



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Nathaly Santana Leal de Souza

**DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS E MATÉRIAS-PRIMAS LOCAIS (NORDESTE/BRASIL)**

Natal

2019

Nathaly Santana Leal de Souza

**DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS E MATÉRIAS-PRIMAS LOCAIS (NORDESTE/BRASIL)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais de Construção e Processos Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Natal

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Souza, Nathaly Santana Leal de.

Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduos industriais e matérias-primas locais (Nordeste/Brasil) / Nathaly Santana Leal de Souza. - 2019.

148f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientadora: Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

1. Agregados leves artificiais - Dissertação. 2. Sinterização de resíduos - Dissertação. 3. Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) - Dissertação. 4. Resíduo de corte de granito e mármore (RGM) - Dissertação. 5. Microscopia de varredura eletrônica (MEV) - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Almeida, Maria das Vitórias Vieira. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

NATHALY SANTANA LEAL DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS E MATÉRIAS-PRIMAS LOCAIS (NORDESTE/BRASIL)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais de Construção e Processos Construtivos.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador, IFPB

Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Coorientadora, UFRN

Prof.^a Dr.^a Luciana de Figueiredo Lopes Lucena – Examinador Interno, UFRN

Prof.^a Dr.^a Ana Cecília Vieira da Nóbrega – Examinador Externo, UFPE

Natal, 28 de março de 2019.

DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E MATÉRIAS-PRIMAS LOCAIS (NORDESTE/BRASIL)

Nathaly Santana Leal de Souza

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

Agregados leves são materiais granulares com estrutura porosa utilizados como isolantes térmico-acústicos e em concretos leves, por exemplo, sendo o mais tradicional a argila expandida, fabricada no Brasil desde 1968, no Estado de São Paulo, cuja produção atualmente permanece concentrada no Sudeste brasileiro. Nesse contexto o estudo visou desenvolver agregados leves inovadores, a partir de precursores regionais (Nordeste/Brasil): resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), com diferentes tipos de beneficiamento, resíduo de corte de granito e mármore (RGM) e diferentes argilas. Esses foram caracterizados a partir de ensaios de área superficial (BET), granulometria a laser, finura, massas específica e unitária além das análises térmica (DTA/TG), química (FRX) e mineralógica (DRX). As misturas estudadas possuem teor de resíduo variando de 0% a 100%, e foram submetidas à sinterização em temperaturas de 1000°C a 1263°C, em forno mufla. Os agregados produzidos foram submetidos a análise de diversas propriedades: índice de encolhimento na secagem, análise visual, massa específica aparente, absorção de água, massa unitária, módulo de deformação dos agregados leves, índice de inchaço, perda de massa, resistência à tração e morfologia a partir de MEV. Registrou-se diversos agregados com massa específica aparente (MEA) inferiores a 2,00 g/cm³, absorção de água (AA) inferior a 15% e massa unitária (UM) inferior a 0,88 g/cm³, produzidos com ambos resíduos, em especial os produzidos com o resíduo agroindustrial RBC em teores superiores a 50%, apresentando MEA de 1,39

g/cm³ e AA de 3%. Já as composições com RGM geraram agregados leves com MEA de 1,56 g/cm³, AA de 8% e MU de 0,85 g/cm³, além de apresentarem resistência à tração quatro vezes superior em relação ao agregado comercializado no Brasil. Dessa forma, os agregados leves desenvolvidos apresentam excelentes características técnicas e viabilizam uma destinação mais nobre a resíduos industriais e agroindustriais locais.

Palavras-chave: Agregados leves artificiais, sinterização de resíduos, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), resíduo de corte de pedras ornamentais (RCPO), microscopia de varredura eletrônica (MEV).

LIGHTWEIGHT AGGREGATE DEVELOPMENT FROM LOCAL RAW MATERIALS AND INDUSTRIAL WASTES (NORTHEAST/BRAZIL)

Nathaly Santana Leal de Souza

Advisor: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Co-advisor: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

Lightweight aggregates are granular materials with a porous structure used as thermal-acoustic insulation and in lightweight concretes, for example. The most traditional being expanded clay, manufactured in Brazil since 1968 in the State of São Paulo, whose production is currently concentrated in the Brazilian Southeast. In this sense, the study aimed to develop innovative lightweight aggregates, from regional precursors (Northeast/Brazil): sugar cane biomass waste (SCBW), with different types of processing; granite and marble cutting waste (GMCW) and different clays. The precursors were characterized by surface area (BET), laser grain size, fineness, specific and unit mass, as well as thermal (DTA/TG), chemical (XRF) and mineralogical (XRD) analyzes. The studied mixtures had a residue content varying from 0% to 100%, and were submitted to sintering at temperatures of 1000°C to 1263°C in a muffle furnace. The aggregates produced were analyzed by the analysis of several properties: drying shrinkage index, visual analysis, particle density, water absorption, bulk density, modulus of deformation of the light aggregates, swelling index, weight loss, tensile strength and morphology from SEM. There were several aggregates with an particle density (PD) of less than 2,00 g/cm³, a water absorption (WA) of less than 15% and a bulk density (BD) of less than 0,88 g/cm³, produced with both residues, in especially those produced with SCBW, agroindustrial waste in contents higher than 50%, presenting PD of 1,39 g/cm³ and WA of 3%. On the other hand, the compositions with GMCW generated lightweight aggregates with PD of 1,56 g/cm³, WA of 8% and BD of 0,85 g/cm³, and showed tensile strength

four times higher than the lightweight aggregate marketed in Brazil. Thus, the developed lightweight aggregates present excellent technical characteristics and enable a nobler destination for industrial and agroindustrial local wastes.

Keywords: Artificial lightweight aggregate, sintering waste, sugar cane bagasse ash (SCBA), cutting ornamental rock waste (COR), scanning electron microscopy (SEM).

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

(Isaac Newton)

*Aos meus pais
Rose Mary e Leal
e meu irmão Filippo.*

*Ao meu marido Klaus,
por ser meu porto seguro.*

(Amo vocês.)

Ao meu esforço e superação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, essa constante de conhecimento e crescimento.

Agradeço ao meu Orientador Prof. Marcos e Coorientadora Profa. Vitória pela confiança depositada, oportunidade, orientação, disponibilidade e compreensão.

Agradeço aos Professores Ênio, Luciana e Cecília pela disponibilidade de analisar esta pesquisa e contribuir com seu desenvolvimento.

Agradeço aos meus pais Rose Mary e Leal por tornarem possível o meu hoje, pelo incentivo, amor e educação, ao meu irmão Filippo pelo exemplo, apoio e presença, mesmo estando distante, e, ao meu marido Klaus por estar ao meu lado nessa batalha, pela compreensão e suporte (principalmente nas horas de desespero).

Agradeço a toda a família e amigos pelo constante incentivo, paciência e carinho, especialmente Emanuele, Mônica, Hausman, Ilane, João, Tâmara e Vanessa.

Agradeço a minha irmã de vida Evilane por me presentear com “confiança embalada”, por acreditar e me ajudar a acreditar (já foram algumas caminhadas juntas “Sis”, e mais uma vez eu só tenho a agradecer pela força e irmandade).

Agradeço também a amiga Larissa por todo apoio, incentivo, cuidado, força e amizade. Valeu demais Larii!!!

Vocês foram minhas parceiras nessa viagem: Evi e Lari. Obrigada por não me deixarem cair e me ajudarem MUITO nessa caminhada. Broncas, consolo, atenção, “mão-na-massa”, “perrengue”, “rindo de nervoso”, em uma palavra: cumplicidade. Obrigada demais meninas, vocês são incríveis!

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais–IFRN/*Campus* Natal-Central (minha segunda casa nesse período). Obrigada Anne, Amanda, Pedro, Edimarlyson, Nathana, Gian, Ricardo, Aretuza, Maelson, Jemima e Débora pela ajuda e por tornar os momentos mais leves mesmo no “aperreio”.

Agradeço aos colegas de turma pelo incentivo, pela ajuda no que estava ao alcance de cada um e também (claro) pelas boas risadas, Adna, Felipe, Isabela, Jônatas, Lanna, Leidian, Queiroz, M^a Luiza e Natalia.

Agradeço a toda equipe do IFRN-*Campus* Canguaretama por tornar esse sonho possível, em especial Valdelúcio, Jacione, Thiago, Marcos, Yuri, Andrea, Liza, Alan, André, Basílio, Cirilo, Eules, Gabriel, Janiele, Nicélia e Regina.

Agradeço à toda equipe de professores, técnicos e bolsistas dos laboratórios que me acolheram abrindo suas portas e viabilizando toda a pesquisa: Laboratório de Sedimentologia/Dep. Geologia/UFRN; Laboratório de Materiais Metálicos da UFPB-*Campus* João Pessoa; Laboratório de Caracterização e Desenvolvimento de Nanomateriais do IFPB-*Campus* João Pessoa; Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da UFRN; Laboratório de Análises Térmicas da UFCG; Laboratório de Nutrição Animal - EAJ/UFRN; Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos-LaPFiMC/UFRN; Laboratório de Caracterização de Minerais/Materiais-LACAMM/IFRN-*Campus* Natal-Central;

Agradeço a toda equipe do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial ao Prof. Fagner e Viviane, pela solicitude e paciência de sempre.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma, a sua maneira, contribuíram para a realização desse trabalho, certamente eu não poderia sem vocês.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
CAPÍTULO 1	21
Introdução	21
1.1 Justificativa	22
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivo geral	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	25
CAPÍTULO 2	26
Revisão da literatura	26
2.1 Definições e principais agregados leves	26
2.2 Propriedades dos agregados leves	29
2.3 Desenvolvimento de agregados leves	32
2.3.1 Resumo da revisão bibliográfica.....	38
CAPÍTULO 3	40
Desenvolvimento experimental	40
3.1 Coleta e beneficiamento das matérias-primas	41
3.1.1 Argila branca regional (ARG-B)	41
3.1.2 Argila vermelha regional (ARG-V)	42
3.1.3 Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC)	42
3.1.4 Resíduo de corte de granitos e mármore (RGM).....	45
3.2 Caracterização das matérias-primas	47
3.2.1 Granulometria à laser	47
3.2.2 Área superficial – BET.....	48

3.2.3	Finura nas peneiras #200 e #100 mesh	48
3.2.4	Composição química – Fluorescência de Raios-X (FRX).....	48
3.2.5	Composição mineralógica – Difractometria de Raios-X (DRX)	48
3.2.6	Análise térmica (TG e DTA)	49
3.2.7	Massa unitária	49
3.2.8	Massa específica.....	49
3.3	Produção dos agregados leves regionais	50
3.3.1	Misturas.....	50
3.3.2	Definição do teor de umidade ideal para moldagem (LL e LP).....	52
3.3.3	Moldagem dos agregados	53
3.3.4	Parâmetros de queima	54
3.3.5	Estudo dos agregados produzidos	56
3.3.5.1	Índice de encolhimento.....	56
3.3.5.2	Índice de inchaço	56
3.3.5.3	Perda de massa	57
3.3.5.4	Massa específica aparente e absorção de água	58
3.3.5.5	Módulo de deformação dos agregados leves.....	59
3.3.5.6	Massa unitária	59
3.3.5.7	Análise visual dos agregados.....	61
3.3.5.8	Resistência à tração	61
3.3.5.9	Análise morfológica dos agregados	63
CAPÍTULO 4	64
Resultados	64
4.1	Caracterização das matérias-primas.....	64
4.1.1	Ensaio físicos de caracterização	64
4.1.2	Composição química – Florescência de Raios-X (FRX).....	66

4.1.3 Composição mineralógica – Difração de Raios-X (DRX)	66
4.1.4 Análise térmica (TG/DTA)	71
4.1.5 Limites de Atterberg	72
4.2 Estudo dos agregados produzidos	73
4.2.1 Agregados do grupo RGM's – Resíduo de corte de granitos e mármores	74
4.2.2 Agregados do grupo RBC-MF's – Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído no moinho de facas	92
4.2.3 Agregados do grupo RBC-MB's – Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído no moinho de bolas	108
4.2.4 Análise morfológica dos agregados.....	125
4.2.5 Compilação dos principais resultados	138
CAPÍTULO 5	141
Conclusões	141
Referências	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro dos agregados leves. Fonte: Mehta e Monteiro, 2014. ...	28
Figura 2.2 - Relação de fatores intervenientes na formação da estrutura porosa de agregados leves (a) e ilustração de sua estrutura porosa ideal (b). Fonte: Ayati <i>et al.</i> , 2018 (adaptado).	30
Figura 3.1 - Fluxo de atividades da pesquisa.	40
Figura 3.2 - Argila branca utilizada na pesquisa (ARG-B).	41
Figura 3.3 - Argila vermelha utilizada na pesquisa (ARG-V). (a) argila úmida, com torrões, recém coletada e (b) argila após beneficiamento.	42
Figura 3.4 - Aparência do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar utilizado na pesquisa. (a) RBC-S; (b) RBC-MF; e, (c) RBC-MB.	43
Figura 3.5 - Imagens do moinho de bolas utilizado para produção do RBC-MB.	43
Figura 3.6 - Imagens do moinho de facas utilizado para produção do RBC-MF.	44
Figura 3.7 - Imagens da marmoraria e seu sistema de drenagem e armazenamento da lama de RGM, com os detalhes das calhas (dutos) e os tanques de decantação e sedimentação.	45
Figura 3.8 - Coleta (a), armazenamento da lama de RGM coletada (b) e extração do excesso de água por decantação (c).	46
Figura 3.9 - Aparência do RGM nas etapas do beneficiamento. (a) lama bastante espessa ainda úmida; (b) torrões totalmente secos após estufa; (c) material retido na #6,3mm; (d) material passante na #6,3mm; (e) material retido na #0,3mm; (f) material passante na #0,3mm; (g) material retido na #0,15mm; e, (h) material passante na #0,15mm, o produto final do beneficiamento.	47
Figura 3.10 - Execução dos ensaios de LL e LP para a mistura RGM-80%. (a) Limite de Plasticidade; (b) balança de precisão utilizada; e, (c) Limite de Liquidez.	53
Figura 3.11 - Execução do traço RGM-100%.	53

Figura 3.12 - Agregados da mistura RBC-MB-90% em secagem ao ar livre por 24h, balança de precisão de 0,01 g e paquímetro digital de precisão 0,01 mm.	54
Figura 3.13- Aparência externa da mufla utilizada e detalhe das placas refratárias utilizadas para proteção interna do equipamento.	55
Figura 3.14 - Aparato de adaptação de balança de precisão para realizar medida submersa nos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água.	58
Figura 3.15 - Realização do ensaio de massa unitária da mistura RBC-MF-50% a 1000°C. a) passo 2; b) equipamentos utilizados no passo 1; e, c) passo 4. .	60
Figura 3.16 - Realização das fotos para a análise visual dos agregados.	61
Figura 3.17 - Diagrama esquemático do grão esférico durante o carregamento e aparência do grão após ruptura. Fonte: Li <i>et al.</i> (2000).	62
Figura 3.18 - Realização do ensaio de resistência à tração.	62
Figura 4.1 - Curvas granulométrica dos materiais precursores.	65
Figura 4.2 - Difratoograma de raios-X da argila branca (ARG-B).	67
Figura 4.3 - Difratoograma de raios-X da argila vermelha (ARG-V).	68
Figura 4.4 - Difratoograma de raios-X do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, moído no moinho de facas (RBC-MF).	69
Figura 4.5 - Difratoograma de raios-X do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, moído no moinho de bolas (RBC-MB).	69
Figura 4.6 - Difratoograma de raios-X do resíduo de corte de granitos e mármore (RGM).	70
Figura 4.7 - Curvas das análises térmicas realizadas nos precursores.	71
Figura 4.8 - Índice de encolhimento dos agregados do grupo RGM's.	75
Figura 4.9 - Análise visual da mistura ARG-B.	77
Figura 4.10 - Análise visual da mistura RGM-50%.	78
Figura 4.11 - Análise visual da mistura RGM-60%.	79
Figura 4.12 - Análise visual da mistura RGM-70%.	80
Figura 4.13 - Análise visual da mistura RGM-80%.	81
Figura 4.14 - Análise visual da mistura RGM-90%.	82
Figura 4.15 - Análise visual da mistura RGM-100%.	83

Figura 4.16 - Resultados dos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água (24h) dos agregados do grupo RGM's.....	85
Figura 4.17 - Módulo de deformação dos agregados do grupo RGM's.....	86
Figura 4.18 - Resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RGM's.	87
Figura 4.19 - Resultados do ensaio de massa unitária dos agregados triturados das misturas do grupo RGM's e respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$	89
Figura 4.20 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RGM's e seus respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$	91
Figura 4.21 - Índice de encolhimento dos agregados do grupo RBC-MF's.	92
Figura 4.22 - Análise visual da mistura ARG-V.	94
Figura 4.23 - Análise visual da mistura RBC-MF-50%.	95
Figura 4.24 - Análise visual da mistura RBC-MF-60%.	96
Figura 4.25 - Análise visual da mistura RBC-MF-70%.	97
Figura 4.26 - Análise visual da mistura RBC-MF-80%.	98
Figura 4.27 - Análise visual da mistura RBC-MF-90%.	99
Figura 4.28 - Resultados dos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água (24h) dos agregados do grupo RBC-MF's.	101
Figura 4.29 - Módulo de deformação dos agregados do grupo RBC-MF's	102
Figura 4.30 - Resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RBC-MF's.....	103
Figura 4.31 - Resultados do ensaio de massa unitária dos agregados triturados das misturas do grupo RBC-MF's e respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$	105
Figura 4.32 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RBC-MF's e seus respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$	107
Figura 4.33 - Índice de encolhimento dos agregados do grupo RBC-MB's....	109
Figura 4.34 - Análise visual da mistura RBC-MB-50%.	111
Figura 4.35 - Análise visual da mistura RBC-MB-60%.	112
Figura 4.36 - Análise visual da mistura RBC-MB-70%.	113

Figura 4.37 - Análise visual da mistura RBC-MB-80%.	114
Figura 4.38 - Análise visual da mistura RBC-MB-90%.	115
Figura 4.39 - Análise visual da mistura RBC-MB-100%.	116
Figura 4.40 - Resultados dos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água (24h) dos agregados do grupo RBC-MB's.	118
Figura 4.41 - Módulo de deformação dos agregados do grupo RBC-MB's. ...	119
Figura 4.42 - Resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RBC-MB's.	120
Figura 4.43 - Resultados do ensaio de massa unitária dos agregados triturados das misturas do grupo RBC-MB's e respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$	122
Figura 4.44 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RBC-MB's e seus respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$	124
Figura 4.45 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MF-50% a 1175°C.	128
Figura 4.46 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MB-50% a 1175°C.	130
Figura 4.47 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MF-70% a 1150°C.	132
Figura 4.48 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MB-70% a 1150°C.	133
Figura 4.49 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RGM-70% a 1213°C.	135
Figura 4.50 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada no agregado comercializado AE-1506 - CINEXPAN.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Normas e especificações sobre agregados e concretos leves. Fonte: Rossignolo e Agnesini, 2011.....	27
Tabela 2.2 - Características de alguns agregados leves comerciais. Fonte: Rossignolo e Agnesini, 2011.....	28
Tabela 2.3 - Composição química de argilas expandidas brasileiras. Fonte: Fabricante CINEXPAN, 2019.....	29
Tabela 2.4 - Resumo da composição química de algumas das matérias-primas utilizadas por autores anteriores no desenvolvimento de novos agregados leves.	39
Tabela 3.1 - Caracterização dos corpos moedores do moinho de bolas.....	44
Tabela 3.2 - Consumo de energia (Watts) das diferente moagens do RBC.....	44
Tabela 3.3 - Beneficiamento do RGM para 1 kg de resíduo em torrões (Figura 3.9-b).....	46
Tabela 3.4 - Relação $SiO_2/\Sigma OF$ de agregados leves comercializados e produzidos por autores anteriores.....	50
Tabela 3.5 - Relação $SiO_2/\Sigma OF$ de possíveis misturas dos precursores estudados.....	51
Tabela 3.6 - Detalhamento das misturas estudadas na pesquisa com seus respectivos teores de umidade de moldagem dos agregados.	52
Tabela 4.1 - Resumo dos relatórios de ensaios e análises de granulometria à laser, BET, finura, massa específica e massa unitária.....	65
Tabela 4.2 - Composição química (FRX) dos materiais precursores da pesquisa.	66
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de LL e LP para as misturas analisadas.	73
Tabela 4.4 - Agrupamento dos agregados estudados (misturas analisadas)...	74
Tabela 4.5 – Resumo das mudanças visuais significativas do grupo RGM's...	76

Tabela 4.6 - Resumo dos resultados de massa específica aparente e absorção de água das misturas do grupo RGM's que atendem aos parâmetros de agregado leve.....	86
Tabela 4.7 - Teores de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e óxidos fundentes das misturas do grupo RGM's.	88
Tabela 4.8 – Resumo dos melhores resultados de massa específica aparente e absorção de água do grupo RBC-MB's.....	119
Tabela 4.9 – Melhores resultados de resistência à tração do grupo RBC-MB's.	120
Tabela 4.10 – Resumo dos agregados de melhor desempenho do grupo RBC-MB's.	125
Tabela 4.11 – Resumo das propriedades investigadas dos agregados submetidos à análise pela MEV.	127
Tabela 4.12 – Compilação dos principais resultados das misturas com RGM e argilas puras (ARG-B e ARG-V).....	139
Tabela 4.13 – Compilação dos principais resultados das misturas com RBC-MF e RBC-MB.	140

CAPÍTULO 1

Introdução

Agregados leves são materiais granulares e de estrutura porosa que são produzidos e comercializados por diversas empresas ao redor do mundo, oferecendo soluções diversas com o uso desses. Alguns exemplos de fabricantes são: CINEXPAN® (Brasil), Leca® (Portugal), Lytag® (Reino Unido) e Liapor® (Alemanha e Áustria). Entre as aplicações sugeridas pelos fabricantes estão os usos como isolante térmico e acústico, decoração em paisagismos, na produção de enchimentos leves, em obras de drenagem, de aterros leves e de infraestrutura, além do uso para cultura hidropônica.

Agregados leves possuem massa unitária inferior a 1120 kg/m^3 e seu peso leve se deve a uma microestrutura celular ou altamente porosa, podendo ter origem natural ou sintética: os naturais são produzidos pela britagem de rochas ígneas vulcânicas, como pedra-pomes, escória ou tufo – esse tipo de agregado tem pouca aplicação em concretos estruturais em função da variabilidade de suas propriedades e da localização das jazidas; em contrapartida os sintéticos, são produzidos pelo tratamento térmico de vários materiais, como, por exemplo, argilas, folhelho, ardósia, diatomita, perlita, vermiculita, escória de alto-forno e cinza volante (MEHTA; MONTEIRO, 2014 e ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

Os agregados leves artificiais são formados pelo rápido aquecimento de materiais que têm a capacidade de se expandir a temperaturas muito altas, e, produzi-los a partir de resíduos é considerado uma alternativa ambiental muito satisfatória, uma vez que produtos anteriormente sem valor tornam-se matérias-primas com aplicações importantes (GONZÁLEZ-CORROCHANO *et al.*, 2016).

Em 2014, Angelin observou que no Brasil, há certa dificuldade de acesso a agregados leves, pois, apenas uma empresa produzia argila expandida no país, opção de agregado leve mais difundida e consolidada, localizada no estado

de São Paulo/Sudeste/Brasil (ANGELIN, 2014). Em dias atuais a produção de agregados leves para concretos leves ainda é percebida apenas na Região Sudeste brasileira.

Nesse contexto, autores nacionais e internacionais vêm estudando formas de produzir agregados leves a partir de resíduos industriais e/ou argilas locais como por exemplo os estudos de Santis e Rossignolo (2014), Santis (2016), Soltan *et al.* (2016), Lau *et al.* (2017), Moreno-Maroto *et al.* (2017a) e Moreno-Maroto *et al.* (2017b), que utilizaram como matérias-primas: resíduos minerais, resíduo de corte de mármore e granito, cinzas, pó de pedra, entre outros.

1.1 Justificativa

Diante do contexto acima desenvolvido, vislumbrou-se a hipótese de que seja possível desenvolver novos agregados leves a partir de resíduos industriais e matérias-primas locais, podendo fomentar a produção de agregados leves na Região Nordeste do Brasil; respondendo questionamentos como: ‘Qual a proporção e quais são os materiais da mistura?’, ‘Qual a temperatura e tempo de sinterização ideais?’, ‘Qual a qualidade deste novo material em relação ao agregado leve tradicional?’.

