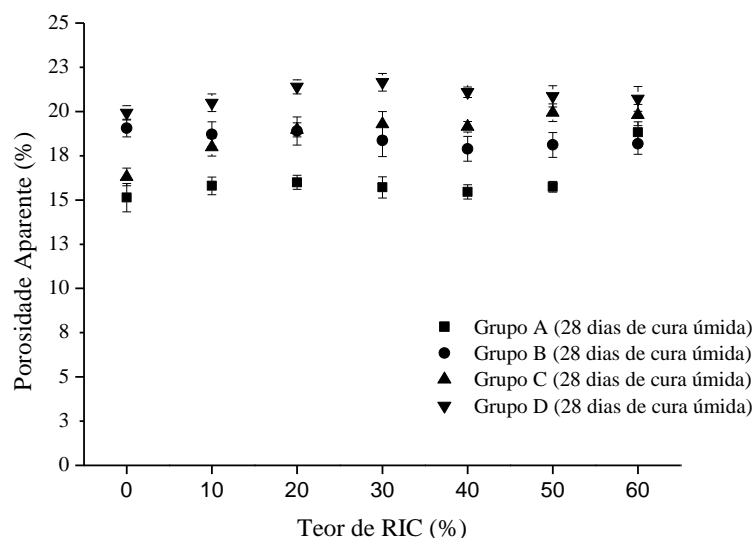


**Figura 24.** Porosidade aparente das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

#### 5.2.4.2 Formulações dos Grupos A, B, C e D Submetidas a 28 dias de Cura Úmida

A Figura 25 ilustra a porosidade aparente das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 25. Porosidade aparente das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do teor de RIC incorporado.**

Os valores de porosidade aparente observados para as formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida, Figura 24, sugerem que o efeito do teor de RIC incorporado ao concreto sílico-aluminoso foi discreto para as curvas de cada Grupo estudado, os quais permaneceram praticamente constantes.

Verificou-se, também, que os Grupos B e D, submetidos a operação de queima, apresentaram maiores valores de porosidade aparente, quando comparados aos Grupos A e C, sem queima. Este comportamento é o oposto do esperado, uma vez que, considerando a porosidade aparente como referente aos poros abertos do material, uma operação de queima teria o efeito de diminuir a porosidade aparente e aumentar a porosidade fechada (BERGMANN, 2002).

De acordo com Karadeniz (2007), em um primeiro estágio, a porosidade aparente tende a aumentar com o aumento da temperatura, porém deve-se observar que, quando modificada a fase microestrutural do material, pode haver uma considerável diminuição da porosidade aparente.

O mesmo comportamento foi evidenciado para os Grupos submetidos a 28 dias de Cura Úmida, Figura 25, indicando que, possivelmente, a temperatura utilizada na operação de queima das formulações dos Grupos B e D, 1100 °C, não foi suficiente para a modificação dos valores de porosidade aparente.

Da mesma forma, o aumento da incorporação de RIC não se mostrou significativo para modificações relevantes na porosidade aparente das formulações dos Grupos estudados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

O efeito da granulometria utilizada para a conformação das formulações de cada Grupo também se mostrou diferente do comumente observado para os materiais cerâmicos.

A presença de poros abertos foi observada por meio das micrografias ópticas, apresentadas no item 5.3 (Propriedades Morfológicas).

O aumento de partículas finas na composição do concreto refratário, possibilita a diminuição da porosidade aparente e o aumento da densidade do material (KARADENIZ *et al.*, 2007); (RIBEIRO e RODRIGUES, 2010).

De maneira geral, a porosidade aparente dos materiais refratários encontra-se na faixa de 15 a 25 %, sendo os valores observados tanto para as formulações sem Cura Úmida, quanto para aquelas submetidas a 28 dias de cura dentro da faixa especificada (BROSNAN, 2004).

Com o aumento gradual da temperatura, a partir do momento em que a água residual é totalmente eliminada, a porosidade torna-se mais importante, comportando-se como uma barreira, diminuindo a condutividade térmica do material (SANTOS, 2003).

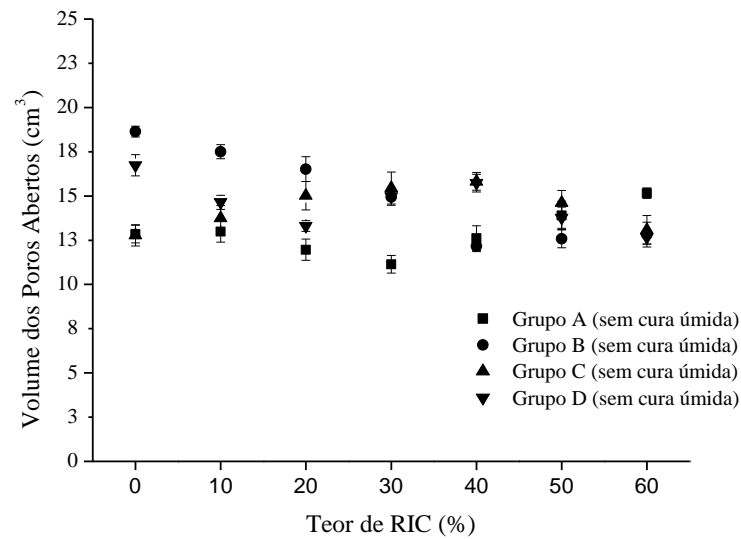
A porosidade, que influencia na densidade dos corpos de prova, pode mudar significativamente com o aumento gradual da temperatura devido aos mecanismos de transferência de calor através dos poros, especialmente em processos de transferência de calor por condução e radiação (RICE, 1998).

Avaliando os dados descritos pela literatura, que mostram que a incorporação de partículas finas e a operação de queima tende a diminuir a porosidade aparente dos materiais cerâmicos, neste estudo foi observado que a mesma manteve-se praticamente constante com o aumento da incorporação de RIC. Desta forma, os resultados aqui obtidos, não permitem, de forma significativa, explicar o comportamento esperado deste tipo de material.

A Figura 26 ilustra o volume dos poros abertos das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

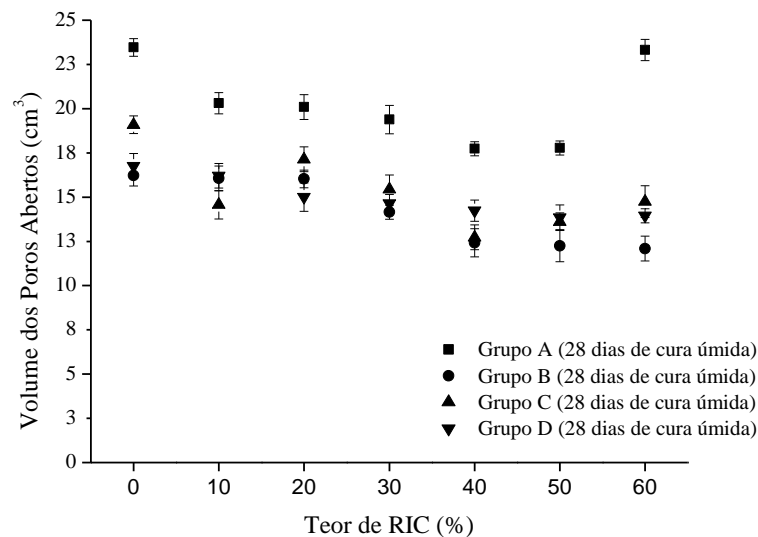


## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 26.** Volume dos poros abertos das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

A Figura 27 ilustra o volume dos poros abertos das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.



**Figura 27.** Volume dos poros abertos das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

Os Grupos B e D (com queima) apresentaram maior volume dos poros até 30 % de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Para o Grupo B, observou-se uma diminuição do volume dos poros até 40 % de RIC incorporado, seguido de uma tendência praticamente constante.

O Grupo D, a partir de 20 % de RIC incorporado, apresentou um discreto aumento no volume dos poros com posterior decréscimo a partir de 40 % de RIC.

Para os Grupos A e C (sem queima) foram observados volume dos poros abertos muito próximos sem a incorporação de RIC. A partir de 40 % de RIC incorporado, os comportamentos se inverteram, observando-se para o Grupo A um decréscimo dos valores até 40 % de RIC com posterior aumento e, para o Grupo C, um aumento dos valores até 40 % de RIC com posterior diminuição.

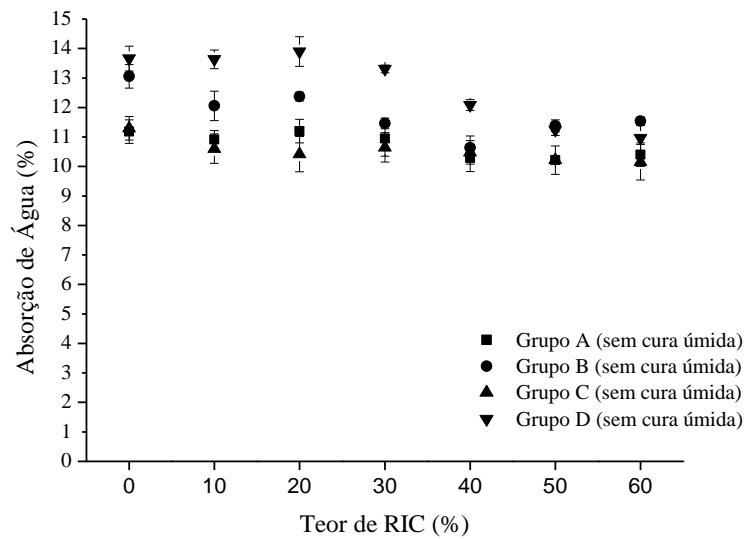
Foi verificado que o volume dos poros abertos para as formulações sem Cura Úmida permaneceu entre 11,1 a 18,6 %.

Já para as formulações dos Grupos submetidos a 28 dias de Cura Úmida, Figura 27, foram observados comportamentos completamente diferentes. Os maiores valores para o volume dos poros abertos foram encontrados para o Grupo A (sem queima), com leve tendência decrescente até 50 % de RIC incorporado, com posterior aumento. As demais curvas apresentaram comportamentos semelhantes, variando de 12,1 a 19,1 %.

Considerando que a porosidade aparente está relacionada com os poros abertos do material cerâmico, o volume de poros abertos deveria acompanhar o comportamento sugerido pela porosidade. No entanto, não foi possível correlacionar essas propriedades, indicando que a técnica adotada não foi suficientemente sensível para detectar alterações significativas.

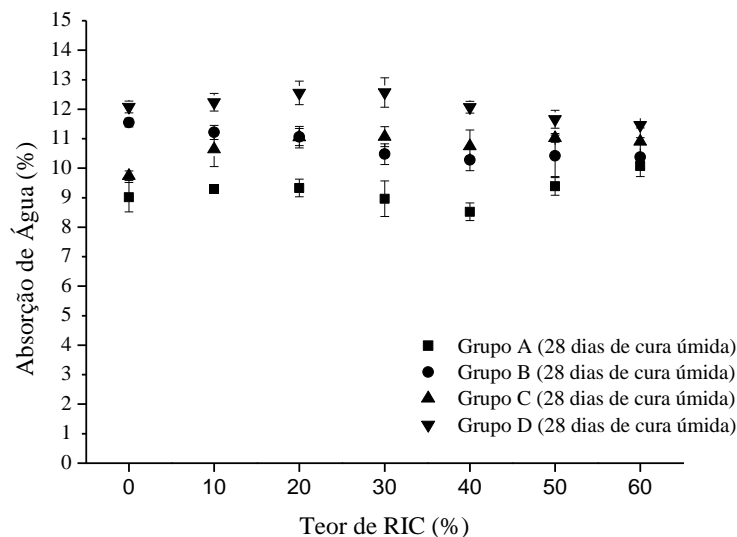
A Figura 28 ilustra a absorção de água das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 28.** Absorção de água das formulações dos Grupos A, B, C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

A Figura 29 ilustra a absorção de água das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.



**Figura 29.** Absorção de água das formulações dos Grupos A, B, C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

Os valores de absorção de água observados para as formulações dos Grupos A, B, C e D sem Cura Úmida, Figura 28, sugerem que o efeito do teor de RIC incorporado ao concreto sílico-aluminoso foi tênue para as curvas de cada Grupo estudado, que permaneceram praticamente constantes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Verificou-se, também, que os Grupos B e D, submetidos à operação de queima, apresentaram maiores valores de absorção de água até 40 % de RIC incorporado, quando comparados aos Grupos A e C, sem queima.

O mesmo comportamento foi evidenciado para os Grupos submetidos a 28 dias de Cura Úmida, Figura 29.

Assim como o volume dos poros abertos está relacionado com a porosidade aparente do material cerâmico, a absorção de água também está. Foi observado que, nas curvas de absorção de água em função do aumento do teor de RIC incorporado, tanto para as formulações sem cura, quanto para as submetidas a 28 dias de Cura Úmida, o comportamento foi semelhante ao evidenciado para a porosidade aparente.

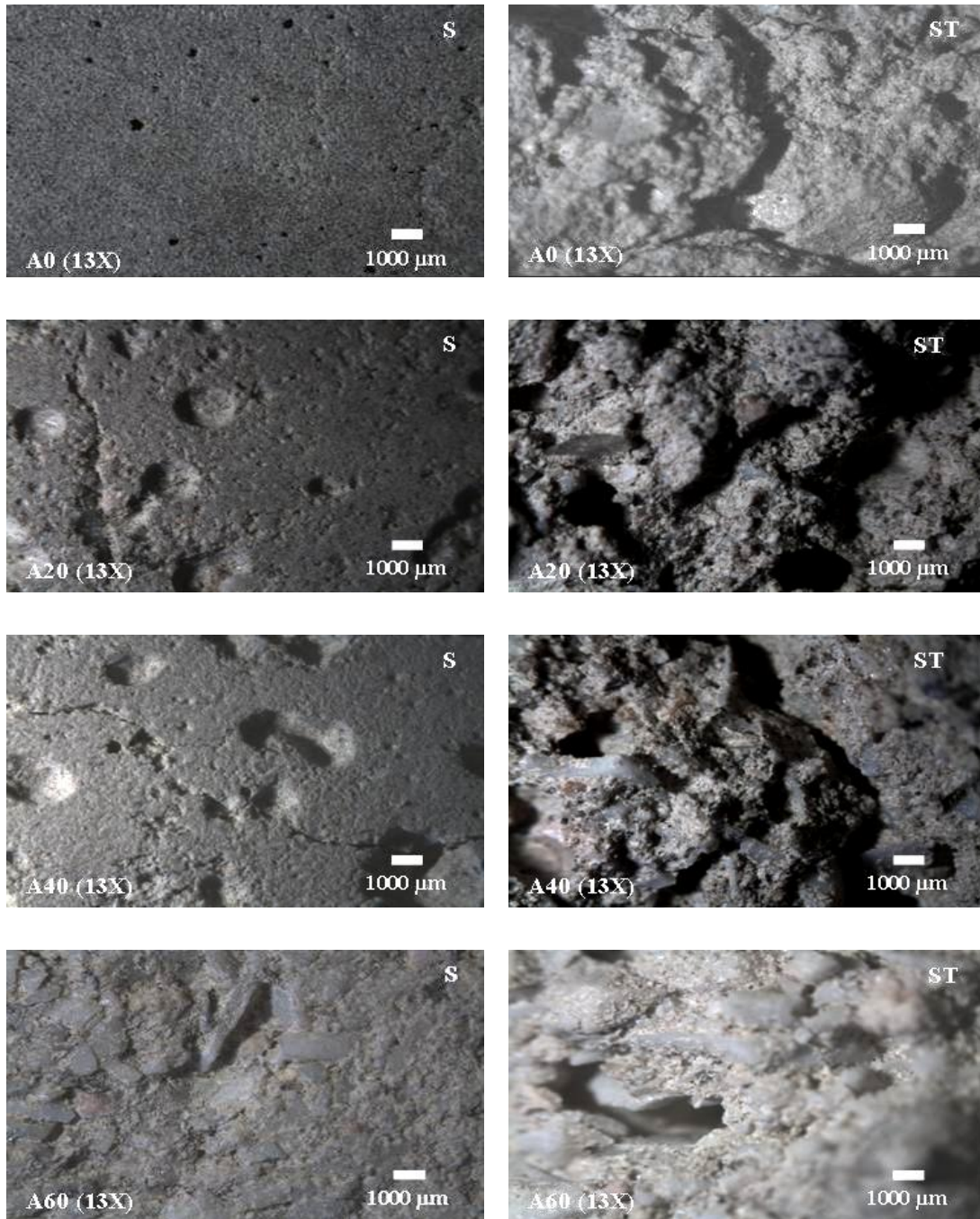
### 5.3 Propriedades Morfológicas

#### 5.3.1 Microscopia Óptica (MO)

##### 5.3.1.1 *Formulações do Grupo A*

A Figura 30 ilustra as micrografias ópticas do Grupo A sem cura úmida.

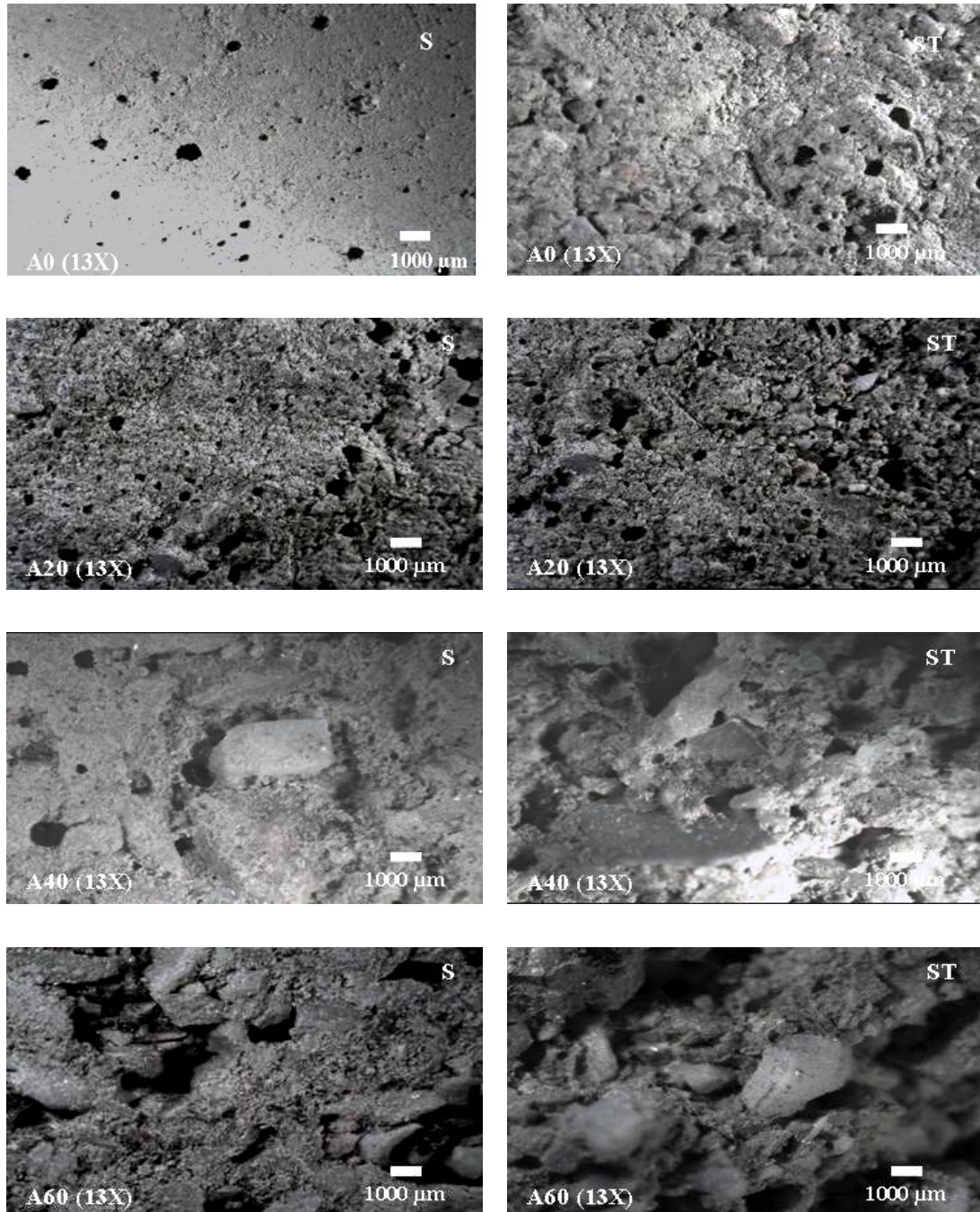
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 30. Micrografias ópticas das formulações do Grupo A sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 31 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo A submetidas a 28 dias de cura úmida.



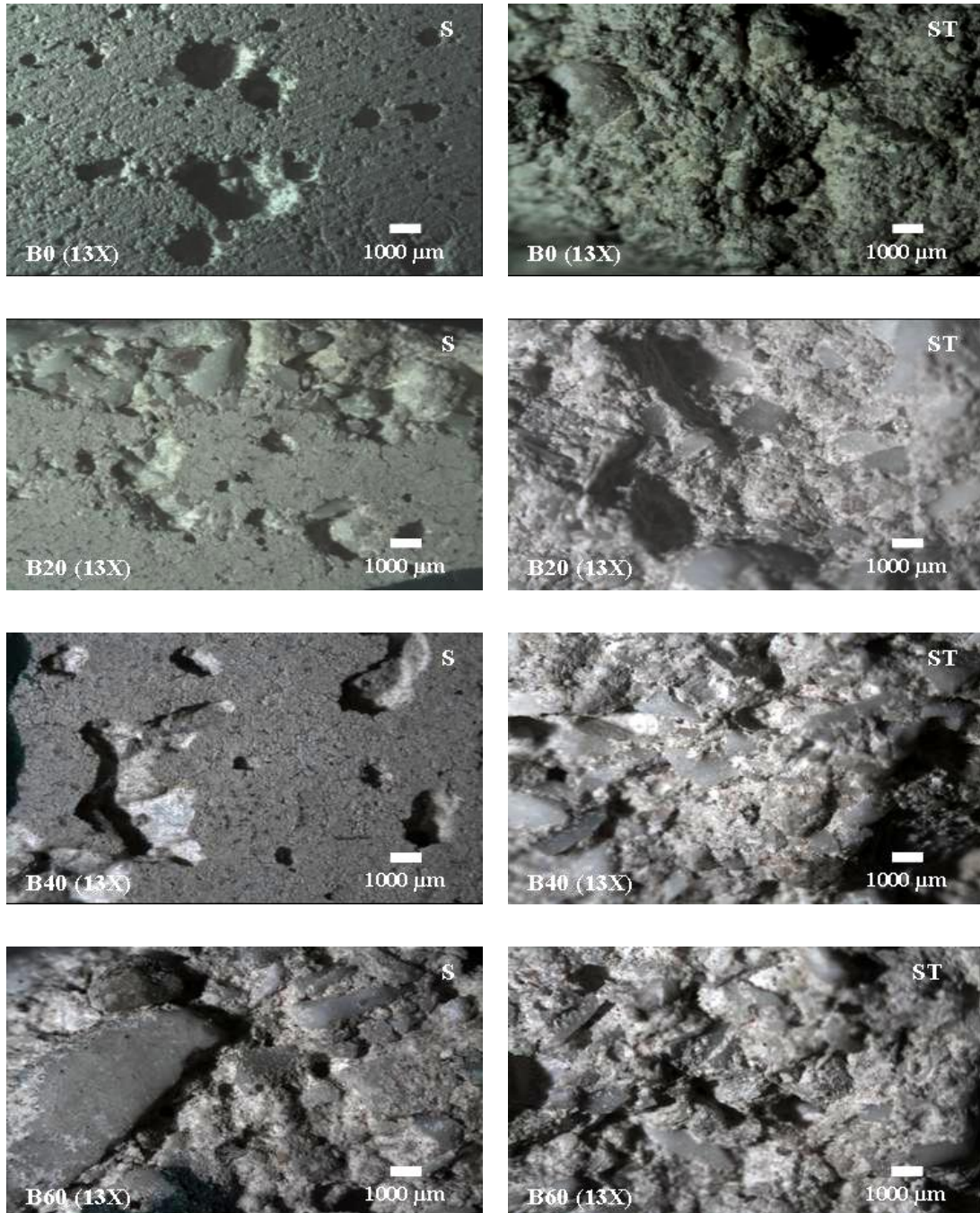
**Figura 31.** Micrografias ópticas das formulações do Grupo A submetidas 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.3.1.2 Formulações do Grupo B

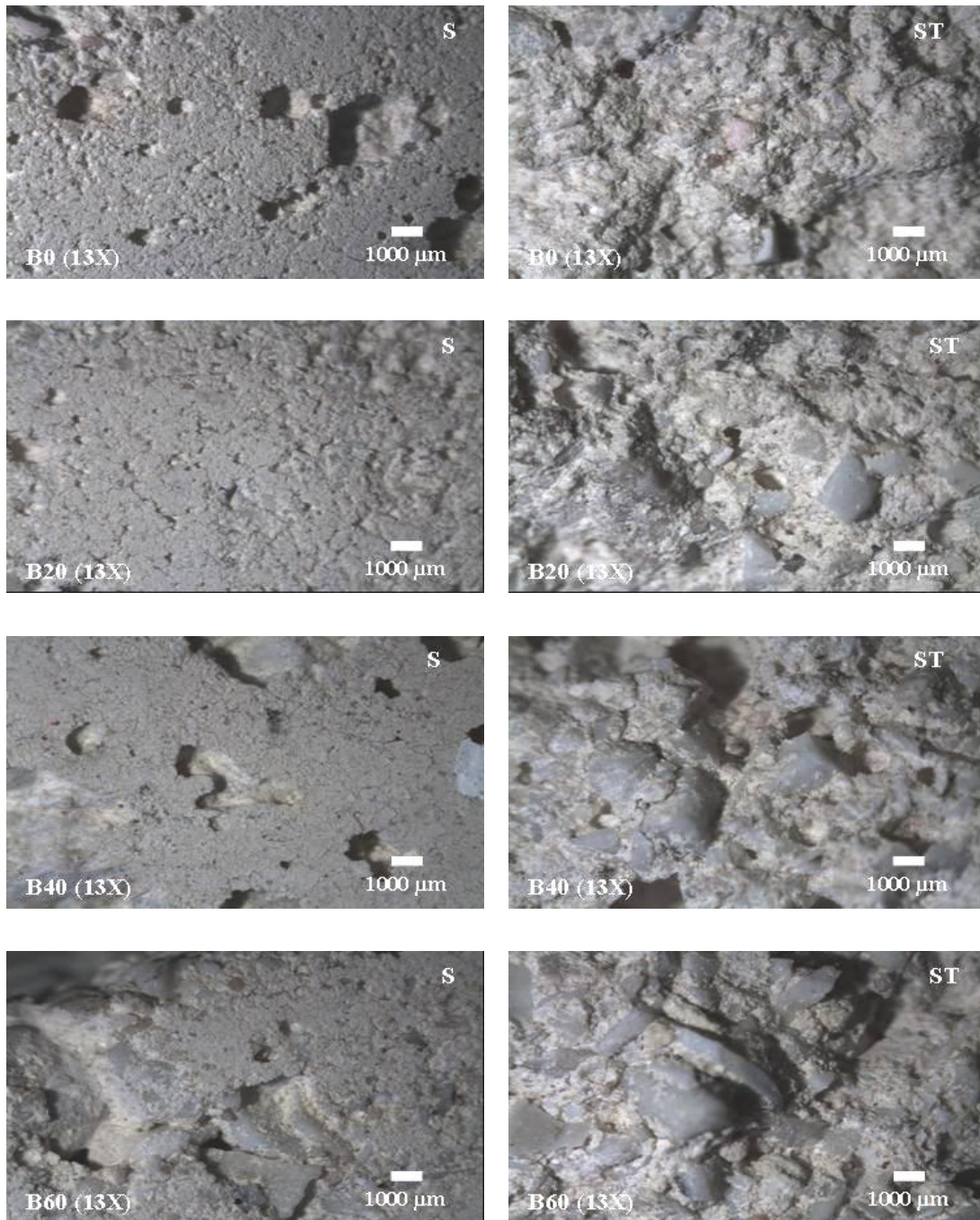
A Figura 32 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo B sem cura úmida.



**Figura 32. Micrografias ópticas das formulações do Grupo B sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 33 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo B submetidas a 28 dias de cura úmida.



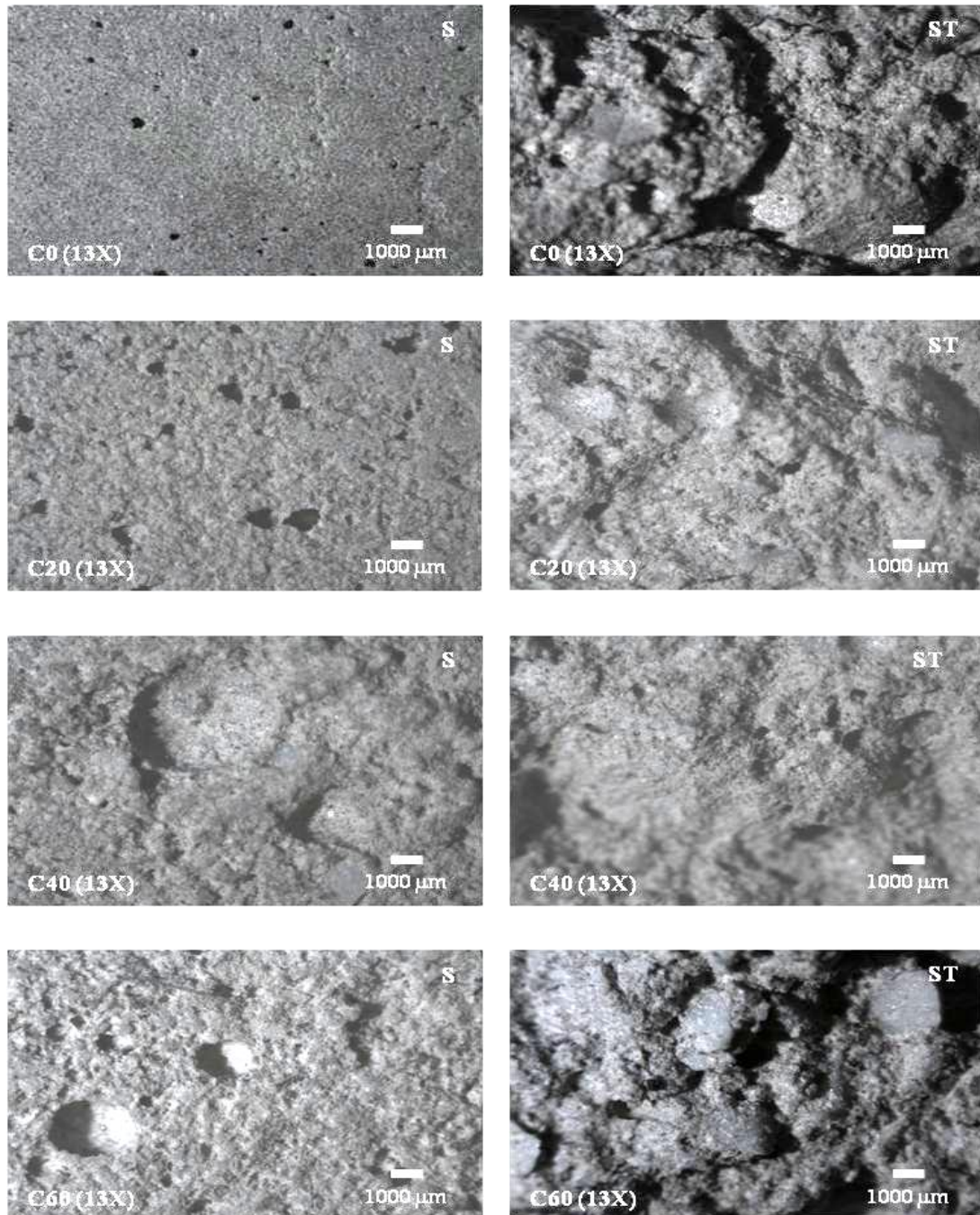
**Figura 33. Micrografias ópticas das formulações do Grupo B submetidas a 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.**



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.3.1.3 Formulações do Grupo C

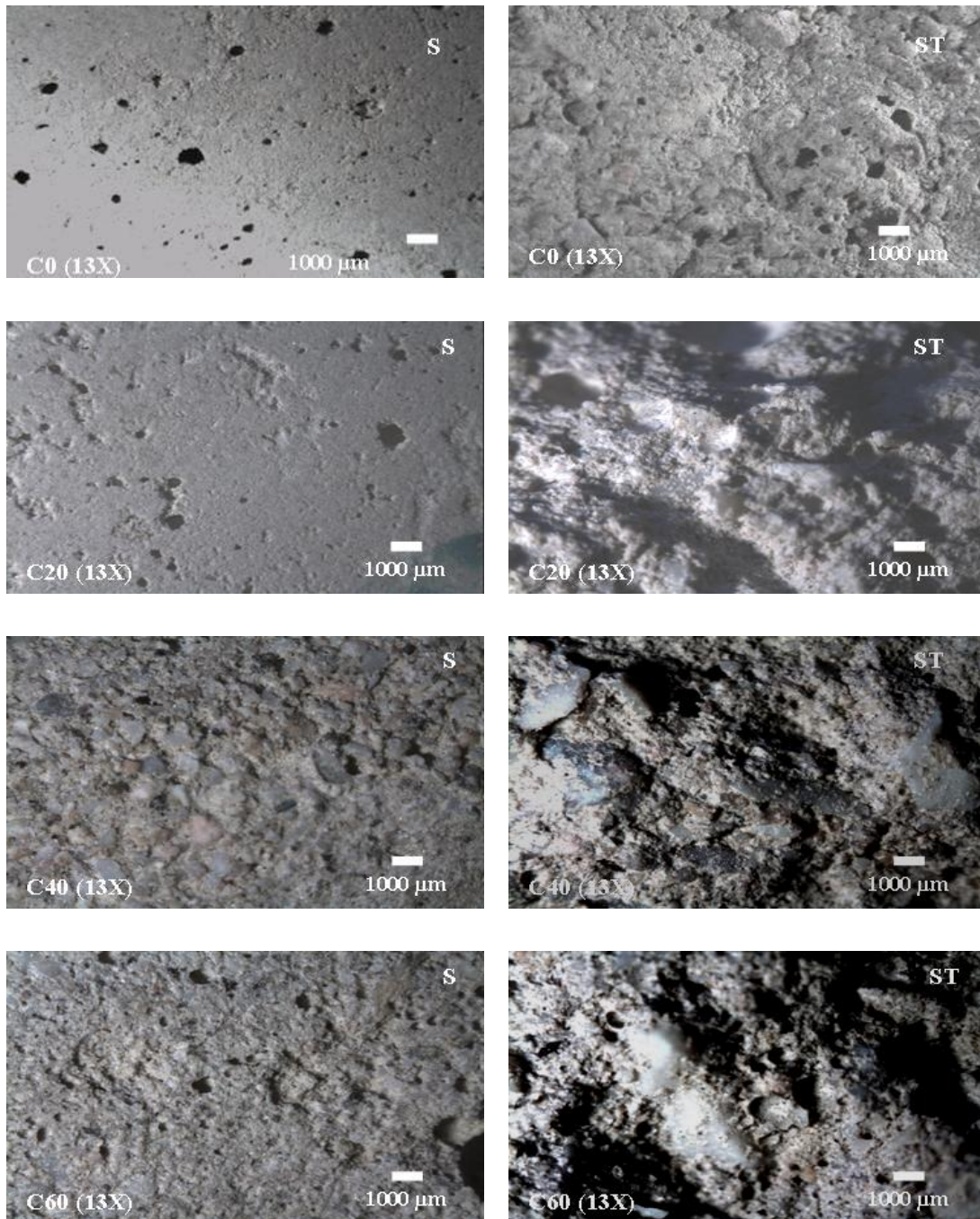
A Figura 34 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo C sem cura úmida.