O principal agregado leve utilizado para a produção de concreto estrutural leve é a argila expandida, agregado que no Brasil é produzido apenas na Região Sudeste. Portanto, se justifica a busca por agregados leves regionais oriundos de matérias-primas regionais, em especial resíduos industriais locais, com qualidade para produzir concreto estrutural leve.

Diferentes resíduos podem ser utilizados para a produção de agregados leves através de sinterização. Estes resíduos devem ser capazes de produzir um núcleo poroso e de baixa densidade, uma camada superficial com baixa absorção de água e uma forma quase esférica para melhorar as propriedades do concreto no estado fresco (CHEESEMAN; VIRDI, 2005).

Assim, se utiliza matéria-prima com características argilosas com teores adequados de fundentes e substâncias formadoras de gases, que queimadas a altas temperaturas proporcionam a formação de uma fase vítrea que retém os gases gerados na queima, provocando a expansão (CLARKE, 2002).

Bethanis e Cheeseman (2004) produziram agregados leves a partir do uso de cinza de incinerações de resíduos e cinza de combustíveis com baixo teor de CaO. As cinzas de combustíveis foram utilizadas para controlar a sinterização e produzir níveis controlados de porosidade. Esse agregado leve apresentou características semelhantes ao agregado leve comercial Lytag, produzido na Inglaterra a partir de cinza volante.

Resíduos minerais como os oriundos do beneficiamento de pedras ornamentais também podem ser utilizados na produção de agregados leves, Moreno-maroto *et al.* (2017a;b) avaliaram o uso de resíduo de corte de granitos e mármore (RGM) com argila e adição de resíduos de fibras de carbono ou rejeitos plásticos. E, após avaliação do tempo e temperatura de sinterização nos fornos, verificou-se a possibilidade de produção de agregados leves com características adequadas.

Contrapondo os autores (MORENO-MAROTO *et al.*, 2017a;b), que utilizaram aditivos fundentes para alcançar agregados leves a partir de argila e RGM, Soltan *et al.* (2016) conseguiu desenvolver agregados caracterizados como leves apenas com argila e RGM, com altos teores do resíduo sem a utilização de aditivos fundentes, na região do Cairo/Egito.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver agregados leves regionais a partir de resíduos industriais e argilas de origem do Estado do Rio Grande do Norte/Região Nordeste/Brasil, visando preencher algumas lacunas, quanto a produção de agregados leves a partir de resíduos regionais, das quais destacam-se:

- Ausência de agregados leves produzidos na Região Nordeste;
- Ausência de análises de precursores regionais voltadas às potencialidades desses para utilização na produção de agregados leves, em especial, sobre a sinergia entre argilas e resíduos locais;
- Desconhecimento de resíduos industriais e agroindustriais locais adequados para a produção de agregado leve, em combinação ou não com argilas regionais, bem como, quais seriam as proporções adequadas de misturas e respectivas condições de sinterização (temperatura, taxa de aquecimento, tempo de patamar, etc.).

Verificou-se ainda como lacuna a pouca utilização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) na produção de agregados leves. Na revisão de literatura, foi encontrado apenas um trabalho (SANTIS, 2016) que estudou a incorporação de RBC no desenvolvimento de agregados leves, em composições com argila e o aditivo alcalino, silicato de Sódio (Na_2SiO_3), com teores de incorporação do resíduo (RBC) entre 0% e 43%. Esse trabalho também foi desenvolvido na região Sudeste/Brasil, reforçando a carência da pesquisa local (Nordeste/Brasil) no desenvolvimento de agregados leves utilizando resíduos industriais e matérias-primas da própria região.

Vislumbra-se a possibilidade de desenvolvimento de agregados leves com alta incorporação de resíduos, com teores de 50% a 100%, os quais ainda não foram analisados para o RBC, resíduo agroindustrial, que é proveniente de usinas sucroalcooleiras, bastante presentes na Região Nordeste brasileira.

Neste contexto os resíduos previamente selecionados para produção de agregados leves na presente pesquisa foram: o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e resíduo do corte de granito e mármore (RGM), além de duas argilas regionais utilizadas em indústrias cerâmicas: argila branca (ARG-B) e argila vermelha (ARG-V).

Ressalta-se ainda que esses resíduos apresentam semelhanças quanto à composição química e mineralógica dos precursores dos agregados leves produzidos com resíduos citados em diferentes trabalhos (HAN *et al.*, 2015; SOLTAN *et al.*, 2016; TANG *et al.*, 2017).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo da pesquisa é desenvolver um novo agregado leve que tenha seus materiais constituintes oriundos do Estado do Rio Grande do Norte/Região Nordeste/Brasil, utilizando-se de resíduos industriais regionais, fomentando o desenvolvimento da pesquisa de produção de agregados leves nessa região.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar as características físico-químicas dos potenciais materiais precursores do agregado leve regional (ALR): resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), resíduo de corte de granito e mármore (RGM) e argilas regionais (ARGs);
- ✓ Avaliar e caracterizar diferentes misturas de RBC, RGM e ARGs para a produção de agregado leve regional (ALR);
- ✓ Desenvolver e produzir o ALR a partir das misturas avaliadas;
- ✓ Diagnosticar temperaturas ideais de sinterização para as misturas;
- ✓ Caracterizar os agregados produzidos, quanto as propriedades próprias de agregados leves, classificando-os ou não como agregados leves;
- ✓ Desenvolver tecnologia e conhecimentos científicos necessários, de modo a estimular a produção de agregados leves regionais.

CAPÍTULO 2

Revisão da literatura

Os agregados leves podem ser classificados quanto a origem, sendo naturais ou artificiais (sintéticos), e, quanto aos artificiais podemos ainda classificá-los pelo processo de fabricação. Segundo Santis (2016), os agregados leves naturais têm utilização limitada devido serem extraídos de jazidas naturais que apresentam variação de propriedades, porém, sua utilização é percebida em alguns locais da Europa, devido à grande presença de vulcões e jazidas para exploração, com destaque para o uso de pedra-pomes e as escórias vulcânicas.

Já os agregados artificiais são produzidos em fábricas a partir de tratamento térmico de matérias-primas naturais como xisto, argila, ardósia, vermiculita, folhelhos ou de subprodutos industriais como cinzas volantes e escórias de alto forno, sendo o tratamento térmico de dois tipos: queima em forno rotativo ou forno de sinterização (Borja, 2011).

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica com ênfase em agregados leves artificiais, apresentando definições, propriedades, fatores intervenientes de produção, além de trabalhos anteriores que desenvolveram agregados leves inovadores, produzidos a partir de argila e também com incorporação de resíduos industriais e agroindustriais.

2.1 Definições e principais agregados leves

De acordo com a ASTM C 331 (2010) e a NM 35 (2008), é necessário que os agregados leves miúdos e graúdos não excedam 1120 kg/m^3 e 880 kg/m^3 , respectivamente, de massa unitária. O peso leve desses agregados é atribuído à sua microestrutura celular ou altamente porosa, porém, materiais orgânicos de estrutura celular, como lascas de madeira, não devem ser utilizados para esse

fim, pois não apresentam durabilidade em meio alcalino e úmido, como é o concreto de cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Já a norma EN 13055 (2016) define o agregado leve como um material granular de origem mineral com massa específica aparente inferior a 2000 kg/m^3 ou massa unitária solta inferior a 1200 kg/m^3 .

A ACI 213 R-03 (2003) aponta que a absorção de água desses agregados é geralmente entre 5% e 25%, em contraste com agregados de peso normal que apresentam, em sua maioria, valores inferiores a 2%.

Na Tabela 2.1, são apresentadas normas e especificações internacionais sobre agregados leves e concretos leves estruturais, catalogadas por Rossignolo e Agnesini (2011).

Tabela 2.1 - Normas e especificações sobre agregados e concretos leves.
Fonte: Rossignolo e Agnesini, 2011.

País	Especificação
EUA	<ul style="list-style-type: none"> • ACI 211.2. Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete, 2004 • ACI 213R-03. Guide for structural lightweight aggregate concrete, 2003 • ACI 318-08. Code requirements for structural concrete and commentary, 2008 • ACI 304.5R-91. Batching, mixing, and job control of lightweight concrete, 1997 • A.CI SP-136. Structural lightweight aggregate concrete performance, 1992 • ASTM C330-05. Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, 2005
Europa	<ul style="list-style-type: none"> • EUROCODE 2. Design of concrete structures, 2007 • NS 3420. Specification texts for building and construction, 1992 • NS 3473. Concrete structures. Design rules, 1998 • NS 22. NCA Publ. NT22. Lightweight aggregate concrete. Specif. And guidelines, 1999 • BS 3797. BS Specifications for LWA for masonry units and structural concrete, 1990 • BS 8110. Structural use of concrete. Part 2, 1997
Japão	<ul style="list-style-type: none"> • JASS 5. Reinforced Concrete Work, 2003 • JIS A 5002. Lightweight Aggregates for Structural Concrete 1978 (revised 1999) • JSCE Chapter 19. Lightweight Aggregate Concrete 1986 (revised 1996)

Mehta e Monteiro (2014), apresentam um espectro de agregados leves (Figura 2.1) que possuem massa unitária variando de 80 a 900 kg/m^3 , além das possíveis classificações de concretos produzidos a partir desses agregados, suas respectivas massas específicas e resistência à compressão.

Na Tabela 2.2 são apresentados os principais agregados leves para concretos leves comercializados no mundo, catalogadas por Rossignolo e Agnesini (2011), ressaltando que no Brasil o agregado leve comercializado é a argila expandida, fabricado pela empresa CINEXPAN, que é apresentada em suas granulometrias mais usuais.

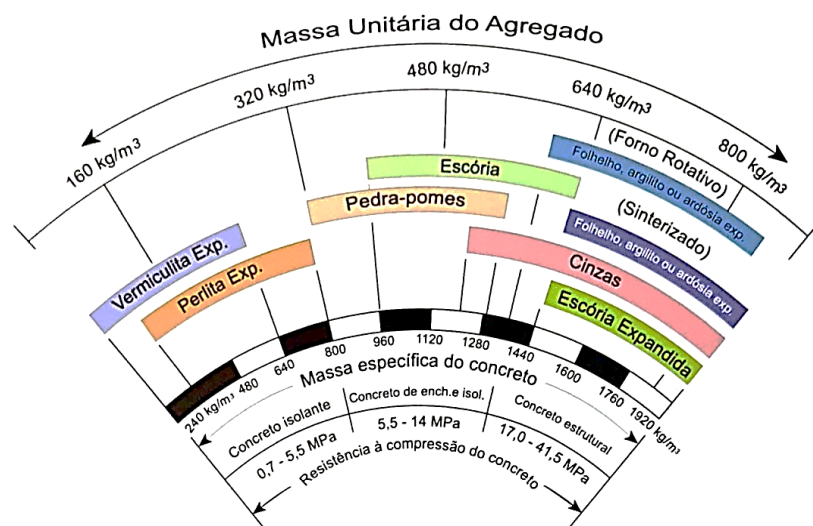


Figura 2.1 - Espectro dos agregados leves.
Fonte: Mehta e Monteiro, 2014.

Tabela 2.2 - Características de alguns agregados leves comerciais.
Fonte: Rossignolo e Agnesini, 2011.

Nome comercial	País	Matéria-prima	Fabricação	Massa específica (kg/dm³)	Massa unitária (kg/dm³)	Dimensão (mm)	Absorção de água 24h (%)
Lytag	Inglaterra	Cinzas volantes	Sinterização	1,3 – 2,1	0,6 – 1,1	0,5 – 19	15 – 20
Solite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	1,4	0,8	4 – 16	15
Liapor	Alemanha	Argila	Forno rotativo	0,6 – 1,8	0,3 – 0,9	2 – 19	11 – 17
Leca	Áustria e Noruega	Argila	Forno rotativo	0,6 – 1,8	0,3 – 0,9	0,5 – 16	11 – 30
Arlita	Espanha	Argila	Forno rotativo	1,4	0,8	1 – 10	13
Cinexpan 0500	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,5	0,9	0,5 – 5	6
Cinexpan 1506	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,1	0,6	6 – 15	7
Cinexpan 2215	Brasil	Argila	Forno rotativo	0,7	0,5	15-22	10

Na Tabela 2.3 apresenta-se a composição química das argilas expandidas brasileiras, de acordo com os dados disponíveis nos catálogos *online* da fabricante¹. A empresa também define a argila expandida como um agregado leve e isolante constituído de uma crosta micro porosa rígida e de alta resistência, com o interior formado por uma massa cerâmica porosa, concebidos por processo em forno rotativo de alta tecnologia a uma temperatura de 1100°C.

¹<https://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-2215-2018.pdf>,
<https://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-1506-2018.pdf>, e,
<https://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-0500-2018.pdf>.

Tabela 2.3 - Composição química de argilas expandidas brasileiras.
Fonte: Fabricante CINEXPAN, 2019.

Óxidos	AE-0500	AE-1506	AE-2215
	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	56,10	52,90	63,19
Al ₂ O ₃	20,00	18,90	18,02
Fe ₂ O ₃	11,90	11,10	7,63
K ₂ O	5,90	5,50	4,91
Na ₂ O	0,20	0,22	0,61
MgO	3,60	3,44	3,26
TiO ₂	0,92	0,88	0,92
CaO	0,10	0,09	0,64
Perda ao fogo	0,50	6,80	0,20

2.2 Propriedades dos agregados leves

Agregados leves possuem características que os enquadram nessa classificação, como visto no item anterior (item 2.1): massa específica aparente inferior à 2,00 g/cm³, massa unitária inferior à 1,20 g/cm³ e absorção de água geralmente inferiores à 25%. Outras propriedades desses agregados também são importantes, em especial para aplicações em concretos, como a forma, textura superficial, estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação, as quais serão detalhadas a seguir.

➤ Morfologia e textura superficial

A morfologia e a textura superficial dos agregados leves influenciam algumas propriedades importantes dos concretos, como resistência mecânica, por exemplo, pois estão relacionados com a quantidade de água necessária para a obtenção da trabalhabilidade desejada (ROSSIGNOLO, 2009).

Agregados leves graúdos geralmente apresentam forma granular aproximadamente esféricas, e segundo Mendes (2016), partículas arredondadas tendem a melhorar a trabalhabilidade de concretos, por reduzirem o atrito entre as partículas maiores, promoverem a redução do índice de vazios e apresentarem menor área superficial específica, demandando menor quantidade de pasta para envolver os agregados e tornar as misturas trabalháveis.

Já quanto a textura superficial, Neville (2016) aponta que a propriedade é baseada no grau de polimento da superfície das partículas, sejam elas polidas ou opacas, lisas ou ásperas, e, que essa afeta a aderência dos agregados à pasta de cimento impactando consideravelmente a resistência do concreto, em

especial a resistência à flexão. Ressalta ainda que frequentemente ocorre a penetração da pasta de cimento nos poros superficiais abertos das partículas de agregado leve graúdo, favorecendo um intertravamento mecânico entre esses.

Por fim, Rossignolo e Agnesini (2011) destacam diferenças morfológicas importantes de acordo com o processo de fabricação dos agregados leves (sinterização ou forno rotativo). Agregados sinterizados, em geral, apresentam forma irregular com alta absorção de água e boa aderência à pasta de cimento em função da rugosidade de sua superfície. Já o forno rotativo produz agregados leves de formato arredondado regular e âmago de massa esponjosa, envolto por uma casca de baixa permeabilidade, diminuindo a absorção de água desses.

➤ Estrutura interna e resistência mecânica

Segundo Ayati *et al.* (2018), a estrutura de poros de um agregado leve é um fator importante que influencia as propriedades de massa específica aparente, absorção de água e resistência mecânica desses, e, que essa estrutura é uma variável influenciada pelas características das matérias-primas e parâmetros de produção. Esses fatores intervenientes e a estrutura porosa ideal de um agregado leve são apresentadas na Figura 2.2.

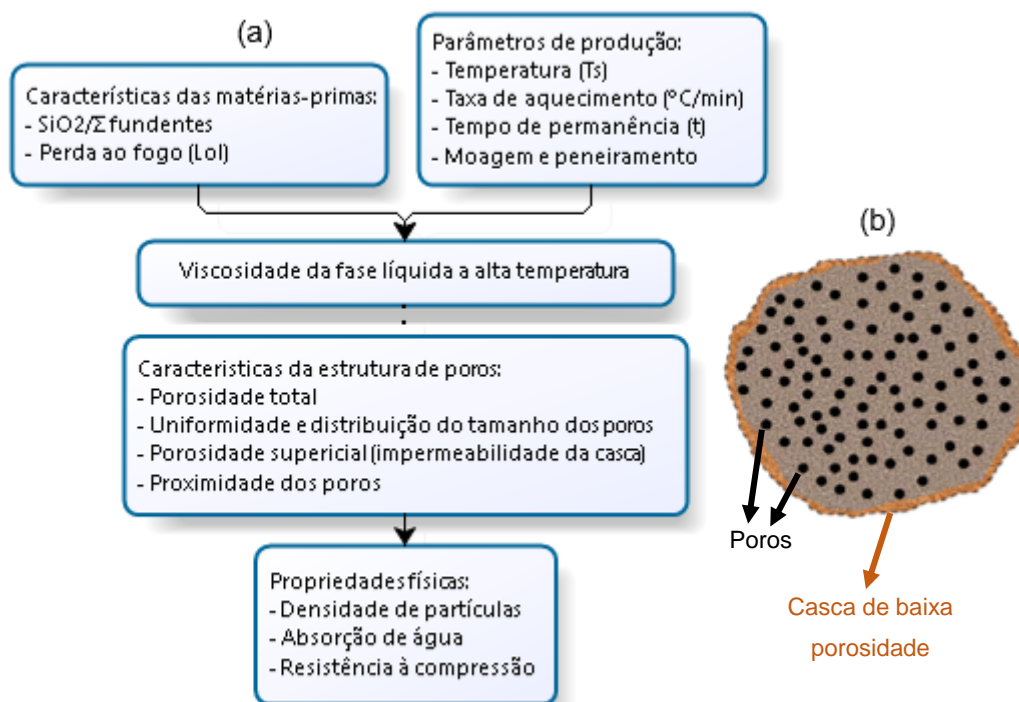


Figura 2.2 - Relação de fatores intervenientes na formação da estrutura porosa de agregados leves (a) e ilustração de sua estrutura porosa ideal (b).

Fonte: Ayati *et al.*, 2018 (adaptado).

Rossignolo (2009) discorre que a estrutura interna tem um efeito importante na resistência mecânica dos agregados leves; para a mesma matéria-prima e processo de fabricação, agregados com estrutura bastante porosa são menos resistentes em relação aos de pouca porosidade. Ressalta ainda que o tamanho e a distribuição dos poros também são decisivos na resistência mecânica desses agregados: para um mesmo grau de porosidade, é melhor que haja uma distribuição uniforme de pequenos poros, em vez de poucos poros de grande diâmetro. O autor ainda pontua que a redução da porosidade, em algumas áreas específicas, como a casca, aumenta a resistência mecânica do agregado.

As partículas dos agregados graúdos leves são relativamente fracas, e sua resistência pode ser um fator limitante da resistência do concreto, porém, essa limitação pode ser amenizada pelo uso de agregados com menor dimensão, contudo a diminuição dos grãos resulta em aumento das massas específica e unitária dos agregados (NEVILLE, 2016).

➤ Massa específica, absorção de água e módulo de deformação

A absorção de água nos agregados leves reflete uma diferença importante entre agregados de peso normal no que se refere a dosagem de concretos. Para agregados de peso normal a umidade do agregado está principalmente relacionada a umidade da superfície desses e pode ser considerada como parte da água de mistura, já para agregados leves a água é absorvida dentro do agregado além de estar na superfície; a água, que é absorvida internamente no agregado leve, não está imediatamente disponível para o cimento e não deve ser contada como água de mistura (ACI-213 R-03, 2003).

Dessa forma, Rossignolo (2009) aponta que para agregados de alta absorção de água é recomendado realizar a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evitar a formação de bolhas de ar ao redor do agregado. A alta quantidade de água absorvida pelo agregado leve pode ser desfavorável para algumas propriedades do concreto no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem e da massa específica e a redução da resistência ao fogo, em contraponto, apresenta melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, com a redução do efeito parede.

Ainda nesse contexto, quando a hidratação do cimento diminui a umidade relativa dos poros capilares na pasta de cimento endurecida, a água do agregado leve migra para os capilares, possibilitando aumento da hidratação adicional; situação que pode ser denominada como "cura úmida interna", e torna o concreto com agregado leve menos sensível à cura inadequada (NEVILLE, 2016).

A ACI 213 R-03 (2003) aponta que o módulo de elasticidade do concreto é uma função do módulo de elasticidade de seus constituintes e apresenta uma relação entre o módulo de elasticidade dos agregados leves e sua massa específica aparente. Essa relação é expressa pela Equação (2.1).

$$E_c = 0,008 \times \gamma^2 \quad (2.1)$$

onde,

E_c é o módulo de deformação (MPa); e,

γ é a massa específica aparente (kg/m^3).

Baseando-se na Tabela 2.2 e aplicando a Equação 2.1, verificou-se que agregados como Cinexpan, Leca, Liapor e Lytag, comercializados no Brasil ou outros países, apresentam módulo de deformação entre 3 GPa e 35 GPa.

Neville (2016) aponta que a aderência entre o agregado e a pasta de cimento hidratada é influenciada pelos seus módulos de elasticidade. Segundo o autor, não há grande diferença entre os módulos de elasticidade do agregado e da pasta de cimento hidratada, nos concretos com agregados leves. Esse fato é benéfico para a boa aderência entre os dois materiais e para um bom comportamento do concreto como um compósito, pois, melhora a transferência de tensões entre as partículas de agregados e a matriz.

2.3 Desenvolvimento de agregados leves

A produção de agregados leves envolve diversos parâmetros como a composição química das matérias-primas, moldagem dos grãos, perfil de queima, no que se refere às taxas de aquecimento, temperaturas de sinterização, realização ou não de pré-aquecimento, tipo de forno utilizado e

resfriamento, além do controle tecnológico através de ensaios básicos que caracterizam o agregado produzido e classifica-o, ou não, como agregado leve.

Nesse contexto, serão apresentados neste item, trabalhos anteriores que estudaram os fatores intervenientes e metodologias de produção de agregados leves a partir de diversos materiais, em especial os que se busca analisar nesta pesquisa: Resíduo de corte de granito e mármore (RGM), Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e argilas.

O RGM é um resíduo proveniente da indústria de rochas ornamentais, normalmente é estocado em forma de lama, pois, durante o corte de mármore e granitos utiliza-se água para o arrefecimento dos discos e diminuição do pó em suspensão, e, essa mistura de água, pó e resíduos formam a lama que é escoada, por dutos próprios nos equipamentos e nas instalações físicas das fábricas, até o local de armazenamento para posterior destinação.

Segundo a ABIROCHAS (2019), o Brasil exportou rochas ornamentais para 120 países no ano de 2018, sendo os três principais destinos os EUA, a China e a Itália, nesta ordem, somando 3,0 milhões de toneladas de produção para o mercado externo; além da produção para o mercado interno, que foi da ordem de 6,0 milhões t, no mesmo ano. Ainda segundo a fonte o papel do Brasil na economia mundial do setor de rochas é muito importante, na qual ocupa quinto lugar e destaca alguns pontos essenciais: em primeiro lugar, a força do mercado interno, superior à média, e o caráter altamente qualificado de exportações que fornecem materiais, muitas vezes exclusivos, de alta valorização estética e tecnológica para os clientes.

Nesse contexto, Santos, Destefani e Holanda (2013) ponderam que apesar da cadeia produtiva da indústria de rochas ornamentais ter uma grande importância econômica e social no país, uma quantidade vultosa de resíduos é gerada tornando seu destino final um problema ambiental, pois contaminam diretamente os rios e o próprio solo, além da desfiguração da paisagem, o que vem preocupando as autoridades e a população. Os autores caracterizaram diferentes RGMs, os quais apresentaram como principal componente a sílica (SiO_2), e, os autores verificaram também uma granulometria bastante fina, com 85% de partículas inferiores a $75\mu\text{m}$.

Soltan *et al.* (2016) utilizou RGM e argila provenientes da cidade de Cairo/Egito, para o desenvolvimento de agregados leves com teores de 50% a 100% do resíduo nas misturas, que foram moldadas manualmente em tamanhos quase constantes, submetidos a sinterização por 15 minutos a temperaturas de 1000°C a 1200°C, com uma rampa de aquecimento de 10°C/min. A massa unitária dos agregados produzidos diminuiu com o aumento da temperatura máxima de queima, e, os agregados leves, de massa unitária inferior ou igual a 1,2 g/cm³, somente foram alcançados após a queima das misturas contendo pelo menos 20% em peso de argila à 1200°C, sendo os menores valores registrados para essa propriedade de 0,65 g/cm³.

Moreno-Maroto *et al.* (2017b) fabricaram agregados leves na Espanha a partir de resíduo de fibra de carbono em pó (FCP), como aditivo, e, como base mineral, o RGM e o resíduo de sepiolita (SEP). O teor de umidade ótimo para a extrusão das misturas foi obtido através dos ensaios de limite de plasticidade (LP) e liquidez (LL). A base mineral das misturas foi composta de 90% de RGM e 10% de SEP, e, a partir dessa base foi incorporado o aditivo FCP em proporções de 0% a 10%. As misturas foram queimadas em forno rotativo, com velocidade de 2,5 RPM, com pré-aquecimento na zona de entrada por 20 segundos a 400°C. Foram analisadas três temperaturas máximas: 1100°C, 1125°C e 1150°C, com variação do tempo de permanência nessa temperatura de 4, 8 e 16 minutos.

Os agregados produzidos (MORENO-MAROTO *et al.* (2017b) apenas com a base mineral reduziram de volume com o aumento da temperatura e do tempo de exposição, alcançando densidades de agregados pesados, entretanto, a utilização de fibra de carbono resultou em agregados de peso leve em todas as misturas, especialmente os sinterizados a 1150°C com 2,5% de FCP, atingindo massa específica de 1,13 g/cm³ e índice de inchaço acima de 8%. Os autores analisam que devido ao “efeito vedante” da casca e à natureza altamente refratária do FCP, o aditivo foi queimado lentamente, existindo tempo suficiente para formar uma matriz mineral viscosa capaz de reter os gases liberados durante o processo de queima, permitindo a formação de um núcleo poroso.

Santis e Rossignolo (2014) produziram agregados leves a partir de argilas provenientes de cinco fábricas de produtos cerâmicos do Estado de São

Paulo/Brasil; o teor de umidade para extrusão foi obtido através de ensaios de Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP), e, a sinterização realizada por 60min a 900°C com as respectivas rampas de aquecimento e resfriamento: 4°C/min e 6°C/min. Os agregados produzidos apresentaram massa específica aparente entre 1,55 g/cm³ e 1,79 g/cm³ e absorção de água entre 16% e 24%, concluindo que a produção de agregados leves, a partir de argilas calcinadas, pode ser viável para utilização em concretos estruturais.

Segundo Ayati *et al.* (2018) uma série de materiais secundários já foram utilizados juntamente com argilas na produção de agregados leves, como: serragem, areia, lodo de esgoto, cinzas volantes, resíduo de corte de granitos e mármore, resíduo de vidro e resíduos de controle de poluição do ar, e, que diversos fatores influenciam na produção desses agregados. O mecanismo de inchaço ocorre quando uma fase contendo silicato viscoso captura gases liberados em alta temperatura, e, que o teor de óxidos fundentes (Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, CaO e MgO) determina a faixa de temperatura na qual ocorre piroplasticidade, enquanto outros fatores, incluindo o teor de silicato, controla a viscosidade (FISHER; GARNER, 1967 apud AYATI *et al.*, 2018).

Os autores (AYATI *et al.*, 2018) ainda pontuam que o controle do processo de fabricação é essencial para produzir uma estrutura de poros ideal para agregado leve, caracterizada pela alta porosidade total, não conectividade dos poros e homogeneidade de distribuição e tamanho dos poros. Características que se relacionam com as propriedades finais desses agregados (densidade de partículas, absorção de água e resistência à compressão). Como por exemplo, se a taxa de aquecimento for baixa, o material pode estar incompletamente vitrificado, permitindo que gases gerados escapem sem causar inchaço e podendo gerar aumento de densidade.

Entre os resíduos agroindustriais produzidos no mundo, diversos produtos vêm sendo estudados para utilização na construção civil em aplicações como por exemplo: adições minerais, substitutos aos agregados miúdos ou incorporação de finos, bem como, na produção de agregados leves sinterizados. Como exemplos desses resíduos: as cinzas de óleo de palma (COP), as cinzas da casca do arroz, já conhecida como pozolana da casca do arroz (PCA), e, o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC).

Porém, na presente revisão de literatura foi encontrado apenas um estudo que buscou desenvolver agregados leves, tendo como componente o RBC, realizado por Santis (2016), porém, esse resíduo vem sendo estudado por diversos autores para aplicação como adições minerais, devido ao seu alto teor de sílica (ANJOS; MARTINELLI, 2008; BENTO; SILVA; MONTEIRO, 2017; RÍOS-PARADA *et al.*, 2017, FARIAS *et al.* 2014, MEDEIROS, 2016).

Ressalta-se ainda que devido à crescente demanda por energias renováveis e combustíveis menos poluentes, a quantidade de cinza do bagaço da cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira tem aumentado significativamente. A safra brasileira de cana-de-açúcar, estimada para 2018/2019, é de 615,84 milhões de toneladas, e, na região Nordeste a produção deverá atingir 45,6 milhões de toneladas, com aumento de 10,8%, em relação à safra anterior (CONAB, 2018).

Santis (2016) buscou desenvolver agregados leves a partir de argila vermelha e RBC, com teores de 0 a 43% do resíduo, com e sem a adição de silicato de sódio, que podia entrar na composição substituindo-se 50% da água de mistura. Para tanto, o autor moldou corpos de prova cilíndricos a partir de extrusão de 10cmx15mm para análise prévia, os quais, após secagem, foram submetidos à queima a 900°C por 60min, com as respectivas rampas de aquecimento e resfriamento: 4°C/min e 6°C/min.

O autor (SANTIS, 2016) produziu agregados de 15 mm x 15 mm, com 43% de RBC e adição do silicato de sódio, para aplicação em concretos leves, considerando que os corpos de prova da mistura apresentaram absorção de água de 15,5%, massa específica aparente de 1,69 g/cm³ e resistência à compressão de 13,95 MPa, porém, não foi percebido a apresentação da análise dos agregados de 15 mm x 15 mm. Por fim, o autor concluiu que agregados leves com argila vermelha calcinada confeccionados com incorporações de RBC e silicato de sódio apresentaram características compatíveis com as apresentadas pelos agregados leves convencionais, possibilitando ainda redução na absorção de água e ganho de resistência dos agregados.

Lau, Teo e Mannan (2017) desenvolveram agregados leves com lodo de esgoto (LE), cinzas de óleo de palma (COP), ambos coletadas no estado de Sarawak/Malásia, e, silicato de sódio (Na₂SiO₃), como agente aglutinante. As

misturas apresentaram proporções de 40% a 60% de COP e LE, com adições de 0%, a 15% de Na_2SiO_3 , e, foram pelletizadas por processo mecânico em disco de granulação. Os grãos foram pré-aquecidos a 200°C, 400°C, 600°C e 800°C, com permanência de 30 min em cada estágio e sinterizados a 1160°C, 1180°C e 1200°C, também por 30 min.

Os autores (LAU; TEO; MANNAN, 2017) concluíram que o aglutinante (Na_2SiO_3) diminuiu a temperatura de sinterização necessária e melhorou o processo de vitrificação nos grãos, produzindo agregados de maiores densidade e resistência mecânica, em contrapartida, sem o aglutinante os resultados mostraram densidades mais baixas, porém os agregados possuíam poros abertos e conectados, o que resultou em alta absorção de água e baixa resistência. Os melhores resultados foram obtidos com as misturas de 50%LE50%COP+15%A e 40%LE60%COP+15%A, alcançando massas específicas aparentes de 1,04 g/cm³ e 1,06 g/cm³ e resistências de 7,4 MPa e 8,1 MPa, respectivamente, possuindo, segundo os autores, resistências similares a agregados de peso normal, porém com redução da ordem de 40% quanto a densidade de partículas.

Han, Han e Shin (2015) produziram agregados leves na Coreia utilizando cinza inferior (CI) e pó de pedra (PP), como base; lodo abrasivo de vidro (LAV), e compostos químicos, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , CaSO_4 , CaCO_3 e NaOH , como fundentes; e, escória oxidante (EO), escória de alto-forno (EAF), Fe_2O_3 , como agentes de inchaço. A moldagem dos grãos foi realizada através de um granulador em tubo e a sinterização ocorreu com pré-aquecidos por 20 min a 400°C em forno mufla e em forno rotativo tubular. Em mufla os grãos foram sinterizados por 15 min em temperaturas de 850°C a 1200°C, e no forno rotativo, com velocidade de 4 RPM e 0,9° de inclinação, a exposição foi de 15 min.

Os melhores resultados apresentados (HAN; HAN; SHIN, 2015) foram obtidos com a proporção de 80:20 (PP:CI), porém, as misturas apenas com PP e CI não foram suficientes para formar agregados leves, requerendo a incorporação dos agentes de inchaço e fundentes. O melhor fundente considerado pelos autores foi o Na_2SO_4 (5%) e o agente de inchaço a escória oxidante (10%). Os resultados com o forno rotativo se mostraram melhores com relação a sinterização em mufla, pois, produziram agregados de menor

densidade a uma temperatura de 1100°C. Na sinterização utilizando mufla a melhor condição observada foi de exposição de 15 min a 1150°C.

2.3.1 Resumo da revisão bibliográfica

A partir da revisão apresentada verificou-se que o teor de umidade pode ou não ser determinado a partir de ensaios de LL e LP e que a moldagem dos grãos se dá de forma manual ou mecanizada a partir de granuladores ou por extrusão. Após moldagem os grãos passam por secagem ao ar livre por no mínimo 24h, e, posteriormente, secagem em estufa a cerca de 100°C também por 24h, o que segundo Lau, Teo e Mannan (2017) diminui a propensão a rachaduras ou explosões durante a queima.

Kazmierczak (2010) também aponta que o teor de água deve ser retirado lentamente do componente cerâmico, de modo a impedir o aparecimento de deformações e/ou fissuras, provocadas por contrações diferenciais entre o interior e a superfície pois, na secagem ocorre migração da água para o exterior, e o calor gerado pela evaporação dessa umidade aquece a superfície do componente moldado, fazendo com que essa seque mais rápido que seu interior.

Quanto ao processo de sinterização verificou-se que as rampas de aquecimento são principalmente de 10°C/min e que as temperaturas de sinterização variam de 850°C a 1250°C e os melhores resultados foram obtidos com 1150°C e 1120°C. Já o tempo de exposição variou de 4 a 30 minutos, com recorrência do uso de 15 min.

A Tabela 2.4 apresenta um resumo da composição química de algumas das matérias-primas utilizadas por autores anteriores citados ao longo do presente item, que analisaram precursores para o desenvolvimento de agregados leves, bem como autores que estudaram o uso do RBC em compósitos cimentícios. Tal resumo de caracterização química de matérias-primas serviu como parâmetro para o desenvolvimento desta pesquisa, em especial, a determinação das composições que foram estudadas e estão descritas no CAPÍTULO 3, no qual é detalhado todo o programa experimental.

Tabela 2.4 - Resumo da composição química de algumas das matérias-primas utilizadas por autores anteriores no desenvolvimento de novos agregados leves.

Referência	Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Óxidos fundentes (OF)						Perda ao fogo
				Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	ΣOF	
Soltan et al., 2016	RGM	70,9	12,9	4,65	2,90	4,90	1,63	0,73	14,81	0,56
	AR-C	46,0	20,9	12,4	2,68	1,23	0,80	2,49	19,6	8,68
Moreno-Maroto et al., 2017b	RGM	63,6	14,4	2,6	3,1	4,2	5,4	0,8	16,1	4,29
	SEP	54,8	7,2	2,0	0,5	1,6	2,0	21,9	28,0	9,79
Santis e Rossignolo, 2014	PF	59,5	17,4	7,43	1,23	3,86	-	2,94	15,46	5,42
	ITU	65,1	16,8	6,81	0,07	0,94	-	0,44	8,26	7,68
Lau, Teo e Mannan, 2017	LE	6,08	2,40	1,27	0,08	0,11	41,53	1,83	44,82	43,74
	COP	59,13	2,65	1,69	0,40	6,54	10,90	6,26	25,79	6,86
	Na ₂ SiO ₃	30,8	-	-	13,4	-	-	-	13,4	-
Han, Han e Shin, 2015	PP	60,5	16,2	3,27	3,73	4,84	3,52	0,95	16,31	1,7
	CI	47,6	21,2	9,75	1,07	1,05	2,94	1,45	16,26	29,3
	LAV	66,9	1,1	0,2	9,5	0,3	7,4	3,8	21,2	8,4
	EO	17,3	12,2	29,0	1,1	0,3	22,8	7,9	61,1	-
	EAF	31,6	14,2	0,4	0,5	0,5	43,2	5,7	50,3	-
Santis, 2016	AR	68,18	14,42	4,88	0,31	4,20	0,32	1,81	11,52	4,64
	RBC*	69,60	7,84	11,70	0,02	2,53	1,17	0,58	16,00	1,16
	Na ₂ SiO ₃	33,49	-	-	15,21	-	-	-	15,21	-
Borja, 2011	RBC	72,69	6,91	9,61	-	4,71	2,84	-	17,16	-
Anjos, 2009	RBC	70,02	5,35	9,19	0	2,03	3,15	2,63	17,00	18,9
RGM	Resíduo de corte de granitos e mármore									
AR-C	Argila regional, proveniente da cidade de Cairo/Egito.									
SEP	Resíduo de sepiolita									
PF	Argila proveniente da cidade de Porto Ferreira/SP/Brasil.									
ITU	Argila proveniente da cidade de Itu/SP/Brasil.									
AR	Argila									
LE	Lodo de esgoto									
COP	Cinzas de óleo de palma									
Na₂SiO₃	Silicato de sódio, empregado com agente fundente									
PP	Pó de pedra									
CI	Cinza inferior, proveniente de usina coreana de energia									
LAV	Lodo abrasivo de vidro, denominado pelos autores como material fundente									
EO	Escória oxidante, denominado pelos autores como agente de inchaço									
EAF	Escória de alto-forno, denominado pelos autores como agente de inchaço									
RBC	Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar									
RBC*	Apresenta na composição química 3,75% de TiO ₂ .									

CAPÍTULO 3

Desenvolvimento experimental

A metodologia adotada para a pesquisa foi baseada em trabalhos anteriores, cuja síntese foi apresentada no CAPÍTULO 2, com o objetivo de produzir agregados leves a partir de materiais regionais, sobretudo resíduos agroindustriais e industriais regionais.

Neste capítulo as etapas do programa experimental são apresentadas e detalhadas, conforme segue fluxo de atividades ilustrado na Figura 3.1, e, exibem-se os materiais e métodos envolvidos no estudo.

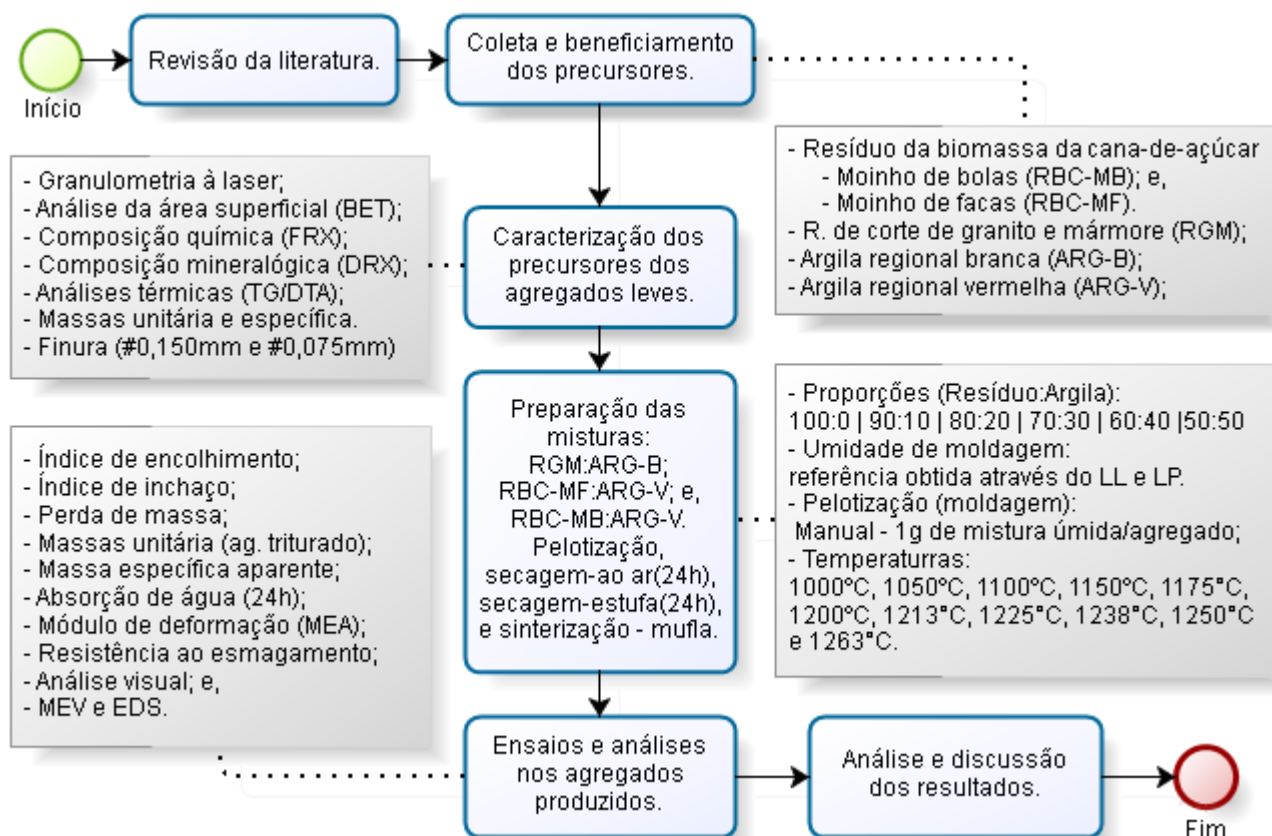


Figura 3.1 - Fluxo de atividades da pesquisa.

3.1 Coleta e beneficiamento das matérias-primas

Para o estudo e desenvolvimento dos agregados leves propostos nesta pesquisa foram adotados apenas matérias-primas locais, em especial, resíduos agroindustriais e industriais da região, cujas características e detalhamento da coleta e beneficiamento serão descritos a seguir. Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Argila branca (ARG-B);
- Argila vermelha (ARG-V);
- Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC):
 - Moído no moinho de facas (RBC-MF);
 - Moído no moinho de bolas (RBC-MB); e,
- Resíduo de corte de granito e mármore (RGM).

3.1.1 Argila branca regional (ARG-B)

A argila branca regional utilizada é proveniente do município de Equador/RN/Nordeste/Brasil, rica em caulinita (degradação do feldspato), já beneficiada, sendo passada na peneira de 325 mesh (abertura de 0,044 mm).

A argila foi cedida por uma indústria fabricante de peças cerâmicas em especial porcelanatos, cuja aparência pode ser verificada na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Argila branca utilizada na pesquisa (ARG-B).

3.1.2 Argila vermelha regional (ARG-V)

A argila vermelha regional utilizada é proveniente do município de Assú/RN/Nordeste/Brasil, de coloração marrom, utilizada na indústria da cerâmica vermelha como matéria prima para tijolos, telhas etc. A argila foi cedida por uma indústria fabricante de cerâmica vermelha da região.

A ARG-V foi cedida na forma natural, ainda úmida e aglomerada (Figura 3.3-a) e o beneficiamento partiu da diminuição dos torrões manualmente, secagem em estufa a $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24h e posterior destorroamento em almofariz com auxílio da mão de gral, ambos de porcelana.

O material beneficiado a ser utilizado na pesquisa foi o passante na peneira de abertura 0,425 mm, recomendada pela NBR 6457 (ABNT, 2016) para preparações de amostras para os ensaios de caracterização de solos, como os ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP). A aparência da argila coletada (a) e após beneficiamento (b) pode ser observada na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Argila vermelha utilizada na pesquisa (ARG-V). (a) argila úmida, com torrões, recém coletada e (b) argila após beneficiamento.

3.1.3 Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC)

O resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) é proveniente de uma usina sulcroalcooleira produtora de açúcar, etanol e energia do município de Arês/RN/Nordeste/Brasil. O resíduo foi coletado ainda úmido diretamente da descarga da limpeza das caldeiras. Após coleta, o resíduo passou por secagem em estufas a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ e armazenado em sacos após resfriamento em ambiente de laboratório até $22\pm 5^{\circ}\text{C}$. Essa etapa foi realizada na Diretoria de Construção Civil-DIACON/IFRN/Campus Natal-Central.

A Figura 3.4a apresenta a aparência do resíduo apenas seco sem passar por beneficiamento (RBC-S), onde nota-se bagaços não queimados. O RBC-S recebeu dois tipos de beneficiamento gerando duas matérias-primas para esta pesquisa: uma moída a partir de moinho de bolas (RBC-MB), considerando moagens utilizadas por autores anteriores para aplicações em concretos (ANJOS; FERREIRA; BORJA, 2012; CORDEIRO; KURTIS, 2017; e, DINIZ, 2018), e outra a partir de um moinho de facas (RBC-MF). As moagens utilizadas serão detalhadas a seguir e na Figura 3.4 apresenta-se a aparência do RBC-S (a), do RBC-MF (b) e do RBC-MB (c).



Figura 3.4 - Aparência do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar utilizado na pesquisa. (a) RBC-S; (b) RBC-MF; e, (c) RBC-MB.

A produção do RBC-MB se deu pela moagem do RBC seco em moinho rotativo de bolas, modelo I-4205 com tambor de dimensões de 380x420 mm de 47 litros (Figura 3.5), do Laboratório de Estruturas e Materiais da UFPB-Campus João Pessoa. Cada ciclo de moagem operava a carga de 2 kg de RBC-S, utilizando como corpos moedores esferas metálicas (especificadas na Tabela 3.1), durante quatro horas em ritmo médio de 62 RPM.



Figura 3.5 - Imagens do moinho de bolas utilizado para produção do RBC-MB.

Tabela 3.1 - Caracterização dos corpos moedores do moinho de bolas.

Diâmetro (mm)	Massa (g)	Quantidade
20	29,55	503
25	56,81	101
30	105,08	44
40	266,00	20

Essa primeira moagem tem produção aproximada de 0,50 kg/h de atividade do moinho de bolas. Devido à baixa produtividade desse método considerou-se a possibilidade de estudar um novo método de moagem que pudesse produzir um RBC beneficiado com características propícias à produção de agregados leves, em menos tempo e menor gasto energético.

Nesse contexto, realizou-se a moagem do RBC-S, no Laboratório de Materiais de Construção do IFRN-Campus São Paulo do Potengi, em moinho de facas do tipo Willey, modelo SL-31, composto por quatro facas móveis (rotor) e quatro facas fixas (câmara de moagem) de rotação de 1750 RPM, com peneira de 50 mesh (abertura de 0,30 mm), para a produção do RBC-MF (Figura 3.6).

O beneficiamento com o moinho de facas tem produção aproximada de 10 kg/h de atividade do moinho de facas, ou seja, 2 kg de RBC-S foram moídos durante cerca de 12 minutos para obtenção do produto RBC-MF e na Tabela 3.2 é apresentado um resumo quanto ao consumo energético dos beneficiamentos.



Figura 3.6 - Imagens do moinho de facas utilizado para produção do RBC-MF.

Tabela 3.2 - Consumo de energia (Watts) das diferente moagens do RBC.

Tipo do moinho	Produção de RBC moído	Potência (fabricante)	Moagem de 2 kg de RBC (tempo)	Moagem de 2 kg de RBC (consumo)
Bolas	0,50 kg/h	1125 W	4,00 h	4500 W
Facas	10,00 kg/h	736 W	0,20 h	147,2 W

3.1.4 Resíduo de corte de granitos e mármore (RGM)

O resíduo de corte de granitos e mármore (RGM) utilizado nesta pesquisa é proveniente de uma marmoraria localizada no município de Parnamirim/RN/Nordeste/Brasil, que forneceu cerca de 300 litros do resíduo em forma de lama.

A Figura 3.7 mostra parte do sistema de drenagem utilizado pela fábrica, composto por dutos distribuídos por todo o chão da fábrica que carreiam a lama formada nas mesas de corte das pedras ornamentais para um tanque de decantação, onde a lama se torna mais espessa se acomodando no fundo dos tanques e é esgotada periodicamente.