**Figura 34. Micrografias ópticas das formulações do Grupo C sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 35 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo C submetidas a 28 dias de Cura Úmida.



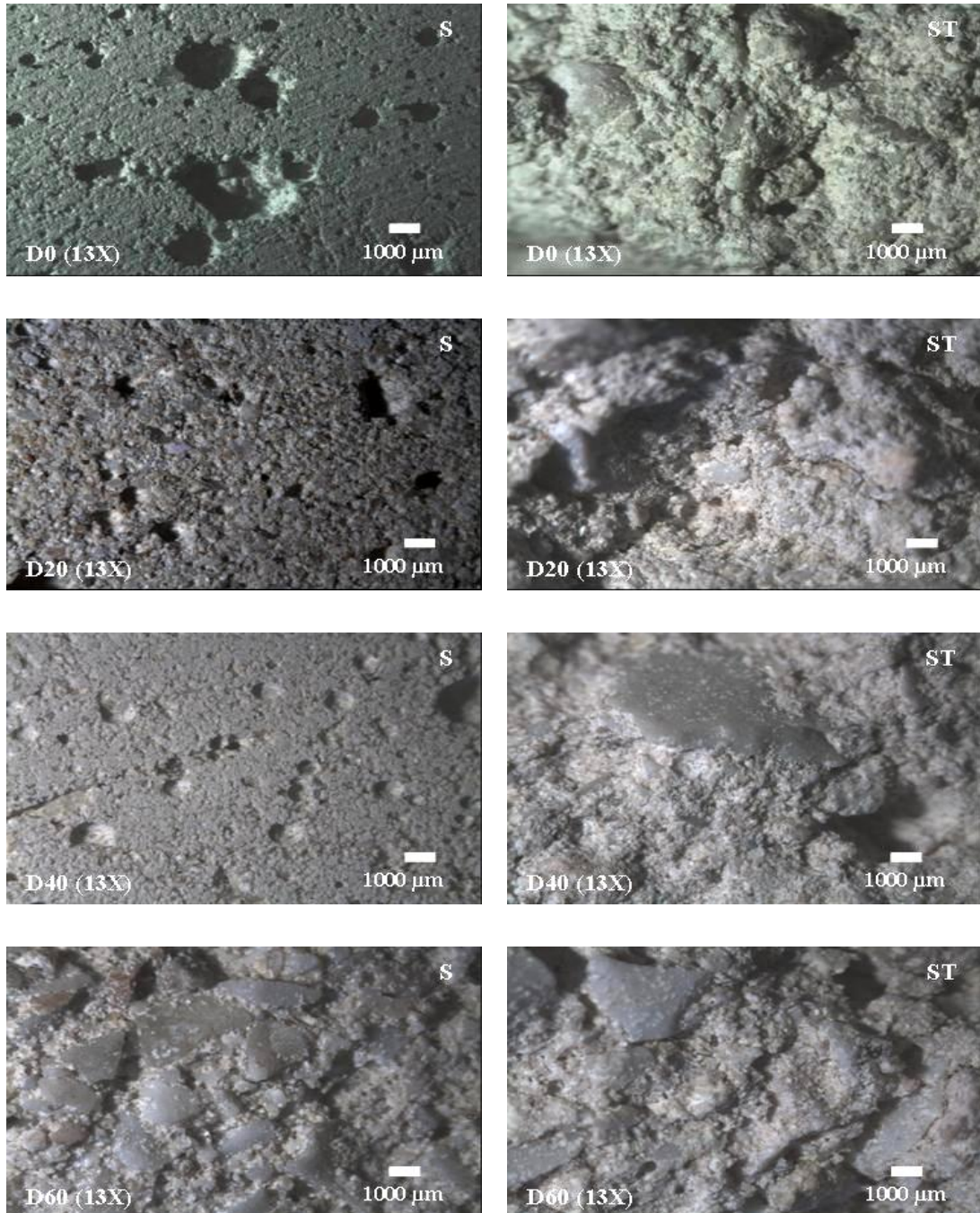
**Figura 35.** Micrografias ópticas das formulações do Grupo C submetidas a 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.3.1.4 Formulações do Grupo D

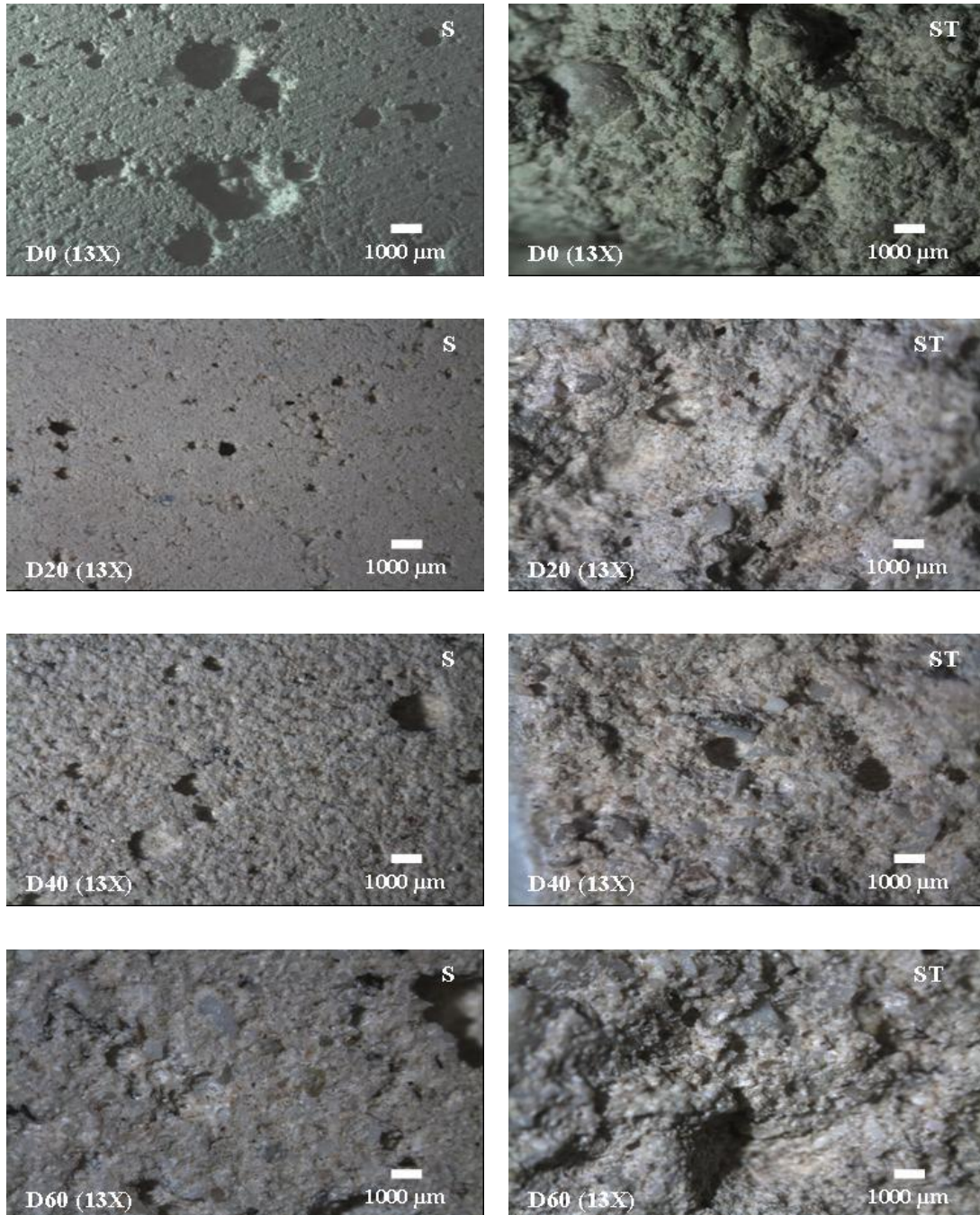
A Figura 36 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo D sem cura úmida.



**Figura 36. Micrografias ópticas das formulações do Grupo D sem cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 31 ilustra as micrografias ópticas das formulações do Grupo D submetidas a 28 dias de cura úmida.



**Figura 37.** Micrografias ópticas das formulações do Grupo D submetidas a 28 dias de cura úmida, sendo (S) referente à superfície e (ST) à superfície da seção transversal.

Foram realizadas micrografias ópticas para todos os Grupos estudados incluindo as amostras sem cura e com 28 dias de cura úmida com o intuito de verificar detalhes microestruturais que complementam a análise das propriedades obtidas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Quando observadas as micrografias para os Grupos A e B, verificou-se que com o aumento do teor de RIC às formulações, menor foi o efeito visual da incorporação agregado/matriz, considerando que com o aumento do teor de RIC ocorreu uma diminuição no teor de concreto refratário sílico-aluminoso, além da utilização de agregados de RIC com granulometria mais grosseira para estes Grupos.

Verificando as micrografias ópticas para o Grupo B, o qual foi submetido à operação de queima, foi observado um maior empacotamento entre as partículas finas, quando comparado com as formulações do Grupo A, embora também tenha sido observado que com o aumento do teor de RIC, mais heterogênea e complexa tenha ficado a matriz, caracterização esta típica para materiais refratários, de acordo com Thummen e colaboradores (2006).

As micrografias ópticas referentes às formulações dos Grupos C e D ilustram um comportamento diferente do observado nos Grupos A e B. Com o aumento do teor de RIC, observou-se uma maior distribuição entre as partículas e a matriz, o que era esperado, uma vez que foi utilizada uma faixa granulométrica mais amplas para a confecção das amostras, incluindo partículas mais finas.

A operação de queima ao qual o Grupo D foi submetido mostrou, aparentemente, os mesmos efeitos observados para o Grupo B, de maior coesão entre as partículas, Figura 37.

Foram observados para todos os Grupos, para as micrografias de superfície, poros abertos e microtrincas, além de partículas mais grosseiras de RIC, especialmente para os Grupos A e B com maior teor de RIC incorporado.

Para as micrografias referentes à seção transversal, foi observada a presença de poros fechados no material, que ficaram expostos após a fratura do mesmo (formação de poros abertos). Também foi possível verificar a influência da morfologia do agregado de RIC no mecanismo de propagação das trincas, responsáveis para fratura do material.

O tamanho dos agregados e sua distribuição, bem como os aspectos microestruturais dos agregados, têm fundamental importância no fenômeno de fratura dos materiais refratários, uma vez que os agregados assumem um papel crucial na região de propagação da trinca (DUNCAN e BRADT, 2003), (GUNGOR *et al.*, 2012).

Os maiores agregados estão diretamente relacionados às trincas intrínsecas ao corpo refratário. Nas proximidades das trincas intrínsecas são observados fenômenos de absorção de energia, que aumentam à medida que a trinca avança. Os elementos microestruturais dos refratários, como os agregados, por exemplo, são capazes de interagir com as superfícies recém formadas de trinca, como pontes de agregados, sendo os fenômenos que ocorrem na



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

região seguinte do rastro da trinca os de maior importância durante o processo de fratura (DUNCAN e BRADT, 2003); (PRATA *et al.*, 2003); (BRADT, 2004).

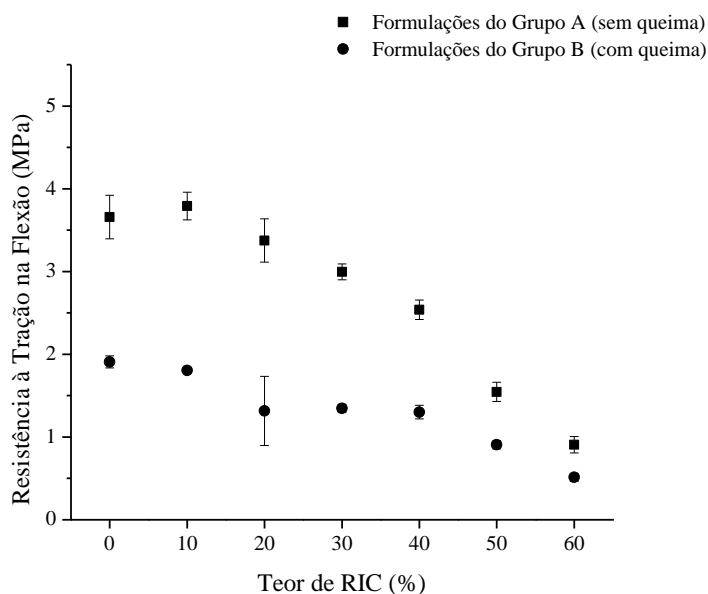
Quando comparadas as micrografias ópticas das formulações sem cura e as submetidas a 28 dias de Cura Úmida, os mesmos fenômenos foram observados, indicando que, por meio da técnica de Microscopia Óptica, não foi possível verificar modificações microestruturais decorrentes da Cura Úmida do material.

### 5.4 Propriedades Mecânicas

#### 5.4.1 Resistência à Tração na Flexão à Temperatura Ambiente (23 °C)

##### 5.4.1.1 Formulações dos Grupos A e B

A Figura 38 ilustra a resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos A e B, sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.



**Figura 38. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.**

A Figura 39 ilustra a resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

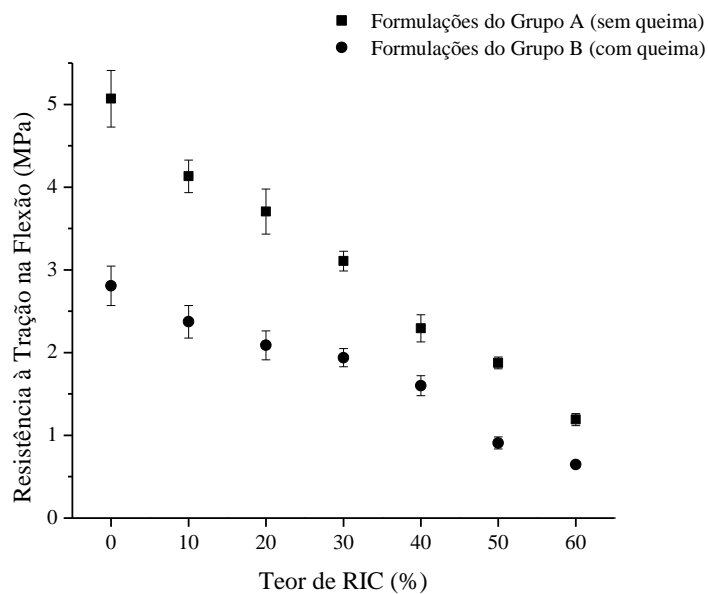


Figura 39. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

#### 5.4.1.2 Formulações dos Grupos C e D

A Figura 40 ilustra a resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos C e D, sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

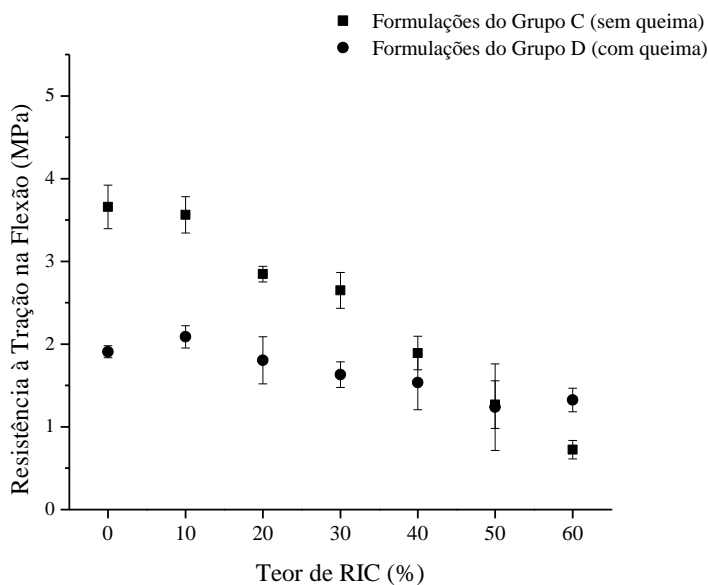
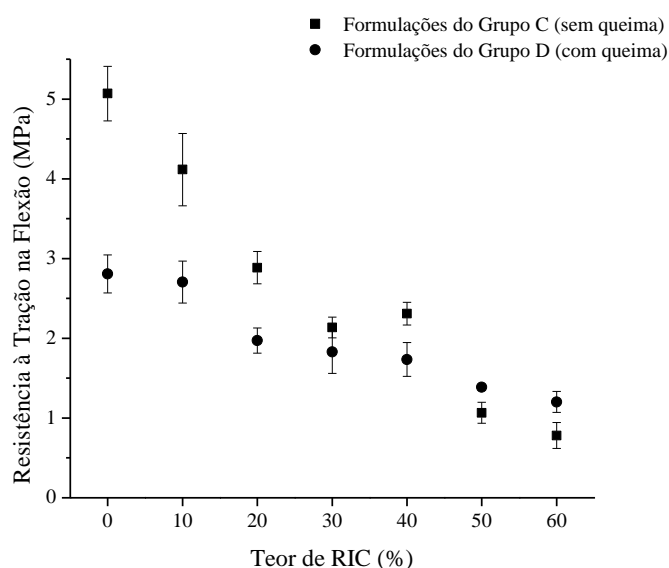


Figura 40. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 41 ilustra a resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC.



**Figura 41. Resistência à tração na flexão das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.**

Foi observada em todas as formulações estudadas uma tendência decrescente nos valores de resistência à tração na flexão com o aumento da incorporação de RIC.

Como esperado, os maiores valores de resistência à tração foram encontrados para as formulações A0 e A10 sem cura úmida, tendo apresentado resistências de  $3,66 \pm 0,26$  MPa e  $3,79 \pm 0,17$  MPa, respectivamente. Com o aumento da incorporação de RIC ao concreto refratário, os valores de resistência à tração na flexão tendem a diminuir consideravelmente, tendo as formulações A60 e B60 sem cura úmida apresentado os menores valores,  $0,91 \pm 0,10$  MPa e  $0,51 \pm 0,05$  MPa, respectivamente.

Quando comparadas às formulações sem cura úmida, verificou-se que as formulações submetidas a 28 dias de cura úmida, ilustradas na Figura 39, apresentaram um aumento nas resistências à tração na flexão, embora o comportamento decrescente dos valores com o aumento do teor de RIC incorporado tenha permanecido o mesmo. As amostras A0 e B0, sem incorporação de RIC, mais uma vez apresentaram os maiores valores de resistência à tração na flexão, de  $5,07 \pm 0,34$  MPa e  $2,81 \pm 0,24$  MPa, respectivamente.

Da mesma forma, os menores valores foram observados para as formulações com 60 % de RIC incorporado, tendo A60 e B60 apresentado valores de  $1,19 \pm 0,07$  MPa e  $0,65 \pm 0,04$  MPa, respectivamente.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Para as formulações dos Grupos C e D, sem cura úmida, apresentadas na Figura 40, a mesma tendência decrescente observada para os Grupos A e B foi verificada. As formulações C0 e C10 sem cura úmida apresentaram maiores valores de resistência à tração na flexão, de  $3,66 \pm 0,26$  MPa e  $3,56 \pm 0,22$  MPa, respectivamente.

Para o Grupo D, D0 e D10 sem Cura Úmida apresentaram os maiores valores entre as formulações do Grupo,  $1,91 \pm 0,07$  MPa e  $2,09 \pm 0,13$  MPa, respectivamente.

Com o aumento da incorporação de RIC, foram observados desvios padrão mais elevados e em conseqüência, alguns valores mostraram-se bastante incomuns, como no caso da formulação D60, que apresentou  $1,33 \pm 0,14$  MPa de resistência à tração na flexão, superior ao encontrado para C60, de  $0,72 \pm 0,11$  MPa. Estas diferenças podem ser atribuídas ao erro experimental, uma vez que, mesmo obedecendo à mesma metodologia na execução do procedimento, a técnica de concretagem (conformação) dos corpos de prova difere de um operador para outro.

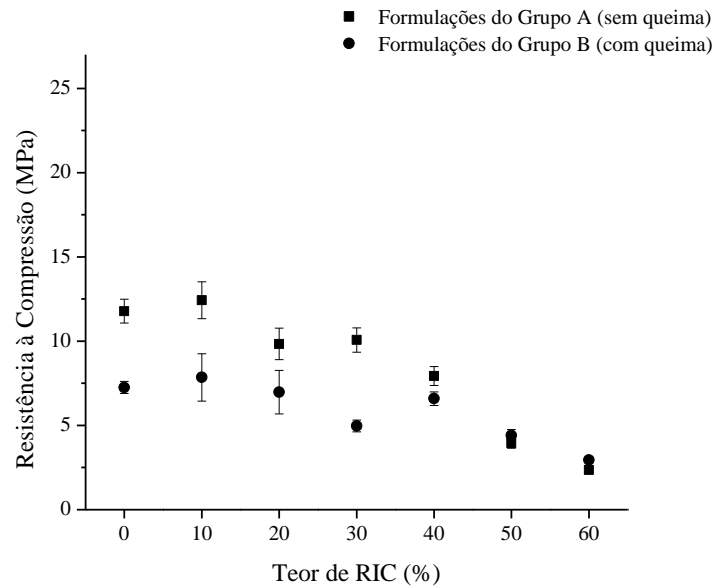
Da mesma maneira como observada para os Grupos A e B submetidos a 28 dias de Cura Úmida, verificaram-se para os Grupos C e D maiores resistências à tração na flexão, embora a tendência decrescente com o aumento do teor de RIC tenha permanecido.

### 5.4.2 Resistência à Compressão à Temperatura Ambiente (23 °C)

#### 5.4.2.1 Formulações dos Grupos A e B

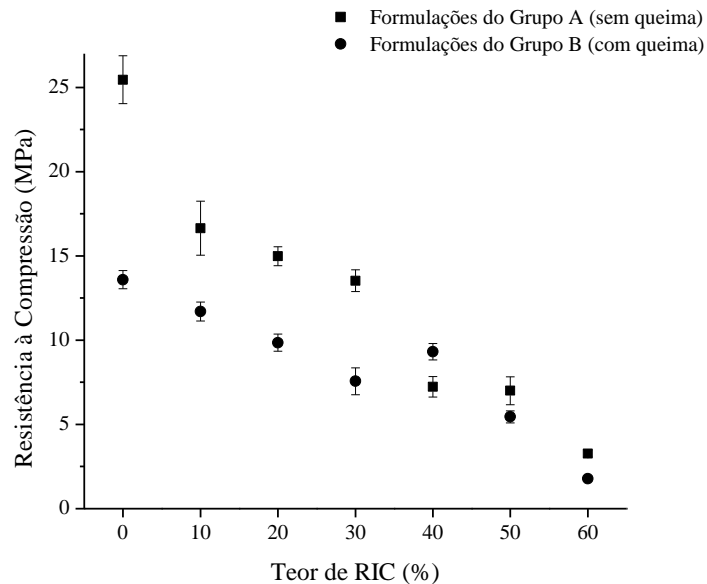
A Figura 42 ilustra a resistência à compressão das formulações dos Grupos A e B, sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 42.** Resistência à compressão das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

A Figura 43 ilustra a resistência à compressão das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

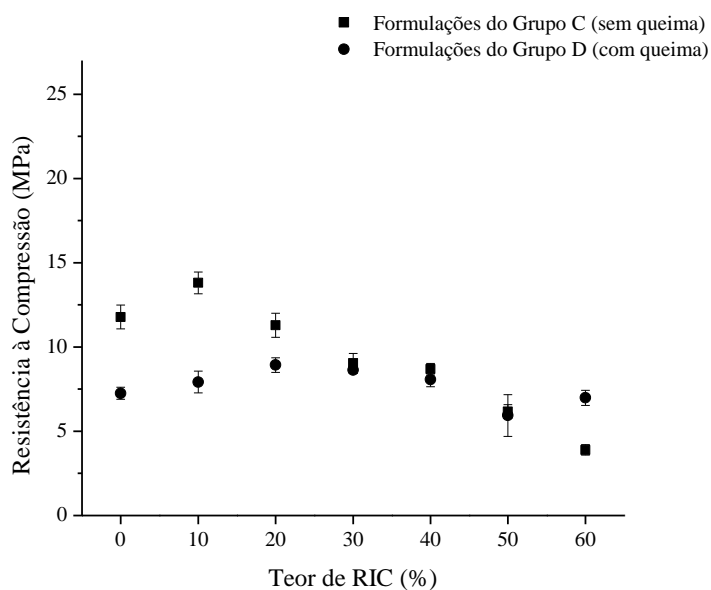


**Figura 43.** Resistência à compressão das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.4.2.2 Formulações dos Grupos C e D

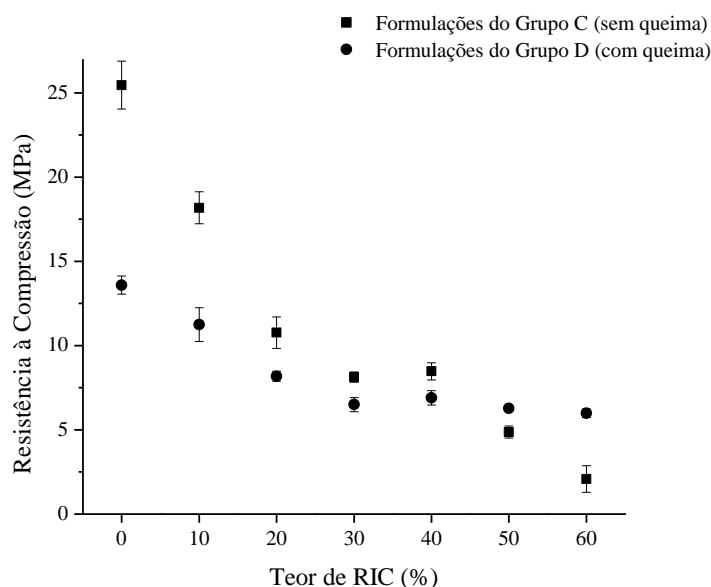
A Figura 44 ilustra a resistência à compressão das formulações dos Grupos C e D, sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.



**Figura 44. Resistência à compressão das formulações dos Grupos C e D com sem cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.**

A Figura 45 ilustra a resistência à compressão das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 45. Resistência à compressão das formulações dos Grupos B e D submetidas a 28 dias de cura úmida em função do aumento do teor de RIC incorporado.**

De maneira geral, observou-se que a mudança na granulometria utilizada para a preparação dos corpos de prova das formulações C e D, propiciou o aumento das propriedades mecânicas dos mesmos, quando comparadas às formulações dos Grupos A e B, embora o comportamento decrescente da resistência à tração na flexão com o aumento do teor de RIC tenha sido observado em todos os Grupos estudados.

Diversos fatores, de acordo com a literatura, são responsáveis por alterações nas propriedades mecânicas dos materiais refratários. A quantidade de ligante (cimento) presente na mistura, bem como a quantidade água necessária para sua mistura, representa um importante papel para as propriedades mecânicas do concreto refratário. Um aumento na resistência mecânica pode ser obtido com o aumento da quantidade de cimento na mistura e uma diminuição na taxa água/cimento (LIU *et al.*, 2011).

Alguns autores sugerem que a quantidade ideal de água a ser utilizada para a mistura de concretos refratários seja na ordem de 3 a 6 % (DIÁZ, 2008); (GUNGOR *et al.*, 2012).

Devemos considerar, neste caso, que com o aumento da incorporação de RIC ao concreto refratário, ocorreu uma diminuição na quantidade de concreto utilizado e um aumento na relação água/cimento, necessária para a realização das reações de hidratação com o concreto sílico-aluminoso presente no concreto refratário, uma vez que, a quantidade de água utilizada para a preparação dos corpos de prova das formulações de cada Grupo, foi fixada em 12 % em massa em relação a quantidade de material.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Os RIC, devido as suas características físicas após sinterização (ausência de porosidade), apresentam baixa capacidade de absorção de água, a qual envolve as partículas do resíduo ao invés de ser absorvida pelos mesmos. Quando a água evapora, espaços vazios são observados entre a matriz cimentícia e os agregados de RIC, especialmente naqueles com a superfície esmaltada exposta diretamente à matriz (CAMPOS, 2006).

A composição química do concreto refratário após conformado varia de maneira significativa de acordo com a quantidade de água utilizada para sua conformação, especialmente quando ciclos térmicos são aplicados. Durante o aquecimento, um fenômeno de desidratação é observado, o qual permite variações na microestrutura, que podem aumentar ou reduzir as propriedades mecânicas, bem como variar a densidade, a distribuição e o tamanho dos poros (RIBEIRO e RODRIGUES, 2010).

Assim como observado neste estudo, os revestimentos ou sistemas refratários, em sua grande maioria não suportam rigorosas condições de carregamento, tendo em vista que sua principal função é revestir ou isolar termicamente. Durante sua aplicação, não apresentam uma característica estrutural relevante. Por este motivo, não precisam necessariamente ser muito resistentes, apenas resistentes o suficiente para manter sua integridade (DUNCAN e BRADT, 2003); (BRADT, 2004); (THUMMEN *et al.*, 2006).

Geralmente, os refratários apresentam resistência à tração na flexão na ordem de 10 a 40 MPa e fratura-frágil à temperatura ambiente, sendo sua utilização frequentemente associada a uma combinação com uma estrutura metálica, no caso do uso em aplicações onde a resistência estrutural seja requerida (SIMONIN *et al.*, 2002); (DUNCAN e BRADT, 2003); (BRADT, 2004).

Os valores de resistência mecânica observados nas formulações estudadas neste trabalho mostraram-se menores que os indicados pela literatura, no entanto, estes baixos valores incluem também as formulações A0, B0, C0 e D0 (controle), sem a incorporação de RIC, ou seja, apenas o concreto refratário sílico-aluminoso comercial.

Os baixos valores de resistência mecânica dos materiais refratários são comumente esperados, uma vez que os refratários não são muito resistentes e suas trincas são consideravelmente grandes (DUNCAN e BRADT, 2003); (BRADT, 2004). Tal fato pode ser observado a olho nu, especialmente quando utilizados agregados maiores, que podem ser corroborados com as micrografias ópticas (MOs), apresentadas no item 5.3 (Propriedades Morfológicas).