O sistema adotado pela fábrica ainda possibilita que a água seja filtrada e reutilizada no arrefecimento nas mesas de corte, contribuindo para que o processo de separação do RGM da água se torne ainda mais eficiente.

A produção estimada pela fábrica é em torno de 700 m²/mês o que gera a necessidade de esgotamento do tanque de lama de RGM a cada 3 meses de produção regular, representando um custo de R\$1200,00 reais/esgotamento na contratação de uma empresa coletora de rejeitos industriais.



Figura 3.7 - Imagens da marmoraria e seu sistema de drenagem e armazenamento da lama de RGM, com os detalhes das calhas (dutos) e os tanques de decantação e sedimentação.

Todo o resíduo coletado foi armazenado em uma caixa d'água, onde passou por homogeneização manual e o excesso de água foi sendo gradativamente extraído por sedimentação (Figura 3.8). À medida que foi se tonando mais espessa a lama foi transferida para bandejas para secar ao ar livre, nesse momento foram retirados manualmente os pedaços de pedras, plásticos e outros materiais misturados à lama. Após secagem ao ar as bandejas foram levadas à estufa a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ até constância de massa (Figura 3.9-b).

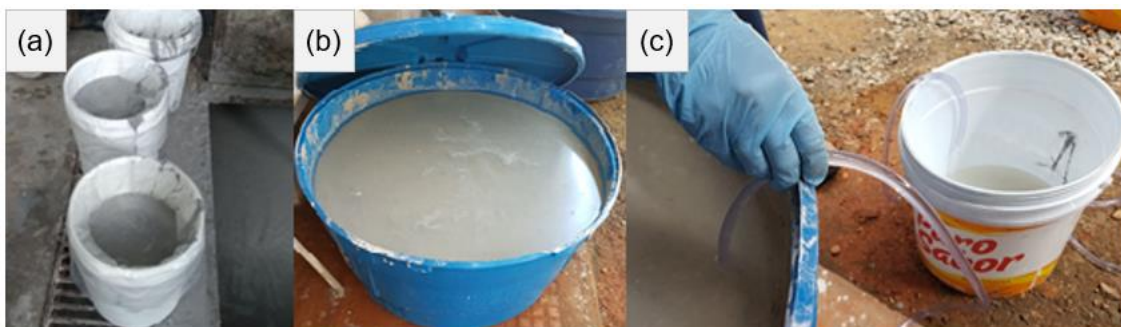


Figura 3.8 - Coleta (a), armazenamento da lama de RGM coletada (b) e extração do excesso de água por decantação (c).

Os blocos formados pela lama após secagem em estufa foram submetidos a peneiramento numa peneira de abertura 6,3 mm. Nesta etapa eventuais lascas e pedaços de pedras misturados ao RGM foram removidos, e, o material passante foi peneirado na malha 0,30 mm. Por fim, o resíduo foi peneirado na malha de 0,15 mm.

Na Figura 3.9 pode ser observada a aparência do RGM nas diversas etapas de secagem e peneiramento e na Tabela 3.3 são apresentados os dados referentes a análise do beneficiamento do RGM realizado na pesquisa, onde observou-se que apenas 11,39% de material é descartado para obtenção do RGM seco e com granulometria inferior a 0,15 mm. Todo o beneficiamento do resíduo foi realizado no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais – IFRN/Campus Natal-Central.

Tabela 3.3 - Beneficiamento do RGM para 1 kg de resíduo em torrões (Figura 3.9-b).

Peneira	Massa retida (g)	% retida
# 6,30mm	3,5	0,35%
# 0,30mm	73,6	7,36%
# 0,15mm	36,8	3,68%
TOTAL	113,9	11,39%

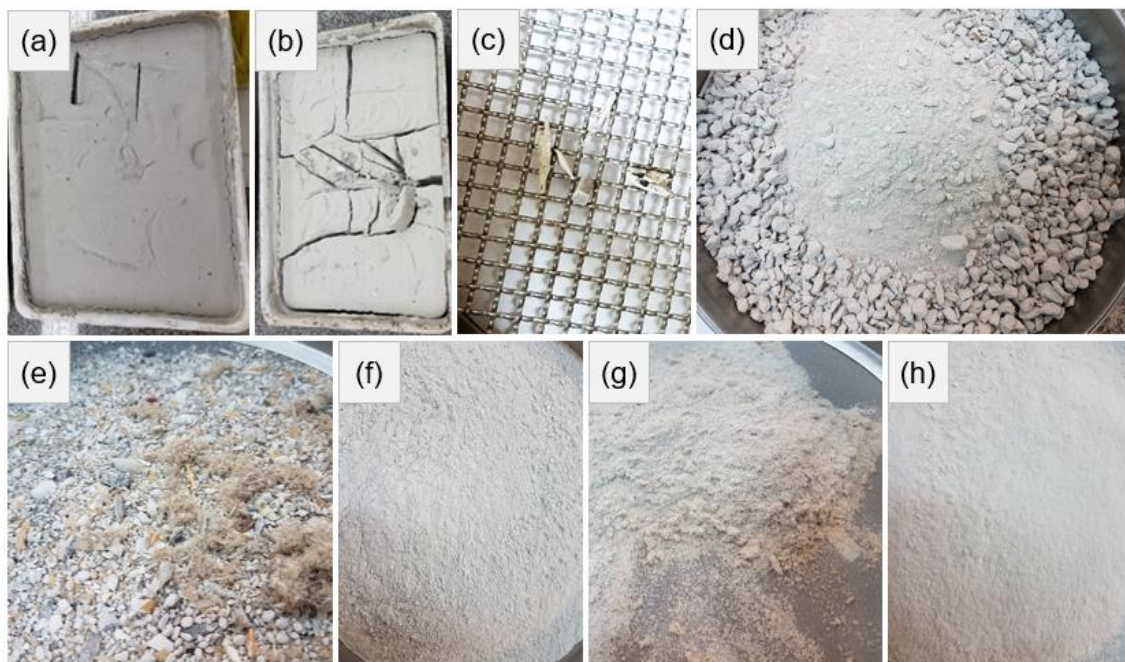


Figura 3.9 - Aparência do RGM nas etapas do beneficiamento. (a) lama bastante espessa ainda úmida; (b) torrões totalmente secos após estufa; (c) material retido na #6,3mm; (d) material passante na #6,3mm; (e) material retido na #0,3mm; (f) material passante na #0,3mm; (g) material retido na #0,15mm; e, (h) material passante na #0,15mm, o produto final do beneficiamento.

3.2 Caracterização das matérias-primas

Os ensaios e análises realizadas nas matérias primas permitiram a definição de pontos importantes da metodologia adotada na pesquisa, como exemplo a análise química obtida através da Florescência de Raios-X (FRX), que foi imprescindível para definição das misturas adotadas na pesquisa, as quais serão apresentadas no item 3.3.1 do presente capítulo. Seguem os ensaios e análises realizadas nos materiais precursores.

3.2.1 Granulometria à laser

A granulometria dos materiais precursores foi determinada a partir do analisador de tamanho de partículas modelo CILAS 1090, por via seca na faixa de 0,10 a 500 μm , com 100 classes. As determinações foram realizadas no Laboratório de Materiais Metálicos da UFPB-Campus João Pessoa.

3.2.2 Área superficial – BET

As análises de áreas superficiais dos materiais precursores foram realizadas no Laboratório de Caracterização e Desenvolvimento de Nanomateriais do IFPB-Campus João Pessoa. O equipamento utilizado é do modelo BELSORP II-MINI, da marca BEL JAPAN, que opera através de adsorção/dessorção de nitrogênio a 77K. Visando remover a umidade da superfície dos sólidos, bem como a possibilidade de gases adsorvidos, as amostras foram inicialmente submetidas a um tratamento térmico a 200°C por duas horas, em fluxo de nitrogênio.

3.2.3 Finura nas peneiras #200 e #100 mesh

A determinação da finura dos materiais precursores seguiu a NBR 11579 (ABNT, 2013) que normatiza a determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (200 mesh) para o cimento Portland. Os procedimentos também foram realizados com a peneira de abertura 150 μm (100 mesh), de modo a obter também a finura do material para essa abertura. Os referidos ensaios foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais – IFRN/Campus Natal-Central.

3.2.4 Composição química – Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química dos materiais precursores foi determinada através da análise de Fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva em equipamento modelo EDX-720. As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais/DEMAT/CT/UFRN.

3.2.5 Composição mineralógica – Difractometria de Raios-X (DRX)

A composição mineralógica dos precursores foi analisada por difração de raios-X em equipamento modelo XRD 7000 da marca Shimadzu utilizando-se voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA. Os dados foram coletados na velocidade de 1°/min, com passo de amostragem de 0,02° com varredura contínua na faixa

de 5 a 70°. As referidas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais/DEMAT/CT/UFRN.

3.2.6 Análise térmica (TG e DTA)

A análise térmica foi realizada por termogravimetria (TG) e por análise térmica diferencial (DTA) em equipamento analisador térmico modelo DTG-60H da marca Shimadzu sob atmosfera de nitrogênio com vazão de 100 ml/min e taxa de aquecimento de 10°C/min, com intervalo de temperatura entre 10°C e 1000°C, utilizando célula de alumina e massas de amostras na ordem de 12 mg. As análises foram realizadas no LabTer – Laboratório de Análises Térmicas da UFCG, na Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa-CCT).

3.2.7 Massa unitária

As determinações das massas unitárias foram realizadas no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais – IFRN/Campus Natal-Central, através de um equipamento modelo 1.103.900, referente a um conjunto para determinação de densidade do cimento e cal a seco (densidade aparente), normatizado pela EN 459-2 (2010). O conjunto é composto por funil padrão com registro de descarga e copo com volume de um litro que possibilita a determinação da densidade aparente de materiais finos.

3.2.8 Massa específica

A massa específica dos materiais precursores foi determinada seguindo os preceitos da NBR 16605 (ABNT, 2017), que estabelece o método para determinação da massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de *Le Chatelier*. Os referidos ensaios foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais – IFRN/Campus Natal-Central.

3.3 Produção dos agregados leves regionais

3.3.1 Misturas

Considerando o exposto no CAPÍTULO 2, cinco materiais foram selecionados como precursores da pesquisa (vide item 3.1), e a escolha das combinações entre esses foi baseada nas respectivas composições químicas, objetivando alcançar uma relação entre $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ (OF: Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO e MgO) próxima de autores anteriores que produziram agregados leves, bem como de agregados comercializados como Lytag e Cinexpan 1506. A Tabela 3.4 apresenta os respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ desses agregados comercializados, e, os melhores resultados apontados por alguns trabalhos anteriores, observando-se que tais valores estão entre 1,00 e 3,85.

Tabela 3.4 - Relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ de agregados leves comercializados e produzidos por autores anteriores.

Referência	Material	SiO_2	Óxidos fundentes (ΣOF)	$\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$
Fabricante	LYTAG	50,60	20,50	2,47
Fabricante	CINEXPAN-1506	63,19	17,05	3,71
Soltan <i>et al.</i> , 2016	RGM	70,90	14,81	3,40*
	AR-C	46,00	19,60	
Santis e Rossignolo, 2014	PF	59,5	15,46	3,85
Lau, Teo e Mannan, 2017	LE	6,08	44,82	1,00**
	COP	59,13	25,79	
	Na_2SiO_3	30,8	13,40	
Han, Han e Shin, 2015	PP	60,5	16,31	2,67***
	CI	47,6	16,26	
	EO	17,3	61,10	

RGM: Resíduo de corte de granitos e mármore; AR-C: Argila regional, proveniente da cidade do Cairo/Egito; PF: Argila proveniente da cidade de Porto Ferreira/SP/Brasil; LE: Lodo de esgoto; COP: Cinzas de óleo de palma; Na_2SiO_3 : Silicato de sódio, empregado com agente fundente; PP: Pó de pedra; CI: Cinza inferior, proveniente de indústria coreana de energia; EO: Escória oxidante, denominado pelos autores como agente de inchaço.

*Referente a melhor mistura apontada pelo autor: 50% RGM + 50% AR-C.

**Referente a melhor mistura apontada pelo autor: 50% LE + 50% COP + 15% Na_2SiO_3 .

***Referente a melhor mistura apontada pelo autor: 80% PP + 20% CI + 10% EO.

Já na Tabela 3.5 apresentam-se as possíveis combinações de misturas a partir da composição química (vide item 4.1.2 para os resultados completos dos FRXs) dos materiais precursores propostos na pesquisa, considerando misturas binárias de argila e resíduo, e suas respectivas relações $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$.

Tabela 3.5 - Relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ de possíveis misturas dos precursores estudados.

Misturas		Teor de resíduo na mistura					
Resíduo	Argila	100%	90%	80%	70%	60%	50%
RGM	ARG-B	0,76	0,87	1,01	1,19	1,43	1,75
RGM	ARG-V		0,79	0,83	0,86	0,90	0,95
RBC MF	ARG-B	0,46	0,56	0,67	0,82	1,01	1,28
RBC MF	ARG-V		0,51	0,55	0,61	0,66	0,73
RBC MB	ARG-B	4,51	4,80	5,15	5,59	6,15	6,89
RBC MB	ARG-V		3,91	3,42	3,00	2,64	2,33
0%	ARG-B				27,91		
0%	ARG-V				1,23		

A partir disso, optou-se por reproduzir o estudo de Soltan, *et al.* (2016) utilizando o RGM e a ARG-B do Rio Grande do Norte/Nordeste/Brasil devido à combinação do resíduo com a argila branca resultar em valores mais próximos dos valores ideais apresentados na Tabela 3.4 entre 1,00 e 3,85.

Verificou-se também que as combinações de RBC-MB com ARG-V apresentam relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ entre 2,30 a 4,51, ou seja, muito próximas das referências já citadas (Tabela 3.4). Assim, optou-se pela reprodução das misturas de RBC-MB com ARG-V, e, a fim de estabelecer comparação entre os dois tipos de beneficiamento do RBC-S empregados na pesquisa (vide item 3.1.3), optou-se por reproduzir as misturas de RBC-MF também com ARG-V.

Também foram produzidos agregados das argilas puras, a fim, de observar o comportamento dessas sem a influência dos resíduos estudados, a relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ das argilas também é apresentada na Tabela 3.5.

Assim, foram definidos três grupos de agregados produzidos, de acordo com o resíduo que foi utilizado: a) o grupo do resíduo de corte de granito e mármore (RGM), onde optou-se pela utilização da argila branca (ARG-B) nas misturas; b) o grupo do resíduo do bagaço da cana-de-açúcar moído no moinho de bolas (RBC-MB), utilizando argila vermelha (ARG-V); e, c) por último e utilizando a mesma argila vermelha, permitindo a comparação entre diferentes tipos de beneficiamento do RBC, o grupo dos agregados produzidos a partir do RBC moído no moinho de facas (RBC-MF).

Dessa forma, nesta pesquisa foi possível analisar o comportamento de 19 misturas com o intuito de desenvolver agregados leves utilizando matérias-

primas regionais sobretudo usufruindo de altos teores de resíduos industriais e agroindustriais. Os materiais precursores já apresentados no início do presente capítulo foram combinadas conforme apresentado na Tabela 3.6 com os respectivos teores de materiais na mistura (vide itens 3.3.2 e 4.1.5 para determinação de umidade de moldagem).

Tabela 3.6 - Detalhamento das misturas estudadas na pesquisa com seus respectivos teores de umidade de moldagem dos agregados.

Misturas	(%) de matéria-prima na mistura					GRUPO
	ARG-B	RGM	ARG-V	RBC-MF	RBC-MB	
ARG-B	100	-	-	-	-	
RGM-50%	50	50	-	-	-	
RGM-60%	40	60	-	-	-	
RGM-70%	30	70	-	-	-	RGM's
RGM-80%	20	80	-	-	-	
RGM-90%	10	90	-	-	-	
RGM-100%	-	100	-	-	-	
ARG-V	-	-	100	-	-	
RBC-MF-50%	-	-	50	50	-	
RBC-MF-60%	-	-	40	60	-	RBC-MF's
RBC-MF-70%	-	-	30	70	-	
RBC-MF-80%	-	-	20	80	-	
RBC-MF-90%	-	-	10	90	-	
RBC-MB-50%	-	-	50	-	50	
RBC-MB-60%	-	-	40	-	60	
RBC-MB-70%	-	-	30	-	70	RBC-MB's
RBC-MB-80%	-	-	20	-	80	
RBC-MB-90%	-	-	10	-	90	
RBC-MB-100%	-	-	-	-	100	

Os materiais secos de todas as misturas foram previamente separados para o total de 1 kg de mistura e homogeneizados em sacos e mantidos fechados para posterior realização dos ensaios de caracterização e moldagem dos agregados, quando foi pesado o material seco necessário da mistura e acrescido do seu respectivo teor de umidade de moldagem.

3.3.2 Definição do teor de umidade ideal para moldagem (LL e LP)

O intervalo de umidade possível para moldagem foi determinado através dos ensaios de limite de liquidez – LL (NBR 6459, 2017) e limite de plasticidade – LP (NBR 7180, 2016). Durante a execução dos ensaios foi possível conhecer

o material e diagnosticar a possibilidade ou não da moldagem das misturas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais do IFRN-Campus Natal-Central, e, na Figura 3.10 é apresentado o conjunto de equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

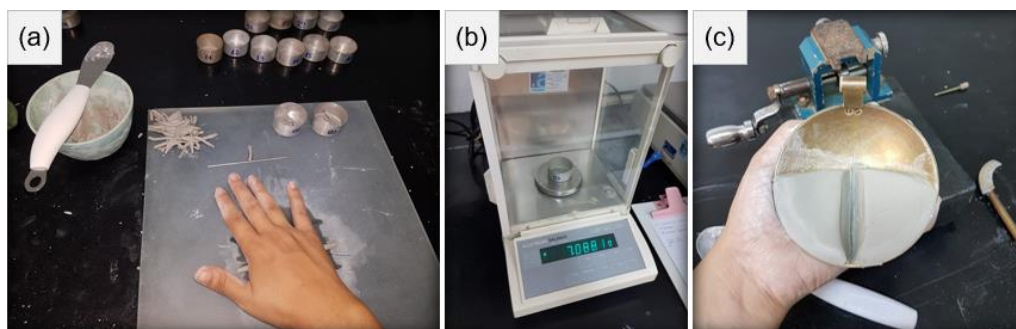


Figura 3.10 - Execução dos ensaios de LL e LP para a mistura RGM-80%.
(a) Limite de Plasticidade; (b) balança de precisão utilizada; e, (c) Limite de Liquidez.

Para a determinação da umidade de moldagem, partiu-se do intervalo de umidade dada pelo LL e LP, selecionando um valor comum a todas as misturas de um mesmo grupo de resíduo, com o objetivo de manter os valores de umidade das misturas o mais próximo possível, evitando a variável nos resultados. Porém, a umidade prevista podia ser ajustada no momento da homogeneização e pelotização dos agregados, devido essas serem realizadas de forma manual.

3.3.3 Moldagem dos agregados

A mistura, homogeneização e pelotização dos agregados foi realizada manualmente, e visando manter a homogeneidade de tamanho dos agregados, a fim de diminuir a variável granulométrica, as massas úmidas foram pesadas em balança com precisão de 0,01 g até a massa de $1 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ e posteriormente moldadas; a massa úmida foi também mantida envolta em papel filme a fim de limitar a perda de umidade da mistura como ilustra a Figura 3.11.



Figura 3.11 - Execução do traço RGM-100%.

Para cada mistura foram moldados aproximadamente 530 agregados, dos quais 30 foram separados e identificados para realização do ensaio de índice de encolhimento (vide item 3.5.5.1).

Após moldagem e medições dos grãos, necessárias para os ensaios, os agregados passaram por secagem ao ar livre (Figura 3.12) em ambiente de laboratório por 24h, posteriormente foram submetidos a secagem em estufa $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24h, e, após resfriamento até temperatura ambiente 24°C em ambiente de laboratório os agregados foram armazenados em recipientes com tampa até a data de queima nas respectivas temperaturas.



Figura 3.12 - Agregados da mistura RBC-MB-90% em secagem ao ar livre por 24h, balança de precisão de 0,01 g e paquímetro digital de precisão 0,01 mm.

3.3.4 Parâmetros de queima

A sinterização dos agregados produzidos ocorreu em forno mufla com capacidade de 70l, dimensões úteis de 40 cm x 40 cm x 45 cm, modelo JC7013, que atinge temperaturas de até 1300°C , e, com controlador de tempo e temperatura do modelo J300. As queimas foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal da Escola Agrícola de Jundiaí-EAJ/UFRN, no distrito de Jundiaí – Macaíba/RN.

Para a proteção do forno mufla, foram utilizadas plaquetas refratárias para forrar o equipamento e dispor sobre essas os agregados para sinterização, como pode ser observado na Figura 3.13, que mostra a mufla externamente e o detalhe das plaquetas refratárias no seu interior. A identificação dos agregados foi realizada pela localização desses sobre as plaquetas refratárias, dessa forma, desenhava-se um mapa detalhando o posicionamento de cada agregado.

A rampa de aquecimento, o patamar de exposição e as temperaturas máximas adotadas foram escolhidas com base em trabalhos anteriores. Assim como Soltan *et al.* (2016), utilizou-se neste estudo a taxa de aquecimento de 10°C/min, patamar de 15 min e temperaturas máximas de 1000°C, 1050°C, 1100°C, 1150°C e 1200°C.



Figura 3.13- Aparência externa da mufla utilizada e detalhe das placas refratárias utilizadas para proteção interna do equipamento.

O arrefecimento se deu de forma gradual e natural, dentro da mufla, até temperatura ambiente, quando as amostras eram retiradas da mufla e armazenadas em recipientes tampados e identificados, para posteriores análises das propriedades. O tempo de resfriamento foi da ordem de 26 horas, dependendo da temperatura máxima adotada.

Após ensaios realizados, algumas misturas (do grupo RGM e as argilas puras) não sofreram grandes alterações até a temperatura de 1200°C, então realizou-se queimas em temperaturas mais altas até que fosse possível identificar a variação física dos agregados em função da temperatura. Dessa forma foram então acrescentadas as temperaturas de 1213°C, 1225°C, 1238°C, 1250°C e 1263°C.

Essas novas temperaturas foram escolhidas da seguinte forma: inicialmente a temperatura acrescentada foi a de 1250°C (segundo o intervalo de 50°C entre temperaturas já adotado), e alguns agregados derreteram completamente, assim, foram acrescentadas as temperaturas intermediárias, reduzindo pela metade o intervalo adotado e repetiu-se as análise dos resultados das respectivas queimas até que se pudesse verificar a temperatura limite de cada mistura, na qual os agregados perdiam o formato esférico e derretiam total ou parcialmente, aderindo a plaqueta refratária. Os agregados que não

derreteram à 1250°C, porém ainda apresentavam alta absorção de água foram submetidos à temperatura de 1263°C.

Já as misturas do grupo dos RBCs se mostraram mais sensíveis à variação de temperatura até 1200°C. Logo, apenas foi acrescentada uma temperatura intermediária: a de 1175°C, pois temperaturas acima de 1200°C não se mostraram promissoras, considerando que à 1200°C os agregados de RBC-MF e RBC-MB já ficaram em certa medida grudados na placa refratária.

3.3.5 Estudo dos agregados produzidos

3.3.5.1 Índice de encolhimento

Para realização deste ensaio foram separados 30 agregados de cada mistura e cada agregado foi medido em 4 direções distintas, utilizando-se um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm, nas condições úmida (logo após moldagem) e seca (após secagem em estufa a 110±5°C por 24h e resfriamento até temperatura ambiente). O ensaio foi realizado no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais/DIACON/IFRN-Campus Natal-Central.

O índice de encolhimento reflete o quanto, percentualmente, o agregado retraiu do momento da sua moldagem até o momento posterior a secagem do mesmo em estufa, e, essa medida é obtida através da Equação (3.1):

$$IE = \frac{D_{mu} - D_{md}}{D_{mu}} \times 100 \quad (3.1)$$

onde,

IE é o Índice de encolhimento do agregado (%);

D_{md} é a média aritmética dos diâmetros na condição seca (mm); e,

D_{mu} é a média aritmética dos diâmetros na condição úmida (mm).

3.3.5.2 Índice de inchaço

O ensaio foi realizado no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais/DIACON/IFRN-Campus Natal-Central, e, para tal, 10 agregados de

cada mistura e temperatura, foram medidos em 4 direções, utilizando-se um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm, nas condições seca (após secagem em estufa a $110\pm 5^\circ\text{C}$ por 24h) e sinterizada (após sinterização em mufla).