Outro fator de extrema importância na análise das propriedades mecânicas dos materiais refratários é o tamanho dos sólidos particulados presentes na formulação, de forma

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

que refratários com maiores tamanhos de agregados têm menores resistências mecânicas que aqueles contendo apenas agregados finos (DUNCAN e BRADT, 2003); (PRATA *et al.*, 2003); (BRADT, 2004).

Este fato pode ser observado, uma vez que o aumento do teor de RIC mostrou-se prejudicial às propriedades mecânicas dos corpos de prova, pois suas partículas inertes dificilmente aderem à matriz cimentícia, tornando-se pontos de concentração de tensão (VIEIRA *et al.*, 2009).

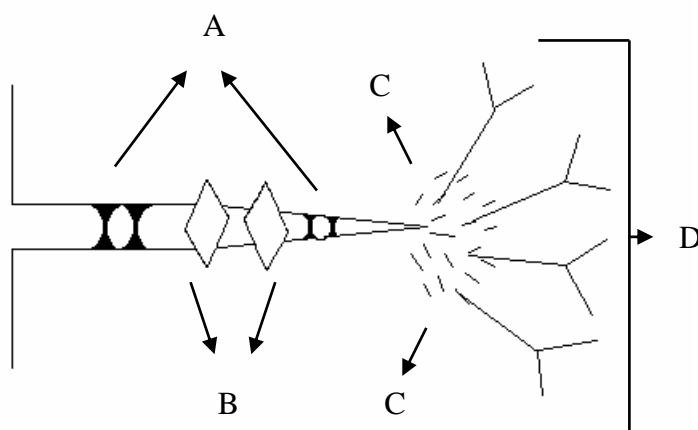
Tal fenômeno foi observado nos resultados deste trabalho. Os Grupos A e B, com granulometria grosseira (9, 10, 16, 28 e 48 *tyler mesh*), apresentaram menores valores de propriedades mecânicas, quando comparados com os Grupos C e D, com granulometria mais fina (9, 10, 16, 28, 48, 100, 200 e passante pela peneira de 200 *tyler mesh*).

O efeito da face esmaltada dos agregados de RIC possivelmente influenciou o comportamento mecânico das formulações estudadas, especialmente para aquelas com maiores tamanhos de partícula de resíduo, Grupos A e B, embora tais efeitos não foram significativos em relação as reações de hidratação do concreto com cimento *Portland* nos estudos de Costa e colaboradores (2005) e Campos (2006).

Os maiores agregados estão diretamente relacionados às trincas intrínsecas ao corpo refratário. Nas proximidades das trincas intrínsecas são observados fenômenos de absorção de energia, que aumentam à medida que a trinca avança. Os elementos microestruturais dos refratários, como os agregados, por exemplo, são capazes de interagir com as superfícies recém formadas da trinca, como pontes de agregados, sendo os fenômenos que ocorrem na região seguinte do rastro da trinca são os de maior importância durante o processo de fratura (DUNCAN e BRADT, 2003); (PRATA *et al.*, 2003); (BRADT, 2004).

A Figura 46 ilustra uma adaptação do esquema de propagação de trincas para materiais refratários, sendo (A) as pontes de fluxo dos silicatos, (B) as pontes de agregados, (C) as microtrincas e (D) o fluxo de propagação das trincas (DUNCAN e BRADT, 2003).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 46. Esquema de propagação de trincas para materiais refratários, sendo (A) as pontes de fluxo dos silicatos, (B) as pontes de agregados, (C) as microtrincas e (D) o fluxo de propagação das trincas (figura adaptada) (DUNCAN e BRADT, 2003).**

A formação de pontes de agregados na trinca em avanço é fundamental para a resistência ao crescimento da trinca. As pontes de agregados agem na região do rastro depois da frente da trinca ter passado. Quando utilizados agregados mais resistentes que a matriz que os liga, é possível observá-los na superfície da fratura do refratário, como consequência do desvio de trincas que circula o agregado. Este fenômeno pôde ser observado pelas micrografias ópticas realizadas, especialmente às referentes à superfície da seção transversal dos corpos de prova (DUNCAN e BRADT, 2003); (BRADT, 2004).

Da mesma maneira que observada para os concretos comuns, o comportamento de tração e compressão do concreto refratário é assimétrico, sendo a resistência à tração desproporcionalmente inferior à resistência à compressão. Este fenômeno é causado, inicialmente pela difusão das trincas menores, que não acontece de forma localizada. Em um segundo momento, com o aumento da carga aplicada, dá-se origem a trincas maiores, mais localizadas e responsáveis pela fratura final do concreto refratário (SIMONIN *et al.*, 2002); (OUEDRAOGO *et al.*, 2011).

A fratura deste tipo de material é dominada pela extensão de suas trincas, que podem ser induzidas pela presença de tensões internas. O entendimento da localização dessas trincas é difícil, uma vez que este tipo de material apresenta uma composição heterogênea (OUEDRAOGO *et al.*, 2011).

Durante a operação de queima, a expansão dos componentes presentes na matriz heterogênea pode influenciar de forma negativa as propriedades mecânicas dos materiais refratários, uma vez que, durante este fenômeno, trincas na matriz cimentícia foram observadas (PASCOAL e PANDOLFELLI, 2000).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Até 400 °C, a diminuição da resistência mecânica está relacionada com uma fase não-coesiva de agregados/matriz. A diminuição da resistência à tração na flexão entre a temperatura ambiente e 1000 °C é frequentemente atribuída à destruição da rede hidratada. Deve-se levar em consideração que durante os ciclos de tratamento térmico ocorre a expansão térmica do material, que também pode causar trincas (DÍAZ *et al.*, 2008).

Há de se considerar, ainda, que os poros que chegam à superfície dos corpos cerâmicos atuam como concentradores de tensões, favorecendo uma diminuição das propriedades mecânicas dos materiais (POKORNY, 2006).

Ficker (2010) descreve a relação entre a porosidade dos materiais cerâmicos e suas propriedades mecânicas como sendo uma inversamente proporcional à outra, em especial a resistência à compressão. No entanto, não se verificou, de forma expressiva, que a porosidade aparente tenha influenciado significativamente as propriedades mecânicas das formulações dos Grupos estudados, diferentemente dos efeitos observados pela diminuição do teor de concreto refratário, em especial do CaO, dos tamanhos dos sólidos particulados, da Cura Úmida e da operação de queima.

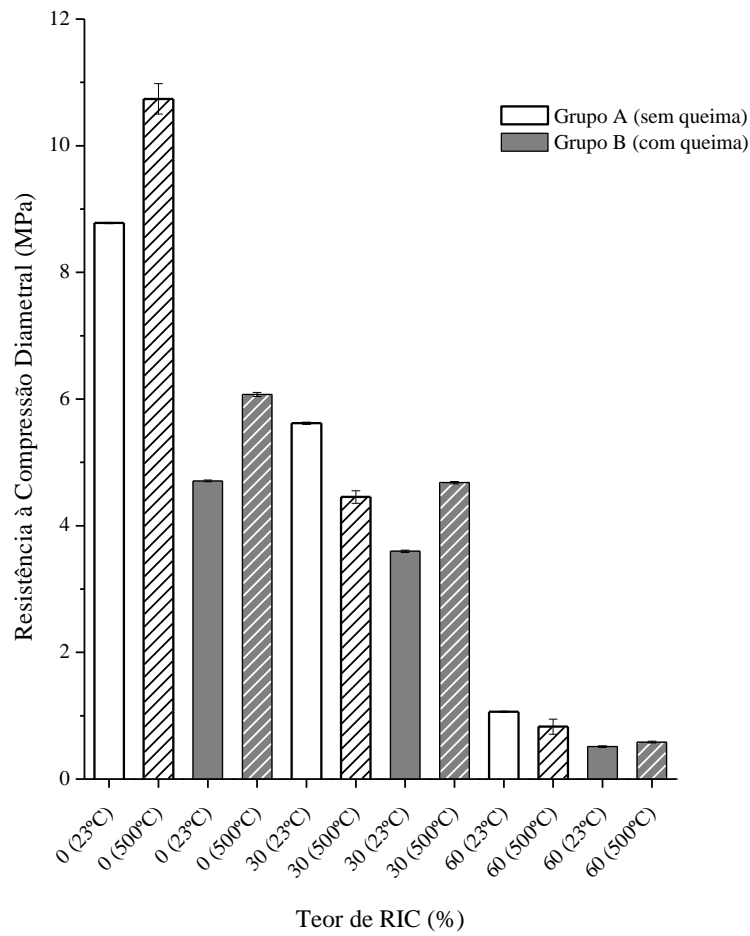
### 5.4.3 Resistência à Compressão Diametral à Temperatura Elevada (500 °C)

#### 5.4.3.1 Formulações dos Grupos A e B

A Figura 47 ilustra a resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos A e B, sem cura úmida a 23 e 500 °C.



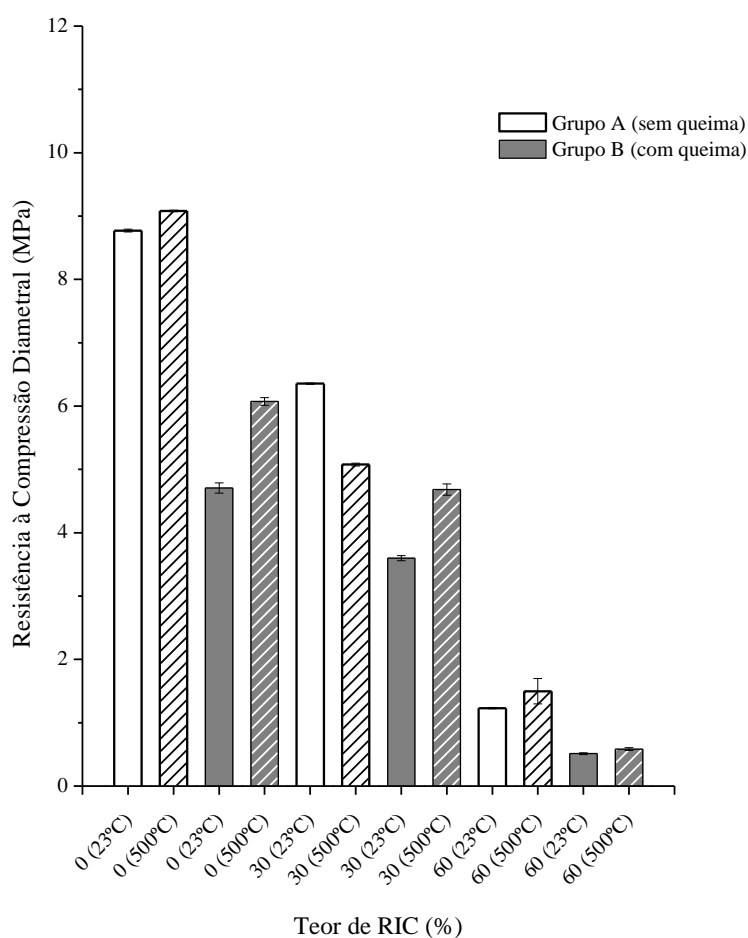
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 47. Resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos A e B sem cura úmida a 23 e 500 °C.**

A Figura 48 ilustra a resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

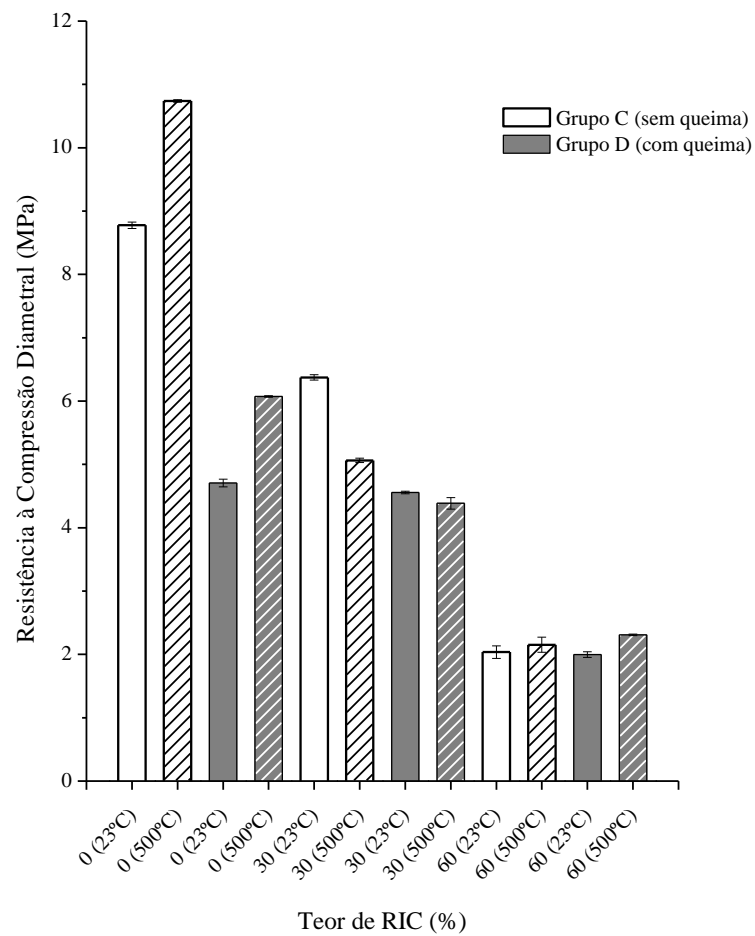


**Figura 48.** Resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos A e B submetidas a 28 dias de cura úmida a 23 e 500 °C.

#### 5.4.3.2 Formulações dos Grupos C e D

A Figura 49 ilustra a resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos C e D, sem cura úmida a 23 e 500 °C.

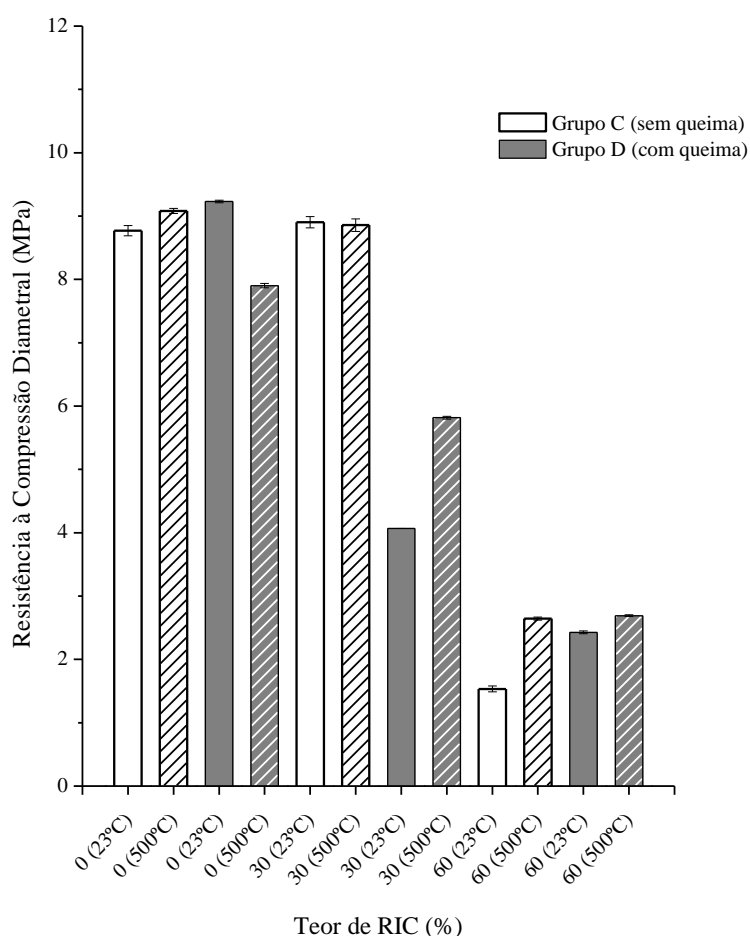
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 49. Resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos C e D sem cura úmida a 23 e 500 °C.**

A Figura 50 ilustra a resistência à compressão diametral das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida a 23 e 500 °C.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 50. Resistência à compressão das formulações dos Grupos C e D submetidas a 28 dias de cura úmida a 23 e 500 °C.**

O ensaio de resistência à compressão diametral a temperatura elevada (500 °C), apresentou algumas características que se assemelham ao comportamento da resistência à compressão à temperatura ambiente (23 °C) descrito em 5.3.2.

A tendência decrescente das propriedades mecânicas com o aumento da incorporação de RIC, bem como o efeito da mudança da granulometria das composições e da Cura Úmida, mais uma vez mostraram-se presentes. No entanto, os resultados não puderam ser propriamente comparados, visto que o equipamento, a forma dos corpos de prova e a técnica de concretagem foram diferentes, especialmente desenvolvidas para a realização deste ensaio.

Tanto o efeito da incorporação de RIC, como da mudança da granulometria das amostras e da Cura Úmida foram esperados, porém foi observado em algumas formulações valores de resistência à compressão diametral superiores para as amostras ensaiadas a 500 °C

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

do que a 23 °C.

Este efeito é oposto ao comportamento dos materiais refratários, de acordo com Duncan (2003).

Ao levarmos em consideração a utilização de um corpo de prova cilíndrico e não prismático, uma diferente técnica de concretagem, sem adensamento mecânico e de que, o corpo de prova até ser submetido ao ensaio à temperatura de 500 °C está sendo submetido a uma operação de tratamento térmico, que possivelmente apresenta o efeito de sinterização do mesmo, alterações do comportamento do material podem ser observadas.

Cabe ressaltar que, de acordo com a literatura, os materiais cerâmicos e em especial os materiais refratários após um tratamento térmico (queima) usualmente apresentam propriedades mecânicas superiores quando comparadas as dos não submetidos a tratamento térmico, porém quando o ensaio é realizado a temperaturas elevadas, os materiais tendem apresentar menores valores de resistência mecânica (DUNCAN e BRADT, 2003); (PRATA *et al.*, 2003); (BRADT, 2004).

Uma vez que a 500 °C os corpos de prova apresentaram fratura-frágil, foi possível verificar que seu comportamento frente a esforços a elevada temperatura não foi observado, sendo necessária a realização dos ensaios à temperaturas de operação aos quais os corpos de prova foram desenvolvidos para serem utilizados, que, de acordo com o fabricante do concreto refratário comercial, é de até 1400 °C.

Infelizmente, testes em temperaturas tão elevadas não puderam ser desenvolvidos, sendo esta uma limitação do trabalho.

De forma a prever o comportamento destes materiais, quando testados à temperaturas elevadas, buscou-se na literatura a compreensão dos fenômenos associados à fratura de refratários a temperaturas elevadas. De maneira típica os materiais refratários não são muito resistentes e tornam-se ainda menos resistentes à temperaturas mais elevadas, mas com menor fragilidade. Este fenômeno é observado devido à presença de silicatos em sua composição química, especialmente aqueles a base de sílica ou sílico-aluminosos. À medida que a temperatura é elevada, os silicatos amolecem e desenvolvem um significativo grau de plasticidade. A fratura de refratários à temperaturas elevadas mostra-se como dúctil, uma vez que a deformação plástica aparece como um tipo de resposta sob a maioria das condições de carregamento (DUNCAN e BRADT, 2003); (BRADT, 2004).

Os silicatos desenvolvem-se ligando fases em contornos de grãos que frequentemente dominam o seu processo de fratura a temperaturas elevadas (BRADT, 2004).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

De acordo com Duncan e colaboradores (2003), os resultados de resistência mecânica de um corpo de prova de escala laboratorial não geram números absolutos, porque a zona de propagação de trinca, frente e atrás, está apenas parcialmente desenvolvida. Devido a estes efeitos, testes em escala laboratorial devem apenas fornecer valores para a comparação entre diferentes microestruturas de refratários testados com as mesmas dimensões de corpo de prova e sob as mesmas condições de ensaio.

### 5.5 Propriedades Térmicas

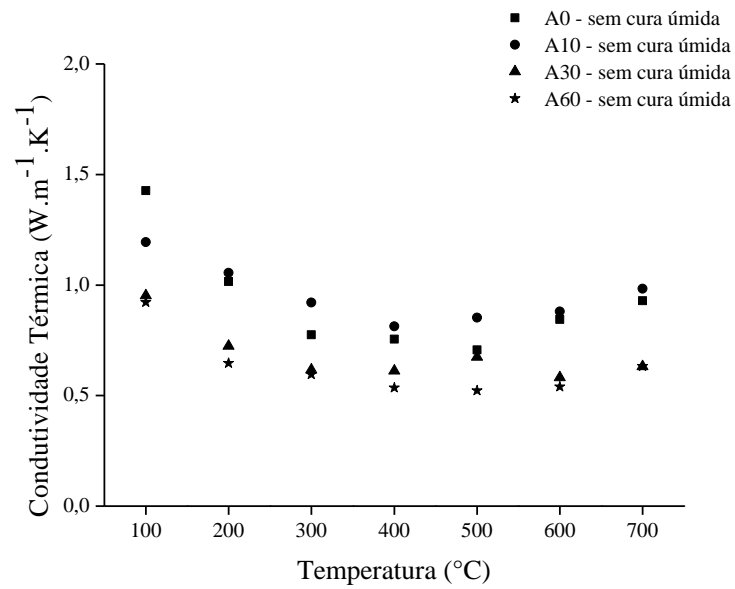
#### 5.5.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica pode ser considerada como uma das principais propriedades para os materiais refratários, visto que seu uso como isolante térmico é muito difundido. Neste sentido, menores valores de condutividade possibilitarão um maior isolamento térmico e os valores de condutividade térmica atribuídos aos materiais refratários determinarão sua melhor aplicação.

##### 5.5.1.1 *Formulações do Grupo A*

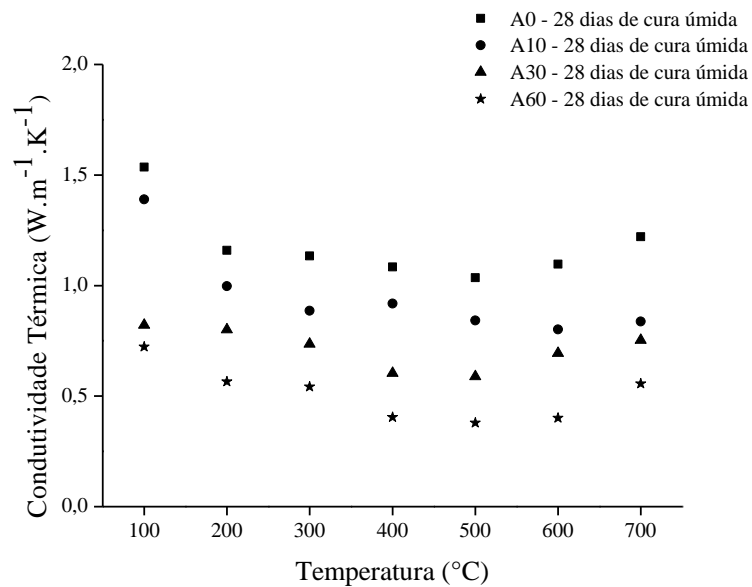
A Figura 51 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo A sem cura úmida em função da temperatura.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 51.** Condutividade térmica das formulações A0, A10, A30 e A60 sem cura úmida em função da temperatura.

A Figura 52 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo A submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.



**Figura 52.** Condutividade térmica das formulações A0, A10, A30 e A60 submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Os resultados de condutividade térmica para as formulações do Grupo A, com e sem cura úmida apresentaram pequenas alterações, quando observadas as curvas individuais para cada formulação.

Quando comparadas as curvas das formulações do Grupo A, sem Cura Úmida, Figura 51, cura úmida, Figura 52, observou-se um comportamento semelhante. Inicialmente todas as formulações apresentaram um decréscimo nos valores de condutividade térmica com a elevação da temperatura até 300 °C. Este comportamento é comumente observado para a grande maioria dos materiais cerâmicos, uma vez que a condutividade térmica diminui em função do aumento da temperatura (CALLISTER, 2008).

Os maiores valores de condutividade térmica observados a 100 °C podem, também, ser atribuídos à eliminação gradual de água presente nos interstícios do material, de acordo com Santos (2003). Deve-se levar em consideração que as amostras do Grupo A não passaram por operação de queima, sendo o primeiro ciclo térmico o utilizado durante o ensaio de condutividade térmica. A partir deste ponto, pôde-se, de forma geral, verificar uma estabilização nos valores de condutividade térmica para todas as formulações no intervalo de 300 a 500 °C.

Nas temperaturas de 200 a 300 °C ocorre a eliminação de 4,5 das 6 moléculas inicialmente presentes no hidrato formado durante a hidratação do CAC ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Esta informação torna-se importante, pois com a eliminação das moléculas de água dos hidratos formados, há uma mudança na fase mineralógica da matriz (SANTOS, 2000).

Com a eliminação da água da hidratação do CAC, a porosidade tende a aumentar e microtrincas surgem na matriz cimentícia conforme observado nas micrografias ópticas. De acordo com Santos (2000), a combinação desses efeitos mostra-se como uma efetiva barreira térmica, que resulta na diminuição dos valores de condutividade térmica.

Quando toda a água adsorvida é eliminada os poros ficam vazios, o que diminui a condutividade térmica, uma vez que nos poros há ar estagnado, que possui uma condutividade térmica extremamente baixa, na ordem de  $0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (NEWMAN e OWENS, 2003); (SANTOS, 2003).

A partir de 500 °C observou-se que o valor de condutividade térmica das formulações tendeu a uma elevação, comportamento este, também característico dos materiais cerâmicos (SANTOS, 2003); (CALLISTER, 2008).

A diminuição inicial da condutividade térmica com o aumento da temperatura é um fenômeno caracterizado pelo mecanismo de transferência de calor dos materiais cerâmicos, essencialmente realizado pelos fônons (vibrações cristalinas), uma vez que, este tipo de



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

material carece de grandes números de elétrons livres. As temperaturas de até 500 °C, a transferência de calor acontece predominantemente pela vibração da rede cristalina (fônons) (CALLISTER, 2008); (PAL *et al.*, 2012).

Uma vez que, os fônons não são tão efetivos como os elétrons livres no transporte de energia calorífica, com o aumento da temperatura o espalhamento das vibrações dos fônons se torna mais pronunciado, permitindo uma diminuição nos valores de condutividade térmica (CALLISTER, 2008).

A vibração da rede cristalina aumenta em frequência e amplitude de acordo com o aumento da temperatura até um estado de dispersão, seja por interações fônons-fônons, seja por imperfeições da rede cristalina (PAL *et al.*, 2012).

De maneira geral, nos materiais cristalinos a condutividade dos fônons diminui com o aumento da temperatura e com o aumento do estado de dispersão (PAL *et al.*, 2012).

Quando observado que, a partir de 500 °C, os valores de condutividade térmica começaram a elevar-se, houve uma modificação no mecanismo de transferência de calor, que passou da condução para a radiação. A partir deste momento o calor passou a ser transportado pelos fótons e pelos fônons e a eficiência desse processo aumentou em função da temperatura (SANTOS, 2003); (CALLISTER, 2008).

Além da radiação, outros fatores favoreceram o aumento da condutividade térmica a partir de 500 °C, como os efeitos de densificação, relacionada à operação de queima do material e da formação de produtos pseudo-amorfos, fenômenos estes, possivelmente relacionados às amostras estudadas (SANTOS, 2003); (GUALTIERI *et al.*, 2010).

Os produtos pseudo-amorfos estão relacionados à fase vítrea presente nos agregados, além da existente da própria hidratação do CAC com a água,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , também conhecida como gibbsita ou hidróxido de alumínio. Estas fases amorfas contribuem para o aumento da condutividade térmica (SANTOS, 2003); (GARCIA *et al.*, 2007).

Durante a queima, uma sequência de reações ocorreu como a desidratação dos minerais e a formação de produtos pseudo-amorfos (GUALTIERI *et al.*, 2010).

Concretos refratários apresentam natureza transitória, considerando que sua microestrutura muda em função da temperatura como consequência da eliminação da água adsorvida durante a cristalização, referente às reações de hidratação do CAC com a água. Neste processo são formadas novas fases e a propagação de microtrincas na matriz cimentícia. Após operações de queima, os concretos refratários apresentam comportamento térmico similar a refratários convencionais (SANTOS, 2003).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação ao comportamento térmico, comparando-se as formulações estudadas, notou-se, de forma geral, que com o aumento da incorporação de RIC, isto é, formulações A30 e A60, ocorreu uma diminuição nos valores de condutividade térmica, com diferenças mais pronunciadas para as formulações submetidas a 28 dias de Cura Úmida.

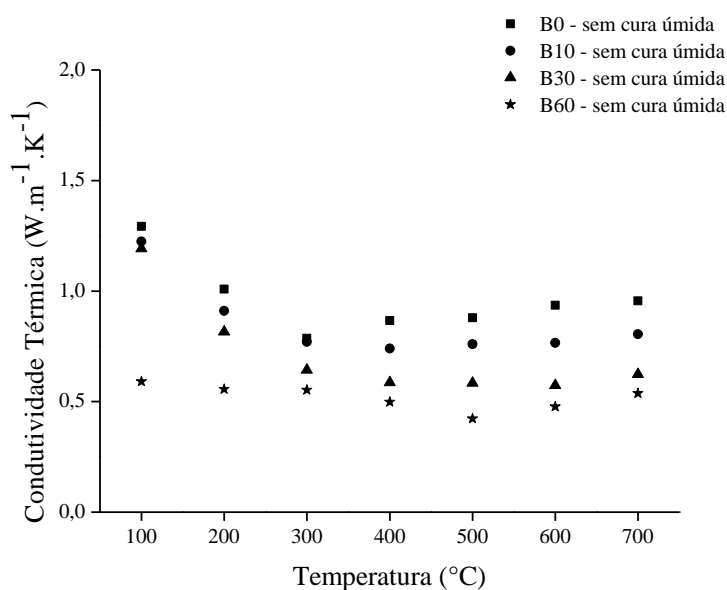
Para as formulações sem Cura Úmida, a maior condutividade térmica foi observada para a formulação A0 (sem incorporação de RIC) a 100 °C e a menor para A60 a 500 °C, 1,43 e 0,52  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , respectivamente.

Já para as formulações submetidas a 28 dias de cura, a maior e menor condutividade térmica também foram encontradas para A0 a 100 °C e A60 a 500 °C, 1,54 e 0,38  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , respectivamente.

Verificando o efeito da Cura Úmida para as formulações do Grupo A, observaram-se pequenas flutuações nos valores obtidos, porém os comportamentos permaneceram os mesmos, indicando que, a Cura Úmida, não influenciou de maneira significativa o comportamento térmico das formulações desse Grupo.

### 5.5.1.2 Formulações do Grupo B

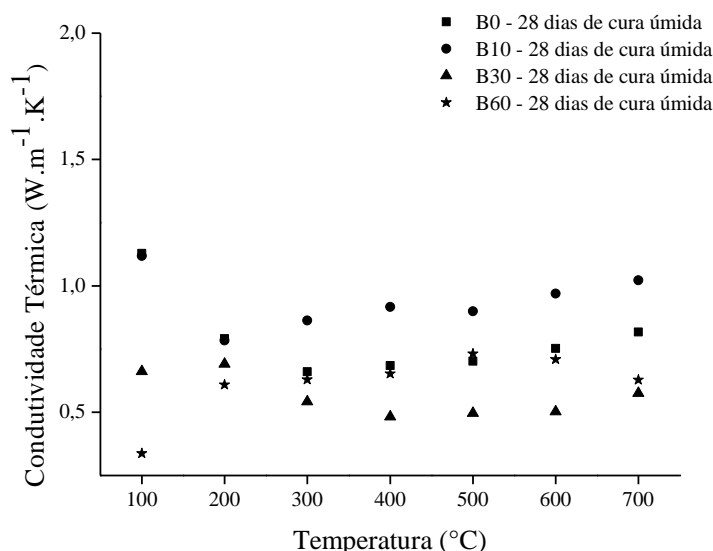
A Figura 53 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo B sem cura úmida em função da temperatura.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Figura 53. Condutividade térmica das formulações B0, B10, B30 e B60 sem cura úmida em função do tempo.**

A Figura 54 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo B submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.



**Figura 54. Condutividade térmica das formulações B0, B10, B30 e B60 submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.**

O comportamento observado para os valores de condutividade térmica das formulações do Grupo B se assemelha ao do Grupo A.

Para as formulações sem cura úmida, Figura 53, verificou-se um decréscimo inicial nos valores de condutividade térmica até a temperatura de 300 °C, exceto para a formulação B60, cujo comportamento mostrou-se constante ao longo de todo o ensaio.

A partir de 300 °C os valores mostraram uma tendência constante, com leves oscilações.

Não se verificou um aumento significativo nos valores de condutividade térmica após 500 °C, indicando um comportamento linear de cada formulação em função do aumento da temperatura.

A maior condutividade térmica para as formulações sem cura úmida foi verificada para B0 a 100 °C e a menor para B60 a 500 °C, 1,30 e 0,42 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, respectivamente.

Embora os valores não sejam exatamente os mesmos encontrados para as formulações do Grupo A, o comportamento muito se assemelha com o Grupo B,

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

comprovando que, com o aumento do teor de RIC nas granulometrias mais grosseiras (9, 10, 16, 28 e 48 *tyler mesh*), ouve uma redução da condutividade térmica.