O índice de inchaço reflete o quanto, percentualmente, o agregado expandiu após passar pelo tratamento térmico, ou seja, após passar pela sinterização no forno mufla seguindo as especificações explícitas no item 3.3.4. Este índice é obtido através da Equação (3.2), ressaltando que valores positivos indicam que houve inchaço do agregado, ou seja, aumento do seu volume, mas que também foram identificados valores negativos para esse índice mostrando que os mesmos retraíram e o respectivo percentual de diminuição do volume.

$$II = \frac{D_{ms} - D_{md}}{D_{md}} \times 100 \quad (3.2)$$

onde,

II é o Índice de inchaço do agregado (%);

D_{ms} é a média aritmética dos diâmetros na condição sinterizada (mm); e,

D_{md} é a média aritmética dos diâmetros na condição seca (mm).

3.3.5.3 Perda de massa

Para realização deste ensaio, 10 agregados de cada mistura por queima (temperatura), tiveram sua massa medida, utilizando-se uma balança de precisão de 0,0001 g, nas condições seca (após secagem em estufa a $110\pm 5^\circ\text{C}$ por 24h) e sinterizada (após sinterização em mufla na respectiva temperatura analisada). O ensaio foi realizado no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais/DIACON/IFRN-Campus Natal-Central.

A perda de massa reflete o quanto, percentualmente, o agregado perdeu massa após passar pelo tratamento térmico já detalhado no item 3.3.4. Este índice é obtido através da Equação (3.3).

$$PM = \frac{M_d - M_s}{M_d} \times 100 \quad (3.3)$$

onde,

PM é perda de massa do agregado (%);

M_s é a massa do agregado na condição sinterizada (g); e,

M_d é a massa do agregado na condição seca (g).

3.3.5.4 Massa específica aparente e absorção de água

O ensaio de massa específica aparente dos grãos e absorção de água foi adaptado da NBR 6458 (ABNT, 2017) seguindo todo o procedimento preconizado pela normativa, porém, adaptado para um quantitativo reduzido de grãos. Cada amostra ensaiada utilizou 10 agregados, e, portanto, realizou-se a adaptação de uma balança de precisão de 0,0001 g para possibilitar a realização das medidas imersas (Figura 3.14).

O ensaio foi também realizado no agregado comercial CINEXPAN 1506 e o resultado obtido para massa específica aparente foi de 1,11 g/cm³, igual ao informado pelo fabricante. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais/DIACON/IFRN-Campus Natal-Central, e, além dos agregados produzidos,



Figura 3.14 - Aparato de adaptação de balança de precisão para realizar medida submersa nos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água.

A massa específica aparente dos grãos e a absorção de água foram obtidas através das Equações (3.4) e (3.5), respectivamente.

$$\rho_{ap(s)} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \times \rho_w \quad (3.4)$$

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.5)$$

onde,

$\rho_{ap(s)}$ é a massa específica aparente dos grãos (g/cm³);

A_a é a absorção de água, em porcentagem da massa de material seco;

M_s é a massa da amostra seca (g);

M_{sat} é a massa da amostra saturada, superficialmente seca (g);

M_i é a massa da amostra totalmente imersa em água (g); e,

ρ_w é a massa específica da água (g/cm³) à temperatura T (°C) do ensaio.

3.3.5.5 Módulo de deformação dos agregados leves

O módulo de elasticidade dos agregados produzidos foram estimados a partir da relação proposta pela ACI 213 R-03 (2003) através da Equação (2.1), já apresentada no CAPÍTULO 2, onde também foi verificado que o módulo de deformação de agregados leves comercializados no Brasil e outros países, apresentam valores entre 3 e 35 GPa (item 2.2).

$$E_c = 0,008 \times \gamma^2 \quad (2.1)$$

onde,

E_c é o módulo de deformação (MPa); e,

γ é a massa específica aparente (kg/m³).

3.3.5.6 Massa unitária

A massa unitária de um agregado é medida pela razão entre a massa de determinada amostra e o volume ocupado pela mesma, incluindo-se os vazios entre os grãos. Considerando que no presente estudo o volume de amostras era reduzido, realizou-se o ensaio de massa unitária com o auxílio de balança de precisão de 0,0001 g e proveta com precisão de 0,5 ml.

Os agregados foram ensaiados na condição triturada, de modo a reduzir os vazios entre os grãos e conseqüentemente reduzindo a influência do tamanho reduzido do recipiente e do volume de amostras. Após triturados os agregados

apresentam valores maiores de massa unitária, representando a pior condição dentro das possibilidades para realização do presente ensaio.

Diante do exposto, ressalta-se ainda que o presente ensaio tem como principal objetivo estabelecer um fator comparativo entre as amostras analisadas. Para tanto, o ensaio e a preparação das amostras foram realizados da mesma forma para todas as misturas.

Os procedimentos do ensaio de massa unitária foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais/DIACON/IFRN-Campus Natal-Central e o roteiro do ensaio é descrito a seguir:

1. Quebra dos agregados individualmente com o auxílio de um almofariz de porcelana com mão de gral;
2. Pesagem da proveta sem amostra que servirá de tara na balança;
3. Colocação da amostra de agregados triturados na proveta, com ajuda de um funil, e verificação do volume ocupado pela amostra;
4. Pesagem da massa da proveta com a amostra na balança com tara, obtendo-se assim o valor da massa da amostra;
5. Os passos de 1-4 foram repetidos de 2 a 4 vezes, tal que a diferença dos resultados de pelo menos 3 análises fosse inferior a $0,02 \text{ g/cm}^3$;
6. O resultado do ensaio é a média aritmética de no mínimo 3 das 5 determinações realizadas e é expresso em g/cm^3 .

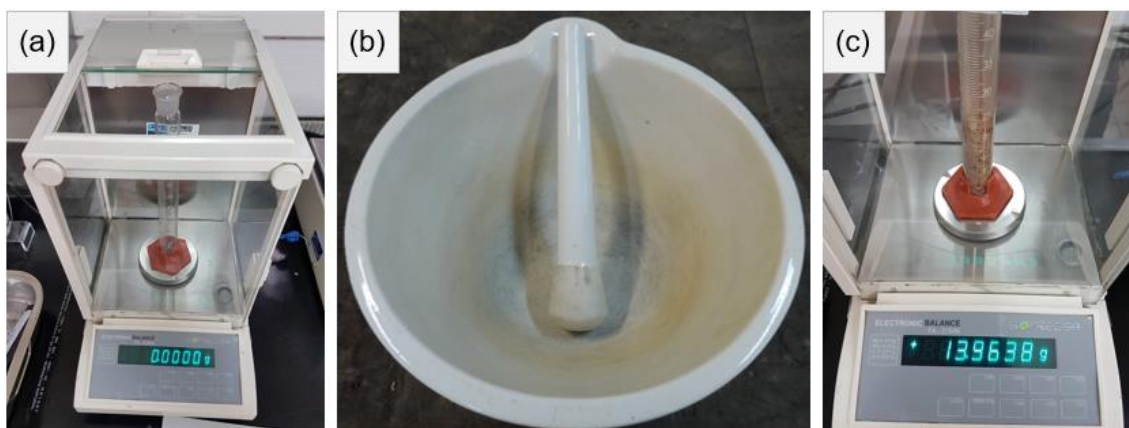


Figura 3.15 - Realização do ensaio de massa unitária da mistura RBC-MF-50% a 1000°C . a) passo 2; b) equipamentos utilizados no passo 1; e, c) passo 4.

3.3.5.7 Análise visual dos agregados

Para a análise visual dos agregados, foram retiradas fotografias de todos os agregados produzidos, em todas as temperaturas de sinterização, na condição íntegra e triturada possibilitando observar macroscopicamente o interior e exterior dos agregados. Foram fotografados também os agregados na condição verde, ou seja, antes da queima. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais/DIACON/IFRN-Campus Natal-Central.

Para a execução das fotografias, utilizou-se folhas e cartolinas brancas para o fundo das fotos, régua para referência de tamanho e para a iluminação foram utilizadas duas luminárias de LED com luz branca. A câmera utilizada é do modelo COOLPIX P520 apoiada em um tripé modelo WF3716. A Figura 3.16 ilustra a execução das fotos em diferentes ângulos.



Figura 3.16 - Realização das fotos para a análise visual dos agregados.

3.3.5.8 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos-LaPFiMC/UFRN e baseou-se no trabalho de Li *et al.* (2000) que buscou analisar a resistência de grãos individualmente e Hiramatsu e Oka, (1966) que desenvolveram uma solução matemática para estimar a resistência à tração de esferas submetidas a carregamento diametral. O diagrama esquemático do ensaio e aparência dos grãos rompidos pelos autores podem ser vistos na Figura 3.17.

As amostras foram ensaiadas individualmente dentro de uma embalagem plástica do tipo “saco zip” de tamanho 4x4 cm a fim de manter os fragmentos da amostra armazenados e favorecer a distribuição uniforme das cargas nos contatos entre as bigornas superior e inferior e a amostra. Foram ensaiadas 5 amostras (grãos) de cada mistura nas 3 melhores temperaturas (conforme os resultados de massa específica e absorção de água).

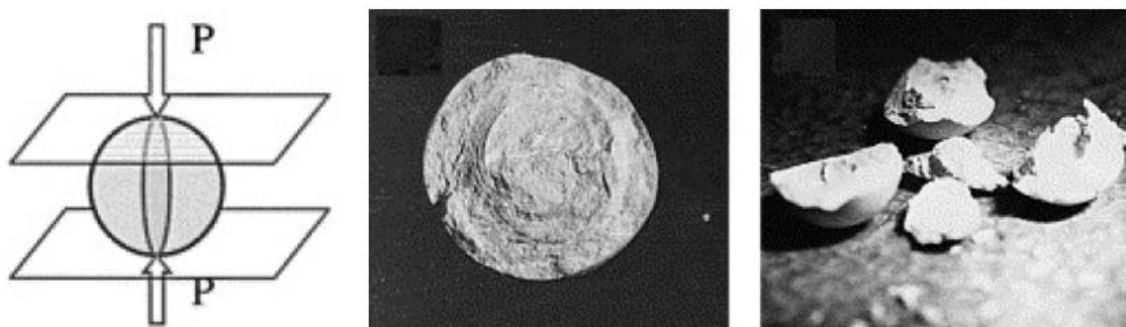


Figura 3.17 - Diagrama esquemático do grão esférico durante o carregamento e aparência do grão após ruptura.
Fonte: Li *et al.* (2000).

O equipamento utilizado foi uma prensa de bancada modelo ZwischLine Z2.5 com capacidade de carga máxima de 2,5 kN e carga mínima de 1 N, com descida da célula de carga a velocidade de 0,1 mm/min. Imagens do equipamento durante a realização do ensaio são apresentadas na Figura 3.18.



Figura 3.18 - Realização do ensaio de resistência à tração.

A resistência à tração das amostras foi calculada a partir da equação proposta por Hiramatsu e Oka (1966) para carregamento diametral de esferas, que aponta que a tensão de tração induzida dentro de uma esfera pode ser obtida através da seguinte Equação (3.6).

$$\sigma_M \approx \frac{2,8 \times P}{\pi \times d^2} \quad (3.6)$$

Onde,

σ_M é a resistência à tração (MPa);

P é a carga crítica aplicada (N); e,

d é a distância entre os pontos de carregamento (mm).

Ressalta-se que o ensaio também foi realizado no agregado comercial CINEXPAN AE-1506, obtendo resultado de 2,23 MPa (com Desvio Padrão de 0,44 MPa), muito próximo ao valor informado pelo fabricante é de 2,27 MPa.

3.3.5.9 Análise morfológica dos agregados

A morfologia das amostras foi analisada no Laboratório de Caracterização de Minerais/Materiais-LACAMM/DIAREN/IFRN-Campus Natal-Central, através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo VEGA3-LMU TESCAN, operado com energia de feixe de elétrons de 20 kV e ampliações de 19x a 450x.

Por restrições de disponibilidade, realizou-se a análise em apenas 6 amostras, as quais foram selecionadas em razão do desempenho nos ensaios de caracterização, descritos nos itens anteriores. Foram escolhidos fragmentos hemisféricos de agregados rompidos no ensaio de resistência à tração, com o mínimo de angulações.

As amostras foram depositadas no porta amostras sobre uma fita adesiva de carbono e a mesma fita foi utilizada para conectar o topo da amostra à base do porta amostras, essa técnica aumenta a condutividade elétrica, concentrando a maior parte dos elétrons no topo da amostra, evitando a dispersão dos mesmos e melhorando a qualidade da imagem obtida. Por fim, as amostras foram metalizadas pela pulverização de plasma de ouro em um equipamento QUORUM Q150R ES com tempo de exposição de 60s.

CAPÍTULO 4

Resultados

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados das propriedades dos materiais precursores da pesquisa, bem como dos agregados produzidos, cuja investigação foi realizada por meio de análises e ensaios que foram detalhados no capítulo anterior.

4.1 Caracterização das matérias-primas

Nesse item são apresentadas as propriedades investigadas na etapa de caracterização dos materiais precursores da pesquisa: argila branca (ARG-B), argila vermelha (ARG-V), resíduo do corte de granitos e mármore (RGM) e resíduo do bagaço da cana-de-açúcar moído pelo moinho de facas (RBC-MF) e moído pelo moinho de bolas (RBC-MB).

4.1.1 Ensaios físicos de caracterização

Apresentam-se neste item os ensaios e análises de caracterização física realizados nos precursores da pesquisa, quais sejam: granulometria à laser, área superficial específica pelo método BET, finura nas peneiras de abertura 100 mesh (0,150mm) e 200 mesh (0,075mm), massa específica e massa unitária; na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo dos respectivos resultados.

Como pode ser observado na Tabela 4.1, a massa específica das argilas ARG-B e ARG-V são próximas, respectivamente 2,44 g/cm³ e 2,56 g/cm³, e, quanto aos diferentes beneficiamentos do RBC, o RBC-MB e RBC-MF também apresentam massa específica aproximada, respectivamente 2,00 g/cm³ e 2,04 g/cm³, já o RGM apresenta a maior massa específica entre as matérias-primas da pesquisa, com 2,71 g/cm³.

Tabela 4.1 - Resumo dos relatórios de ensaios e análises de granulometria à laser, BET, finura, massa específica e massa unitária.

Precursores	ARG-B	ARG-V	RBC-MB	RBC-MF	RGM
Diâmetro a 10% – μm	0,94	0,20	0,61	1,72	0,49
Diâmetro a 50% – μm	4,21	12,21	2,05	10,93	4,57
Diâmetro a 90% – μm	24,76	81,67	6,90	52,23	38,93
Diâmetro a 100% – μm	70,00	240,00	12,00	180,00	110,00
Diâmetro médio – μm	9,23	27,84	2,99	20,47	12,61
Área superficial específica BET – m^2/g	8,92	12,29	60,32	11,28	5,10
Volume total de poros (BET) – cm^3/g	$1,70 \times 10^{-2}$	$2,69 \times 10^{-2}$	$3,91 \times 10^{-2}$	$1,91 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^{-2}$
Massa retida na #0,150mm – %	0,00	41,10	0,00	26,90	0,00
Massa retida na #0,075mm – %	0,40	44,80	1,40	48,50	2,20
Massa específica – g/cm^3	2,44	2,56	2,00	2,04	2,71
Massa unitária – g/cm^3	0,69	1,04	0,54	0,40	0,76

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas granulométrica, onde pode-se observar que a granulometria da argila branca e do resíduo RGM são muito próximas, bem como a discrepância entre o RBC-MF e o RBC-MB, gerada pela diferença de beneficiamento do RBC (vide item 3.1.3). As análises de BET e ensaios de finura também reforçam a discrepância de granulometria entre os beneficiamentos, sendo o RBC-MB bem mais fino que o RBC-MF.

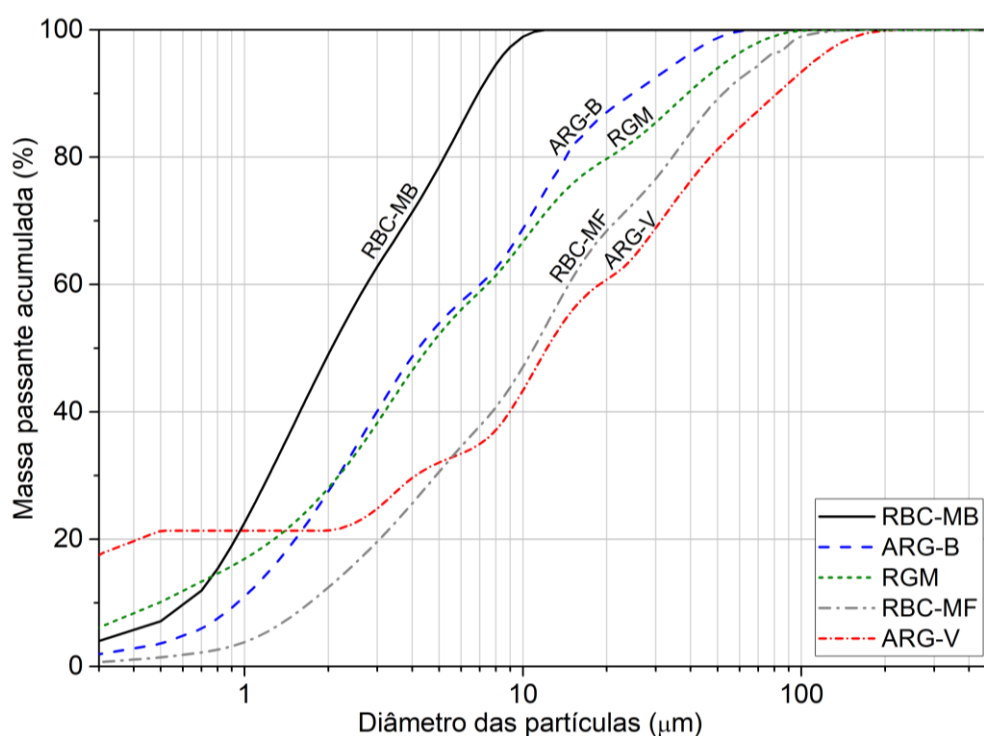


Figura 4.1 - Curvas granulométrica dos materiais precursores.

A ARG-V chama a atenção por conter alto teor de partículas finas e ao mesmo tempo possuir o maior diâmetro médio entre as partículas com 27,14 μm . O tipo de beneficiamento adotado para esse precursor pode ser o responsável por gerar essa granulometria de graduação aberta, pois, o material não passou por moinho; o destorroamento ocorreu de forma manual em almofariz com auxílio de mão de gral, como detalhado no item 3.1.2.

4.1.2 Composição química – Florescência de Raios-X (FRX)

A análise de fluorescência de raios-X foi de suma importância para determinar as misturas estudadas na presente pesquisa (vide item 3.3.1), tendo como principal relação a razão entre o teor de SiO_2 e o somatório dos teores de óxidos fundentes (ΣOF). A relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ bem como a composição química dos materiais precursores da pesquisa são detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Composição química (FRX) dos materiais precursores da pesquisa.

Precursores	ARG-B	ARG-V	RBC-MB	RBC-MF	RGM	
SiO₂	55,80	41,69	75,58	26,77	39,01	
Al₂O₃	41,95	21,23	2,50	3,39	7,00	
Óxidos fundentes (OF)	Fe₂O₃	0,71	27,87	9,91	24,12	5,51
	Na₂O	0,24	-	0,36	-	2,21
	K₂O	0,88	2,93	1,89	17,32	0,56
	CaO	0,02	1,13	1,79	13,65	29,44
	MgO	0,15	2,06	2,82	2,55	13,71
Outros	TiO₂	0,05	1,41	0,56	1,58	1,60
	P₂O₅	0,06	-	2,51	4,71	0,30
	ZrO₂	0,04	0,43	0,17	2,10	0,08
	<1,5%*	0,09	1,24	1,90	3,81	0,57
ΣOF	2,00	33,99	16,77	57,64	51,43	
SiO₂/ ΣOF	27,87	1,23	4,51	0,46	0,76	

*Somatório dos óxidos de teor inferior à 1,5% simultaneamente em todos os precursores.

4.1.3 Composição mineralógica – Difração de Raios-X (DRX)

A seguir apresentam-se as composições mineralógicas dos materiais precursores da pesquisa, obtidos através da análise de difração de Raios-X.

- Argila Branca – ARG-B

A Figura 4.2 apresenta o difratograma de raios-x da argila branca, onde observa-se que as fases cristalinas presentes na amostra são dos argilominerais Caulinita e Haloisita, além da presença de Quartzo. O resultado da análise mineralógica reforça a composição química já apresentada no item anterior, com a presença predominante de óxidos de silício e alumínio.

Por se tratar de uma argila branca, proveniente do mineral Caulim, já era esperado que sua composição mineralógica apresentasse silicatos hidratados de alumínio, em especial a caulinita e haloisita por serem os mais frequentes. Pinheiro (2006) utilizou o Caulim da mesma região de origem da ARG-B e apresenta mineralogia semelhante.

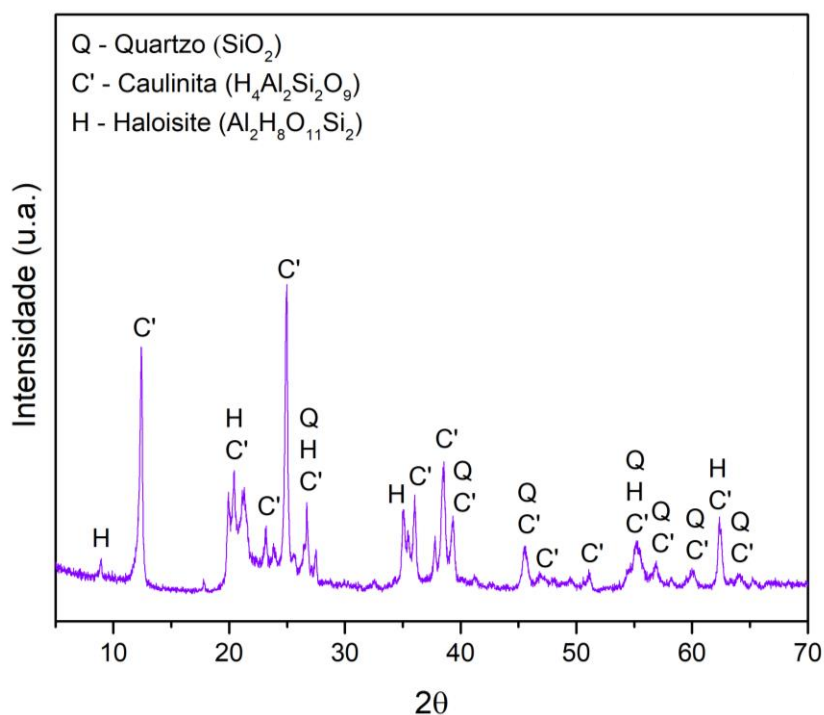


Figura 4.2 - Difratograma de raios-X da argila branca (ARG-B).

O argilomineral Caulinita e o Quartzo também estão presentes na argila utilizada por Soltan *et al* (2016), cujo trabalho embasou a produção das composições com RGM adotadas no presente trabalho, porém, os outros minerais presentes, a albita (NaAlSi₃O₈) e a Montmorillonita (Na_{0,2}Ca_{0,1}Al₂Si₄O₁₀(OH)₂(H₂O)₁₀), não foram identificadas na ARG-B, provavelmente devido a sua alta pureza.

- Argila vermelha – ARG-V

O difratograma de raios-x da ARG-V é apresentado na Figura 4.3, onde observa-se a presença de três fases cristalinas: Quartzo, Biotita e Ilita; corroborando com a composição química já apresentada, com predominância de óxidos de silício, alumínio e ferro, em teores superiores a 20% e óxidos de magnésio e potássio com teores entre 2 e 3% (Tabela 4.2) e em consonância ao apresentado por Barros (2015), que estudou argilas do Rio Grande do Norte, também utilizadas na indústria produtora de cerâmica vermelha, e, nas quais as fases de Quartzo, Biotita e Ilita também estão presentes.

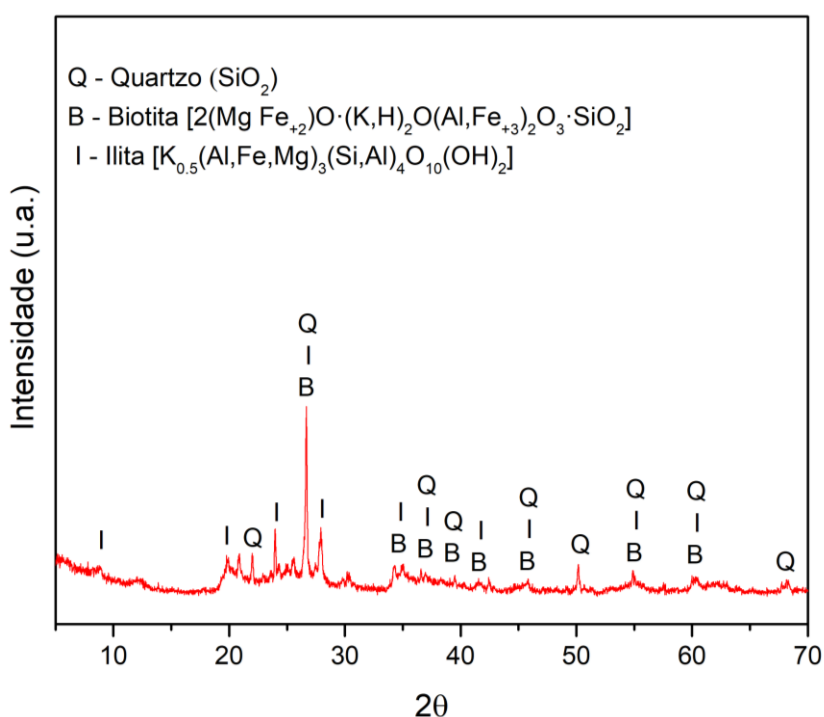


Figura 4.3 - Difratograma de raios-X da argila vermelha (ARG-V).

- Resíduos da biomassa da cana-de-açúcar (RBC-MF e RBC-MB)

O difratograma de raios-x do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, moído no moinho de facas (RBC-MF) é apresentado na Figura 4.4, e o do moído no moinho de bolas (RBC-MB) é apresentado na Figura 4.5, onde, verifica-se a presença da fase cristalina apenas do Quartzo, para ambas as amostras; resultado coerente com autores anteriores (ANJOS, 2009; ANJOS, FERREIRA & BORJA, 2012) que analisaram diferentes moagem para o RBC.

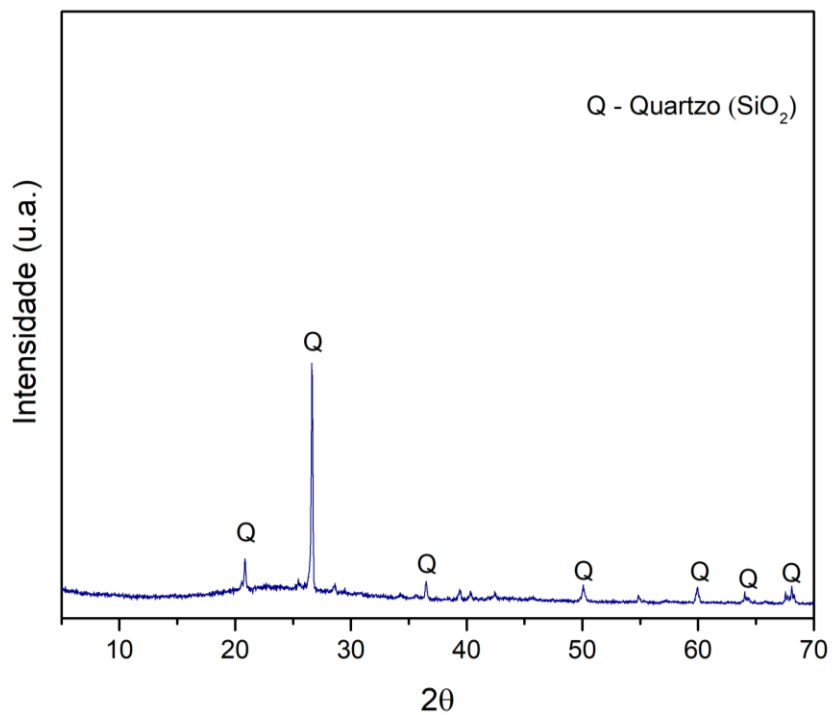


Figura 4.4 - Difratoograma de raios-X do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, moído no moinho de facas (RBC-MF).

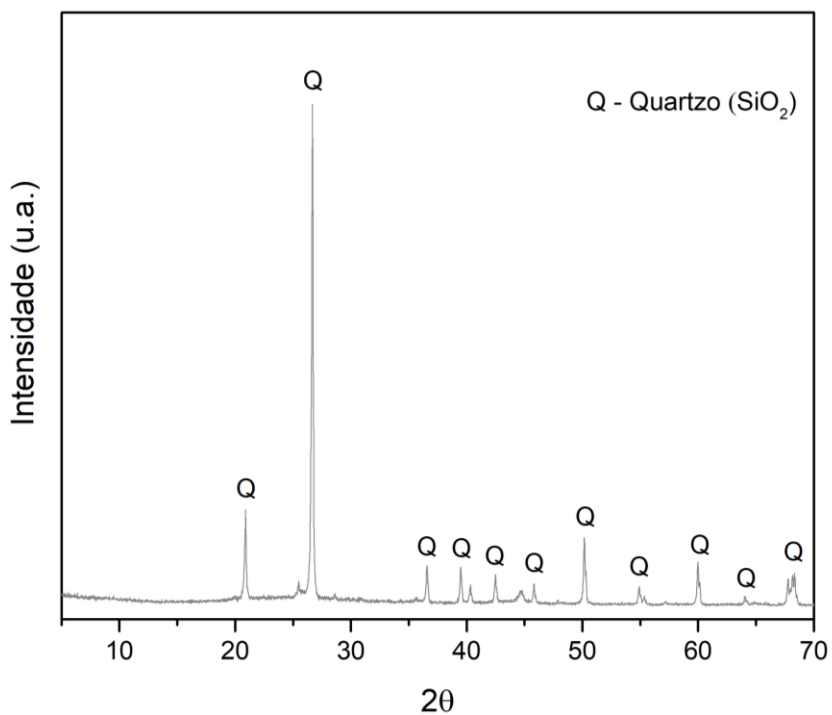


Figura 4.5 - Difratoograma de raios-X do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, moído no moinho de bolas (RBC-MB).

- Resíduo do corte de granitos e mármore – RGM

A Figura 4.6 apresenta o difratograma de raios-x do RGM, onde foram identificadas diversas fases cristalinas, o que já era esperado devido ao resíduo ser resultado do beneficiamento de rochas ornamentais de origens diversas.

O RGM estudado na presente pesquisa apresenta fases de Biotita, Dolomita, Calcita, Albita e Quartzo (Figura 4.6), o que se mostra coerente com os resultados obtidos através da análise química (FRX), com a predominância dos óxidos de silício, cálcio e magnésio, com teores entre 14% e 39% e a presença de óxidos de alumínio, ferro, sódio e titânio em teores mais baixos, entre 2% e 7% (Tabela 4.2).

No estudo de Soltan *et al.* (2016) o RGM também apresenta os minerais quartzo (SiO_2), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e biotita ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})$), porém, também apresenta fases de hornblenda ($\text{Ca}_2\text{Mg}_4\text{AlFeSi}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$) e microclínio (KAlSi_3O_8), que não foram identificados no presente estudo. O que também acompanhou as diferenças observadas na composição química desses materiais, visto que o RGM de Soltan *et al.* (2016) apresenta 71% de SiO_2 , 13% de Al_2O_3 , 5% de Fe_2O_3 e K_2O , 3% de Na_2O , além de óxidos de cálcio, magnésio e titânio em teores inferiores a 2%.

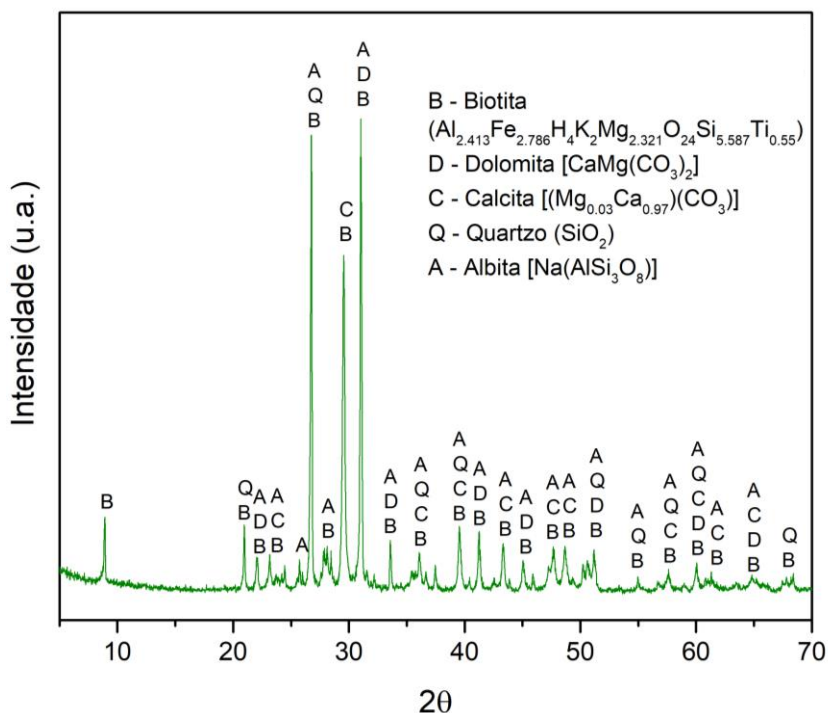


Figura 4.6 - Difratograma de raios-X do resíduo de corte de granitos e mármore (RGM).

4.1.4 Análise térmica (TG/DTA)

Na Figura 4.7 apresentam-se as curvas das análises térmicas por termogravimetria (TG) e por análise térmica diferencial (DTA) realizadas nos materiais precursores da pesquisa. Ressalta-se que por limitações de disponibilidade de equipamentos e laboratórios, só foi possível realizar tais análises nos seguintes materiais: ARG-B, RGM, RBC-MB e RBC-MF.

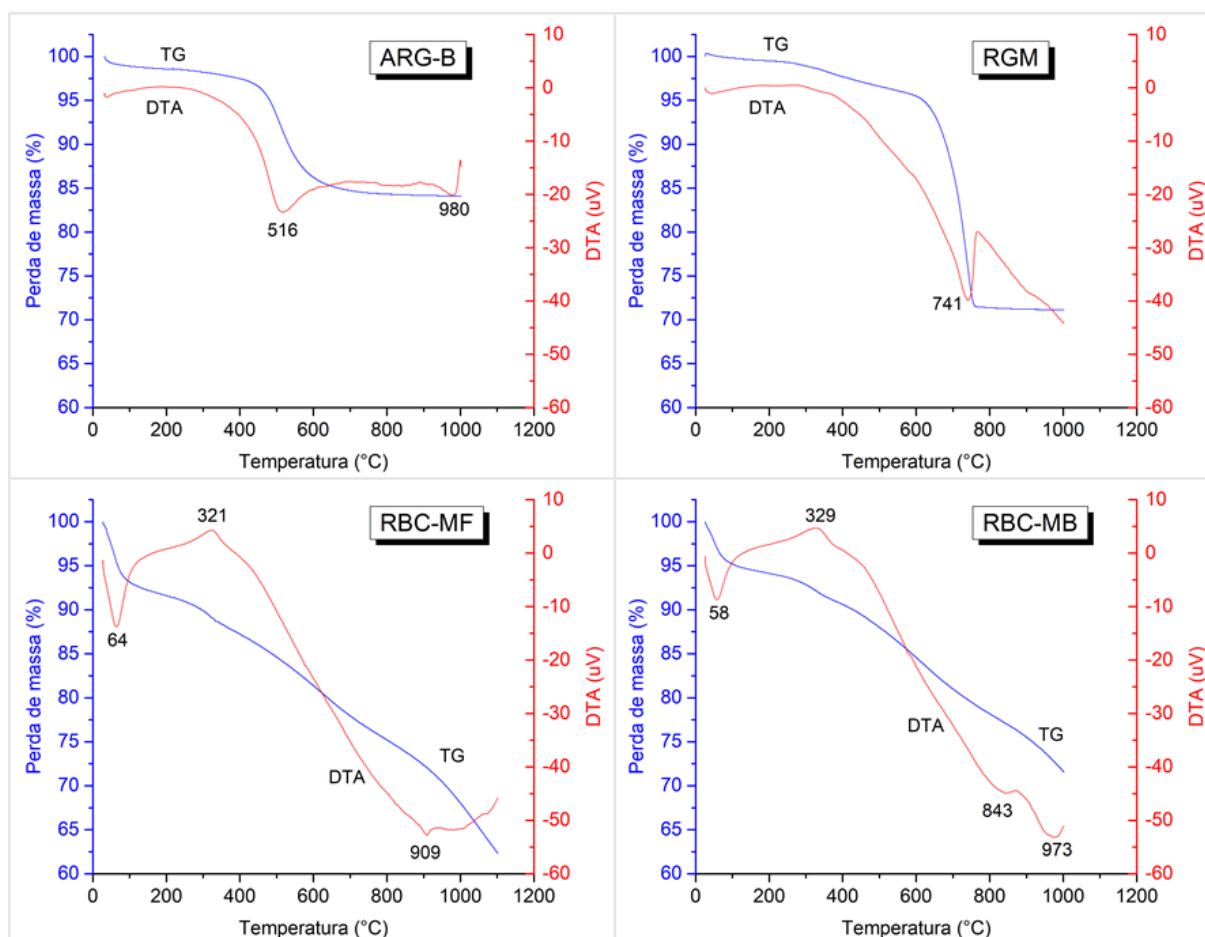


Figura 4.7 - Curvas das análises térmicas realizadas nos precursores.

A análise térmica da argila branca (ARG-B) mostra o comportamento típico de uma argila refratária rica em sílica e alumina, confirmando a composição química e mineralógica já apresentada, muito semelhante ao apresentado por Bragança e Bergmann (2010), onde a perda de massa até 100°C é atribuída a liberação de água adsorvida (pico endotérmico), a queima das substâncias orgânicas ocorre até cerca de 400°C em um pico exotérmico, e, aproximadamente a 550°C ocorre a desidroxilação da caulinita formando a metacaulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) em uma reação endotérmica. O registro na curva DTA da ARG-B, possivelmente referente a esse último evento, ocorre a 516°C.

Bragança e Bergmann (2010) ainda identificam um pico exotérmico de ocorrência entre 950° a 1000°C onde a metacaulinita se transforma em espinélio ($2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$), liberando sílica amorfa. Esse evento não foi totalmente observado na curva DTA da ARG-B, mas, a partir de 980°C a curva inicia um possível pico exotérmico que é interrompido à 1000°C pelo término da análise.

A ARG-B apresenta uma perda de massa a 1000°C de 16%, e pela análise realizada acima, infere-se que possivelmente o principal evento responsável pela perda de massa da argila é a desidroxilação da caulinita e que a argila possui baixo teor de matéria orgânica.

Já o RGM apresenta uma perda de massa a 1000°C de 29%, onde a principal perda de massa está associada a um pico endotérmico a 741°C. Suas curvas TG e DTA são bastante similares ao apresentado por Moreno-Maroto *et al.* (2017b) que também trabalhou com resíduo de corte de granitos e mármore e suas curvas apresentam uma grande perda de massa associada a um pico endotérmico a 708°C que foi associado a decomposição da calcita em CO_2 .

Considerando que na composição mineralógica do RGM observa-se a presença da calcita e pelo observado no estudo supracitado de Moreno-Maroto *et al.* (2017b), infere-se que o principal evento responsável pela perda de massa do resíduo é possivelmente relativo à decomposição da calcita em CO_2 . Observa-se ainda que o RGM possui, provavelmente, baixo teor de matéria orgânica.

Já as curvas TG e DTA do RBC-MF e do RBC-MB apresentam picos exotérmicos bem definidos a 321°C e 329°C respectivamente, indicando alto teor de matéria orgânica dos resíduos e corroborando com o apresentado por Anjos (2009) que atribuiu a perda de massa entre 313°C e 575°C à decomposição de constituintes orgânicos do RBC como a hemicelulose, celulose e a lignina.

Os picos endotérmicos iniciais a temperaturas inferiores a 100°C podem ser atribuídos a perda de água de umidade nos resíduos, e, a perda de massa a 1000°C do RBC-MF e do RBC-MB é respectivamente 32% e 28%.

4.1.5 Limites de Atterberg

Os limites de plasticidade (LP), limites de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) determinados para cada mistura analisada na pesquisa, estão

apresentados na Tabela 4.3, além dos valores de umidade de moldagem (UM) de cada mistura. Ressalta-se que não foi possível determinar os limites de Atterberg para as misturas RBC-MF-50%, 60%, 70%, 80% e 90%; segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016) essas são caracterizadas como não plásticas (NP).

Para a determinação da umidade de moldagem, partiu-se do intervalo de umidade dada pelo LL e LP, selecionando um valor comum a todas as misturas de um mesmo grupo de resíduo, com o objetivo de manter os valores de umidade das misturas o mais próximo possível, evitando a variável nos resultados. Porém, a umidade prevista podia ser ajustada no momento da homogeneização e pelotização dos agregados, devido essas serem feitas de forma manual.

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de LL e LP para as misturas analisadas.

Misturas	LL	LP	IP	UM
ARG-B	44	31	13	40
RGM-50%	31	20	11	29
RGM-60%	29	18	11	28
RGM-70%	26	18	8	28
RGM-80%	25	20	5	27
RGM-90%	25	19	6	27
RGM-100%	23	18	5	28
ARG-V	50	26	24	40
RBC-MF-50%	56	44	12	56
RBC-MF-60%	57	NP	NP	56
RBC-MF-70%	64	NP	NP	68
RBC-MF-80%	58	NP	NP	77
RBC-MF-90%	61	NP	NP	77
RBC-MB-50%	47	28	19	44
RBC-MB-60%	47	31	16	45
RBC-MB-70%	46	33	13	44
RBC-MB-80%	45	30	15	46
RBC-MB-90%	45	30	15	47
RBC-MB-100%	47	28	19	48

4.2 Estudo dos agregados produzidos

A análise dos agregados produzidos na pesquisa será apresentada por grupos de acordo com o resíduo utilizado nas misturas e a respectiva argila utilizada. A descrição dos grupos é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Agrupamento dos agregados estudados (misturas analisadas).

Grupo	Resíduo utilizado	Argila utilizada	Agregados estudados
RGM's	Resíduo de corte de granitos e mármore (RGM)	Argila branca (ARG-B)	ARG-B RGM-50% RGM-60% RGM-70% RGM-80% RGM-90% RGM-100%
RBC-MF's	Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído no moinho de facas (RBC-MF)	Argila vermelha (ARG-V)	ARG-V RBC-MF-50% RBC-MF-60% RBC-MF-70% RBC-MF-80% RBC-MF-90%
RBC-MB's	Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído no moinho de bolas (RBC-MB)	Argila vermelha (ARG-V)	RBC-MB-50% RBC-MB-60% RBC-MB-70% RBC-MB-80% RBC-MB-90% RBC-MB-100%

4.2.1 Agregados do grupo RGM's – Resíduo de corte de granitos e mármore

- Índice de encolhimento

O índice de encolhimento apresenta como resposta a retração do agregado moldado após secagem em estufa. O índice é investigado na indústria produtora de peças cerâmicas pois a partir dele é possível observar as deformações das peças ao longo do processo produtivo, diagnosticando deformações que possam desaproveitar as peças além de ser importante para estabelecer o desenho dos moldes. Dessa forma o índice de encolhimento foi observado nesta pesquisa com intuito de avaliar deformações excessivas das misturas, considerando que a granulometria pré-estabelecida para os agregados poderia ser alterada em função da retração.

Segundo Kazmierczak (2010), o teor de sílica livre e matéria orgânica influenciam na retração das peças, enquanto um maior teor de sílica reduz a plasticidade da argila e também diminui a retração das peças, um maior teor de matéria orgânica além de gerar maior retração e fissuras nas peças, também pode provocar diferenças de coloração em um mesmo componente.

A Figura 4.8 apresenta os resultados de índice de encolhimento dos agregados do grupo RGM's, onde pode ser observado que os teores de 60% a 100% de resíduo apresentam índices de encolhimento similares entre si e inferiores em relação as misturas com 50% e 100% de argila branca, ou seja, a inclusão do resíduo resultou em menores índices de retração, porém, a diferença entre as misturas não é significativa.

A maior retração observada nas composições com maior teor de argila branca pode ser explicada pelo exposto por Kazmierczak (2010), pois, o teor de SiO_2 da ARG-B é de 56%, porém, a análise de DRX realizada na argila apresenta picos de quartzo de baixa intensidade, o que indica que o SiO_2 verificado no FRX está relacionado com os aluminossilicatos presentes na argila, diferente da análise realizada no RGM, que possui 39% de SiO_2 , porém, com picos de alta intensidade de quartzo, oriundos das rochas ornamentais.

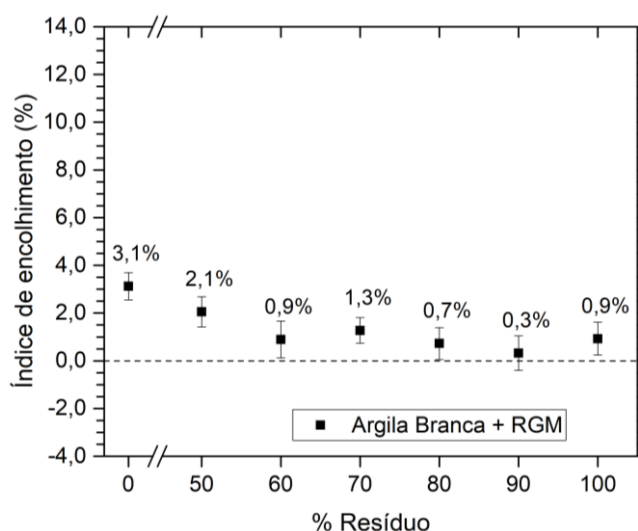


Figura 4.8 - Índice de encolhimento dos agregados do grupo RGM's.

- Análise visual

Apresentam-se a seguir as imagens obtidas a partir da análise visual dos agregados produzidos das misturas ARG-B, RGM-50%, RGM-60%, RGM-70%, RGM-80%, RGM-90% e RGM-100%, onde pode ser observada a aparência dos agregados nas diversas temperaturas de sinterização estudadas e o aspecto externo e interno dos agregados, fotografados na condição íntegra e triturada.

As misturas com teores de 80%, 90% e 100% de RGM, quando submetidos a temperaturas até 1000°C, 1050°C e 1100°C, respectivamente, se desintegraram (Figura 4.13 a Figura 4.15), pois, o tratamento térmico realizado foi insuficiente para que as transformações de fase resultassem em produtos resistentes.

Em geral, as composições do grupo RGM's não sofrem alterações significativas de formato, textura ou coloração até a temperatura de 1200°C; a exceção é a mistura RGM-80% que a 1200°C apresentou a formação de uma casca brilhosa de baixa porosidade e de cor escura na parte de cima da amostra. Já a parte do agregado que ficou mais próxima da placa refratária permaneceu mais clara. Internamente apresentou a formação de grandes poros (Figura 4.13).

Na mesma linha de comportamento, a mistura RGM-70% apresentou a formação da casca brilhosa na temperatura de 1213°C, porém, de forma mais homogênea que a mistura RGM-80%, mantendo maior esfericidade e produzindo poros de tamanhos e distribuição mais uniforme. Ressalta-se que conforme Ayati *et al.* (2018), a estrutura de poros ideal para o agregado leve compreende um elevado volume de poros de tamanho e distribuição uniformes.

Os agregados de 100% RGM ou ARG-B mantiveram o formato inicial sem formação da casca brilhosa mesmo sob temperaturas de até 1263°C, porém, a sinergia desses precursores apresentou temperaturas onde ocorreu mudança visual significativa (MV) referente a coloração, textura ou formato, formação de casca de baixa porosidade (C) ou o derretimento total do agregado (D), tornando a massa sinterizada sem formato regular, com a aparência de um líquido viscoso, endurecido que ficou aderido a placa refratária. Um resumo dessas mudanças é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resumo das mudanças visuais significativas do grupo RGM's

	1200°C	1213°C	1225°C	1238°C	1250°C	1263°C
ARG-B	SA	SA	SA	SA	SA	SA
RGM-50%	SA	SA	SA	MV	MV	D
RGM-60%	SA	MV	MV	D	-	-
RGM-70%	MV	C	D	-	-	-
RGM-80%	C	D	-	-	-	-
RGM-90%	MV	MV	C	D	-	-
RGM-100%	MV	MV	MV	MV	MV	MV

D – Derretimento; C – Formação da casca de baixa porosidade, MV – Mudança visual significativa; e, SA – Sem alteração significativa.