O comportamento observado para as formulações do Grupo B após 28 dias de cura úmida mostrou algumas distinções.

Embora tenha sido observado o decréscimo característico nos valores de condutividade térmica nas temperaturas iniciais para as formulações B0 e B10, a formulação B30 se mostrou constante até 200 °C, seguida de leve decréscimo e comportamento constante a partir de 300 °C.

Em B60, o ponto inicial a 100 °C não está de acordo com a literatura, podendo ser desconsiderado do estudo. Após este ponto, os valores permaneceram praticamente constantes até 500 °C, com discreta tendência crescente a partir desta temperatura (SANTOS, 2000); (SANTOS, 2003).

Os maiores valores de condutividade térmica foram encontrados para as formulações B0 e B10 a 100 °C e o menor para B30 a 400 °C, 1,13 e 0,48  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , respectivamente.

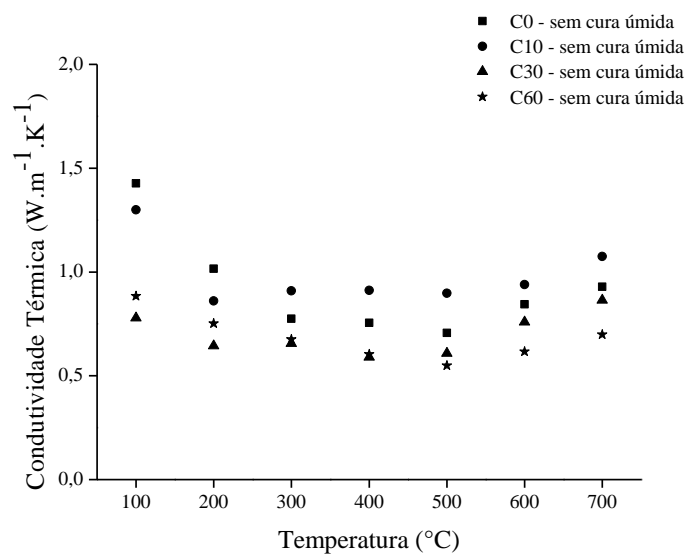
Esperava-se que, as menores condutividades térmicas fossem atribuídas a B60, uma vez que, apresentava maior quantidade de RIC. No entanto, este comportamento não foi observado, possivelmente devido a erros operacionais no momento da conformação dos corpos de prova, que pode influenciar nas propriedades finais do material.

De forma geral, considerando que as formulações do Grupo B passaram por uma operação de queima, o efeito observado pela queima ocasionou uma leve diminuição nos valores de condutividade térmica, quando comparados às formulações do Grupo A, sem queima.

### 5.5.1.3 Formulações do Grupo C

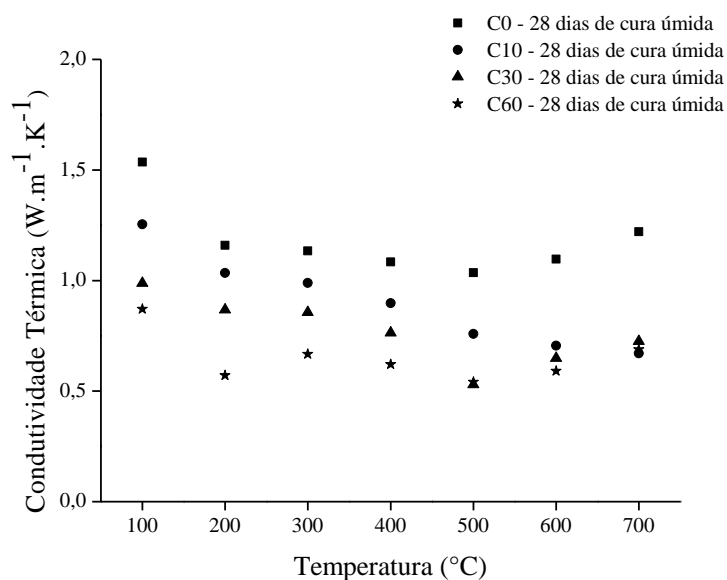
A Figura 55 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo C sem cura úmida em função da temperatura.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 55.** Condutividade térmica das formulações C0, C10, C30 e C60 sem cura úmida em função da temperatura.

A Figura 56 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo C submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.



**Figura 56.** Condutividade térmica das formulações C0, C10, C30 e C60 submetidas a 28 dias de cura úmida.

Observou-se para o Grupo C sem cura úmida, Figura 55, um comportamento semelhante ao verificado para os Grupos A e B.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Notou-se um comportamento decrescente nos valores de condutividade térmica até 300 °C, mais pronunciado para C0 e C10 e mais discreto para C30 e C60.

Entre 300 e 500 °C observou-se uma tendência constante para todas as formulações, seguida de um aumento nos valores a partir desta temperatura.

A maior condutividade térmica foi observada para C0 a 100 °C, mesmo valor de A0, tendo em vista que se tratavam das formulações controle (sem RIC incorporado) e o menor para C60 a 500 °C, 1,43 e 0,55  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , respectivamente.

Com relação ao Grupo C após 28 dias de Cura Úmida, Figura 56, observaram-se as mesmas tendências já descritas, com discretas flutuações para C60.

A maior condutividade térmica foi observada para C0 a 100 °C e as menores para C30 e C60, 1,43 e 0,54  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , respectivamente.

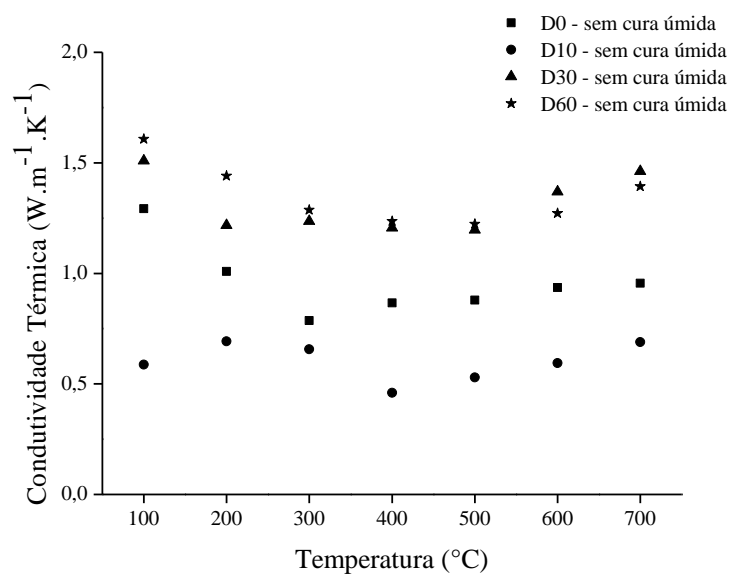
De forma geral observou-se que mesmo alterando-se a granulometria utilizada para a preparação das formulações com partículas mais finas, como no caso do Grupo C, o efeito mostrou-se semelhante ao dos Grupos A e B, ou seja, com o aumento do teor de RIC incorporado, houve uma diminuição nos valores de condutividade térmica. Este fato mostrou-se importante, uma vez que com maior teor de RIC utilizado nas composições, um maior isolamento térmico pode ser observado.

O aumento nos valores a partir de 500 °C, atribuído a mudança do mecanismo de transferência de calor de condução para radiação, mostrou-se mais pronunciado no Grupo C, em comparação aos Grupos A e B. Este fato, possivelmente, pode ser explicado pela maior concentração de SiO<sub>2</sub> atribuído à fase quartzosa e presente em proporções significativas no RIC, que tende a elevar a condutividade térmica dos refratários em temperaturas mais elevadas (GARCÍA-TEN *et al.*, 2010).

### 5.5.1.4 Formulações do Grupo D

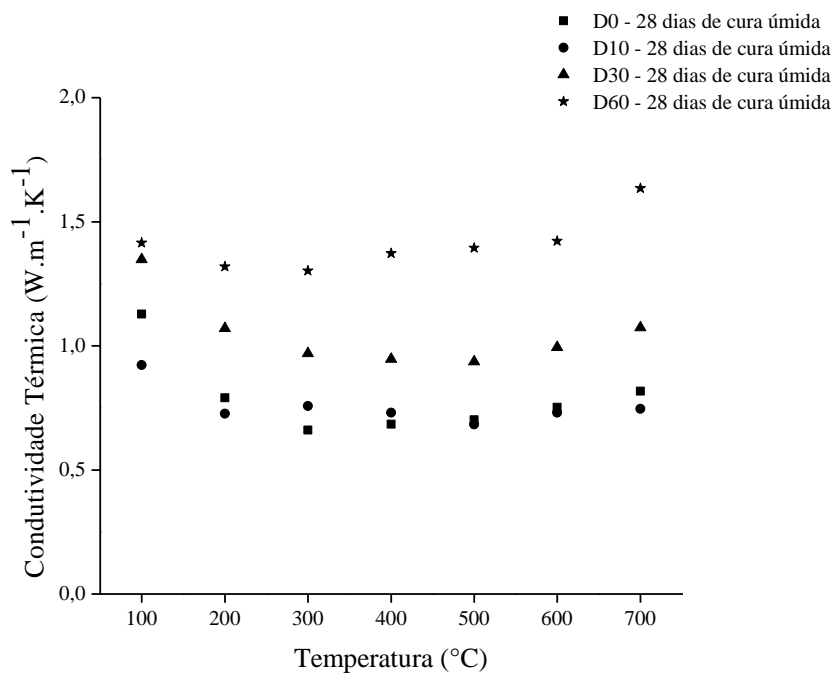
A Figura 57 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo D sem cura úmida em função da temperatura.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO



**Figura 57.** Condutividade térmica das formulações D0, D10, D30 e D60 sem cura úmida em função da temperatura.

A Figura 58 ilustra os resultados de condutividade térmica das formulações do Grupo D submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.



**Figura 58.** Condutividade térmica das formulações D0, D10, D30 e D60 submetidas a 28 dias de cura úmida em função da temperatura.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Verificando os resultados de condutividade térmica para as formulações do Grupo D, efeitos consideravelmente diferentes foram observados, em comparação ao Grupo C, uma vez que a única diferença entre os dois Grupos foi a operação de queima na qual o Grupo D foi submetido e o Grupo C não.

Na Figura 57, com exceção de alguns pontos aleatórios, a diminuição dos valores de condutividade térmica até 300 °C foi observada para D0, D30 e D60. Como descrito anteriormente, uma tendência constante entre as temperaturas de 300 e 500 °C foi observada, especialmente para as formulações D30 e D60.

A partir de 500 °C, um aumento gradual na condutividade térmica foi constatado.

Para D10 a partir de 300 °C verificou-se um comportamento constante com leve aumento nos valores de condutividade térmica.

Da mesma maneira, D10 após 400 °C apresentou aumento constante nos valores de condutividade térmica até a temperatura final do ensaio, 700 °C.

A maior condutividade térmica foi verificada para D60 a 100 °C e a menor para D10 a 400 °C, 1,61 e 0,46 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, respectivamente.

Já as formulações do Grupo D submetidas a 28 dias de cura úmida, Figura 58, apresentaram um comportamento semelhante às formulações sem cura úmida.

Foram observados decréscimos nas condutividades térmicas de todas as formulações até a temperatura de 300 °C, comportamento também observado para as análises dos outros Grupos.

Observou-se, também, um comportamento constante nos valores de condutividade térmica entre as temperaturas de 300 e 500 °C, levemente mais pronunciado para D60.

A partir de 500 °C, os valores de condutividade térmica apresentaram tendência crescente, até a temperatura final do ensaio, 700 °C.

As formulações D0 e D10 apresentaram pequenas variações nos valores de condutividade térmica ao longo do aumento da temperatura, enquanto que para D30 e D60, as variações foram mais significativas.

De maneira geral, a Cura Úmida apresentou o efeito de aumentar a condutividade térmica das formulações, especialmente para aquelas que apresentaram menores valores, como a D0 e D10.

A maior condutividade térmica foi verificada para a formulação D60 a 700 °C e a menor condutividade para D0 a 300 °C, 1,63 e 0,66 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os resultados observados para as formulações do Grupo D mostraram-se diferentes daqueles verificados para os outros Grupos. Enquanto que para os Grupos A, B e C o aumento



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

do teor de RIC incorporado teve como efeito a diminuição dos valores de condutividade térmica, para o Grupo D, com partículas de RIC mais finas e submetidas à operação de queima, foi observado o efeito contrário, tendo as formulações D30 e D60 apresentado maiores valores de condutividade térmica em função do aumento da temperatura.

Neste caso, verificou-se que a combinação da operação de queima com as partículas mais finas, provavelmente possibilitou uma mudança microestrutural importante para as formulações (GUALTIERI *et al.*, 2010).

A literatura descreve um aumento nos valores de condutividade térmica em função do aumento da temperatura para materiais cuja microestrutura apresente fases amorfas. Considerando o elevado teor de SiO<sub>2</sub> presente nas fases quartzosas dos RIC, bem como outros óxidos presentes em menores proporções, que podem atuar como fundentes, assim como os produtos pseudo-amorfos da hidratação do CAC, como a gibbsita, quando realizada a operação de queima das formulações do Grupo D, fases vítreas podem ter sido formadas, responsáveis pelo aumento da condutividade térmica em função do aumento da temperatura, especialmente para as formulações D30 e D60 (TRAORÉ *et al.*, 2003); (KHALFAOUI *et al.*, 2004); (TRAORÉ *et al.*, 2007); (GARCÍA-TEN *et al.*, 2010).

De acordo com Incropera (2008), o estudo da condutividade térmica deve levar em consideração a dissipação do calor durante o ensaio, assim como a queda de temperatura devido a uma resistência térmica de contato.

De forma a minimizar os efeitos de queda de temperatura e dissipação do calor, os ensaios de condutividade térmica foram realizados em sistema isolado, sendo a amostra envolvida por mantas de lã de vidro em forno revestido de tijolos refratários com porta hermeticamente fechada.

No intuito de verificar se o efeito da dissipação do calor durante a realização do ensaio foi significativo para alterações importantes na determinação dos valores de condutividade térmica das formulações estudadas, foi proposta a realização do mesmo ensaio para um material com condutividade térmica conhecida.

Desta forma, foi realizado o ensaio de condutividade térmica para uma amostra de aço SAE 4320. Os materiais metálicos, diferentemente dos cerâmicos, conduzem bem o calor, devido a um grande número de elétrons livres presentes em suas composições (CALLISTER, 2008).

Os resultados obtidos indicaram valores médios de condutividade térmica de  $46,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  para a amostra metálica, condizentes com os valores descritos pela literatura (CALLISTER, 2008); (INCROPERA *et al.*, 2008). Assim, verificou-se que o efeito da

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

dissipação de calor inerente aos testes realizados não promoveu um erro significativo para os resultados obtidos.

## 6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pelo presente estudo, pode-se afirmar que há a viabilidade técnica no uso dos resíduos de isoladores elétricos cerâmicos para a fabricação de revestimentos refratários não estruturais com a finalidade de isolamento térmico, especialmente à temperatura de 500 °C.

Podem-se, também, inferir as seguintes conclusões:

### Quanto às Propriedades Químicas

- Para os resíduos de isoladores cerâmicos (RIC), foram identificados em maior concentração o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), além de outros óxidos presentes em menores concentrações;
- O concreto refratário, da mesma forma, apresentou elevados valores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , além de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ );
- As composições dos resíduos de isoladores cerâmicos e do concreto refratário sílico-aluminoso mostraram-se quimicamente similares, o que favoreceu o potencial da incorporação de um no outro, para a obtenção dos artefatos cerâmicos.

### Quanto às Propriedades Físicas

- Com o aumento do teor de resíduo incorporado, foi observada uma leve diminuição nas densidades aparentes das formulações estudadas, sendo mais pronunciada para os Grupos A e B, em comparação aos Grupos C e D;
- O mesmo efeito foi observado para as formulações submetidas à operação de queima;
- A operação de queima apresentou como efeito a diminuição da densidade aparente das formulações.
- Não foram observadas grandes modificações nas propriedades medidas, indicando que a técnica adotada não foi suficientemente sensível para detectar alterações capazes de correlacionar as propriedades dos revestimentos produzidos com seus respectivos desempenhos.

## 6. CONCLUSÃO

---

### **Quanto às Propriedades Morfológicas**

- Verificou-se um aspecto mais heterogêneo da matriz com o aumento do teor de resíduo incorporado, mais pronunciado para os Grupos A e B em comparação aos Grupos C e D;
- O efeito da cura úmida não pôde ser observado por meio da técnica de Microscopia Óptica;
- Foram observadas, em todas as formulações, trincas e microtrincas que resultaram na fratura do material;
- Foram observados em todas as formulações estudadas, poros abertos, também responsáveis, embora em menor efeito, pela propagação das trincas.

### **Quanto às Propriedades Mecânicas**

- Foi observado que, com o aumento do teor de resíduo incorporado, houve uma diminuição das propriedades mecânicas dos revestimentos produzidos;
- A operação de queima apresentou como efeito a diminuição dos valores de resistência à tração na flexão e à compressão;
- A Cura Úmida elevou os valores de resistência à tração na flexão e à compressão;
- A variação da granulometria alterou as propriedades mecânicas dos revestimentos produzidos, tendo as formulações dos Grupos C e D apresentado maiores resistências que as formulações dos Grupos A e B;
- Foi observada fratura frágil para os corpos de prova estudados;
- Foi identificado que o mecanismo de fratura dos corpos de prova estudados foi influenciado essencialmente pela dimensão, forma e distribuição dos agregados de resíduo incorporado;

### **Quanto às Propriedades Térmicas**

- Foi observada, uma diminuição da condutividade térmica para as formulações estudadas com o aumento do teor de resíduo incorporado;

## 6. CONCLUSÃO

---

- A mudança na granulometria das formulações apresentou efeitos no comportamento térmico dos materiais, tendo os Grupos C e D apresentado maiores condutividades térmicas, em relação aos Grupos A e B;
- A cura úmida aumentou a condutividade térmica, especialmente para as formulações com menor teor de resíduo incorporado;
- A operação de queima diminuiu a condutividade térmica especialmente para as formulações dos Grupos A e B, e aumentou os valores de condutividade térmica para as formulações dos Grupos C e D;
- O comportamento térmico das formulações estudadas apresentou condutividades térmicas similares ou inferiores às obtidas nas formulações controle, ou seja, sem resíduo incorporado;
- As menores condutividades térmicas foram observadas a 500 °C, indicando a temperatura ideal de operação para isolamento térmico dos revestimentos produzidos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. **Métodos de Fabricação de Porcelana e Dados de Mercado de Isoladores Elétricos de Porcelana**. Disponível: <www.abceram.org.br>. Acesso em: 31/05/2012.

AKIYOCHI, M. M.; PEREIRA, R.; SILVA, A. P.; PANDOLFELLI, V. Effect of alumina content, porosity and temperature on the thermal conductivity of refractories. **American Ceramic Bulletin**, 82, p. 29 – 33, 2003.

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. 4ª Ed. Editora Chapman and Hall, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C133: Standard Test Method for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories**, 1997 (reaprovada em 2008), 6 p.

\_\_\_\_\_. **C16-03: Standard Test Method for Load Testing Refractory Shapes at High Temperatures**, 2003 (reaprovada em 2008), 5 p.

\_\_\_\_\_. **C1605-04: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Ceramic Whiteware Materials Using Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry**, 2004 (reaprovada em 2009), 5 p.

\_\_\_\_\_. **C33-03: Standard Specification for Concrete Aggregates**, 2003, 11 p.

\_\_\_\_\_. **C373-88: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products**, 1988 (reaprovada em 2006), 2 p.

\_\_\_\_\_. **C862-02: Standard Practice for Preparing Refractory Concrete Specimens by Casting**, 2002 (reaprovada em 2008), 5 p.

\_\_\_\_\_. **C865-02: Standard Practice for Firing Refractory Concrete Specimens**, 2002 (reaprovada em 2007), 3 p.

\_\_\_\_\_. **C868-02: Standard Practice for Preparing Refractory Concrete Specimens by Casting**, 2002 (reaprovada em 2008), 5 p.

\_\_\_\_\_. **D7348-08: Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues**, 2008, 7 p.

\_\_\_\_\_. **E1225-09: Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique**, 2009, 9 p.

\_\_\_\_\_. **E2651-10: Standard Guide for Powder Particle Size Analysis**. 2010, 7 p.

\_\_\_\_\_. **MNL 32: Manual on Test Sieving Methods**. Lawrence R. Pope; Charles W. Ward. Comitê ASTM E-29, 1998, 43 p.

## REFERÊNCIAS

AMIRTHAN, G.; KUMAR, A. U.; BALASUBRAMANIAN, M. Thermal Conductivity studies on Si/SiC ceramic composites. **Ceramics International**, 37, p. 423 – 426, 2011.

ANDERSSON, L.; JONES, A. C.; KNACKSTEDT, M. A.; BERGSTRÖM, L. Permeability, pore connectivity and critical pore throat control expandable polymeric sphere templated macroporous alumina. **Acta Materialia**, 59, p. 1239 – 1248, 2011.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.479: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassas e concreto**. Rio de Janeiro, 1994, 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.004: resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004, 71 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13.279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005, 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13.280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 2005, 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.479: Câmara úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassa e concreto**. Rio de Janeiro, 1994, 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.935: agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1987, 6 p.

BAKER, K. L.; WARNER, D. H. Simulating dynamic fragmentation process with particles and elements. **Engineering Fracture Mechanics**, 84, p. 96 – 110, 2012.

BAKER, T. J.; ZIMBA, J.; AKPAN, E. T.; BASHIR, I.; WATOLA, C. T.; SOBOYEJO, W. O. Viscoelastic toughening of aluminosilicate refractory ceramics. **Acta Materialia**, 25, p. 2665 – 2675, 2006.

BANERJEE, S. Properties of Refractories. In: SCHACHT, C. A. (Ed). **Refractories handbook**. Marcel Decker Inc. New York, N. Y. 2004.

BERGMANN, C. P. **Introdução aos Materiais Cerâmicos**. Material disponibilizado na Disciplina de Introdução aos Materiais Cerâmicos. Apresentação em slides. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2002.

BLACKADDER, D. A.; NEDDERMAN, R. M. **Manual de Operações Unitárias**. Editora Hemus. São Paulo, 1982.

BRADT, R. C. Fracture of Refractories. In: SCHACHT, C. A. (Ed). **Refractories handbook**. Marcel Decker Inc. New York, N. Y. 2004.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, n.º 147, 03 ago., 2010. Seção 1. pt 3.

BRITO, F. V. **Processamento de cerâmicas porosas à base de sílica visando aplicações na indústria do petróleo.** 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. 158 f.

BROSNAN, D. A. Alumina-Silica Brick. In: SCHACHT, C. A. (Ed). **Refractories handbook.** Marcel Decker Inc. New York, N. Y. 2004.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Editora LTC. 5ª Ed. Rio de Janeiro. 2002.

\_\_\_\_\_. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Editora LTC. 7ª Ed. Rio de Janeiro. 2008.

CAMPOS, M. A. **Estudo do Reaproveitamento de Isoladores Elétricos de Porcelana como Agregados em Argamassas e Concretos.** 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2009, 155 f.

\_\_\_\_\_. **Análise Microestrutural e das Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Argamassas e Concretos com Isoladores Elétricos de Porcelana.** 2011. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2011, 197 f.

CANNIO, M.; HANUSKOVA, M. Os materiais refratários. **Pesquisa & Desenvolvimento**, p. 24 – 29, 2008.

CARNEIRO, A. P. Reciclagem do Entulho da Região Metropolitana de Salvador para a Produção de Materiais de Construção de Baixo Custo. In: **Anais do IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.** Porto Seguro, Bahia, 2000.

CHINELATTO, A. L.; SOUZA, D. P. F. Porcelanas elétricas aluminosas: Parte I - revisão da literatura. **Cerâmica**, 50, p. 62 – 68, 2004.

\_\_\_\_\_. Porcelanas elétricas aluminosas: Parte II - desenvolvimento da microestrutura e sua influência no módulo de ruptura. **Cerâmica**, 50, p. 172 – 184, 2004.

COSTA, J. S.; BENINI, V. A.; MARTINS, C. A.; BALDO, J. B. Uso do rejeito virgem da indústria de piso cerâmico esmaltado no desenvolvimento de concreto estrutural. In: **Anais do Congresso Brasileiro do Concreto**, 47, 2005, Recife: IBRACON, 2005.

DEMIRBOGA, R.; GUL, R. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. **Energy and Buildings**, 35, p. 1155 – 1159, 2003.



## REFERÊNCIAS

- DENOUAL, C.; HILD, F. A damage model for the dynamic fragmentation of brittle solids. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 183, p. 247 – 258, 2000.
- DÍAZ, L. A.; TORRECILLAS, R.; SIMONIN, F.; FANTOZZI, G. Room temperature mechanical properties of high alumina refractory castables with spinel, periclase and dolomite additions. **Journal of the European Ceramic Society**, 28, p. 2853 – 2858, 2008.
- DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle packing II – Review of packing of polydisperse particle system. **Interceram**, 41, p. 95 – 97, 1992.
- DONDI, M.; MAZZANTI, F.; PRINCIPI, P.; RAIMONDO, M.; ZANARINI, G. Thermal conductivity of clay bricks: The Influence of Microstructure and Phase Composition. **Techna Science for New Technology of Silicate Ceramics**, p. 223 – 230, 2003.
- \_\_\_\_\_. Thermal conductivity of clay bricks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 16, p. 8 – 14, 2004.
- DUNCAN, F. N. C.; BRADT, R. C. Fratura de Refratários. **Cerâmica**, 49, p. 199 – 215, 2003.
- ERKER, A. The thermal conductivity of the brick ceramic body (Part 1). **Ziegelindustrie International**, 55, p. 34 – 42, 2002.
- ESTADOS UNIDOS DA AMERICA (EUA). **Harzarduos** Waste Management: Protection of Environmental. Title 40, Part 260 – 265. **Code of Federal Regulations (CRF)**, 2000.
- FERREIRA, M. G.; SÁ, H. D.; GUARIZZO, V. T.; RIBEIRO, B. G.; ZANIN, C. I. C. B. Utilização da sucata de isoladores cerâmicos para preenchimento de gabiões. **Gestão em Foco**, União das Instituições de Serviços, Ensino e Pesquisa dos Estados de Minas Gerais e São Paulo, 2010.
- FICKER, T. **Retracted**: Fractal Dimensions of Fracture Surfaces. **Journal of Engineering Mechanics**, p. 174 – 178, 2010.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 670 p, 1982.
- FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: An Eco Material That Needs to be Improved. **Journal of the European Ceramic Society**, 32, p. 2787 – 2798, 2012.
- FREDMAN, T. P.; SAXEN, H. Model for temperature profile estimation in refractory of a metallurgical ladle. **Metallurgical and Materials Transactions**, 29, p. 651 – 659, 1998.
- FRITZ, L. **Construções de concreto – Primeiro volume: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Editora Interciência Ltda. 1ª Ed. Rio de Janeiro. 1977.

## REFERÊNCIAS

- GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio. **Cerâmica**, 53, p. 42 – 56, 2007.
- GARCÍA-TEN, J.; ORTS, M. J.; SABURIT, A.; SILVA, G. Thermal conductivity of traditional ceramics Part II: Influence of mineralogical composition. **Ceramics International**, 36, p. 2017 – 2024, 2010.
- GOMIDE, R. **Operações Unitárias: Operações com Sistemas Sólidos Granulares**. São Paulo: Editora CIP-Brasil, vol. 1, 1983.
- GRADY, D. E. Fragment size distributions from dynamic fragmentation of brittle solids. **International Journal of Impact Engineering**, 35, p. 1557 – 1562, 2008.
- GUALTIERI, M. L.; GUALTIERI, A. F.; GAGLIARDI, S.; RUFFINI, P.; FERRARI, R.; HANUSKOVA, M. Thermal conductivity of fired clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials. **Applied Clay Science**, 49, p. 269 – 275, 2010.
- GUNGOR, A.; CELIKCIOGLU, O.; SAHIN, S. The physical and mechanical properties of alumina-based ultralow cement castable refractories. **Ceramics International**, 38, p. 4189 – 4194, 2012.
- HALL, C.; HOLFF, W. D.; **Water transport in brick, stone and concrete**. Taylor and Francis, 318 p, 2002.
- HARMUTH, H.; RIEDER, K.; KROBATH, M.; TSCHEGG, E. Investigation of the nonlinear fracture behaviour of ordinary ceramic refractory materials. **Materials Science and Engineering A214**, p. 53 – 61, 1996.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1ª Ed. Brasília: Editora Pini, 348 p, 1993,.
- HERRMANN, H. J.; WITTEL, F. K.; KUN, F. Fragmentation. **Physica A**, 371, p. 59 – 66, 2006.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Editora LTC, 6º Ed. Rio de Janeiro. 2008.
- INNOCENTINI, M. D. M.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Permeabilidade de concretos refratários multifuncionais. **Cerâmica**, 47, p. 34 – 39, 2001.
- IVANOV, S. N.; KHAZANOV, E. N.; LOJKOWSKI, W.; ZHUKOVA, L. M.; TARANOV, A. V. The scattering of non-equilibrium phonons on grain boundaries in single-phase ceramics. **Physica B: Condensed Matter**, 263 – 264, p. 698 – 701, 1999.
- KARADENIZ, E.; GURCAN, C.; OZGEN, S.; AYDIN, S. Properties of alumina based low-cement self flowing castable refractories. **Journal of the European Ceramic Society**, 27, p. 1849 – 1853, 2007.

## REFERÊNCIAS

- KHALFAOUI, A.; KACIM, S.; HAJJAJI, M.; Sintering mechanism and ceramic phases of an illitic-chloritic raw clay. **Journal of the European Ceramic Society**, 26, p. 161 – 167, 2004.
- KLEMES, P. G. Heat conduction in solids by phonons. **Thermochimica Acta**, 218, p. 247 – 255, 1993.
- KOVLER, K.; ROUSSEL, N. Properties of fresh and hardened concrete. **Cement and Concrete Research**, 41, p. 775 – 792, 2011.
- KRIETZ, L. Refractory Castables. In: SCHACHT, C. A. (Ed). **Refractories handbook**. Marcel Decker Inc. New York, N. Y. 2004.
- KYPRIANOU, A. E.; PARDO, J. C. An optimal stopping problem for fragmentation process. **Stochastic Processes and their Applications**, 122, p. 1210 – 1225, 2012.
- LIU, Z.; CHEN, Q.; XIE, X.; XUE, G.; DU, F.; NING, Q.; HUANG, L. Utilization of the sludge derived from dyestuff-making wastewater coagulation. **Construction and Building Materials**, 25, p. 1699 – 1706, 2011.
- MAGALHÃES, A. **Manual do Engenheiro Globo – Quarto volume, Tomo 1**. Editora Globo. 8ª Ed. Porto Alegre. 1977.
- MCCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. McGraw-Hill Companies, New York, 1993.
- MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Editora: LTC - Livros Técnicos e Científicos. 2ª. Ed. Rio de Janeiro, 456 p. v. 2, 1994.
- MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **Cement & Concrete Composites**, 34, p. 48 – 54, 2011.
- MEHTA, P. K. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª Ed. Editora Pini. São Paulo, SP, 1994.
- MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como materiais-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 6, p. 303 – 313, 2002.
- MONTGOMERY, R. Heat-resisting and refractory concretes. **Advanced Concrete Technology - Processes**. 1ª Ed. Editora Elsevier. Londres, 2003.
- MORABITO, P. Measurement of thermal properties of different concretes. **High Temperatures-High Pressures**, 21, p. 51 – 59, 1989.
- MUNZ, D.; FETT, T. **Ceramics: mechanical properties, failure behaviour, material selection**. 2ª Ed. Editora Springer. Nova Iorque, 298 p, 2001.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Editora Pini Ltda. 2ª Ed. São Paulo. 1997.

## REFERÊNCIAS

- NEWMAN, J.; OWENS, P. Properties of lightweight concrete. **Advanced Concrete Technology - Processes**. 1ª Ed. Editora Elsevier. Londres, 2003.
- NODA, K.; NAKAZAWA, T.; OYAMA, Y.; YAMAKI, D.; IKEDA, Y. Electrical resistivity of ceramic insulators under irradiation using 14 MeV nêutrons. **Journal of Nuclear Materials**, 233-237, p. 1289 – 1293, 1996.
- OUEDRAOGO, E.; ROUSEFID, M.; PROMPT, N. DETEUF, C. Refractory concretes uniaxial compression behaviour under high temperature testing conditions. **Journal of the European Ceramic Society**, 31, p. 2163 – 2774, 2011.
- PAL, A. R.; BHARATI, S.; KRISHNA, N. V. S.; DAS, G. C.; PAL, P. G. The effect of sintering behaviour and phase transformations on strength and thermal conductivity of disposable tundish linings with varying compositions. **Ceramics International**, 38, p. 3383 – 3389, 2012.
- PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. Bauxitas refratárias: composição química, fases e propriedades - Parte II. **Cerâmica**, 46, p. 131 – 138, 2000.
- PEREIRA, F. R.; RIBEIRO, M. J.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Extrusion and property characterization of waste-based ceramic formulations. **Journal of the European Ceramic Society**, 27, p. 2333 – 2340, 2007.
- PERFECT, E. Fractal models for the fragmentation of rocks and solids: a review. **Engineering Geology**, 48, p. 185 – 198, 1997.
- PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 6ª Ed. Editora McGraw-Hill Book Company. Singapura, 1984.
- POKORNY, A. **Obtenção e caracterização de espumas vítreas a partir de resíduos de vidro sodo-cálcico e calcário dolomítico como agente espumante**. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006, 129 f.
- PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; FRANCK, R.; DERKSEN, R. Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto: determinação do desempenho sob envelhecimento acelerado. **Cerâmica**, 52, p. 155 – 167, 2006.
- PRATA, L. B.; LIBARDI, W.; BALDO, J. B. The Effect of Aggregate Aspect Ratio and Temperature on Fracture Toughness of a Low Cement Refractory Concrete. **Materials Research**, 6, p. 545 – 550, 2003.
- PROMPT, N. OUEDRAOGO, E. High temperature mechanical characterization of an alumina refractory concrete for blast furnace main through – Part I: General context. **Journal of the European Ceramic Society**, 28, p. 2859 – 2565, 2008.
- QUESADA, D. E.; GARCÍA, C. M.; CARTAS, M. L. M.; PALOMINO, M. T. C.; VILLAREJO, L. P.; PÉREZ, N. C.; IGLESIAS, F. A. C. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. **Applied Clay Science**, 52, p. 270 – 276, 2011.

## REFERÊNCIAS

---

RANDOLPH, A. D.; LARSON, M. A. **Theory of Particulate Process - Analysis and Techniques of Continuous Crystallization**. Editora Academic Press. Nova Iorque, 1971.

REED, J. S. **Engineered Materials Handbook**. Editora ASM International, 1991.

\_\_\_\_\_. **Principles of Ceramics Processing**. Editora Wiley-Interscience, 658 p, 1995.

RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A.; The influence of microstructure on the maximum load and fracture energy of refractory castables. **Ceramics International**, 36, p. 263 – 274, 2010.

RICE, R. W. **Porosity of Ceramics**. Editora Marcel Dekker Inc. 1ª Ed. Nova Iorque, 539 p, 1998.

RICHERSON, D. W. **Modern Ceramic Engineering – Properties, Processing and Use in Design**. Third Edition, Taylor & Francis, 2006.

SANTOS, W. N. Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic materials. *Journal of Materials Science*, 35, p. 3977 – 3982, 2000.

\_\_\_\_\_. **Effect** of moisture and porosity on the thermal properties of a conventional refractory concrete. *Journal of the European Ceramic Society*, 23, p. 745 – 755, 2003.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; PINTO, D. G.; OLIVEIRA, L. A.; DEVEZAS, T. C. Effect of particle size distribution and calcium aluminate cement on the rheological behaviour of all-alumina refractory castables. **Powder Technology**, 226, p. 107 – 113, 2012.

SIMONIN, F.; OLAGNON, C.; MAXIMILIEN, S.; FANTOZZI, G. Room temperature quasi-brittle behaviour of an aluminous refractory concrete after firing. **Journal of the European Ceramic Society**, 22, p. 165 – 172, 2002.

SINGH, J. P.; THOMAS, J. R.; HASSELMAN, D. P. H. Analysis of effect of heat-transfer variables on thermal stress resistance of brittle ceramics measured by quenching experiments. **Journal of the American Ceramic Society**, 63, p. 140 – 144, 1979.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**. Editora Prentice Hall, 2000.

SCHMIT, V. **Materiais elétricos**. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 166p. v. 2, 1979.

SCHULLER, D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas. **Cerâmica**, 54, p. 435 – 442, 2008.

SCRIVENER, K.; CAPMAS, A. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4ª Ed. Editora Elsevier Ltd. 2003.

SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**, 27, p. 910 – 913, 2005.

## REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_.; GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste: durability properties. **Construction and Building Materials**, 25, p. 2413 – 2419, 2011.
- SOUSA, F. J. P.; NEVES, W. F.; ALARCON, O. E. Estudo da viabilidade de obtenção de isoladores elétricos a partir de resíduos de esmaltação. **Cerâmica**, 50, p. 217 – 224, 2004.
- STEIGER, R. W.; HURD, M. K. Lightweight insulating concrete for floors and roofs decks. **Concrete Construction**, 23, p. 411 – 422, 1978.
- STUDART, A. R.; DIAS, L. L.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; MENEGAZZO, B. A.; MAURÍCIO, M. R. D. Utilização de alumina na fabricação de isoladores elétricos para alta tensão. **Cerâmica Industrial**, 01, p. 32 – 36, 1996.
- TERMKHAJORNKIT, P.; BARBARULO, R. Modeling the coupled effects of temperature and fineness of Portland cement on the hydration kinetics in cement paste. **Cement and Concrete Research**, 42, 526 – 538, 2012.
- THUMMEN, F.; OLAGNON, C. GODIN, N. Cyclic fatigue and lifetime of a concrete refractory. **Journal of the European Ceramic Society**, 26, p. 3357 – 3363, 2006.
- TRAORÉ, K.; KABRÉ, T. S.; BLANCHART, P. Gehliline and anorthite crystallization from kaolinite and calcite mix. **Ceramics International**, 29, p. 377 – 383, 2003.
- \_\_\_\_\_.; OUEDRAOGO, G. V.; BLANCHART, P.; JERNOT, J. P.; GORMINA, M. Influence of calcite on the microstructure and mechanical properties of pottery ceramics obtained from a kaolinite-rich clay from Burkina Faso. **Journal of the European Ceramic Society**, 27, p. 1677 – 1681, 2007.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S. Reusing ceramic waste in concrete. **Construction and Building Materials**, 24, p. 832 – 838, 2010.
- UKRAINCZYK, N.; MATUSINOVIC, T. Thermal properties of hydrating calcium aluminate cements pastes. **Cement and Concrete Research**, 40, p. 128 – 136, 2010.
- UYSAL, H.; DEMIBORGA, R.; SAHIN, R.; GUL, R. The Effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. **Cement and Concrete Research**, 34, p. 845 – 848, 2004.
- VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. Editora Edgar Blücher. São Paulo, 1973.
- \_\_\_\_\_. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Editora Campus. Rio de Janeiro, 1998.
- VIAN, A.; OCÓN, J. **Elementos de Ingeniería Química (Operaciones Básicas)**. Editora Aguilar. 5ª Ed. Madri, 1972.

## REFERÊNCIAS

---

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. **Cerâmica**, 55, p. 332 – 336, 2009.

WANG, P.; XU, L. Hydration properties of Portland cement plus calcium aluminate cement at 0~20°C. **Procedia Engineering**, 27, p. 253 – 260, 2012.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 42, p. 20 – 26, 2012.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Aspecto Macroscópico dos Agregados de RIC após Cominuição nas Diferentes Faixas Granulométricas



Figura 59. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 4 tyler mesh.

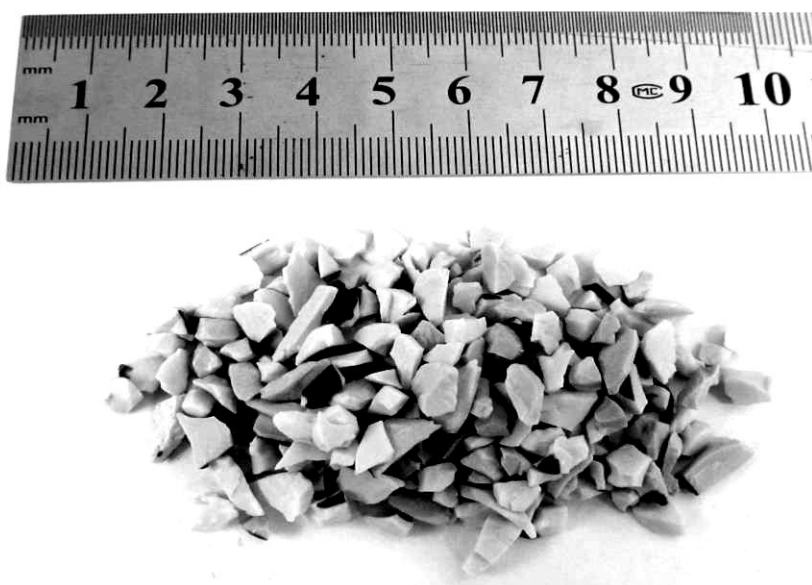
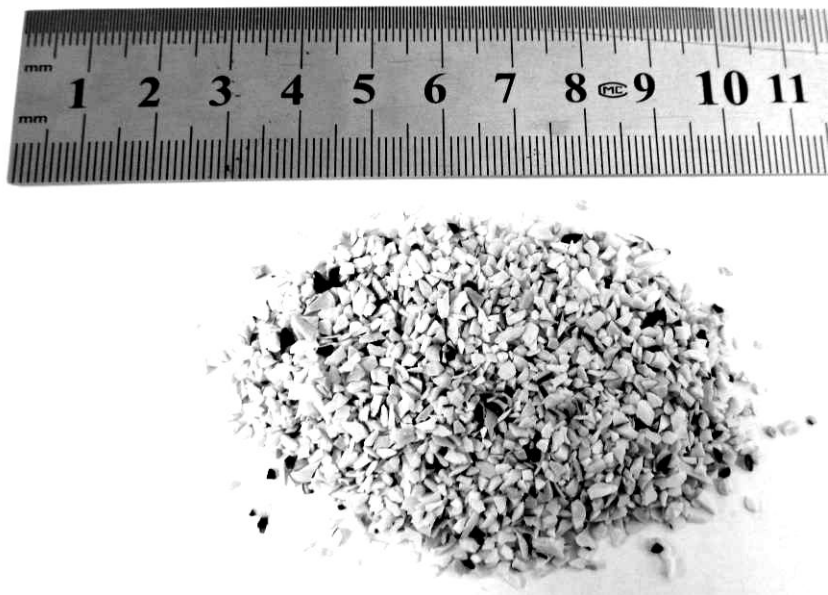


Figura 60. Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 6 tyler mesh.





**Figura 61.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *9 tyler mesh*.



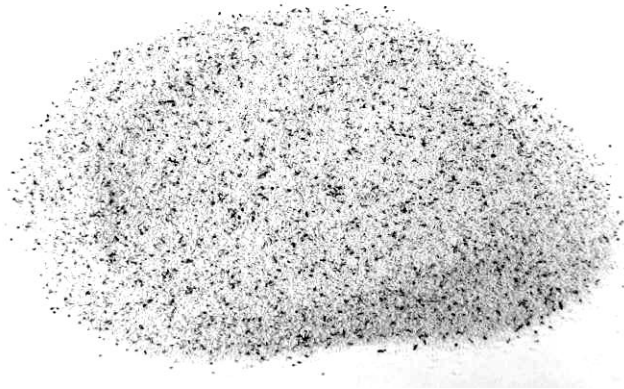
**Figura 62.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *10 tyler mesh*.



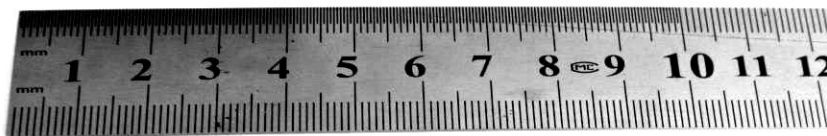
**Figura 63.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 16 tyler mesh.



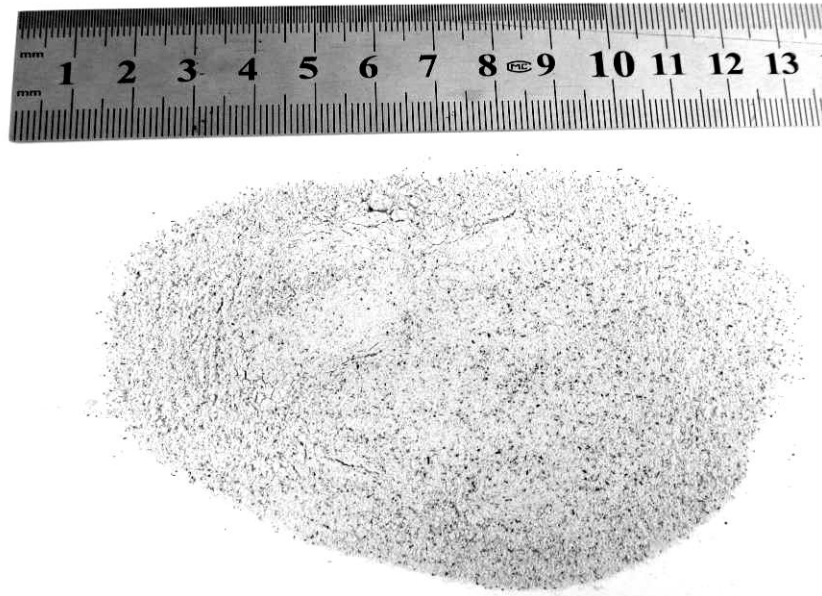
**Figura 64.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de 28 tyler mesh.



**Figura 65.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *48 tyler mesh*.



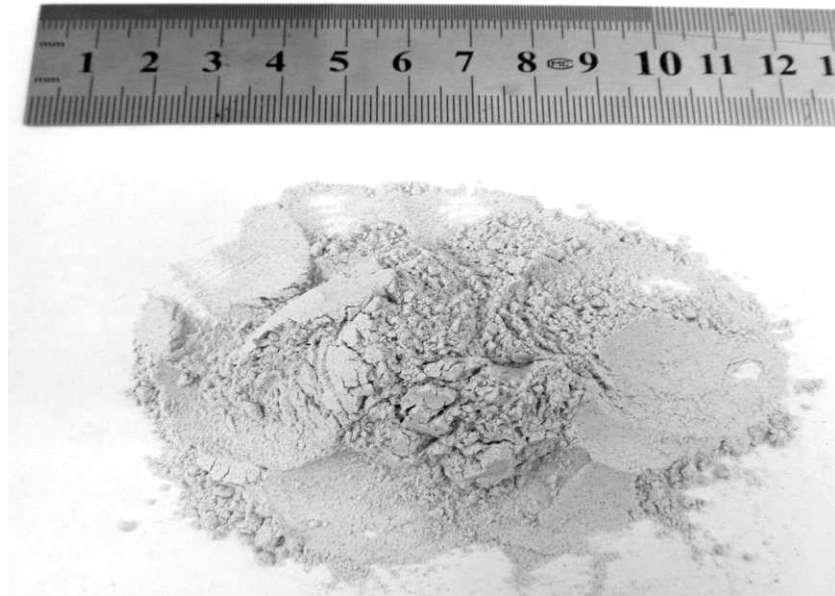
**Figura 66.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *60 tyler mesh*.



**Figura 67.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *65 tyler mesh*.



**Figura 68.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *100 tyler mesh*.



**Figura 69.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC retidos na peneira de *200 tyler mesh*.



**Figura 70.** Fotografia do aspecto morfológico dos agregados de RIC passantes na peneira de *200 tyler mesh*.

## ANEXOS

## ANEXO 2. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do Grupo A

**Tabela 13. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A0 com sem Cura Úmida.**

**Formulação: A0**

Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,01		39,94	39,93	161,68	161,22	500	503,33
2	40,81	40,79	39,93	± 0,01	160,98	± 0,40	500	± 5,77
3	41,55	± 0,77	39,93		161		510	

**Tabela 14. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A10 sem Cura Úmida.**

**Formulação: A10**

Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,93		41,43	40,46	161,02	161,04	535	520
2	42,19	41,93	39,94	± 0,84	161,04	± 0,03	515	± 13,23
3	41,67	± 0,26	40,01		161,07		510	

**Tabela 15. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A20 sem Cura Úmida.**

**Formulação: A20**

Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,58		41,52	41,47	160,44	160,64	525	526,67
2	41,39	41,79	41,13	± 0,31	160,6	± 0,22	515	± 12,58
3	42,41	± 0,54	41,75		160,87		540	

## ANEXOS

**Tabela 16. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A30 sem Cura Úmida.**

Formulação: A30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,11		39,95	39,93	161,24	160,75	485	485
2	40,3	± 0,10	39,92	± 0,02	160,66	± 0,45	485	± 0
3	40,2		39,93		160,35		485	

**Tabela 17. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A40 sem Cura Úmida.**

Formulação: A40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,96		41,13	40,82	161,93	161,55	500	495
2	41,43	± 0,27	40,45	± 0,34	161,05	± 0,45	490	± 5
3	41,62		40,88		161,68		495	

**Tabela 18. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A50 sem Cura Úmida.**

Formulação: A50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,3		39,56	39,49	160,81	160,88	450	448,33
2	40,4	± 0,10	39,37	± 0,11	160,94	± 0,07	445	± 2,89
3	40,21		39,55		160,9		450	

**Tabela 19. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A60 sem Cura Úmida.**

Formulação: A60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,05		40,16	39,93	160,9	160,83	425	428,33
2	40,09	± 0,12	39,9	± 0,21	161,25	± 0,46	430	± 2,89
3	40,27		39,74		160,34		430	

## ANEXOS

Tabela 20. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A0 com 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: A0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,05		40,16		160,9		425	
2	40,09	40,14	39,9	39,93	161,25	160,83	430	428,33
3	40,27	± 0,12	39,74	± 0,21	160,34	± 0,46	430	± 2,89

Tabela 21. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A10 com 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: A10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40		39,9		160,5		509,1	
2	40,3	40,10	39,9	39,9	160,2	160,23	509,2	507,73
3	40	± 0,17	39,9	± 0	160	± 0,25	504,9	± 2,45

Tabela 22. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A20 com 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: A20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,7		40,2		160,3		495,6	
2	40,6	39,97	40,1	40,03	160,3	160,3	495	493,37
3	39,6	± 0,55	39,98	± 0,21	160,3	± 0	489,5	± 3,36

Tabela 23. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A30 com 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: A30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,1		40		160,5		493,72	
2	39,8	39,5	39,9	39,93	160,4	160,53	481,75	486
3	39,6	± 0,36	39,9	± 0,06	160,7	± 0,15	482,54	± 6,69



## ANEXOS

**Tabela 24. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A40 com 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: A40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,5		39,9	39,9	160,8		500,5	
2	40,1	40,10	39,9	39,9	160,3	160,47	500,6	497,62
3	39,7	± 0,40	39,9	± 0	160,3	± 0,29	491,75	± 5,08

**Tabela 25. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A50 com 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: A50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,4		39,9	39,9	160,3		463,26	
2	39,9	40,10	39,9	39,9	160,5	160,53	456,45	460,03
3	40	± 0,26	39,9	± 0	160,8	± 0,25	460,38	± 3,42

**Tabela 26. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação A60 com 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: A60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,9		39,9	39,9	160,3		427,2	
2	40,5	40,60	39,9	39,9	160,7	160,47	431,3	429,20
3	40,4	± 0,26	39,9	± 0	160,4	± 0,21	429,1	± 2,05

## ANEXOS

### ANEXO 3. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do Grupo B

Tabela 27. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B0 sem Cura Úmida.

Formulação: B0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,57		40,88	40,55	160,03	160,02	495	486,67
2	41,07	$\pm 0,28$	40,50	$\pm 0,31$	160,20	$\pm 0,19$	485	$\pm 7,64$
3	41,4		40,26		159,82		480	

Tabela 28. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B10 sem Cura Úmida.

Formulação: B10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,10		39,88	40,51	150,50	160,19	470	491,67
2	40,70	$\pm 0,89$	41,13	$\pm 0,63$	160,03	$\pm 0,27$	510	$\pm 20,21$
3	40,57		40,53		160,05		495	

Tabela 29. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B20 sem Cura Úmida.

Formulação: B20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,99		41,07	40,43	161,89	161,98	475	476,67
2	39,92	$\pm 0,04$	40,21	$\pm 0,56$	161,83	$\pm 0,21$	465	$\pm 12,58$
3	39,95		40,02		162,22		490	

## ANEXOS

**Tabela 30. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B30 sem Cura Úmida.**

Formulação: B30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,39		41,35		160,01		480	
2	40,12	39,99	41,68	41,24	160,21	160,12	475	473,33
3	39,46	± 0,48	40,68	± 0,51	160,24	± 0,10	465	± 7,64

**Tabela 31. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B40 sem Cura Úmida.**

Formulação: B40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,90		39,68		162,68		460	
2	39,86	40,03	39,93	39,88	162,65	162,74	465	461,67
3	40,32	± 0,25	40,04	± 0,18	162,89	± 0,13	460	± 2,89

**Tabela 32. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B50 sem Cura Úmida.**

Formulação: B50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,07		39,92		160,98		435	
2	39,38	39,77	39,38	39,65	160,55	160,76	435	438,33
3	39,86	± 0,35	39,66	± 0,27	160,74	± 0,22	445	± 5,77

**Tabela 33. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B60 sem Cura Úmida.**

Formulação: B60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,72		39,92		160,98		435	
2	39,38	39,69	39,38	39,70	160,55	160,86	435	430
3	39,86	± 0,14	39,66	± 0,16	160,74	± 0,16	445	± 0

## ANEXOS

**Tabela 34. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B0 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,60		40,50		160,70		506,9	
2	40,80	40,53	40	40,17	160,30	160,47	503,3	499,58
3	39,20	± 1,22	40	± 0,29	160,40	± 0,21	488,54	± 9,73

**Tabela 35. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B10 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,20		40		160,30		496,8	
2	40,90	40,40	39,90	39,93	160,50	160,57	506,1	499
3	40,10	± 0,44	39,90	± 0,06	160,09	± 0,31	494,09	± 6,3

**Tabela 36. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B20 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,70		40		160,50		498,5	
2	40	40,30	39,90	40,10	160,30	160,30	495,7	497,80
3	40,20	± 0,36	40,40	± 0,26	160,10	± 0,20	499,2	± 1,85

**Tabela 37. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B30 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,50		39,90		160,40		500,4	
2	40,60	40,80	39,90	39,90	160,30	160,37	491,44	493,28
3	40,30	± 0,62	39,90	± 0	160,40	± 0,06	488,01	± 6,40

## ANEXOS

**Tabela 38. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B40 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,80		39,80		160,70		469,23	
2	40,50	40,17	39,90	39,87	160,50	160,57	474,57	472,5
3	40,20	± 0,35	39,90	± 0,06	160,50	± 0,12	473,85	± 2,90

**Tabela 39. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B50 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,80		40		160		430,87	
2	40,70	40,97	39,98	39,90	160,10	160,10	436,97	438
3	41,40	± 0,38	39,99	± 0,10	160,20	± 0,10	446,16	± 7,70

**Tabela 40. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação B60 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: B60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,30		40,90		160		434,54	
2	41,10	41,33	41,10	41,20	160,50	160,20	434,33	438,79
3	41,60	± 0,25	41,60	± 0,36	160,10	± 0,26	447,51	± 7,55

## ANEXOS

## ANEXO 4. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do Grupo C

**Tabela 41. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C0 sem Cura Úmida.**

Formulação: C0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	42,62		40,19	40,58	162,51	162,13	550	545
2	42,21	± 1,42	39,99	± 0,85	161,90	± 0,33	545	± 5
3	39,99		41,55		161,99		540	

**Tabela 42. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C10 sem Cura Úmida.**

Formulação: C10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	42,62		40,20	40,24	162,57	162,15	530	526,67
2	42,20	± 1,47	39	± 1,27	161,93	± 0,59	530	± 5,77
3	39,89		41,53		161,95		520	

**Tabela 43. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C20 sem Cura Úmida.**

Formulação: C20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,40		40,81	40,59	161,47	161,26	500	501,67
2	40,62	± 0,15	40,35	± 0,23	160,60	± 0,59	505	± 2,89
3	40,34		40,61		161,72		500	

## ANEXOS

**Tabela 44. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C30 sem Cura Úmida.**

Formulação: C30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,81		39,87	40,10	162,72	162,74	495	496,67
2	39,95	± 1,05	40,46	± 0,32	162,48	± 0,28	495	± 2,89
3	40,04		39,97		163,03		500	

**Tabela 45. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C40 sem Cura Úmida.**

Formulação: C40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	38,85	38,85	40,03	39,91	160,91	160,89	450	448,33
2	39,80	± 0,95	39,92	± 0,12	161,07	± 0,19	455	± 7,64
3	37,90		39,79		160,69		440	

**Tabela 46. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C50 sem Cura Úmida.**

Formulação: C50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,45	40,62	39,98	40,62	163,30	162,44	470	470
2	40,31	± 0,73	41,32	± 0,67	160,86	± 1,37	480	± 10
3	40,09		40,56		163,16		460	

**Tabela 47. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C60 sem Cura Úmida.**

Formulação: C60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,82	39,80	41,12	40,94	160,63	160,50	445	445
2	39,80	± 0,03	40,76	± 0,18	160,27	± 0,20	450	± 5
3	39,77		40,93		160,61		440	

## ANEXOS

**Tabela 48. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C0 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	38,90		40		160,40		509,5	
2	38,80	39,00	40,10	40,03	160,30	160,30	507	508,50
3	39,30	± 0,26	40	± 0,06	160,20	± 0,10	509	± 1,32

**Tabela 49. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C10 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,17		42,60		160,56		525	
2	41,53	40,55	39,94	41,43	160,52	160,57	515	520
3	39,96	± 0,85	41,74	± 1,36	160,62	± 0,05	520	± 5

**Tabela 50. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C20 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	42,48		40,15		160,98		505	
2	39,98	40,87	41,05	40,75	160,75	160,99	495	500
3	40,15	± 1,40	41,04	± 0,52	161,25	± 0,25	500	± 5

**Tabela 51. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C30 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,67		39,94		162,30		495	
2	40,04	40,37	40,85	40,46	162,34	162,54	485	485
3	39,40	± 1,17	40,60	± 0,47	162,98	± 0,38	475	± 10



## ANEXOS

**Tabela 52. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C40 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	37,41		40,01	39,91	160,76	160,96	445	443,33
2	38,29	± 0,63	39,92	± 0,11	161,19	± 0,22	450	± 7,64
3	37,08		39,79		160,92		435	

**Tabela 53. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C50 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,92		40,01	40,54	161,92	162,21	455	456,67
2	39,71	± 0,16	40,65	± 0,49	192,31	± 0,25	455	± 2,89
3	40,03		40,97		192,39		460	

**Tabela 54. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação C60 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: C60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,27	41,17	39,66	40,04	160,56	160,55	455	453,33
2	41,28	± 0,19	40,24	± 0,33	160,50	± 0,04	450	± 2,89
3	40,95		40,23		160,58		455	

## ANEXOS

## ANEXO 5. Dimensões e Massas dos Corpos de Prova Prismáticos das Formulações do Grupo D

**Tabela 55. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D0 sem Cura Úmida.**

Formulação: D0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,30		41,10	41,32	161,23	160,35	505	500
2	38,55	± 1,44	41,53	± 0,22	160,25	± 0,84	475	± 10
3	40,68		41,32		159,56		495	

**Tabela 56. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D10 sem Cura Úmida.**

Formulação: D10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,38		41,21	41,29	161,13	160,64	505	491,67
2	38,51	± 1,51	41,54	± 0,22	160,82	± 0,60	475	± 15,28
3	40,75		41,12		159,97		495	

**Tabela 57. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D20 sem Cura Úmida.**

Formulação: D20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,95		40,26	39,91	161,21	161,17	475	468,33
2	40,03	± 0,13	39,86	± 0,33	161,09	± 0,07	470	± 7,64
3	40,20		39,61		161,20		460	

## ANEXOS

**Tabela 58. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D30 sem Cura Úmida.**

Formulação: D30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,99		39,74		160,75		460	
2	39,37	39,74 ± 0,33	39,73	39,79 ± 0,10	161,15	160,95 ± 0,20	455	458,33 ± 2,89
3	39,85		39,91		160,96		460	

**Tabela 59. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D40 sem Cura Úmida.**

Formulação: D40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,19		39,92		160,60		475	
2	40,91	41,15 ± 0,23	40,34	40,17 ± 0,22	160,32	160,33 ± 0,27	480	478,33 ± 2,89
3	41,36		40,26		160,06		480	

**Tabela 60. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D50 sem Cura Úmida.**

Formulação: D50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,64		41,02		160,01		455	
2	39,81	40,63 ± 0,82	40,81	40,66 ± 0,45	163,64	161,20 ± 2,11	450	458,33 ± 10,41
3	41,44		40,15		159,96		470	

**Tabela 61. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D60 sem Cura Úmida.**

Formulação: D60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,84		40,65		160,50		445	
2	39,89	39,90 ± 0,06	40,86	40,53 ± 0,41	160,54	160,53 ± 0,03	455	445 ± 10
3	39,96		40,07		160,55		435	

## ANEXOS

Tabela 62. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D0 após 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: D0								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	38,90	39	40,20	40,07	160,10	160,23	505	500
2	38,80	$\pm 0,26$	40,10	$\pm 0,15$	160,20	$\pm 0,15$	500	$\pm 5$
3	39,30		39,90		160,40		495	

Tabela 63. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D10 após 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: D10								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	40,17	40,55	42,60	41,43	160,56	160,57	500	501,67
2	41,53	$\pm 0,85$	39,94	$\pm 1,36$	160,52	$\pm 0,05$	505	$\pm 2,89$
3	39,96		41,74		160,62		500	

Tabela 64. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D20 após 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: D20								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	42,48	40,87	40,15	40,75	160,98	160,99	495	491,67
2	39,98	$\pm 1,40$	41,05	$\pm 0,52$	160,75	$\pm 0,25$	485	$\pm 5,77$
3	40,15		41,04		161,25		495	

Tabela 65. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D30 após 28 dias de Cura Úmida.