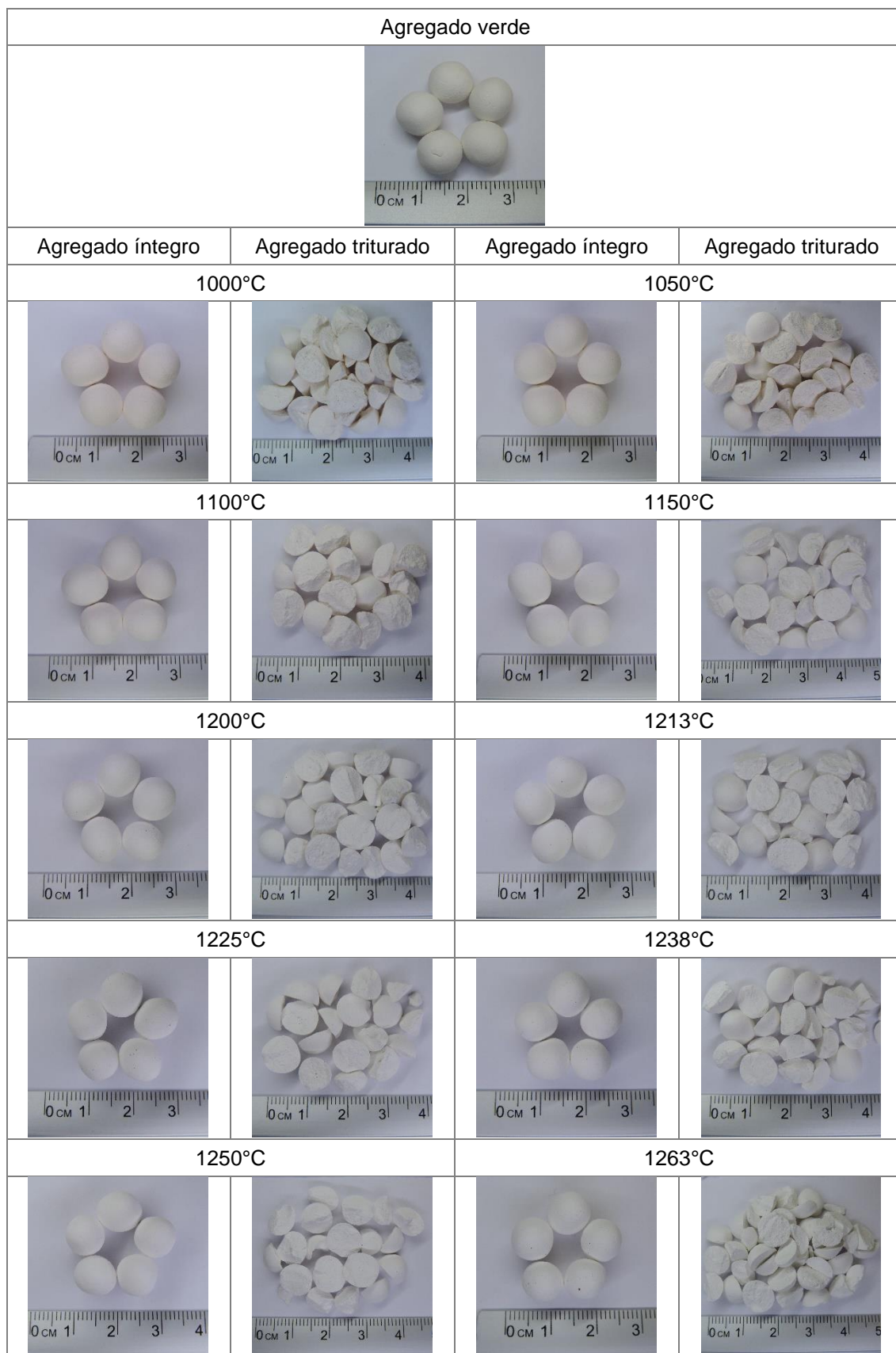


Figura 4.9 - Análise visual da mistura ARG-B.

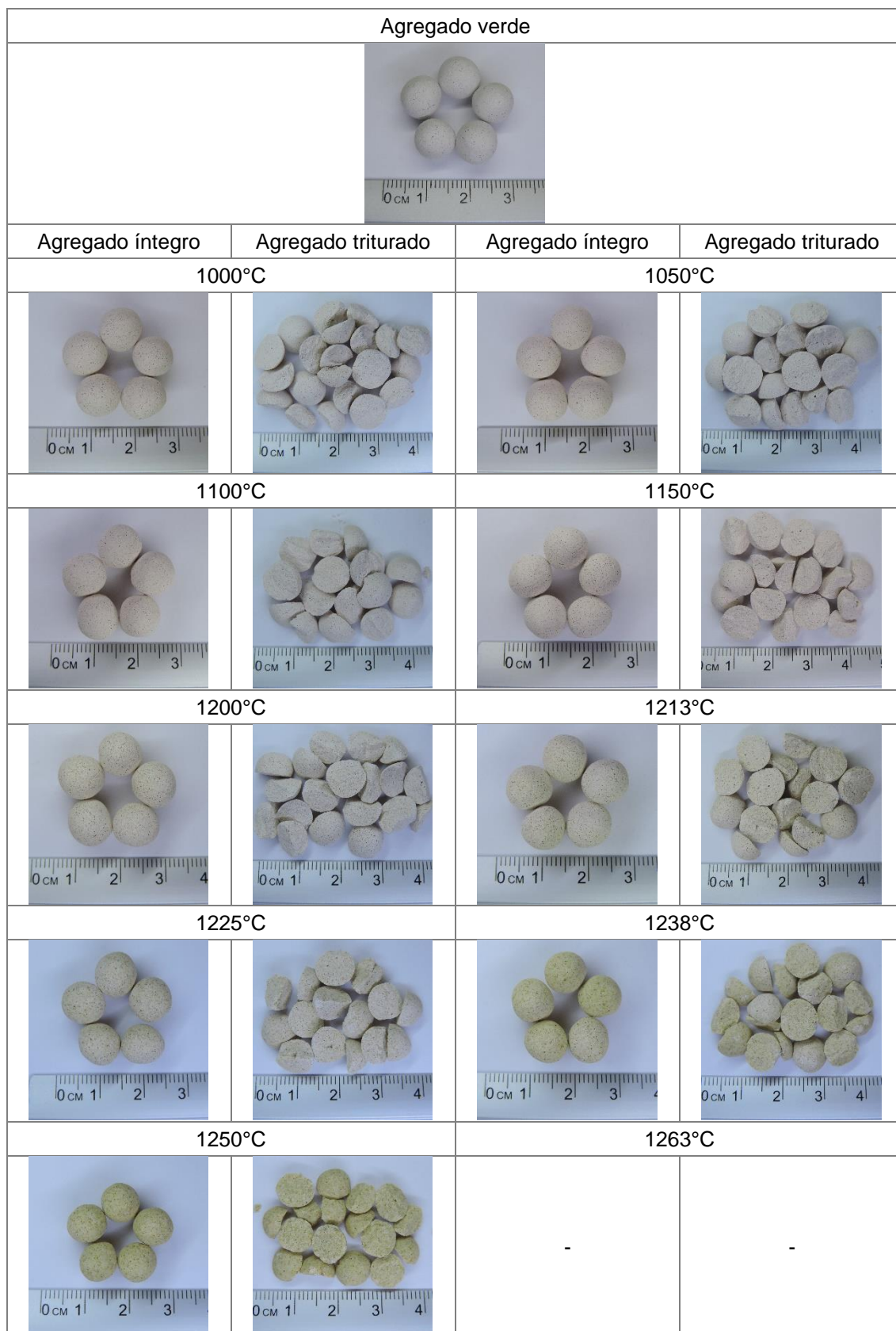


Figura 4.10 - Análise visual da mistura RGM-50%.









Agregado verde			
			
1000°C		1050°C	
			
1100°C		1150°C	
			
1200°C		1213°C	
			
1225°C		1238°C	
-		-	
1250°C		1263°C	
-		-	

Figura 4.11 - Análise visual da mistura RGM-60%.







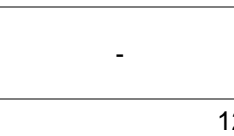
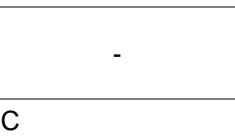
Agregado verde			
			
1000°C		1050°C	
			
1100°C		1150°C	
			
1200°C		1213°C	
			
1225°C		1238°C	
-		-	
1250°C		1263°C	
-		-	

Figura 4.12 - Análise visual da mistura RGM-70%.











Agregado verde			
			
Agregado íntegro	Agregado triturado	Agregado íntegro	Agregado triturado
1000°C		1050°C	
			
1100°C		1150°C	
			
1200°C		1213°C	
		-	-
1225°C		1238°C	
-	-	-	-
1250°C		1263°C	
-	-	-	-

Figura 4.13 - Análise visual da mistura RGM-80%.














Agregado verde			
			
Agregado íntegro	Agregado triturado	Agregado íntegro	Agregado triturado
1000°C		1050°C	
			
1100°C		1150°C	
			
1200°C		1213°C	
			
1225°C		1238°C	
		-	-
1250°C		1263°C	
-	-	-	-

Figura 4.14 - Análise visual da mistura RGM-90%.

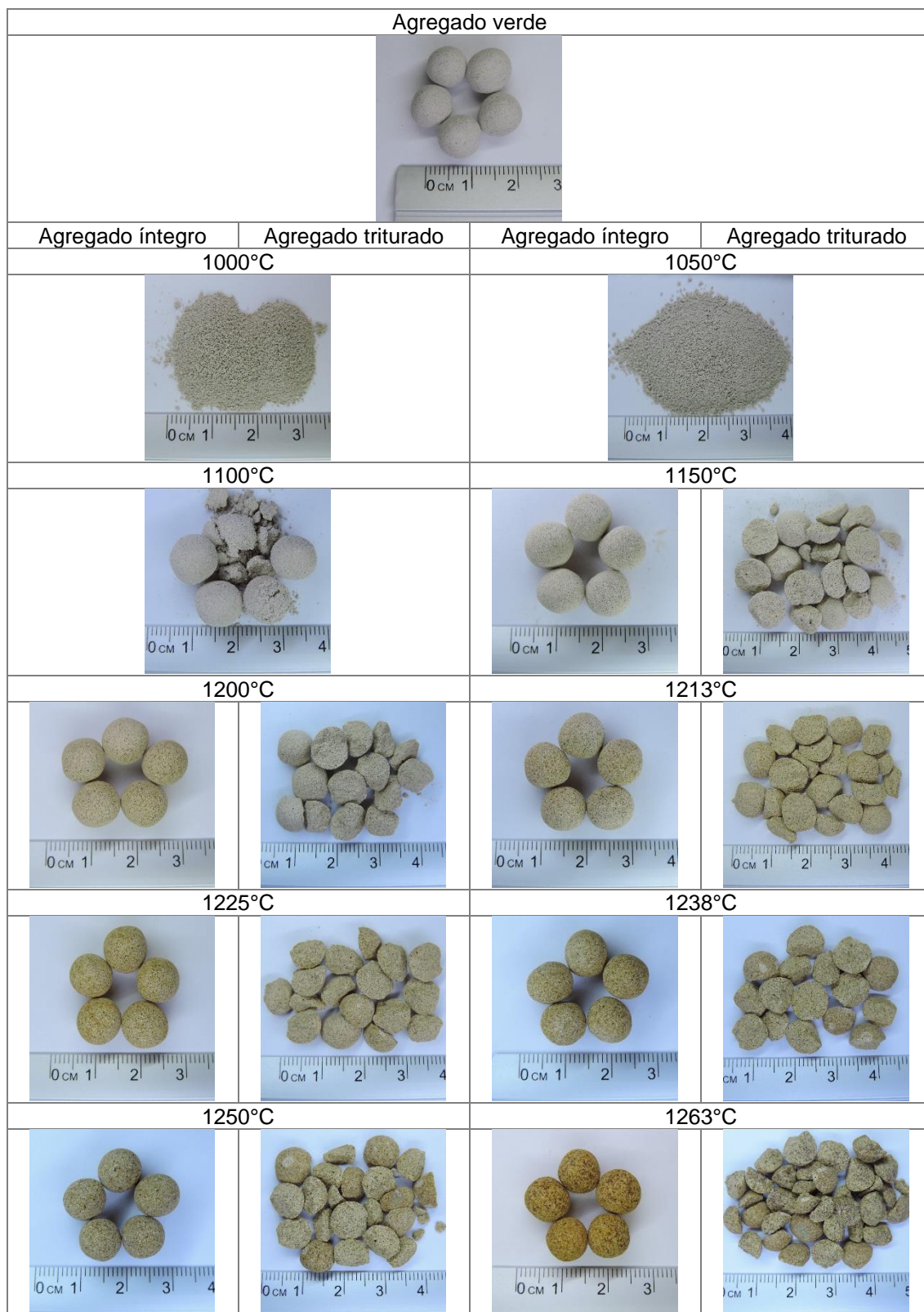


Figura 4.15 - Análise visual da mistura RGM-100%.

- Massa específica aparente e absorção de água

A Figura 4.16 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água para os agregados do grupo RGM's. A partir da figura é possível observar quais agregados atendem a definição de agregado leve, segundo a EN 13055 (2016), apresentando massa específica aparente inferior à $2,00 \text{ g/cm}^3$.

Quanto a absorção de água, Ayati *et al.* (2018) observou que os agregados comercializados no mundo, em sua maioria apresentam absorção inferior a 20%; corroborando com Neville (2016), que aponta que a absorção de agregados leves varia entre 5% e 20%, mas, para agregados de boa qualidade destinados ao uso em concreto estrutural, ela normalmente é inferior a 15%.

Nesse contexto, verifica-se na Figura 4.16 que todos os agregados, quanto calcinados até 1200°C atendem ao parâmetro de massa específica aparente da EN 13055 (2016), porém, apresentam, em geral, valores de absorção de água superiores a 20%.

Verifica-se também que o acréscimo de temperatura diminui a absorção de água de todas as misturas, porém, para algumas misturas essa diminuição acompanhou um aumento de massa específica, ultrapassando o limite definido pela norma supramencionada.

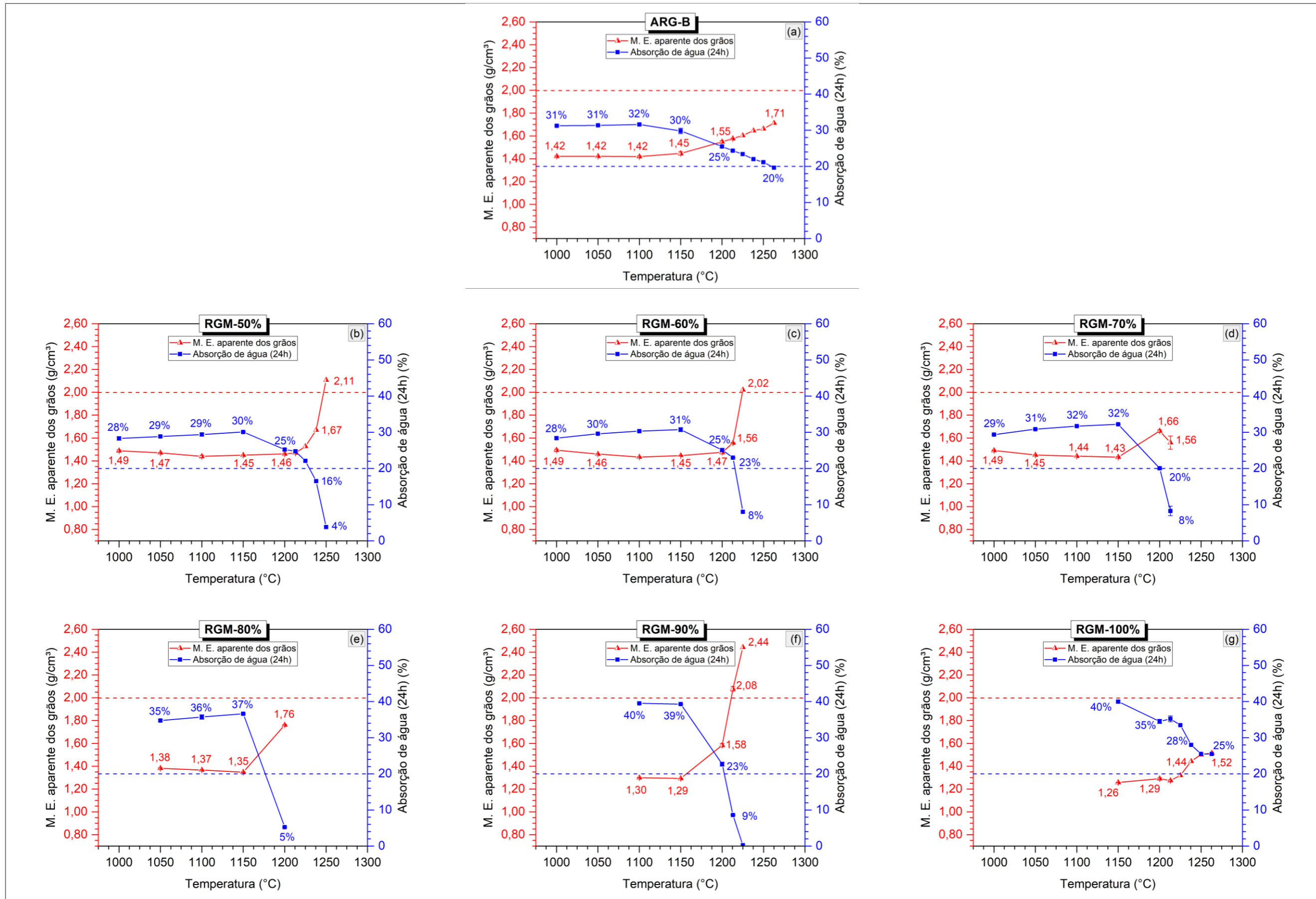


Figura 4.16 - Resultados dos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água (24h) dos agregados do grupo RGM's.

A Tabela 4.6 apresenta um resumo dos agregados que simultaneamente atendem aos parâmetros de massa específica aparente e absorção de água.

Tabela 4.6 - Resumo dos resultados de massa específica aparente e absorção de água das misturas do grupo RGM's que atendem aos parâmetros de agregado leve.

Mistura	Temperatura	Massa específica aparente	Absorção de água
ARG-B	1263°C	1,71 g/cm ³	20%
RGM-50%	1238°C	1,67 g/cm ³	16%
RGM-60%	1225°C	2,02 g/cm ³	8%
RGM-70%	1200°C	1,66 g/cm ³	20%
RGM-70%	1213°C	1,56 g/cm ³	8%
RGM-80%	1200°C	1,76 g/cm ³	5%

Considerando os resultados apresentados, o RGM-70% sinterizado à 1213°C apresenta a massa específica mais baixa (1,56 g/cm³) dentre as misturas do grupo RGM's, e, assim como as misturas RGM-60% a 1225°C e RGM-80% a 1200°C possui absorção de água inferior a 15%, compatível com agregados de boa qualidade utilizados em concretos estruturais, segundo Neville (2016).

- Módulo de deformação

A Figura 4.17 apresenta os valores de módulo de deformação dos agregados do grupo RGM's, onde é possível verificar que, com exceção dos agregados das misturas RGM-90% a 1225°C e o RGM-50% a 1250°C, todos os agregados produzidos deste grupo se apresentam dentro do intervalo de valores de módulo de elasticidade dos agregados comercializados (Lyttag, Solite, Liapor, Leca, Arlita e CINEXPAN, vide item 3.3.5.5), entre 3 e 35 GPa.

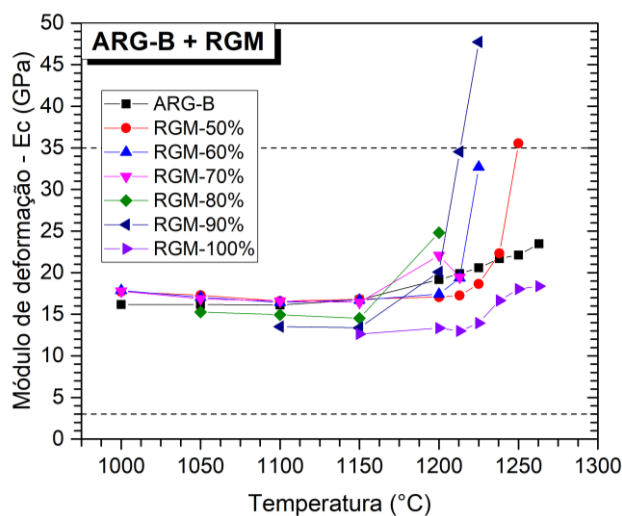


Figura 4.17 - Módulo de deformação dos agregados do grupo RGM's

- Resistência à tração

A Figura 4.18 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RGM's, neste grupo foram realizadas rupturas nas temperaturas de 1150°C, 1200°C e 1225°C e a linha tracejada ressalta o valor 2,23 MPa referente ao resultado do presente ensaio realizado no agregado comercializado Argila Expandida 1506 da CINEXPAN (vide item 3.3.5.8). Dessa forma, observa-se que as resistências alcançadas pelos agregados produzidos com argila branca e o resíduo RGM em geral são mais altas que a referência.

Ressalta-se que não foi possível aferir a resistência à tração da mistura RGM-90% à 1225°C, local marcado com asterisco (*), pois, o valor de carga excedeu o limite do equipamento utilizado², porém, foi possível estimar que o valor de resistência à tração para este é superior a 31 MPa.

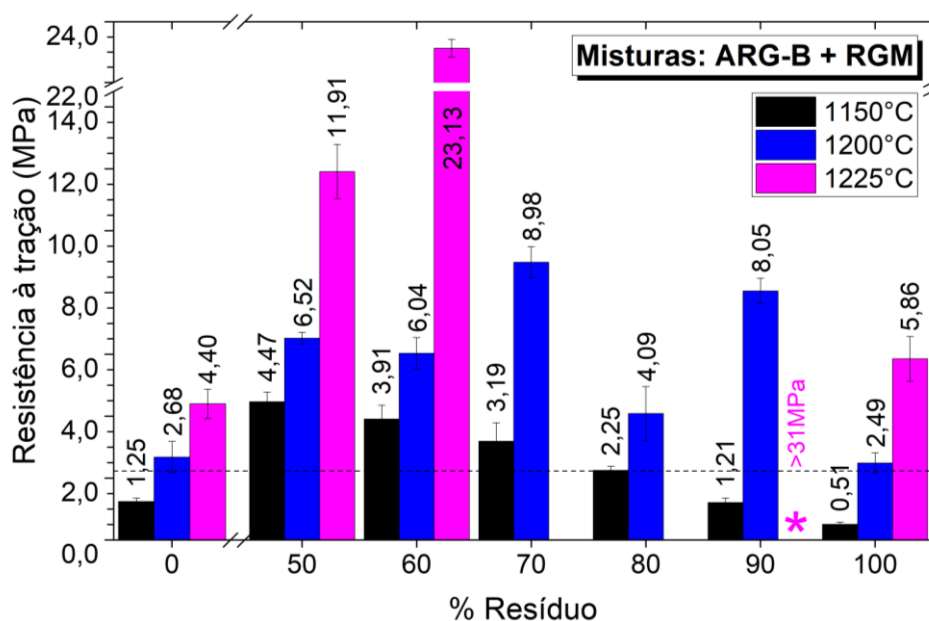


Figura 4.18 - Resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RGM's.

Considerando os resultados apresentados é possível verificar a influência do aumento de temperatura no ganho de resistência, evidenciada em todas as misturas. Santis (2012) confirmou que misturas que continham maior teor de

² O limite de carga do equipamento é de 2,5 kN, como especificado no item 3.3.5.8, porém, o laboratório estabeleceu, por segurança, como carga máxima de trabalho o valor de 2,0 kN. Ao atingir 2,0 kN o ensaio foi finalizado e a resistência foi estimada com base nesse carregamento.

SiO_2 e Al_2O_3 , responsáveis pela formação da fase vítrea, apresentam maiores resistências em relação a composições com teores reduzidos.