Formulação: D30								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41	40,27	40,10	39,70	162	162,67	440	448,33
2	40	$\pm 0,64$	40	$\pm 0,61$	161	$\pm 2,08$	465	$\pm 14,43$
3	39,80		39		165		440	

## ANEXOS

**Tabela 66. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D40 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: D40								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,90		40		161		435	
2	38	39,30 ± 1,13	39	40 ± 1	160	160,33 ± 0,58	435	433,33 ± 2,89
3	40		41		160		430	

**Tabela 67. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D50 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: D50								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	39,92		40,01		161,92		435	
2	39,71	39,89 ± 0,16	40,65	40,54 ± 0,49	162,31	162,21 ± 0,25	455	450 ± 13,23
3	40,03		40,97		162,39		460	

**Tabela 68. Dimensões e massas dos corpos de prova prismáticos da formulação D60 após 28 dias de Cura Úmida.**

Formulação: D60								
Corpo de prova	Altura (mm)	Média e Desvio Padrão	Largura (mm)	Média e Desvio Padrão	Comprimento (mm)	Média e Desvio Padrão	Massa (g)	Média e Desvio Padrão
1	41,27		39,66		160,56		455	
2	41,28	41,17 ± 0,19	40,24	40,04 ± 0,33	160,50	160,55 ± 0,04	445	451,67 ± 5,77
3	40,95		40,23		160,58		455	

## ANEXOS

**ANEXO 6. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas****Tabela 69. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas dos Resíduos de Isoladores Cerâmicos - RIC**

<b>Peneira (tyler mesh)</b>	<b>Aberturas <math>D_i</math> (mm)</b>	<b>Diâmetro <math>\overline{D_i}</math> (mm)</b>	<b>Fração <math>\frac{i-1}{i}</math></b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Fração acumulada retida <math>\Delta\varphi_i</math></b>	<b>Fração acumulada retida <math>\Delta\varphi_i</math> (%)</b>	<b>Fração acumulada de finos <math>1-\varphi_i</math></b>
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	1100	495	0,49	49,5	0,50
6	3,327	4,013	6/9	535	630	95	0,09	9,5	0,90
9	2,362	2,844	9/10	470	590	120	0,12	12	0,88
10	1,651	2,006	10/16	500	560	60	0,06	6	0,94
16	1,168	1,410	16/28	435	485	50	0,05	5	0,95
28	0,589	0,878	28/48	375	425	50	0,05	5	0,95
48	0,295	0,442	48/60	360	405	45	0,04	4,5	0,95
60	0,251	0,273	60/65	415	425	10	0,01	1	0,99
65	0,208	0,229	65/100	400	430	30	0,03	3	0,97
100	0,147	0,177	100/200	400	435	35	0,03	3,5	0,96
200	0,075	0,111	- 200	415	420	5	0,005	0,5	0,99
fundo	< 0,074	< 0,111		415	420	5	0,005	0,5	0,99
$\Sigma$	-	-	-	5325	6325	1000	1	100	-

## ANEXOS

**Tabela 70. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas do Concreto Refratário Sílico-Aluminoso comercial, também atribuídas às Formulações A0, B0, C0 e D0.**

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	600	635	35	0,03	3,5	0,96
6	3,327	4,013	6/9	530	595	65	0,06	6,5	0,93
9	2,362	2,844	9/10	470	530	60	0,06	6,0	0,94
10	1,651	2,006	10/16	500	530	30	0,03	3,0	0,97
16	1,168	1,410	16/28	435	520	85	0,08	8,5	0,91
28	0,589	0,878	28/48	375	470	95	0,09	9,5	0,90
48	0,295	0,442	48/60	360	515	155	0,15	15,5	0,84
60	0,251	0,273	60/65	415	445	30	0,03	3,0	0,97
65	0,208	0,229	65/100	395	440	45	0,04	4,5	0,95
100	0,147	0,177	100/200	400	480	80	0,08	8,0	0,92
200	0,075	0,111	- 200	415	530	115	0,11	11,5	0,88
fundo	< 0,074	< 0,111		415	620	205	0,20	20,5	0,79
$\Sigma$	-	-	-	5310	6310	1000	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 71. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A10 e B10.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	600	660	60	0,02	1,85	0,98
6	3,327	4,013	6/9	530	835	305	0,09	9,40	0,91
9	2,362	2,844	9/10	470	725	255	0,08	7,86	0,92
10	1,651	2,006	10/16	495	690	195	0,06	6,01	0,94
16	1,168	1,410	16/28	435	780	345	0,12	10,63	0,89
28	0,589	0,878	28/48	375	735	360	0,11	11,09	0,89
48	0,295	0,442	48/60	360	915	555	0,17	17,10	0,83
60	0,251	0,273	60/65	420	470	50	0,01	1,54	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	585	185	0,06	5,70	0,94
100	0,147	0,177	100/200	400	540	140	0,04	4,31	0,96
200	0,075	0,111	- 200	415	625	210	0,06	6,47	0,93
fundo	< 0,074	< 0,111		415	1000	585	0,18	18,03	0,82
$\Sigma$	-	-	-	5315	8560	3245	1	100	-



## ANEXOS

Tabela 72. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A20 e B20.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	600	660	60	0,02	1,85	0,98
6	3,327	4,013	6/9	530	835	305	0,09	9,40	0,91
9	2,362	2,844	9/10	470	725	255	0,08	7,86	0,92
10	1,651	2,006	10/16	495	690	195	0,06	6,01	0,94
16	1,168	1,410	16/28	435	780	345	0,11	10,63	0,89
28	0,589	0,878	28/48	375	735	360	0,11	11,09	0,89
48	0,295	0,442	48/60	360	915	555	0,17	17,10	0,83
60	0,251	0,273	60/65	420	470	50	0,02	1,54	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	585	185	0,06	5,70	0,94
100	0,147	0,177	100/200	400	540	140	0,04	4,31	0,96
200	0,075	0,111	- 200	415	625	210	0,06	6,47	0,94
fundo	< 0,074	< 0,111		415	1000	585	0,18	18,03	0,82
$\Sigma$	-	-	-	5315	8560	3245	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 73. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A30 e B30.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	660	55	0,02	1,77	0,98
6	3,327	4,013	6/9	535	705	170	0,05	5,48	0,95
9	2,362	2,844	9/10	470	775	305	0,10	9,84	0,90
10	1,651	2,006	10/16	500	760	260	0,08	8,39	0,92
16	1,168	1,410	16/28	435	795	360	0,12	11,61	0,88
28	0,589	0,878	28/48	380	760	380	0,12	12,26	0,88
48	0,295	0,442	48/60	360	925	565	0,18	18,23	0,82
60	0,251	0,273	60/65	420	480	60	0,02	1,94	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	520	120	0,04	3,87	0,96
100	0,147	0,177	100/200	350	875	525	0,17	16,94	0,83
200	0,075	0,111	- 200	415	655	240	0,08	7,74	0,92
fundo	< 0,074	< 0,111		415	475	60	0,02	1,94	0,98
$\Sigma$	-	-	-	5285	8385	3100	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 74. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A40 e B40.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	670	65	0,02	2,10	0,98
6	3,327	4,013	6/9	535	760	225	0,07	7,26	0,93
9	2,362	2,844	9/10	470	860	390	0,13	12,58	0,87
10	1,651	2,006	10/16	500	720	220	0,07	7,10	0,93
16	1,168	1,410	16/28	435	845	410	0,13	13,23	0,87
28	0,589	0,878	28/48	375	785	410	0,13	13,23	0,87
48	0,295	0,442	48/60	360	890	530	0,17	17,10	0,83
60	0,251	0,273	60/65	420	470	50	0,02	1,61	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	535	135	0,04	4,35	0,96
100	0,147	0,177	100/200	350	550	200	0,06	6,45	0,94
200	0,075	0,111	- 200	415	685	270	0,09	8,71	0,91
fundo	< 0,074	< 0,111		420	615	195	0,06	6,29	0,94
$\Sigma$	-	-	-	5285	8385	3100	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 75. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A50 e B50.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	655	50	0,02	1,62	0,98
6	3,327	4,013	6/9	535	670	135	0,04	4,37	0,96
9	2,362	2,844	9/10	470	935	465	0,15	15,05	0,85
10	1,651	2,006	10/16	500	880	380	0,12	12,30	0,88
16	1,168	1,410	16/28	435	835	400	0,13	12,94	0,87
28	0,589	0,878	28/48	375	820	445	0,14	14,40	0,86
48	0,295	0,442	48/60	360	940	580	0,19	18,77	0,81
60	0,251	0,273	60/65	420	445	25	0,01	0,81	0,99
65	0,208	0,229	65/100	395	475	80	0,03	2,59	0,97
100	0,147	0,177	100/200	350	585	235	0,08	7,61	0,92
200	0,075	0,111	- 200	415	635	220	0,07	7,12	0,93
fundo	< 0,074	< 0,111		415	490	75	0,02	2,43	0,98
$\Sigma$	-	-	-	5275	8365	3090	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 76. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações A60 e B60.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	665	60	0,02	1,94	0,98
6	3,327	4,013	6/9	535	870	335	0,11	10,81	0,89
9	2,362	2,844	9/10	505	805	300	0,10	9,68	0,90
10	1,651	2,006	10/16	500	795	295	0,10	9,52	0,90
16	1,168	1,410	16/28	465	960	495	0,16	15,97	0,84
28	0,589	0,878	28/48	380	840	460	0,15	14,84	0,85
48	0,295	0,442	48/60	360	955	595	0,19	19,19	0,81
60	0,251	0,273	60/65	420	470	50	0,02	1,61	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	525	125	0,04	4,03	0,96
100	0,147	0,177	100/200	350	520	170	0,05	5,48	0,95
200	0,075	0,111	- 200	415	560	145	0,05	4,68	0,95
fundo	< 0,074	< 0,111		415	485	70	0,02	2,26	0,98
$\Sigma$	-	-	-	5350	8450	3100	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 77. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C10 e D10.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	615	10	0,01	0,98	0,99
6	3,327	4,013	6/9	535	605	70	0,07	6,83	0,93
9	2,362	2,844	9/10	505	585	80	0,08	7,80	0,92
10	1,651	2,006	10/16	500	535	35	0,03	3,41	0,97
16	1,168	1,410	16/28	465	585	120	0,12	11,71	0,88
28	0,589	0,878	28/48	375	470	95	0,09	9,27	0,91
48	0,295	0,442	48/60	360	525	165	0,16	16,10	0,84
60	0,251	0,273	60/65	415	435	20	0,02	1,95	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	455	55	0,05	5,37	0,95
100	0,147	0,177	100/200	385	460	75	0,07	7,32	0,93
200	0,075	0,111	- 200	390	550	160	0,16	15,61	0,84
fundo	< 0,074	< 0,111		415	555	140	0,14	13,66	0,86
$\Sigma$	-	-	-	5350	6375	1025	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 78. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C20 e D20.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	615	10	0,01	1,02	0,99
6	3,327	4,013	6/9	535	610	75	0,08	7,61	0,92
9	2,362	2,844	9/10	505	585	80	0,08	8,12	0,92
10	1,651	2,006	10/16	500	530	30	0,03	3,05	0,97
16	1,168	1,410	16/28	465	580	115	0,12	11,68	0,88
28	0,589	0,878	28/48	380	480	100	0,10	10,15	0,90
48	0,295	0,442	48/60	360	505	145	0,15	14,72	0,85
60	0,251	0,273	60/65	415	435	20	0,02	2,03	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	440	40	0,04	4,06	0,96
100	0,147	0,177	100/200	385	490	105	0,11	10,66	0,89
200	0,075	0,111	- 200	355	500	145	0,15	14,72	0,85
fundo	< 0,074	< 0,111		380	500	120	0,12	12,18	0,88
$\Sigma$	-	-	-	5285	6270	985	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 79. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C30 e D30.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	612	7	0,01	0,70	0,99
6	3,327	4,013	6/9	535	578	43	0,04	4,27	0,96
9	2,362	2,844	9/10	505	588	83	0,08	8,25	0,92
10	1,651	2,006	10/16	500	558	58	0,06	5,77	0,94
16	1,168	1,410	16/28	465	587	122	0,12	12,13	0,88
28	0,589	0,878	28/48	375	450	75	0,07	7,46	0,93
48	0,295	0,442	48/60	360	508	148	0,15	14,71	0,85
60	0,251	0,273	60/65	415	434	19	0,02	1,89	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	471	71	0,07	7,06	0,93
100	0,147	0,177	100/200	385	474	89	0,09	8,85	0,91
200	0,075	0,111	- 200	355	462	107	0,11	10,64	0,89
fundo	< 0,074	< 0,111		380	564	184	0,18	18,29	0,82
$\Sigma$	-	-	-	5280	6286	1006	1	100	-



## ANEXOS

Tabela 80. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C40 e D40.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	610	620	10	0,01	1,04	0,99
6	3,327	4,013	6/9	540	595	55	0,06	5,73	0,94
9	2,362	2,844	9/10	505	605	100	0,10	10,42	0,90
10	1,651	2,006	10/16	500	560	60	0,06	6,25	0,94
16	1,168	1,410	16/28	465	580	115	0,12	11,98	0,88
28	0,589	0,878	28/48	380	475	95	0,10	9,90	0,90
48	0,295	0,442	48/60	360	495	135	0,14	14,06	0,86
60	0,251	0,273	60/65	415	435	20	0,02	2,08	0,98
65	0,208	0,229	65/100	400	450	50	0,05	5,21	0,95
100	0,147	0,177	100/200	385	500	115	0,12	11,98	0,88
200	0,075	0,111	- 200	390	490	100	0,10	10,42	0,90
fundo	< 0,074	< 0,111		380	485	105	0,11	10,94	0,89
$\Sigma$	-	-	-	5330	6290	960	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 81. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C50 e D50.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	609	4	0,00	0,39	1,00
6	3,327	4,013	6/9	535	574	39	0,04	3,84	0,96
9	2,362	2,844	9/10	505	629	124	0,12	12,20	0,88
10	1,651	2,006	10/16	500	532	32	0,03	3,15	0,97
16	1,168	1,410	16/28	465	612	147	0,14	14,47	0,86
28	0,589	0,878	28/48	375	483	108	0,11	10,63	0,89
48	0,295	0,442	48/60	360	534	174	0,17	17,13	0,83
60	0,251	0,273	60/65	415	429	14	0,01	1,38	0,99
65	0,208	0,229	65/100	400	420	20	0,02	1,97	0,98
100	0,147	0,177	100/200	385	458	73	0,07	7,19	0,93
200	0,075	0,111	- 200	355	447	92	0,09	9,06	0,91
fundo	< 0,074	< 0,111		380	569	189	0,19	18,60	0,81
$\Sigma$	-	-	-	5280	6296	1016	1	100	-

## ANEXOS

Tabela 82. Análises Granulométricas Diferenciais e Acumuladas das Formulações C60 e D60.

Peneira (tyler mesh)	Aberturas $D_i$ (mm)	Diâmetro $\overline{D_i}$ (mm)	Fração $\frac{i-1}{i}$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa retida (g)	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$	Fração acumulada retida $\Delta\varphi_i$ (%)	Fração acumulada de finos $1-\varphi_i$
4	4,699	$\geq 4,699$	4/6	605	611	6	0,01	0,57	0,99
6	3,327	4,013	6/9	535	571	36	0,03	3,41	0,97
9	2,362	2,844	9/10	505	608	103	0,10	9,76	0,90
10	1,651	2,006	10/16	500	622	122	0,12	11,56	0,88
16	1,168	1,410	16/28	465	599	134	0,13	12,70	0,87
28	0,589	0,878	28/48	375	525	150	0,14	14,22	0,86
48	0,295	0,442	48/60	360	488	128	0,12	12,13	0,88
60	0,251	0,273	60/65	415	428	13	0,01	1,23	0,99
65	0,208	0,229	65/100	400	439	39	0,04	3,70	0,96
100	0,147	0,177	100/200	385	464	79	0,07	7,49	0,93
200	0,075	0,111	- 200	355	450	95	0,09	9,00	0,91
fundo	< 0,074	< 0,111		380	530	150	0,14	14,22	0,86
$\Sigma$	-	-	-	5280	6335	1055	1	100	-

## ANEXO 7. Condutividade Térmica em Função da Temperatura para as Formulações dos Grupos A, B, C e D por Método de Cálculo Numérico

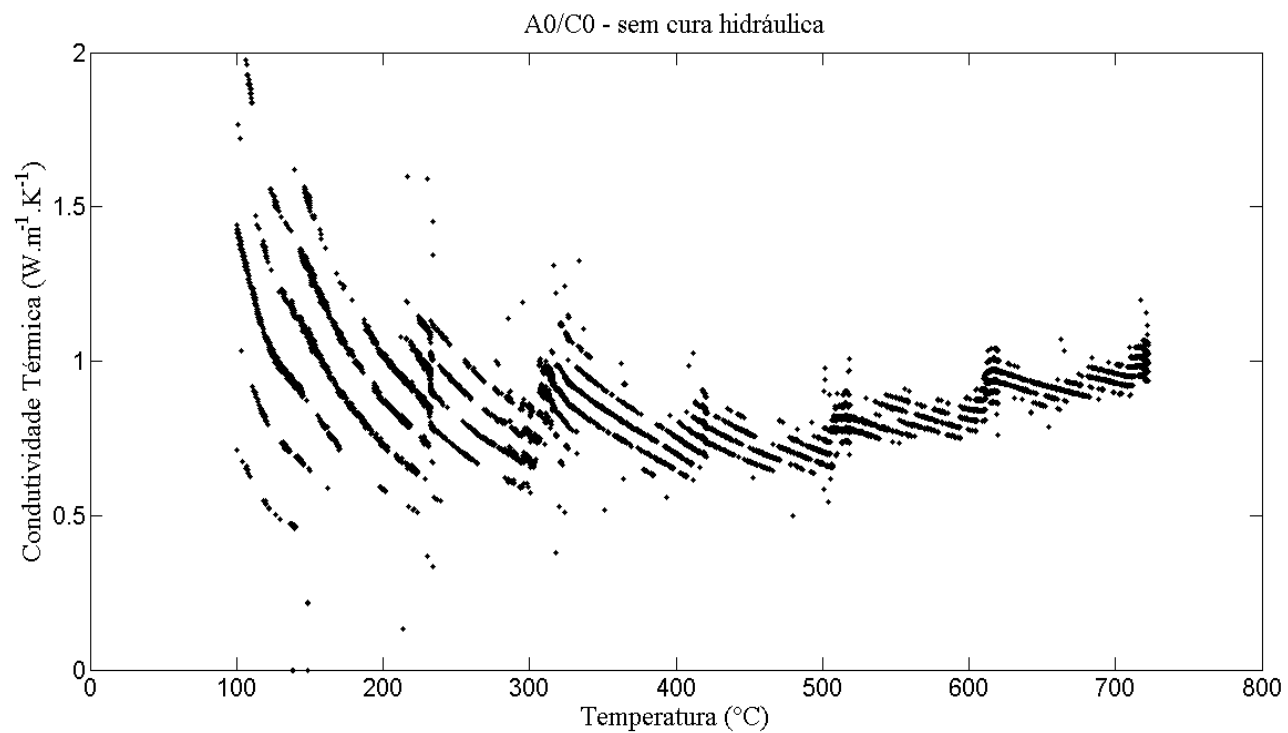


Figura 71. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações A0/C0 sem Cura Úmida.

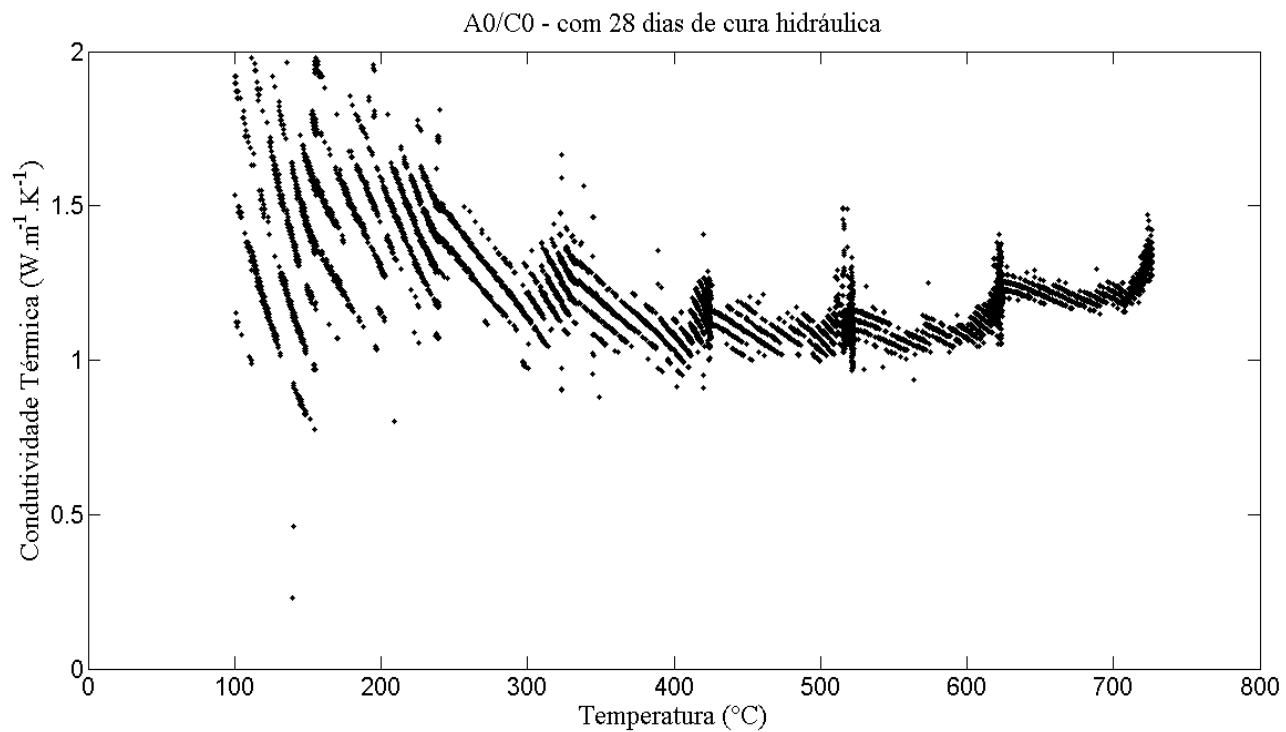
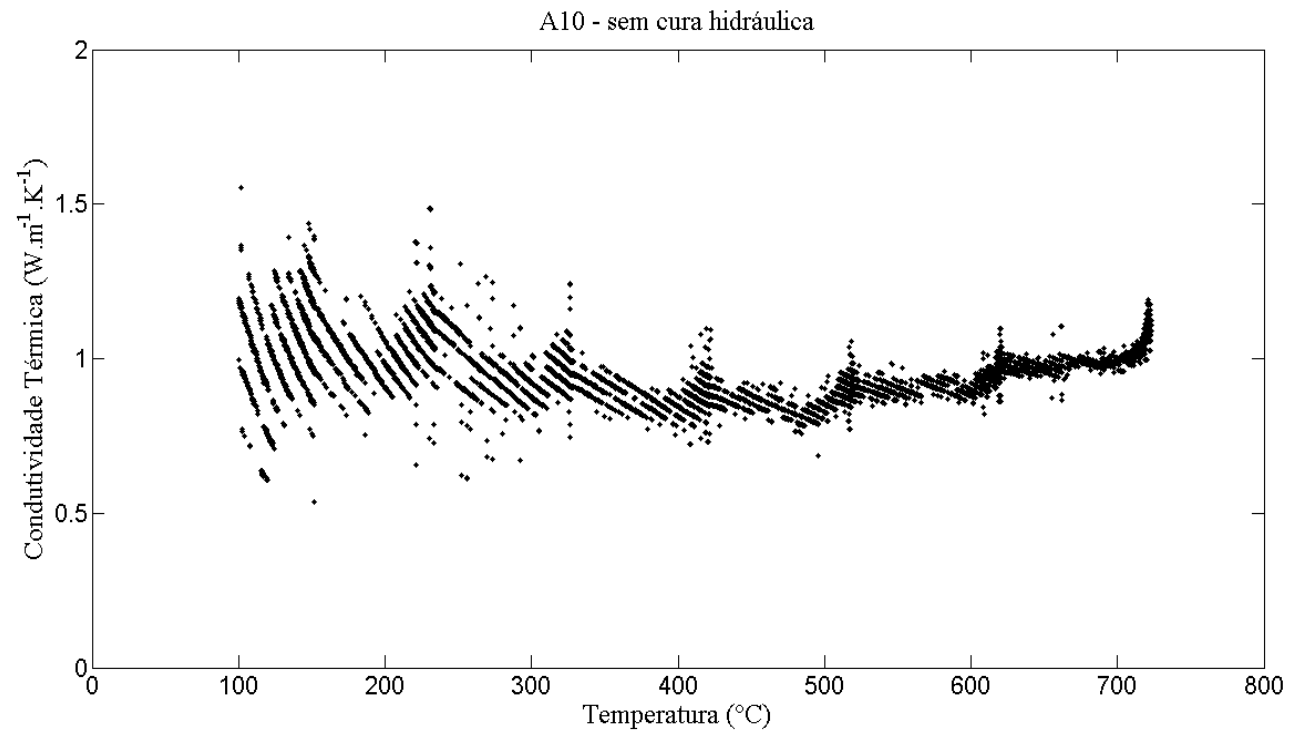


Figura 72. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações A0/C0 com 28 dias de Cura Úmida.



**Figura 73.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A10 sem Cura Úmida.

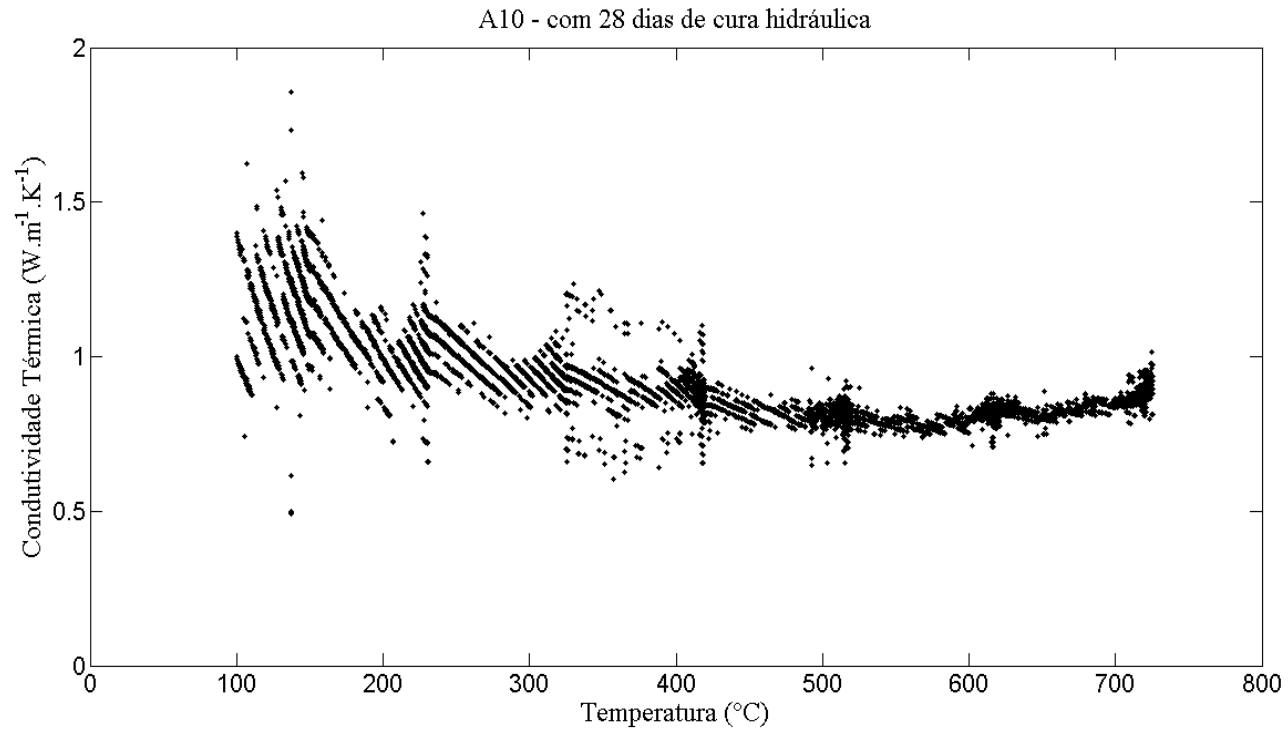


Figura 74. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A10 com 28 dias de Cura Úmida.

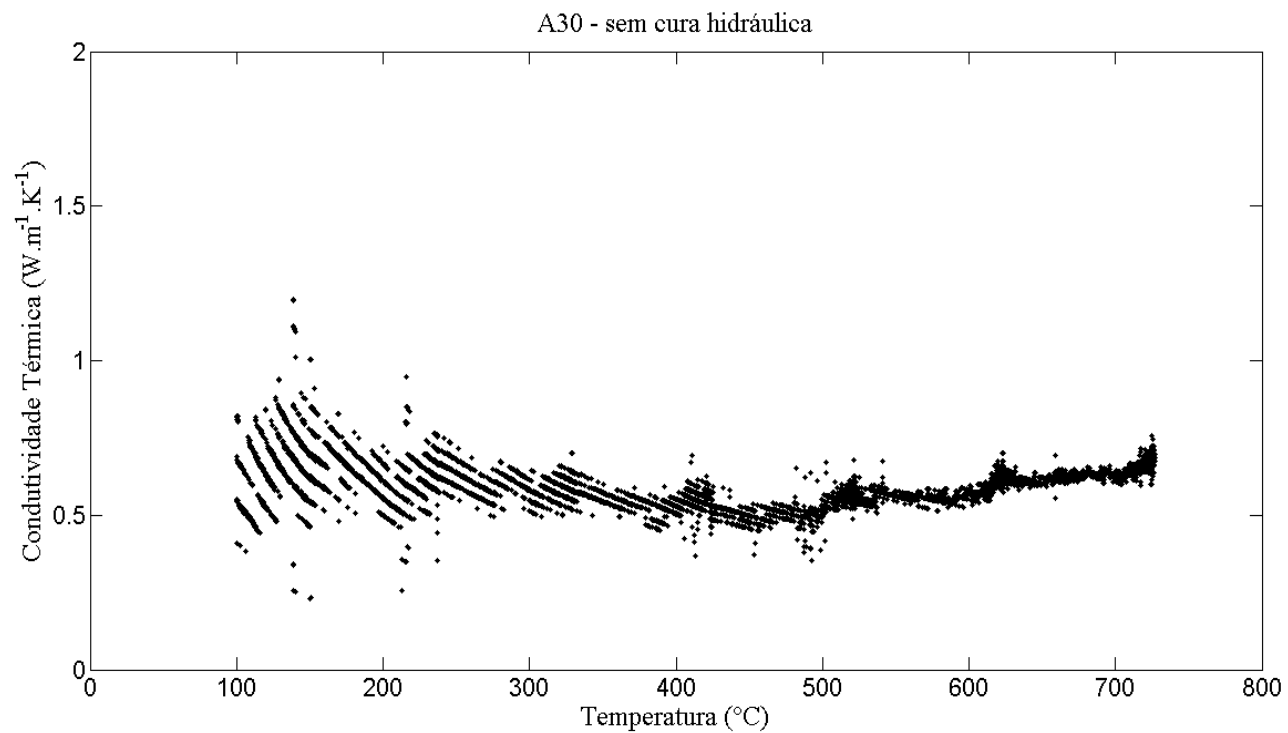


Figura 75. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A30 sem Cura Úmida.



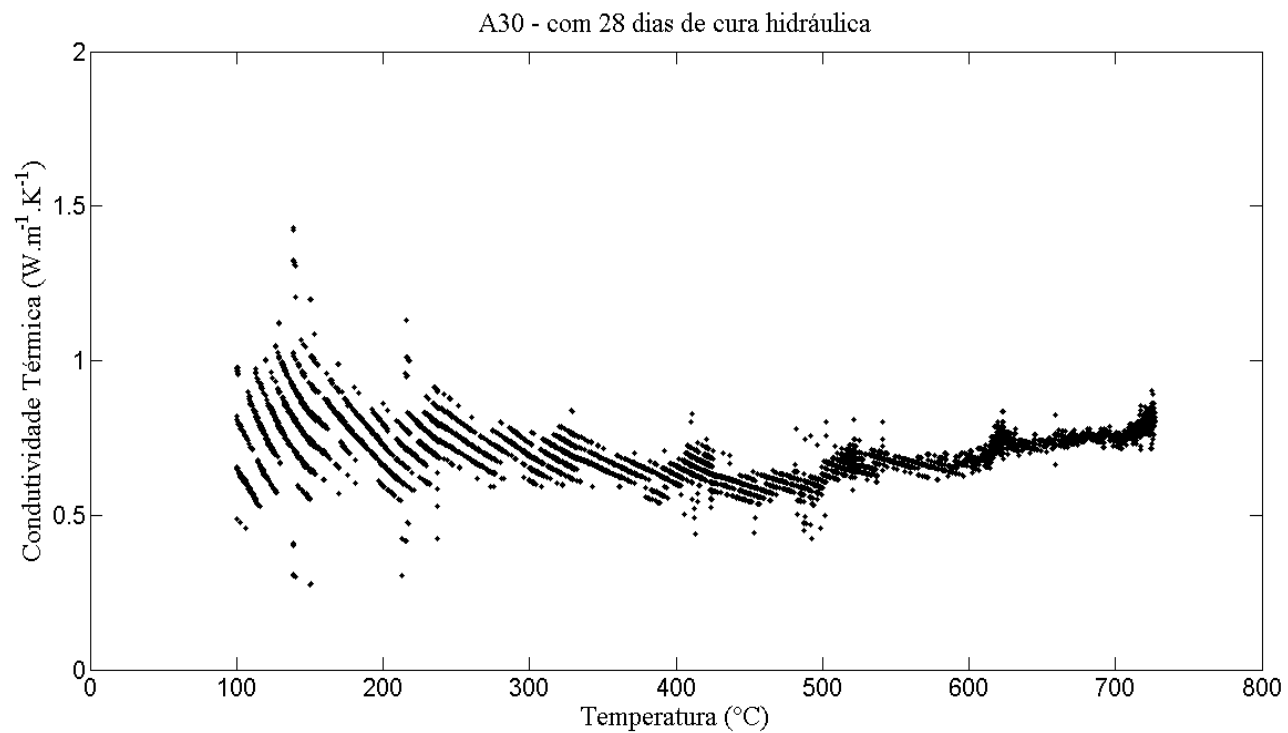


Figura 76. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A30 com 28 dias de Cura Úmida.

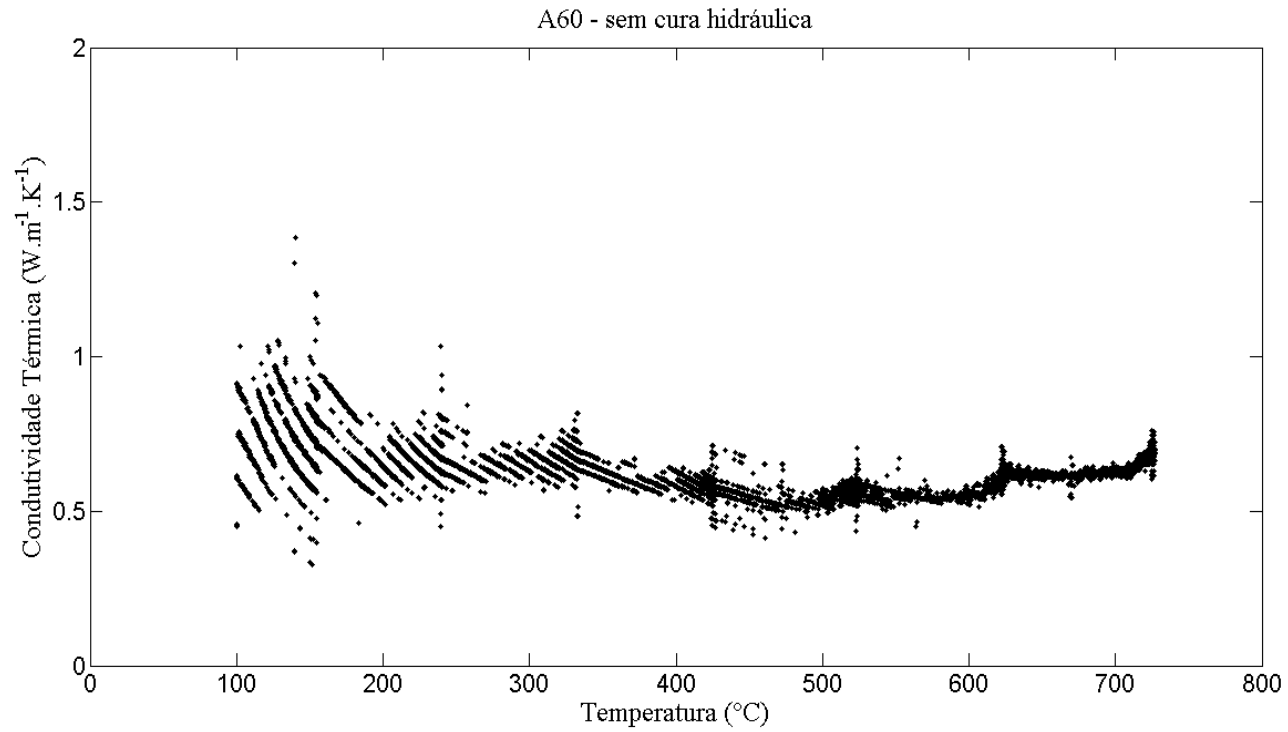


Figura 77. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A60 sem Cura Úmida.

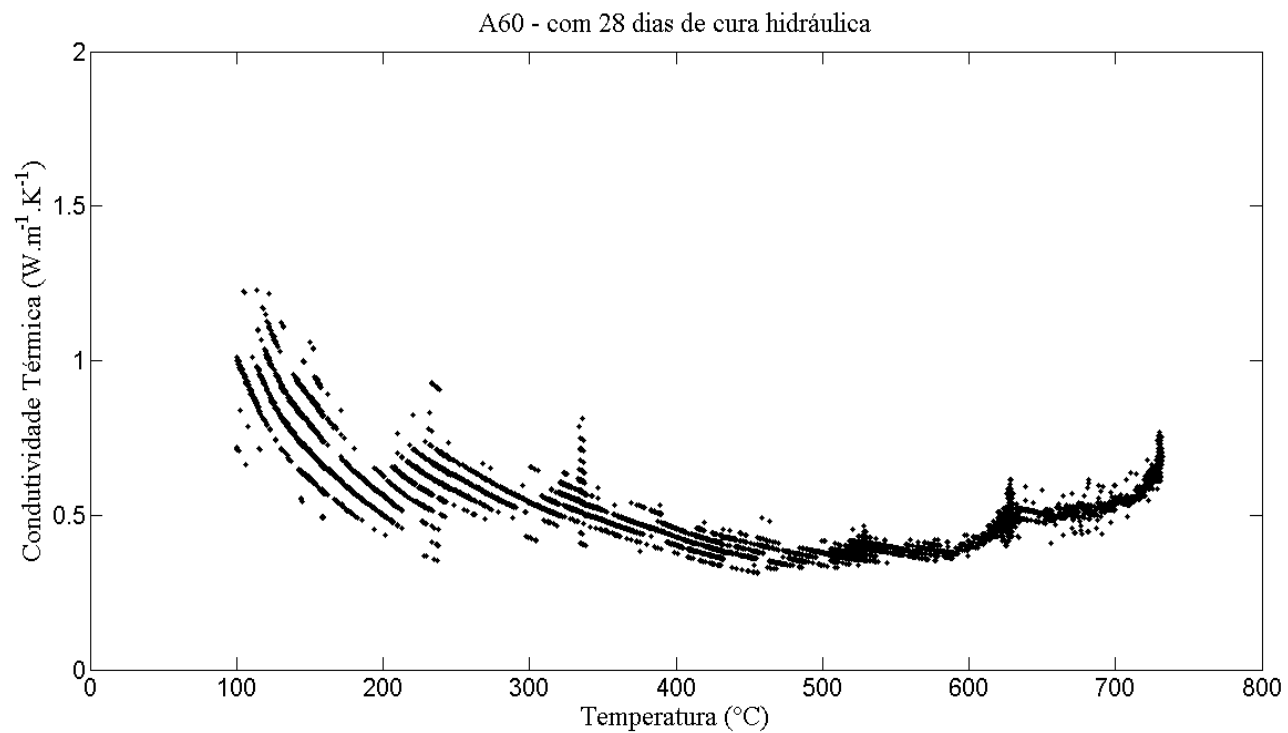


Figura 78. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação A60 com 28 dias de Cura Úmida.

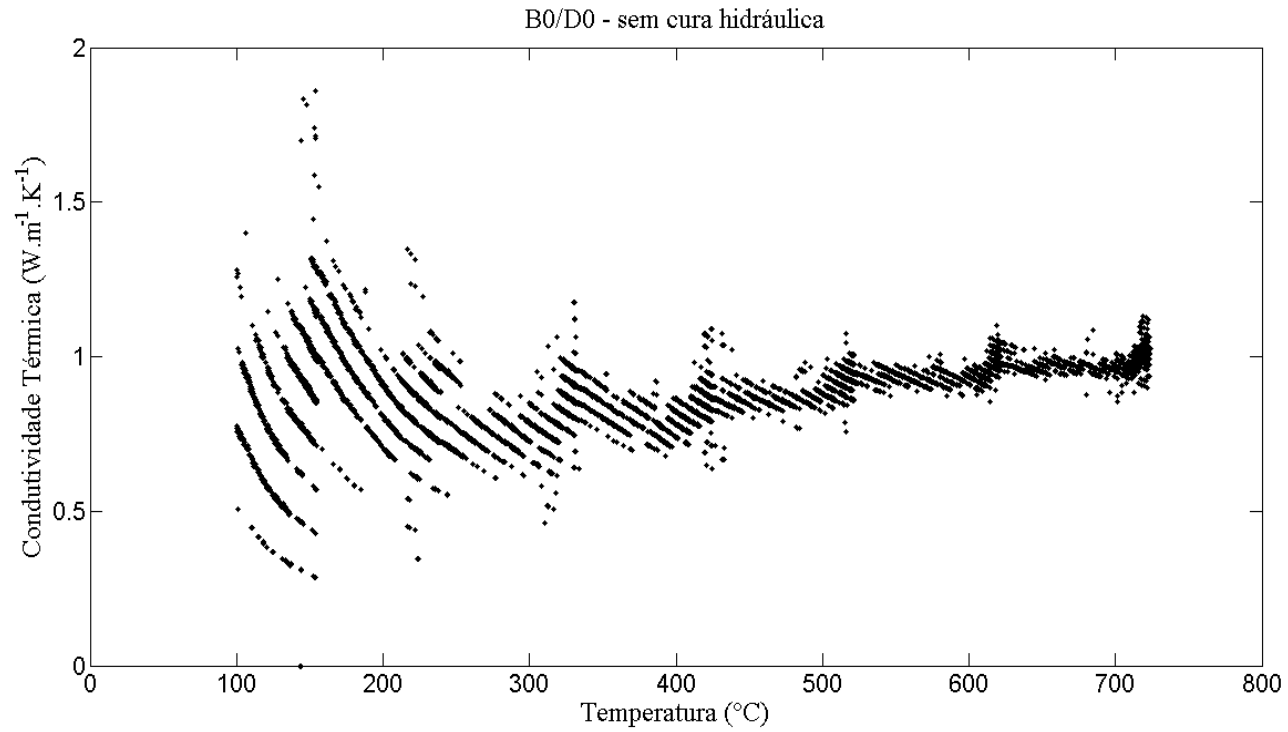


Figura 79. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações B0/D0 sem Cura Úmida.

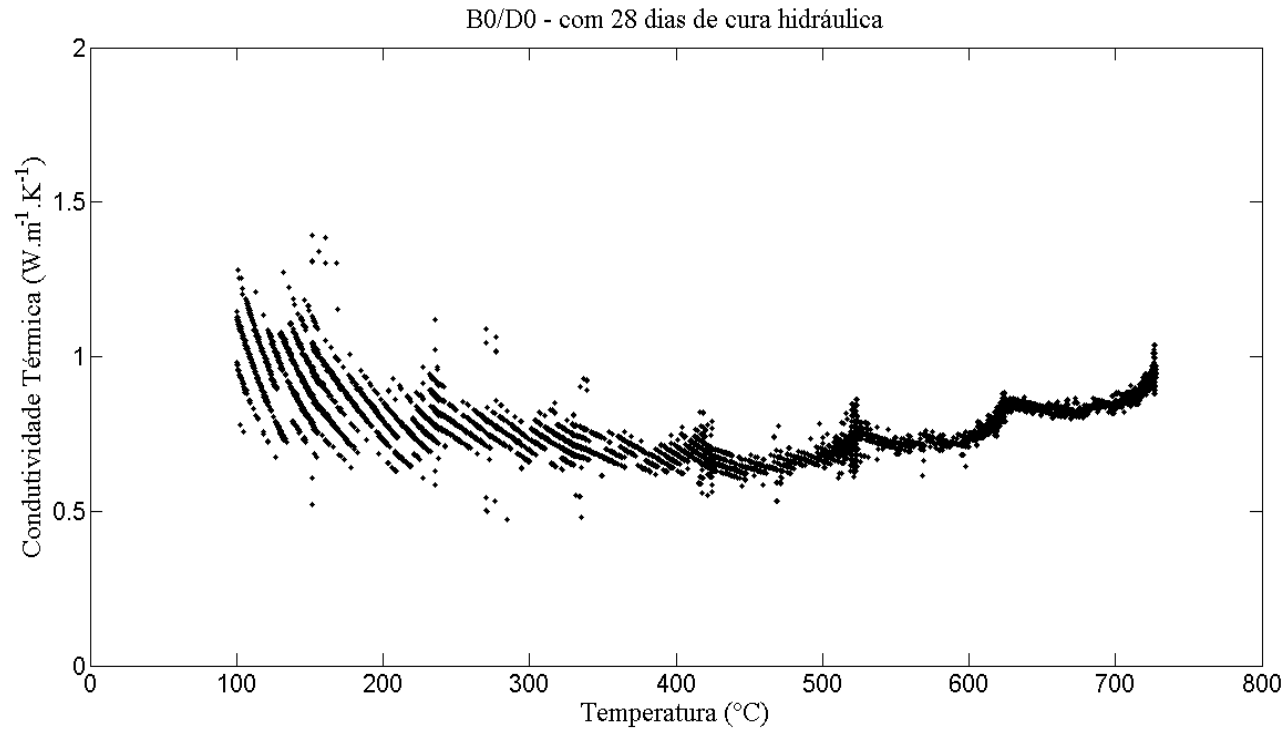
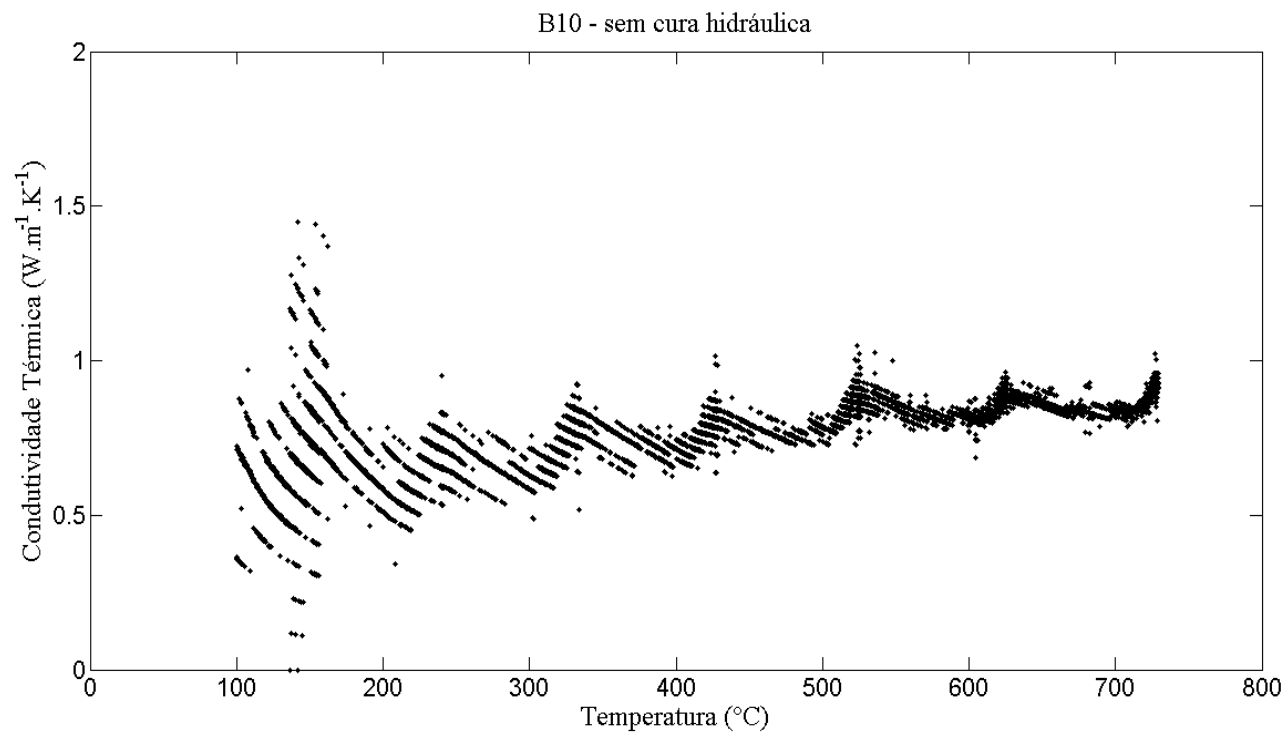


Figura 80. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para as formulações B0/D0 com 28 dias de Cura Úmida.



**Figura 81.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B10 sem Cura Úmida.

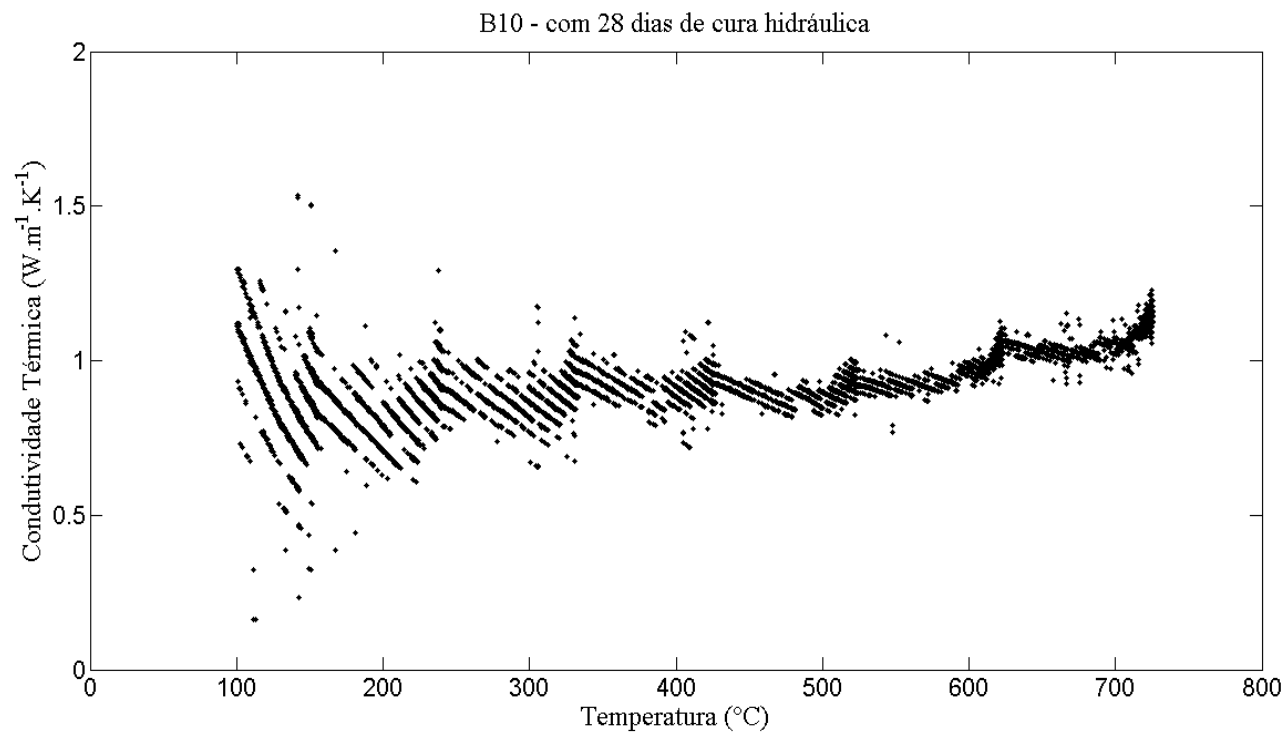


Figura 82. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B10 com 28 dia de Cura Úmida.

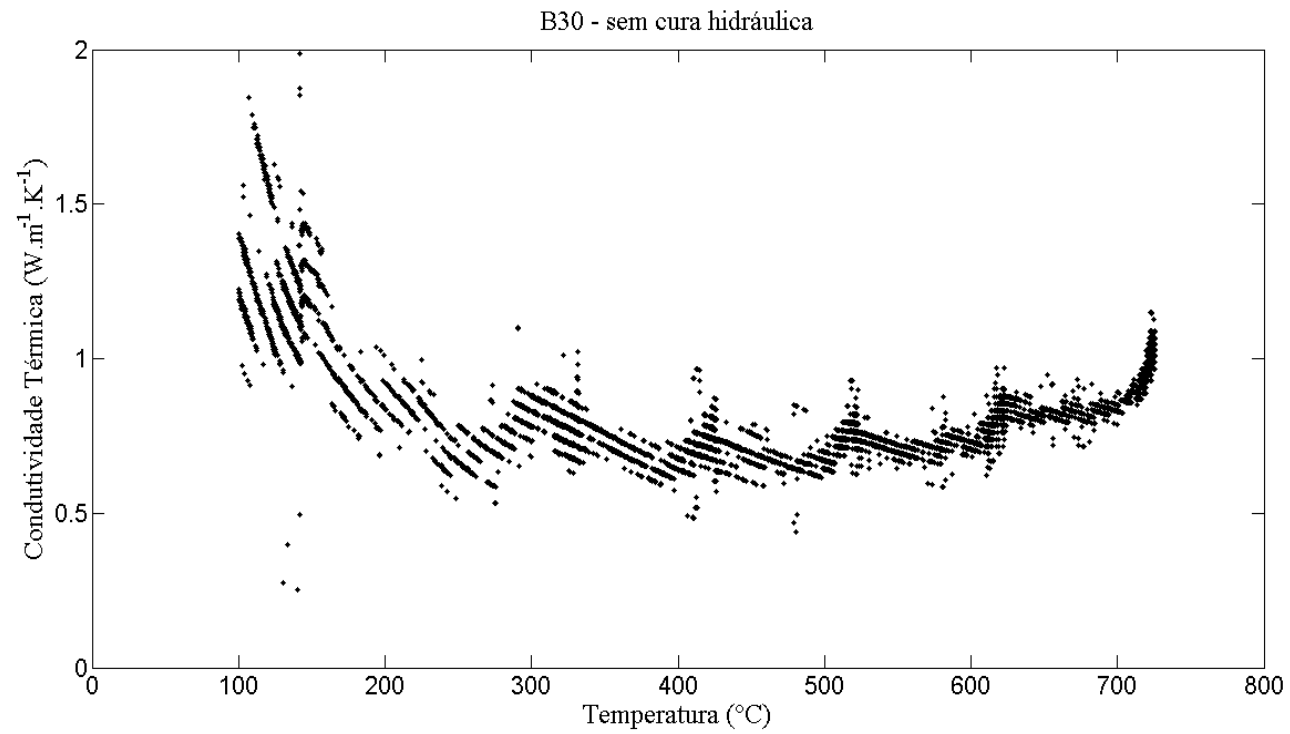


Figura 83. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B30 sem Cura Úmida.



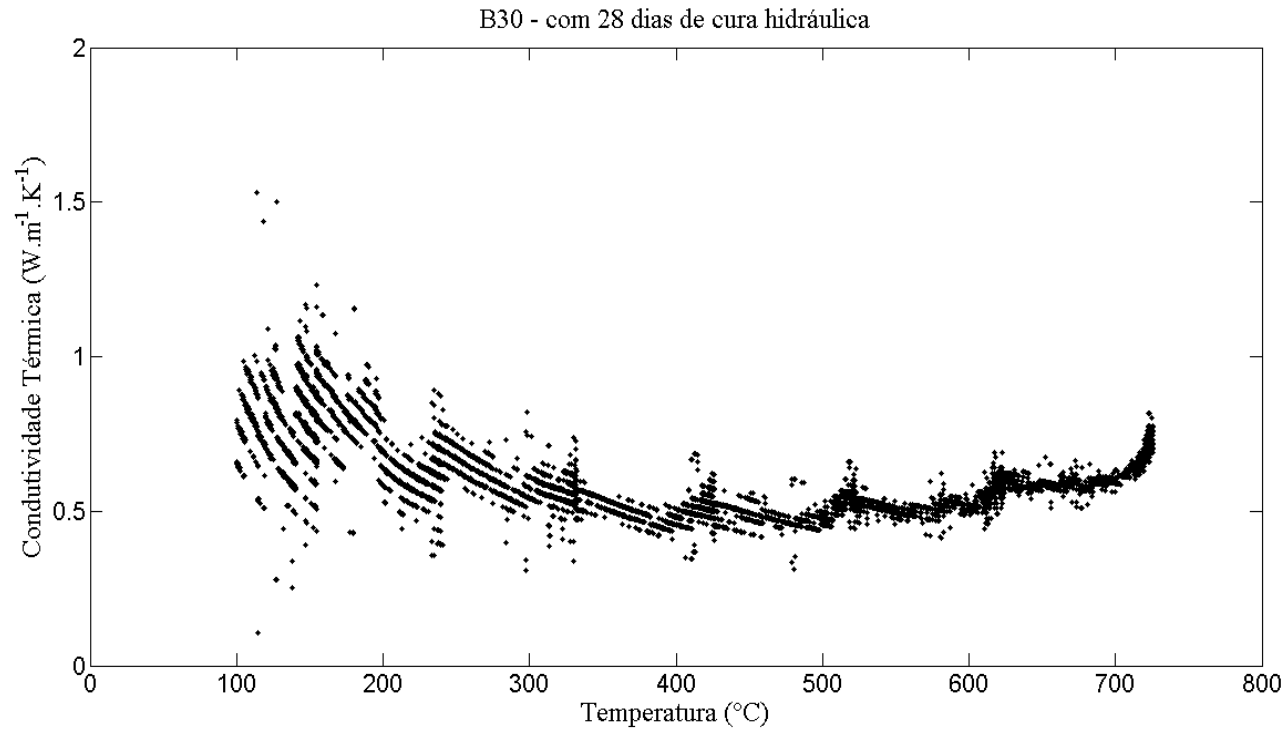


Figura 84. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B30 com 28 dias de Cura Úmida.

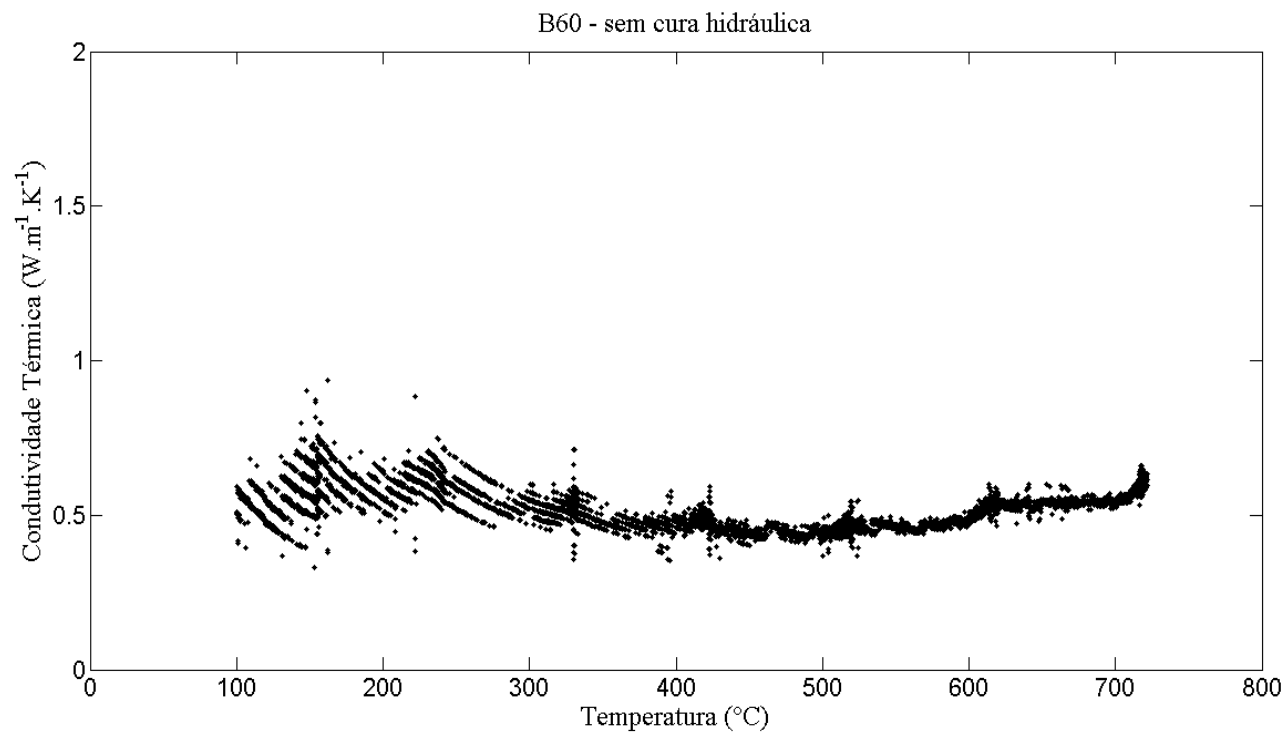


Figura 85. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B60 sem Cura Úmida.

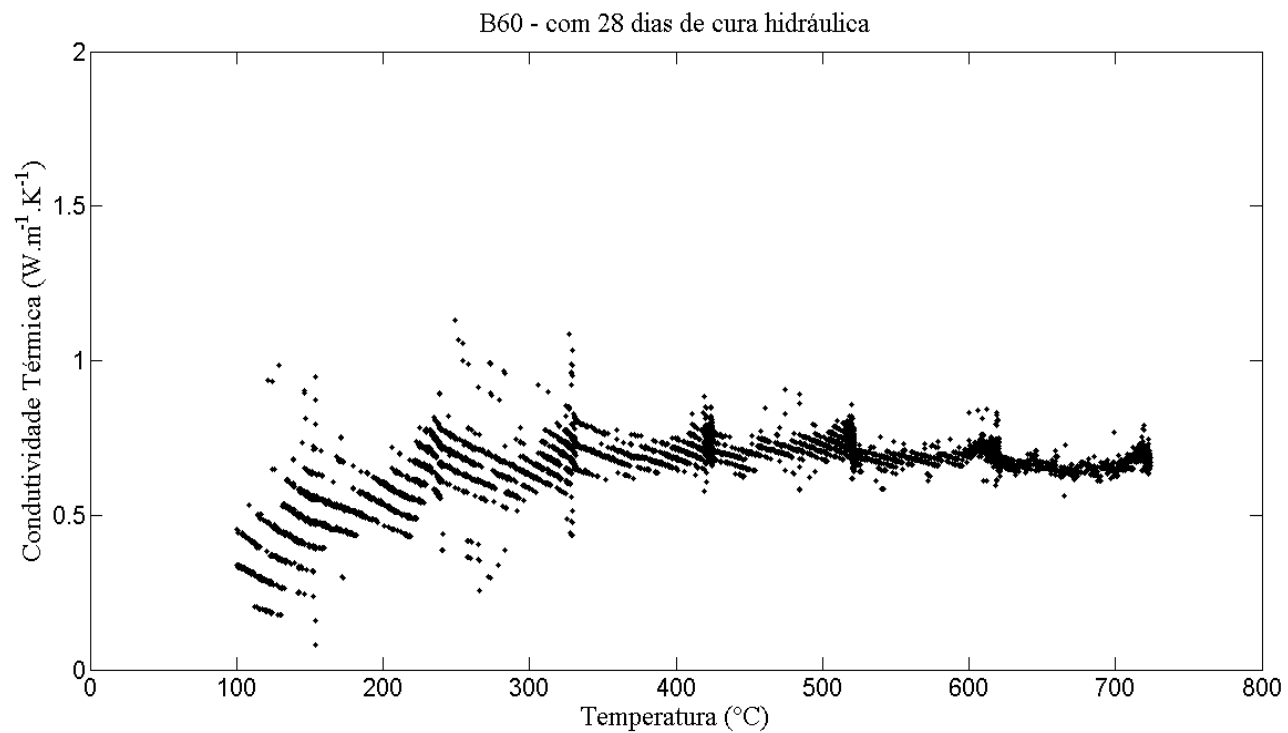
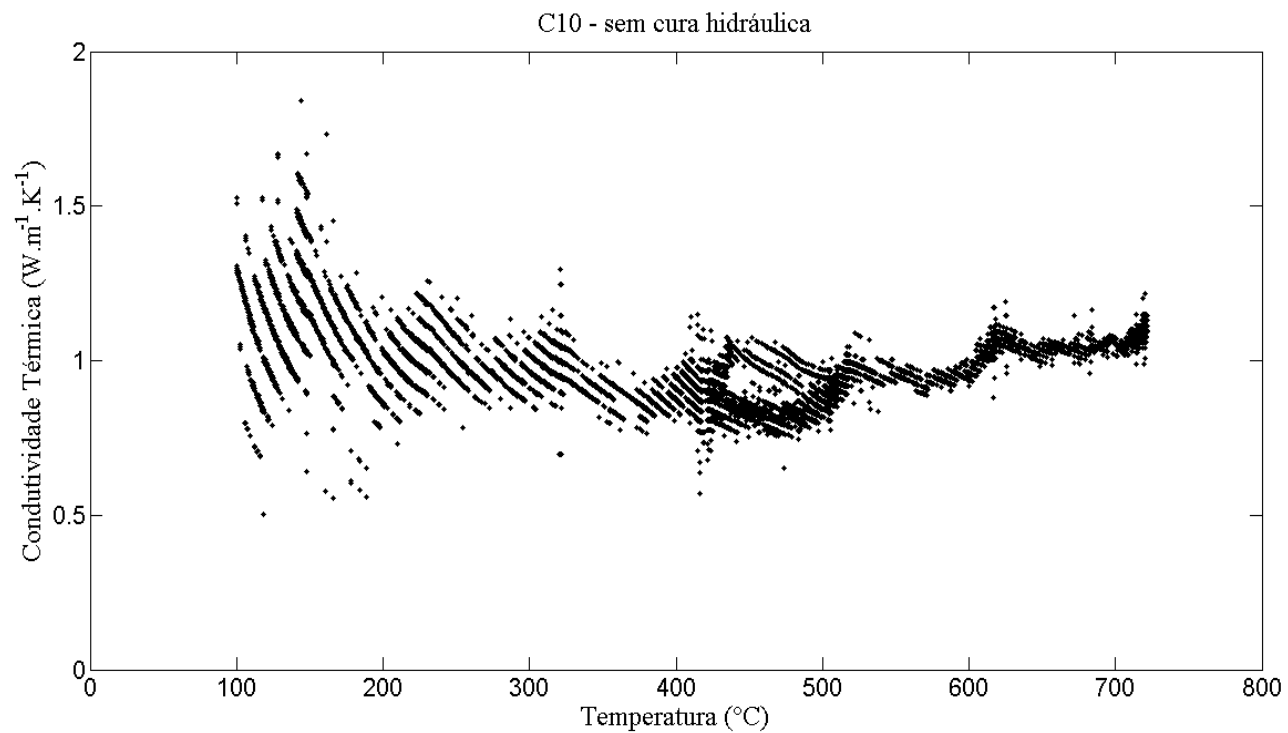


Figura 86. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação B60 com 28 dias de Cura Úmida.



**Figura 87.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C10 sem Cura Úmida.

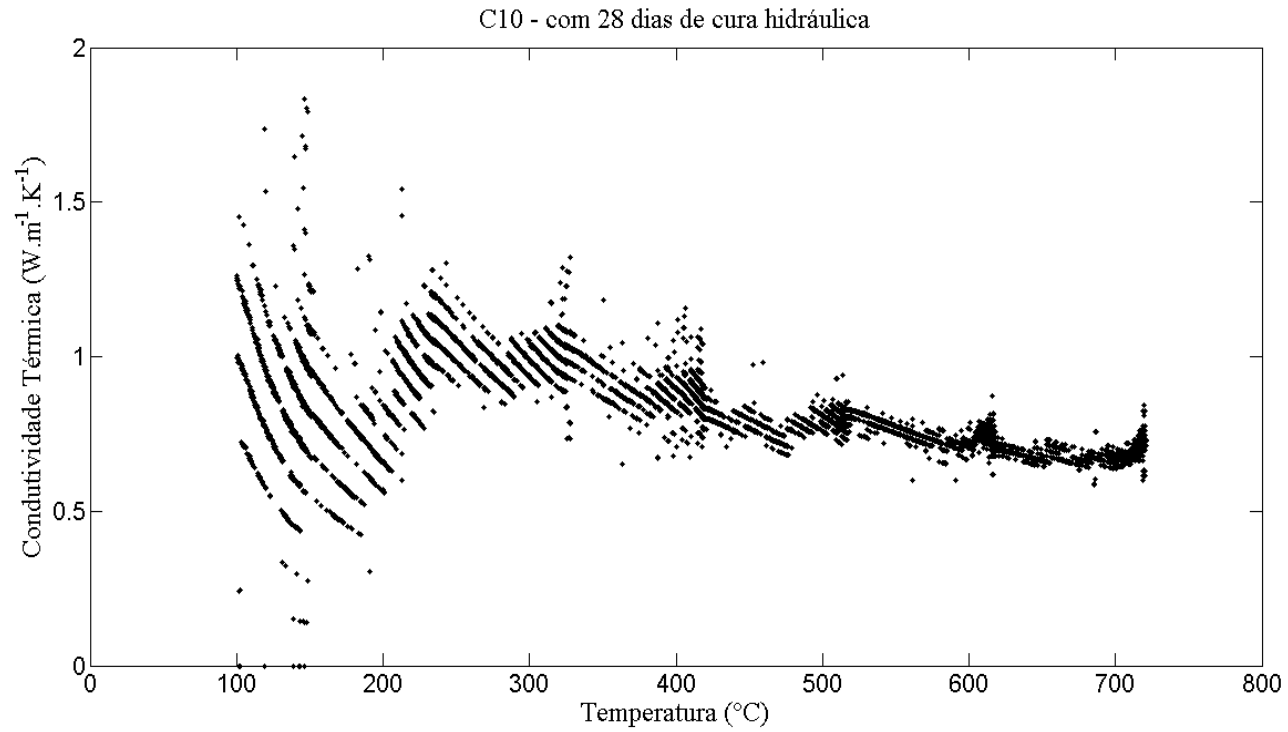


Figura 88. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C10 com 28 dias de Cura Úmida.

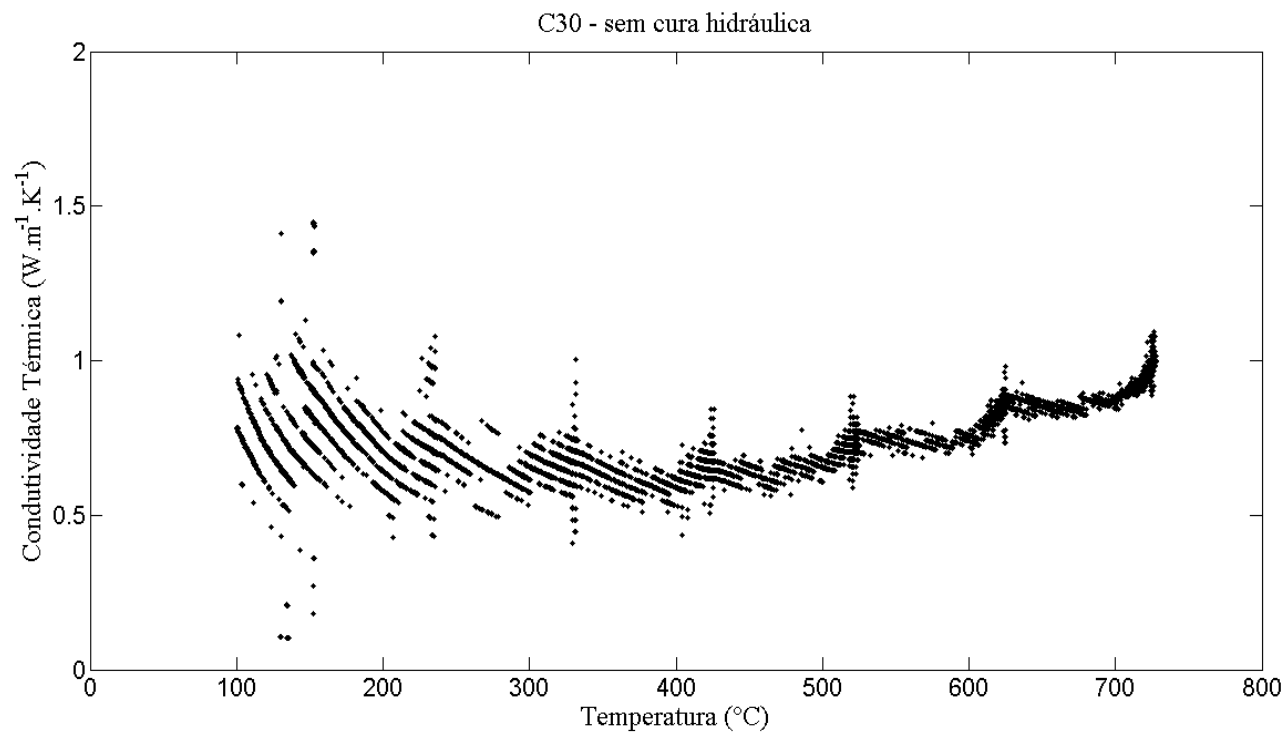


Figura 89. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C30 sem Cura Úmida.

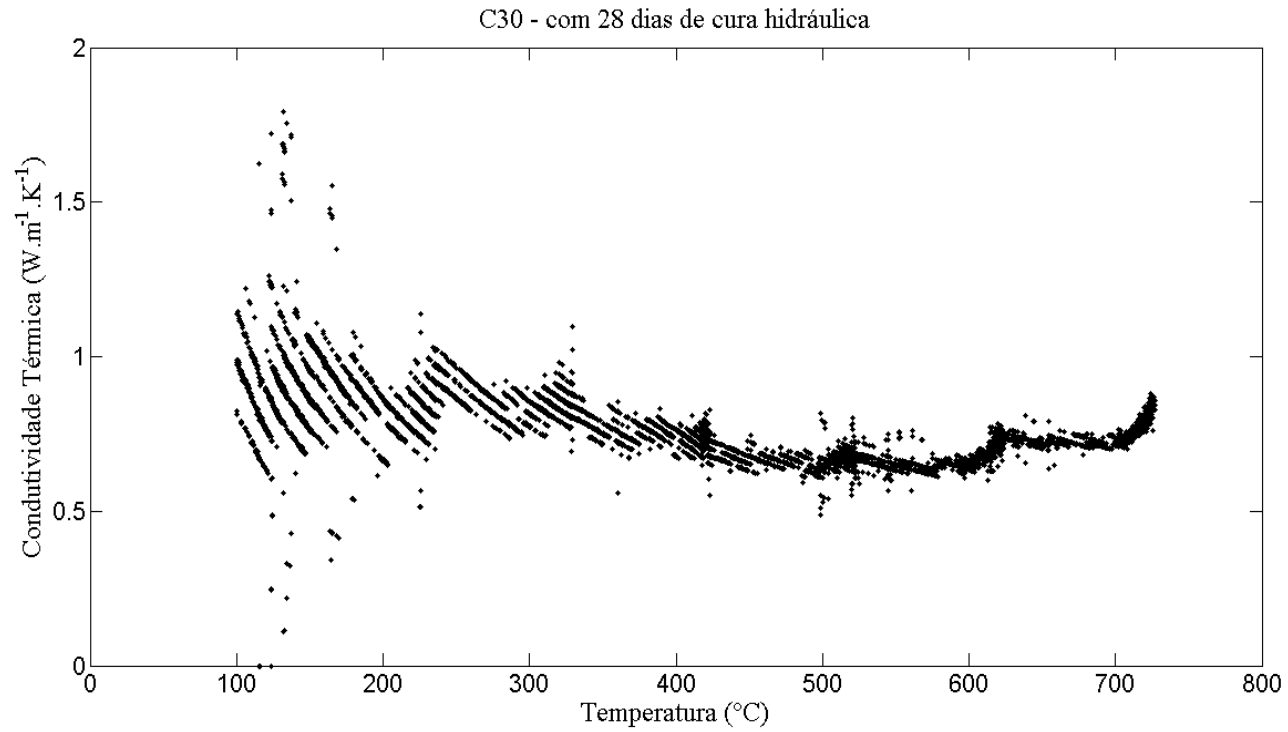


Figura 90. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C30 com 28 dias de Cura Úmida.

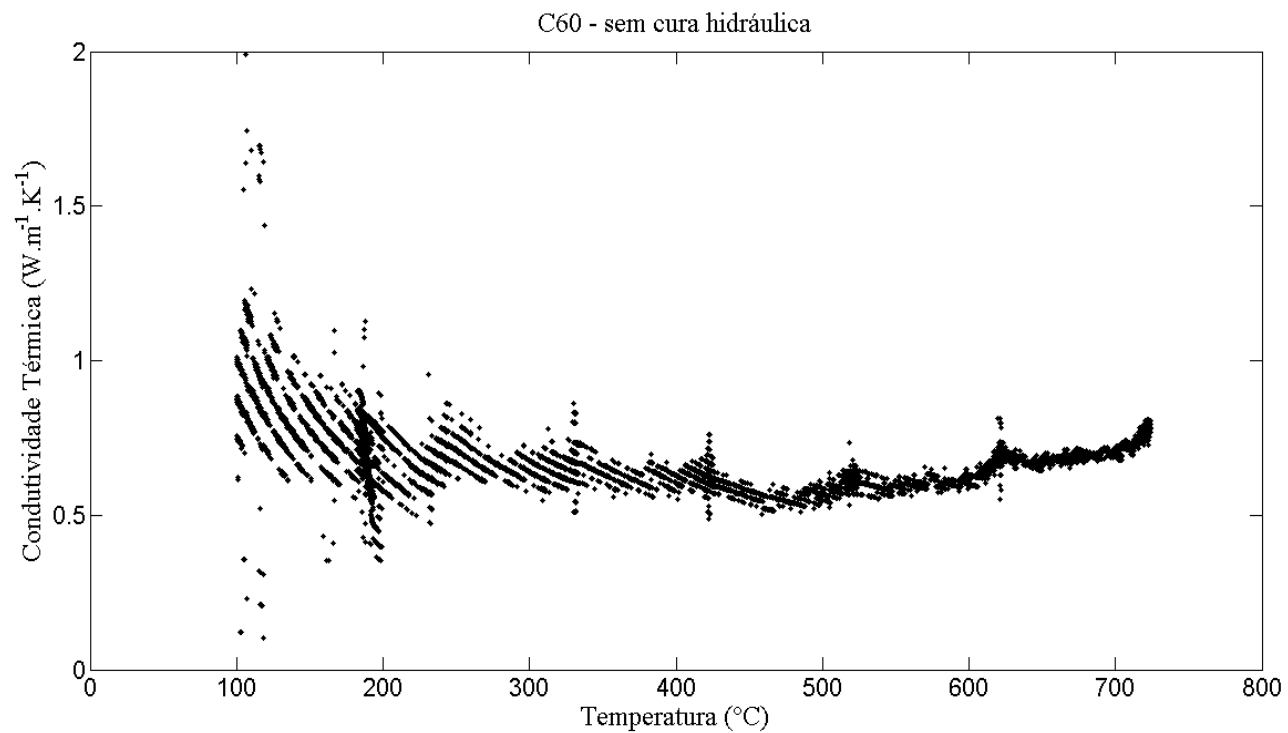


Figura 91. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C60 sem Cura Úmida.



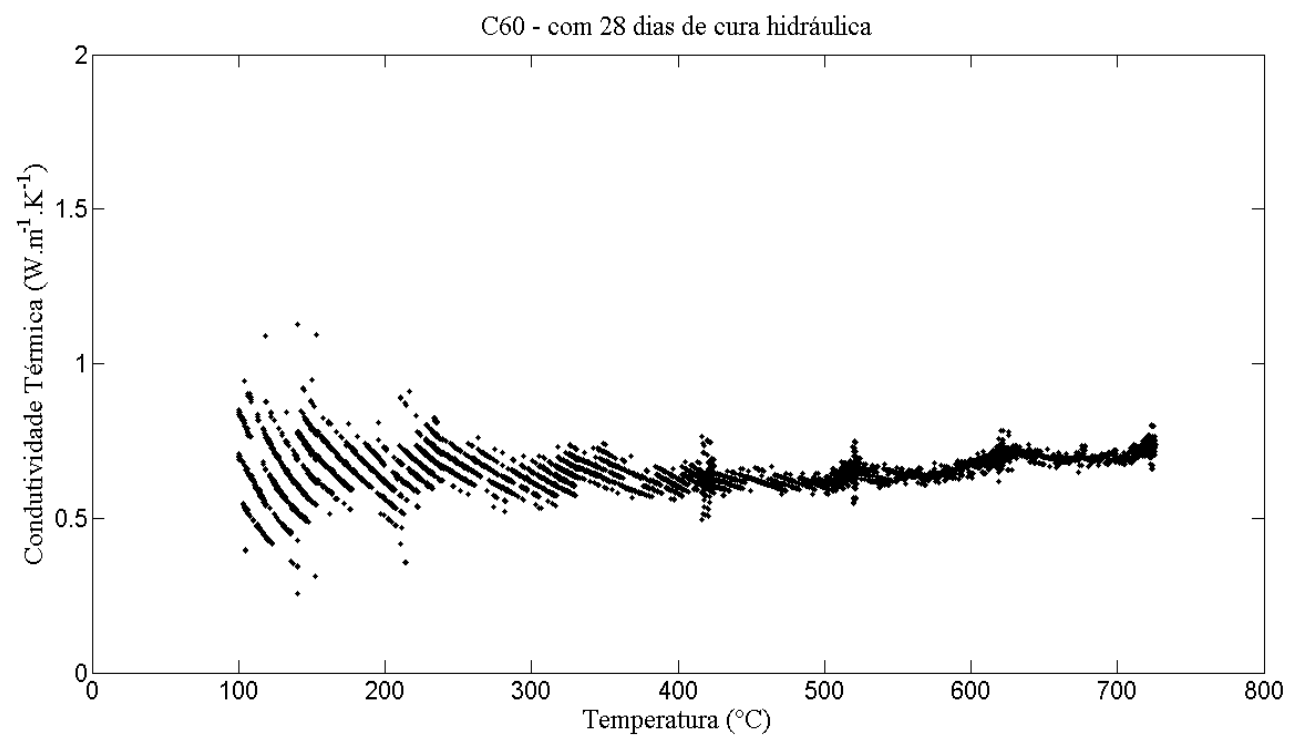
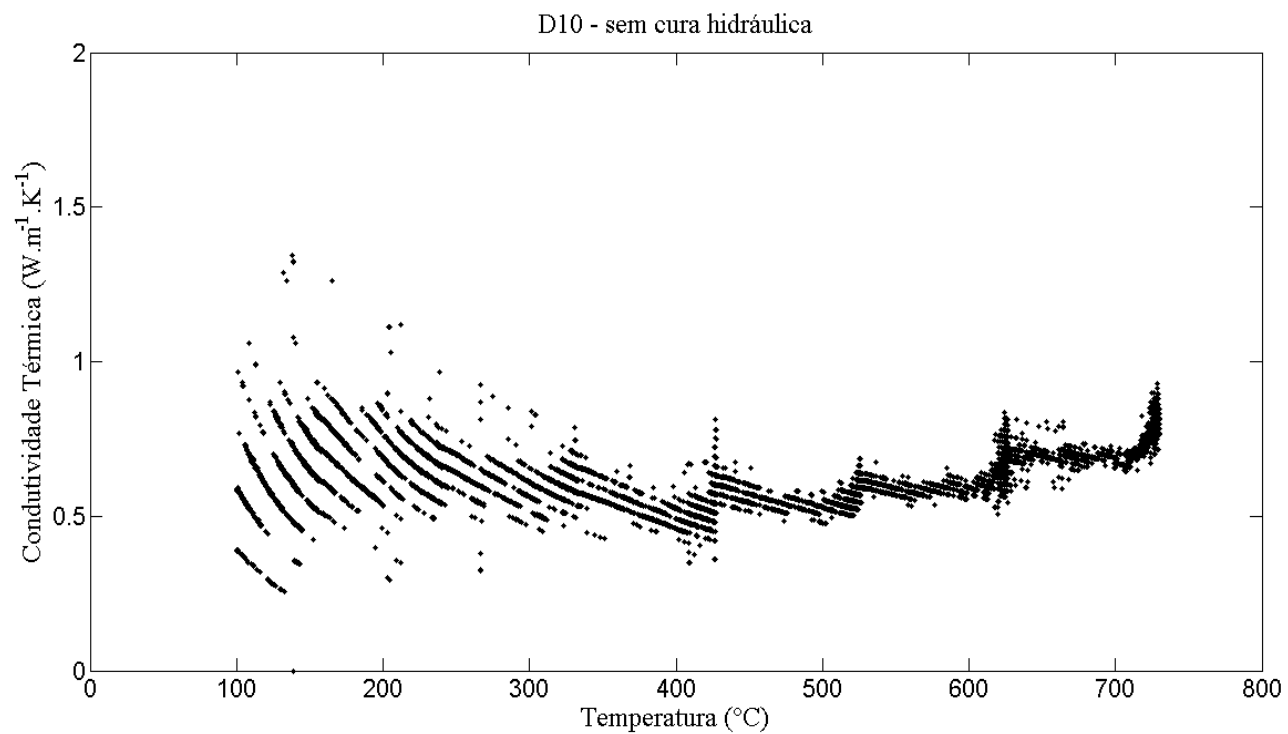


Figura 92. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação C60 com 28 dias de Cura Úmida.



**Figura 93.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D10 sem Cura Úmida.

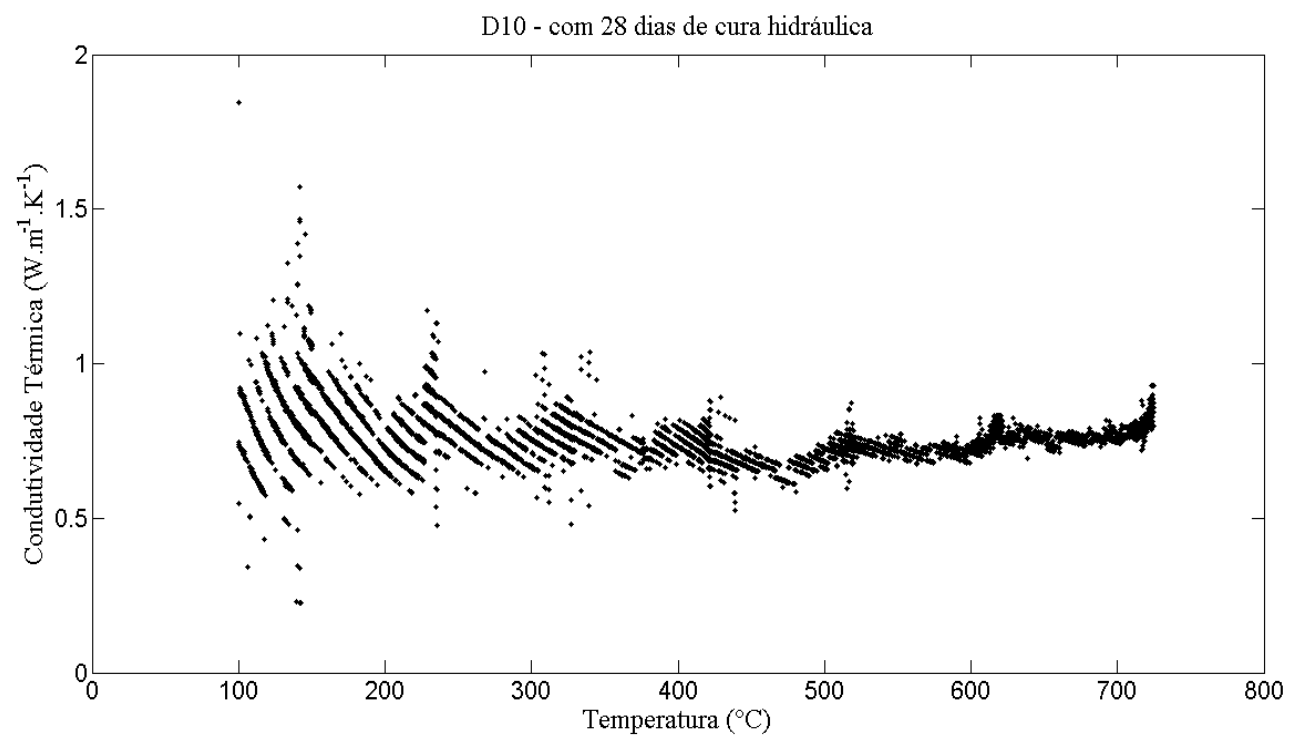
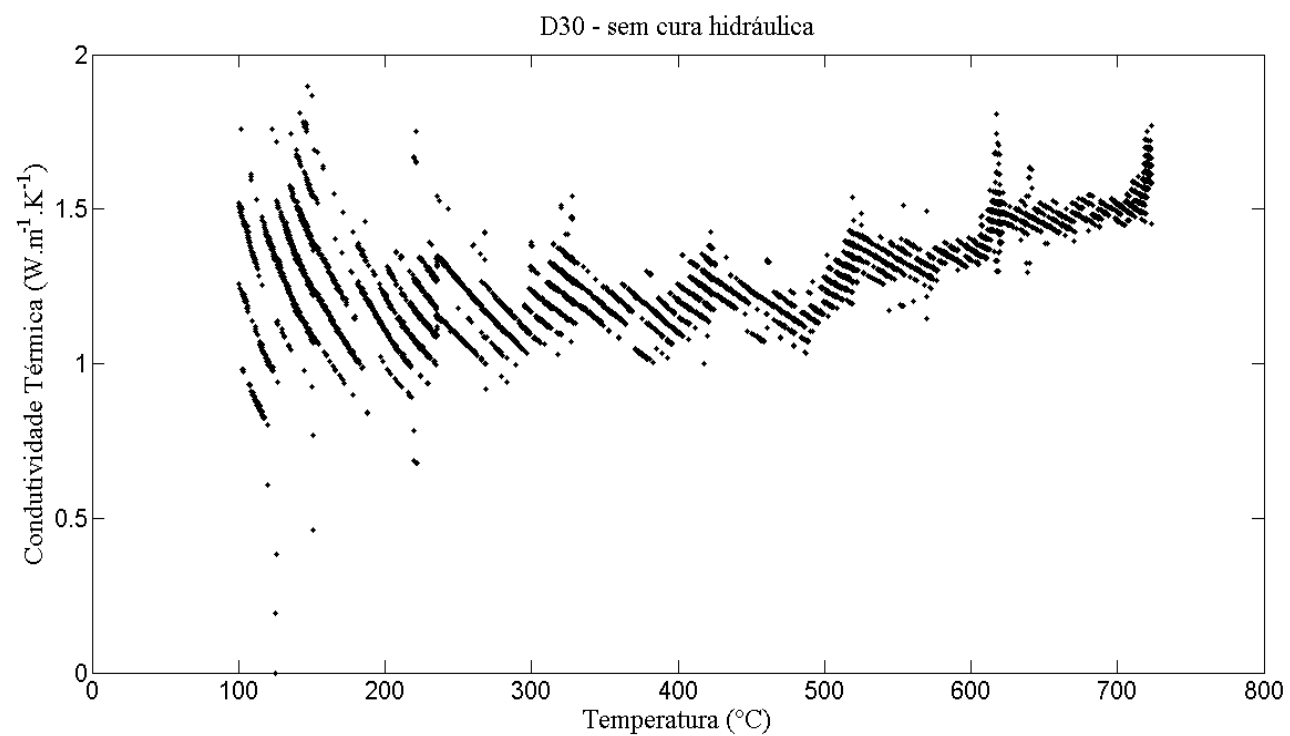


Figura 94. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D10 com 28 dias de Cura Úmida.



**Figura 95.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D30 sem Cura Úmida.

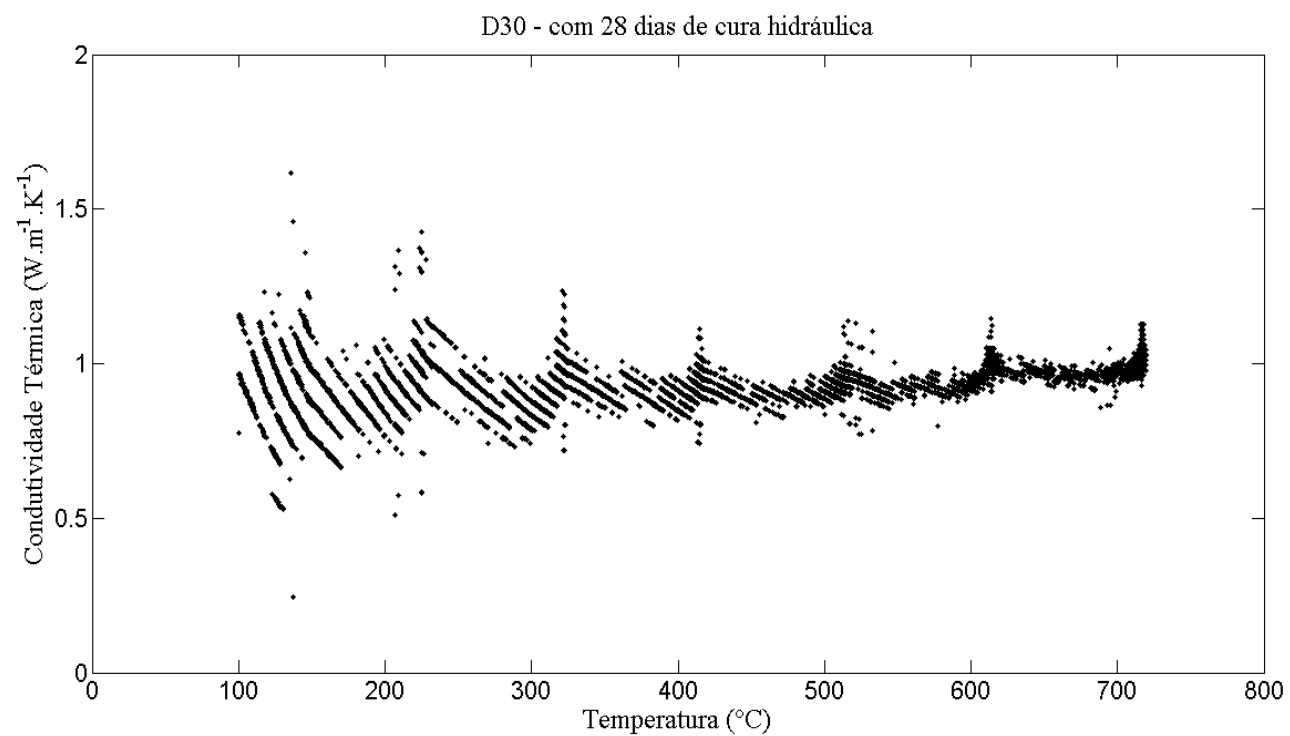
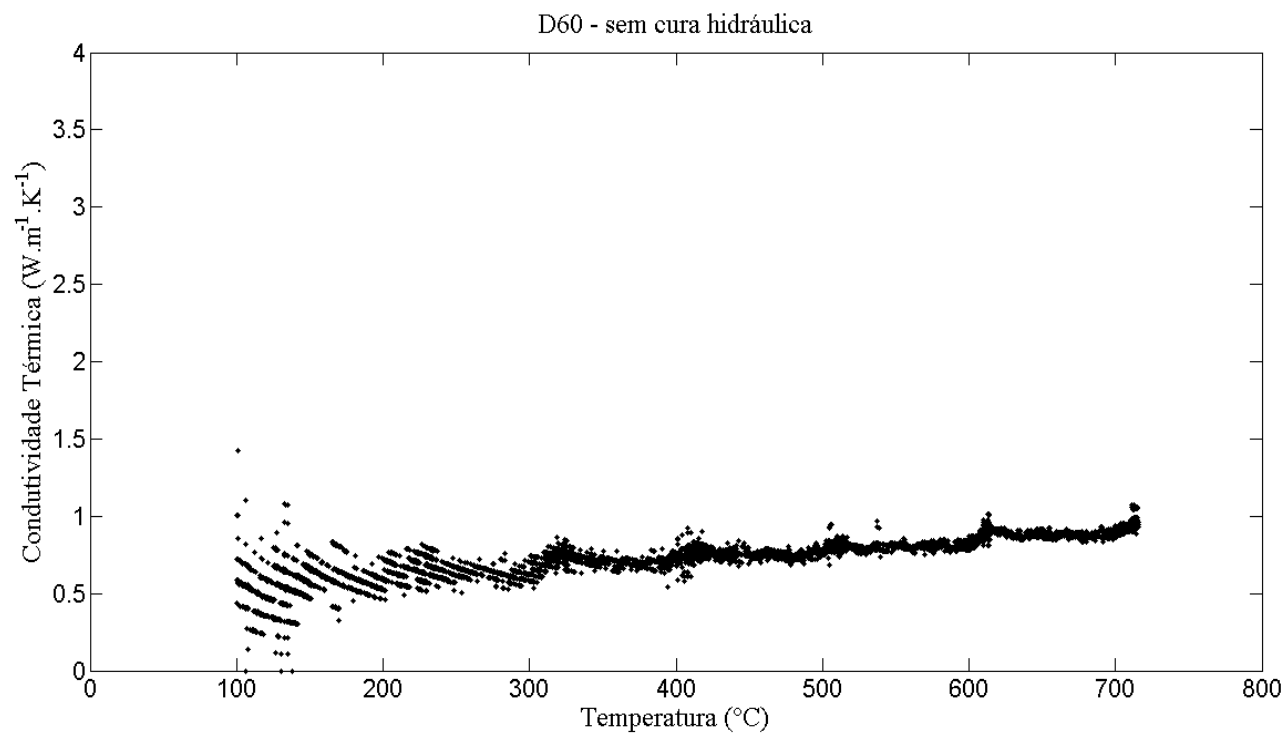
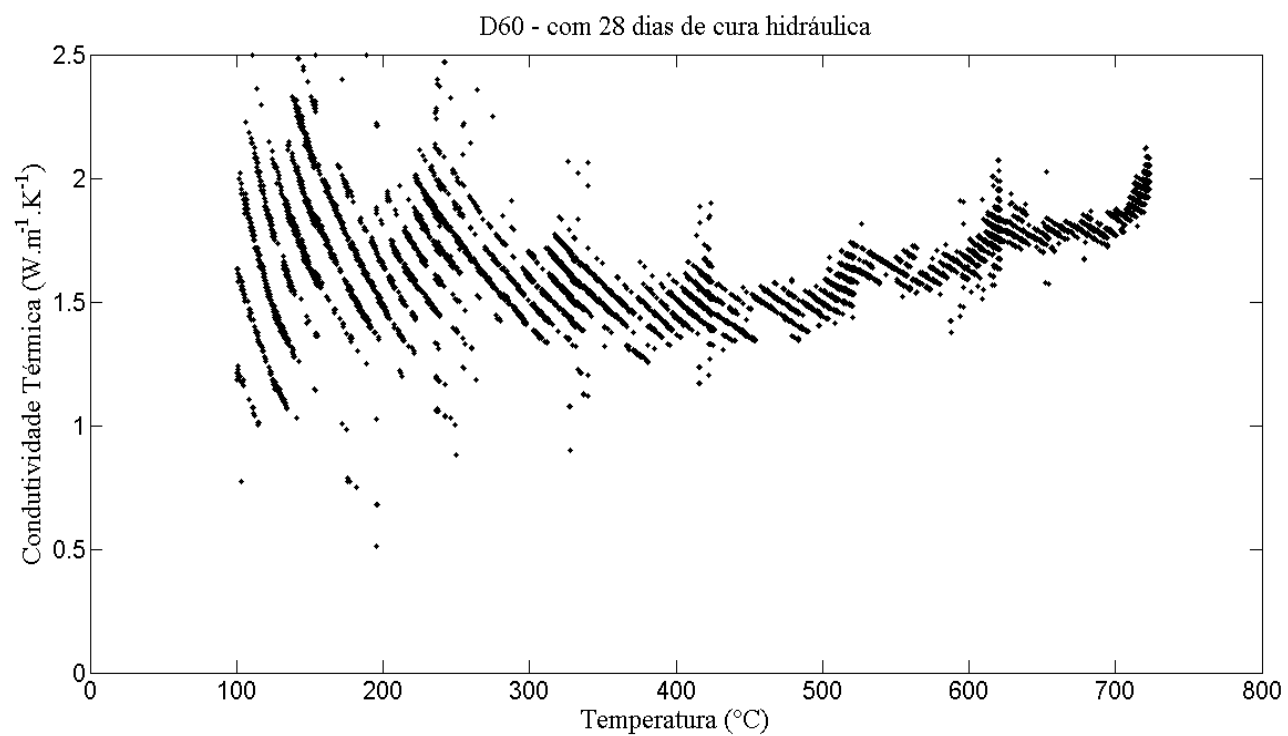


Figura 96. Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D30 com 28 dias de Cura Úmida.



**Figura 97.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D60 sem Cura Úmida.



**Figura 98.** Condutividade térmica em função da temperatura por método de cálculo numérico para a formulação D60 com 28 dias de Cura Úmida.