Além do teor de sílica e alumina, o teor de óxidos fundentes exerce grande influência na resistência dos produtos cerâmicos. Cascudo, Carasek e Hasparyk (2010) apontam que o teor de óxidos fundentes afeta as relações de equilíbrio entre a sílica e alumina e abaixam consideravelmente a temperatura eutética, além de alterarem a composição eutética.

Considerando os autores supracitados, apresenta-se na Tabela 4.7 os teores de sílica, alumina e óxidos fundentes das misturas do grupo RGM's. Onde é possível observar o provável motivo das resistências de ARG-B e RGM-100% serem as menores entre as composições, pois, o teor de óxidos fundentes na ARG-B é extremamente baixo, e nos agregados com RGM-100% o teor de alumina é o mais baixo entre as composições.

Tabela 4.7 - Teores de SiO_2 , Al_2O_3 e óxidos fundentes das misturas do grupo RGM's.

Mistura	SiO_2	Al_2O_3	ΣOF
ARG-B	55,94	42,05	2,00
RGM-50%	47,99	24,62	27,39
RGM-60%	46,40	21,13	32,47
RGM-70%	44,81	17,64	37,55
RGM-80%	43,22	14,16	42,63
RGM-90%	41,63	10,67	47,70
RGM-100%	40,03	7,18	52,78

- Massa unitária

A Figura 4.19 apresenta a massa unitária dos agregados do grupo RGM's, juntamente com os respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$. A linha de referência nos gráficos de massa unitária estabelece o limite superior dado pela ASTM C331 (2010) de $0,88 \text{ g/cm}^3$ para agregados graúdos leves. Já quando à relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$, as linhas de referência marcam o intervalo de 1,00 a 3,85, apresentados na Tabela 3.4 (item 3.3.1) contendo as relações de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ de agregados comercializados e de autores anteriores. Observa-se na Figura 4.19 que a propriedade acompanha a tendência já observada na análise da massa específica, em que o aumento da temperatura provoca o aumento dos valores de massa unitária. Outrossim, todos agregados das misturas RGM-70% e RGM-100% estão abaixo do limite de $0,88 \text{ g/cm}^3$.

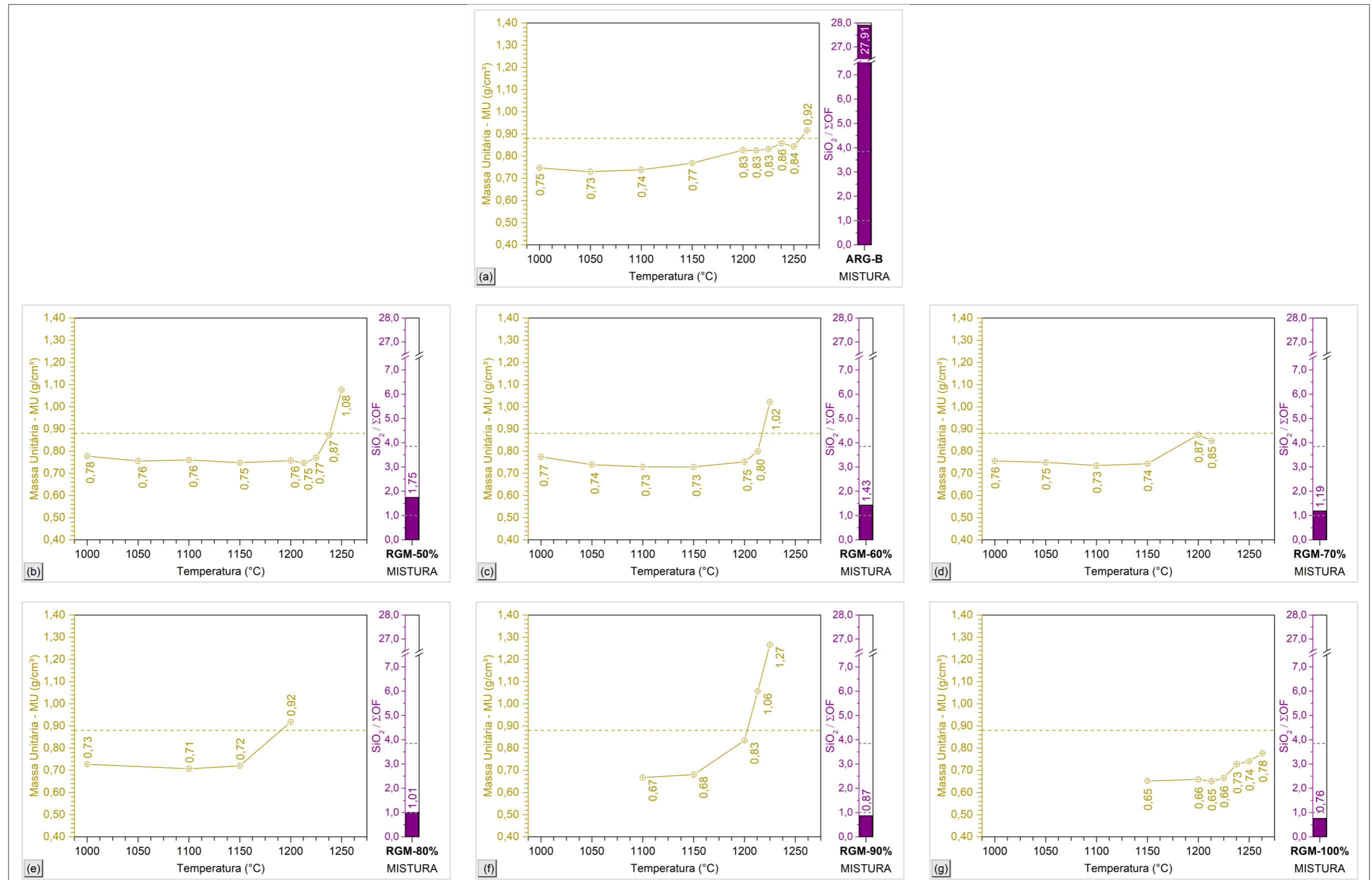


Figura 4.19 - Resultados do ensaio de massa unitária dos agregados triturados das misturas do grupo RGM's e respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF.

Verifica-se ainda que, quanto aos melhores resultados observados na propriedade de massa específica e absorção de água (Tabela 4.6) apenas os agregados RGM-70% a 1200°C e 1213°C e RGM-50% a 1238°C apresentam massas unitárias inferiores a 0,88 g/cm³. Esses agregados também possuem valores da relação SiO₂/ΣOF dentro do intervalo de 1,00 a 3,85. O melhor resultado observado no grupo RGM's foi o da mistura RGM-70% a 1213°C.

- Índice de inchaço e Perda de massa

O índice de inchaço e perda de massa dos agregados do grupo RGM's é apresentado na Figura 4.20, onde é possível observar que em geral os agregados não apresentaram inchaço e que o incremento de temperatura provocou maior retração dos agregado. A maior retração, ou seja, o menor valor de índice de inchaço observado foi de -17,8%, no agregado RGM-90% a 1225°C.

Analisando os melhores resultados apresentados na propriedade anterior (massa unitária), destaca-se que entre as misturas RGM-70% a 1200°C e a 1213°C e RGM-50% a 1238°C, o maior índice de inchaço foi observado na mistura RGM-70% a 1213°C, muito embora, essa ainda apresente índice de inchaço negativo (-4,0%), ou seja, os agregados retraíram menos que os demais.

Observou-se também que os agregados com 80%, 90% e 100% de RGM apresentaram um sutil inchaço nas temperaturas inferiores a 1150°C, com valores entre 0,1 e 2,0%, porém, esses agregados não registraram bons resultados quanto as demais propriedades analisadas. Quanto a perda de massa, verifica-se que as menores perdas são observadas na mistura com argila branca pura (ARG-B), 13% e que o incremento do teor de RGM nas misturas aumenta a perda de massa a até 28%, observada na mistura RGM-100%.

Nota-se também que o incremento de temperatura a partir de 1000°C não alterou a perda de massa nas misturas, que se manteve praticamente constante ($\pm 1\%$). Infe-re-se, nesse contexto, que a perda de massa foi provocada em temperaturas inferiores à 1000°C, e, possivelmente relacionados com as transformações observadas na análise de TG e DTA (item 4.1.4) onde a perda de massa registrada para os precursores ARG-B e RGM foram atribuídas principalmente à degradação da caulinita e calcita, respectivamente.

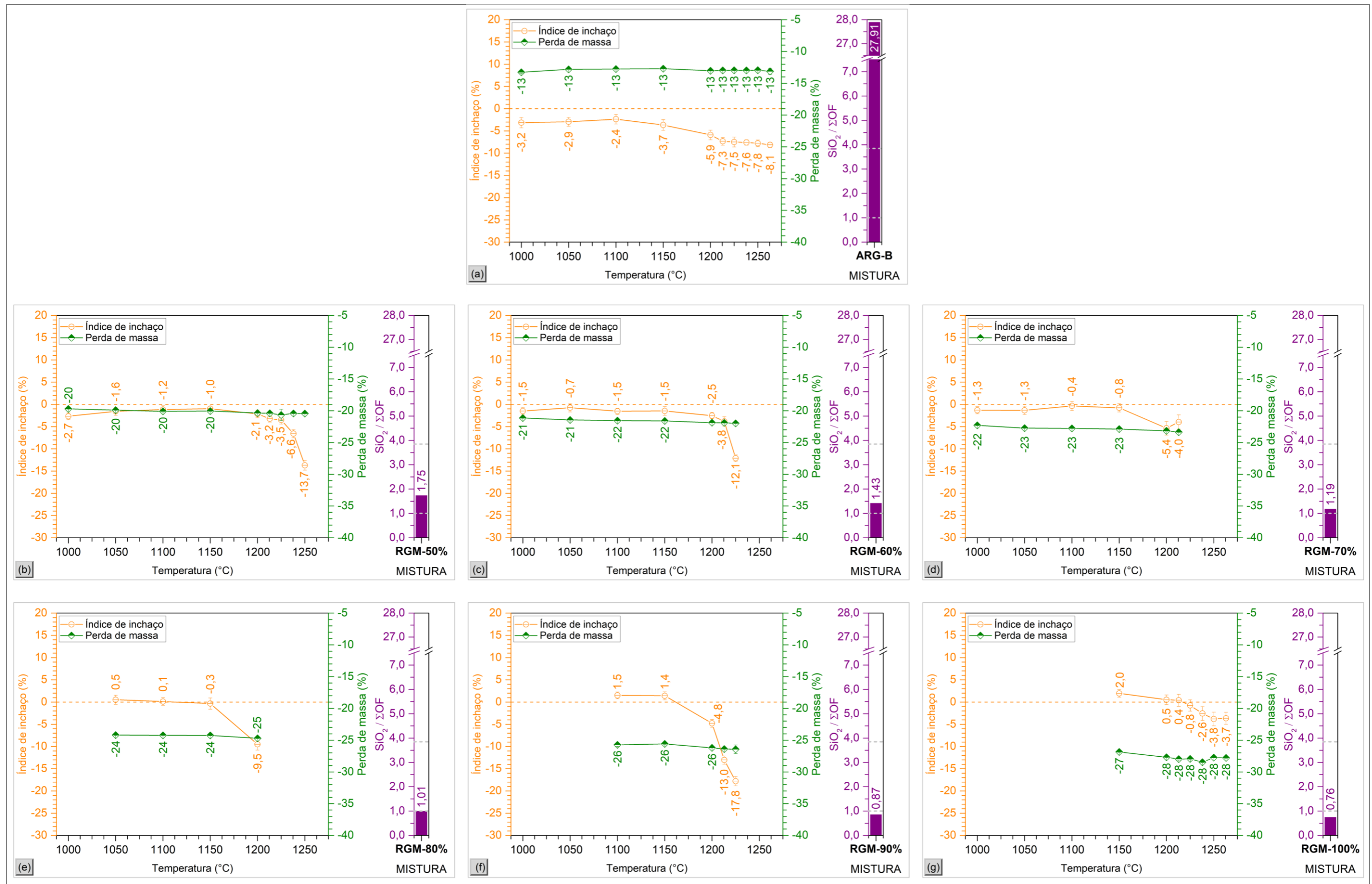


Figura 4.20 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RGM's e seus respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF.

Conclui-se que, apesar de não serem registrados inchaços significativos nos agregados do grupo RGM's, foi possível produzir agregados leves que atendem aos requisitos de massa específica e absorção água, com excelente resistência à tração. A partir da análise das diversas propriedades destacam-se os agregados das misturas RGM-70% a 1200°C e a 1213°C e RGM-50% a 1238°C, como os de melhor desempenho do grupo.

4.2.2 Agregados do grupo RBC-MF's – Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído no moinho de facas

- Índice de encolhimento

A Figura 4.21 apresenta os resultados de índice de encolhimento dos agregados do grupo RBC-MF's, onde pode ser observado que os agregados produzidos com 100% de argila vermelha (ARG-V) sofrem alto índice de encolhimento e que o incremento de resíduo na mistura diminuiu consideravelmente a retração dos agregados.

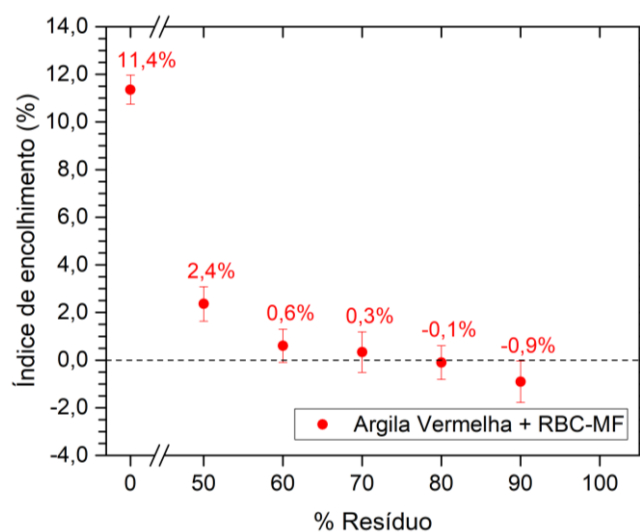


Figura 4.21 - Índice de encolhimento dos agregados do grupo RBC-MF's.

- Análise visual

Apresentam-se a seguir as imagens obtidas a partir da análise visual dos agregados produzidos das misturas ARG-V, RBC-MF-50%, RBC-MF-60%, RBC-MF-70%, RBC-MF-80% e RBC-MF-90% (Figura 4.22 a Figura 4.27). Onde pode

ser observado que esse grupo apresenta maior suscetibilidade a variação visual com o aumento de temperatura até 1200°C que o grupo RGM's (item 4.2.1).

As misturas com teores de 70% a 90% de RBC-MF, quando submetidos a temperaturas de até 1100°C, desintegraram. Infere-se, portanto, que possivelmente o tratamento térmico realizado não atingiu temperatura suficiente para que as transformações de fase resultassem em produtos resistentes.

Em geral as misturas sofreram a mesma alteração de coloração em relação as temperaturas de sinterização: a 1000°C e 1050°C apresentaram cor alaranjada, a 1100°C a cor variou entre laranja e marrom, e, a partir de 1150°C todos os agregados apresentaram cor marrom escuro.

Quanto às texturas, é possível observar a formação de uma casca de baixa porosidade e brilhosa a partir da temperatura de 1100°C nos agregados das misturas ARG-V, RBC-MF-50% e RBC-MF-60%, e, a partir de 1150°C nas misturas RBC-MF-70%, RBC-MF-80% e RBC-MF-90%, nota-se também que a casca desses agregados possuem coloração diferente do interior dos mesmos, e, essa variação de tons se torna mais sutil com o aumento do teor de resíduo.

Por outro lado, os agregados com menor teor de resíduo (50% a 70%) possuem a diferença entre casca e núcleo bem delineada, e, na mistura RBC-MF-50%, é possível verificar que o núcleo se desprende da casca formando um grande bolsão de ar dentro do agregado, entre o núcleo e a casca.

Ainda sobre a textura dos agregados, observa-se que com exceção dos agregados produzidos a partir de 100% de argila vermelha (ARG-V), que apresentaram uma casca lisa, todos os agregados produzidos a partir da sinergia entre a argila e o resíduo (RBC-MF), apresentaram uma casca rugosa, e, alguns agregados, em especial aqueles que apresentaram notório inchaço (ex. RBC-MF-50%), perderam o formato inicial, que era aproximadamente esférico.

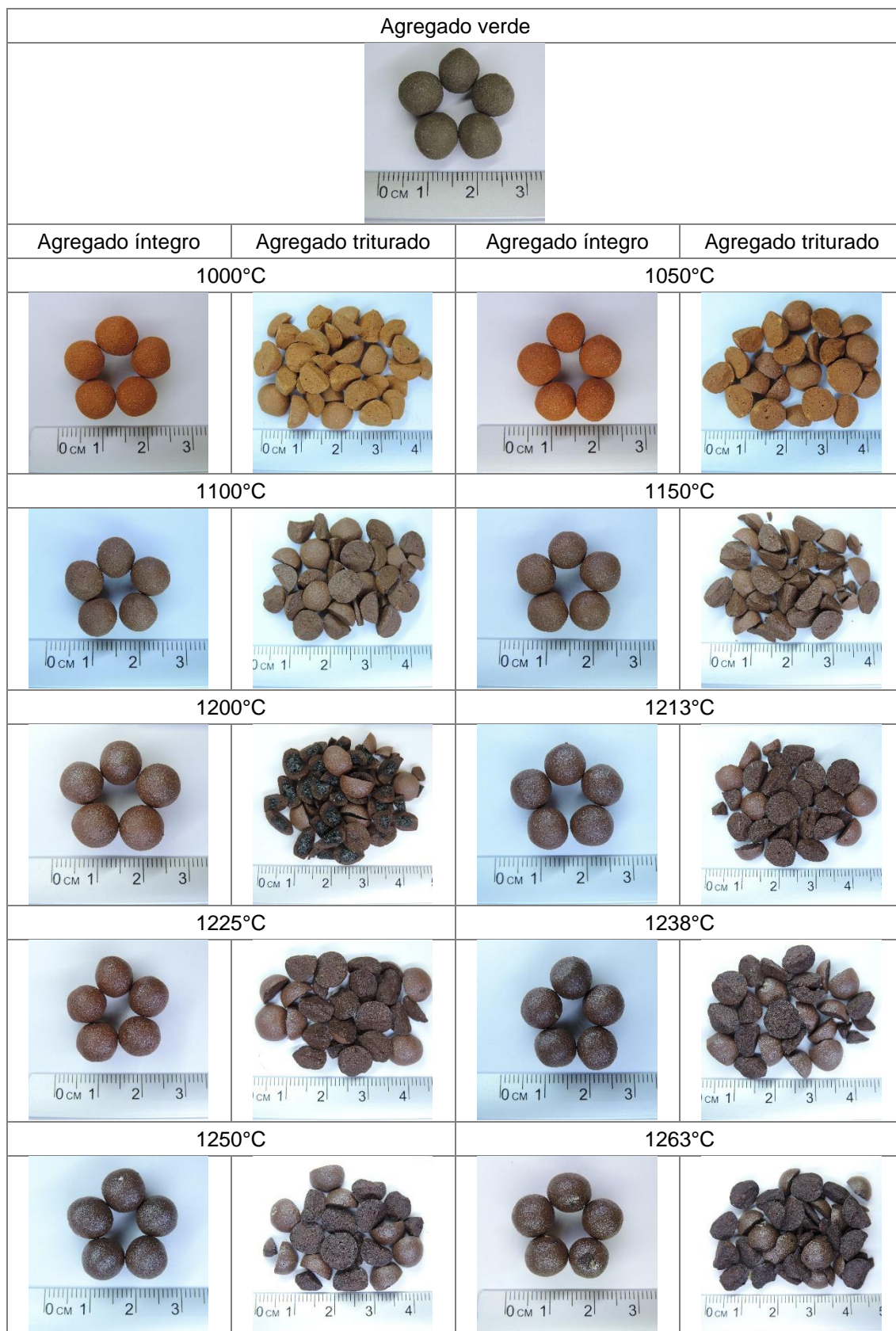


Figura 4.22 - Análise visual da mistura ARG-V.

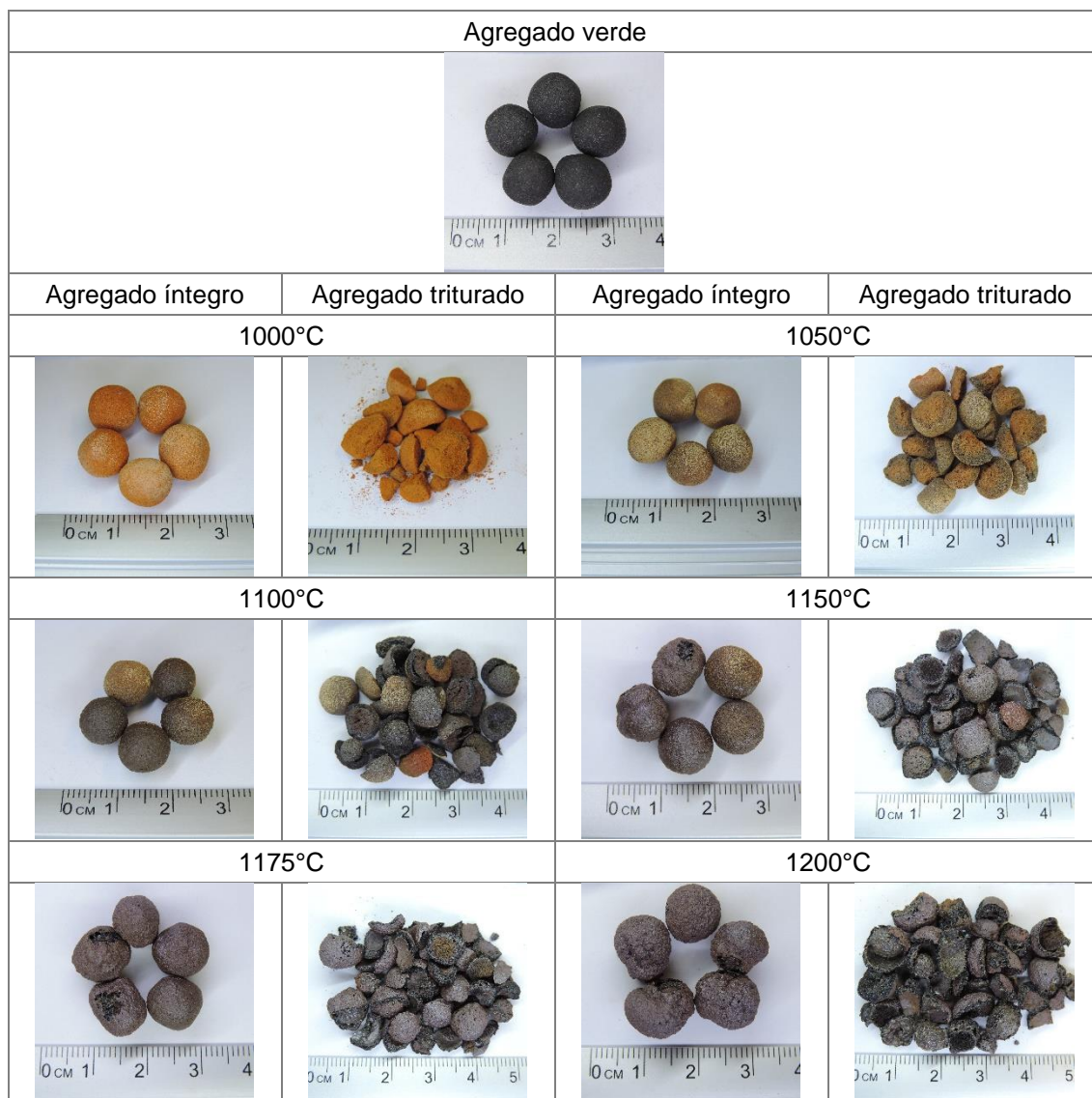


Figura 4.23 - Análise visual da mistura RBC-MF-50%.



Figura 4.24 - Análise visual da mistura RBC-MF-60%.









Agregado verde			
			
Agregado íntegro	Agregado triturado	Agregado íntegro	Agregado triturado
1000°C		1050°C	
			
1100°C		1150°C	
			
1175°C		1200°C	
			

Figura 4.25 - Análise visual da mistura RBC-MF-70%.







Agregado verde			
			
Agregado íntegro	Agregado triturado	Agregado íntegro	Agregado triturado
1000°C		1050°C	
			
1100°C		1150°C	
		 	
1175°C		1200°C	
 		 	

Figura 4.26 - Análise visual da mistura RBC-MF-80%.

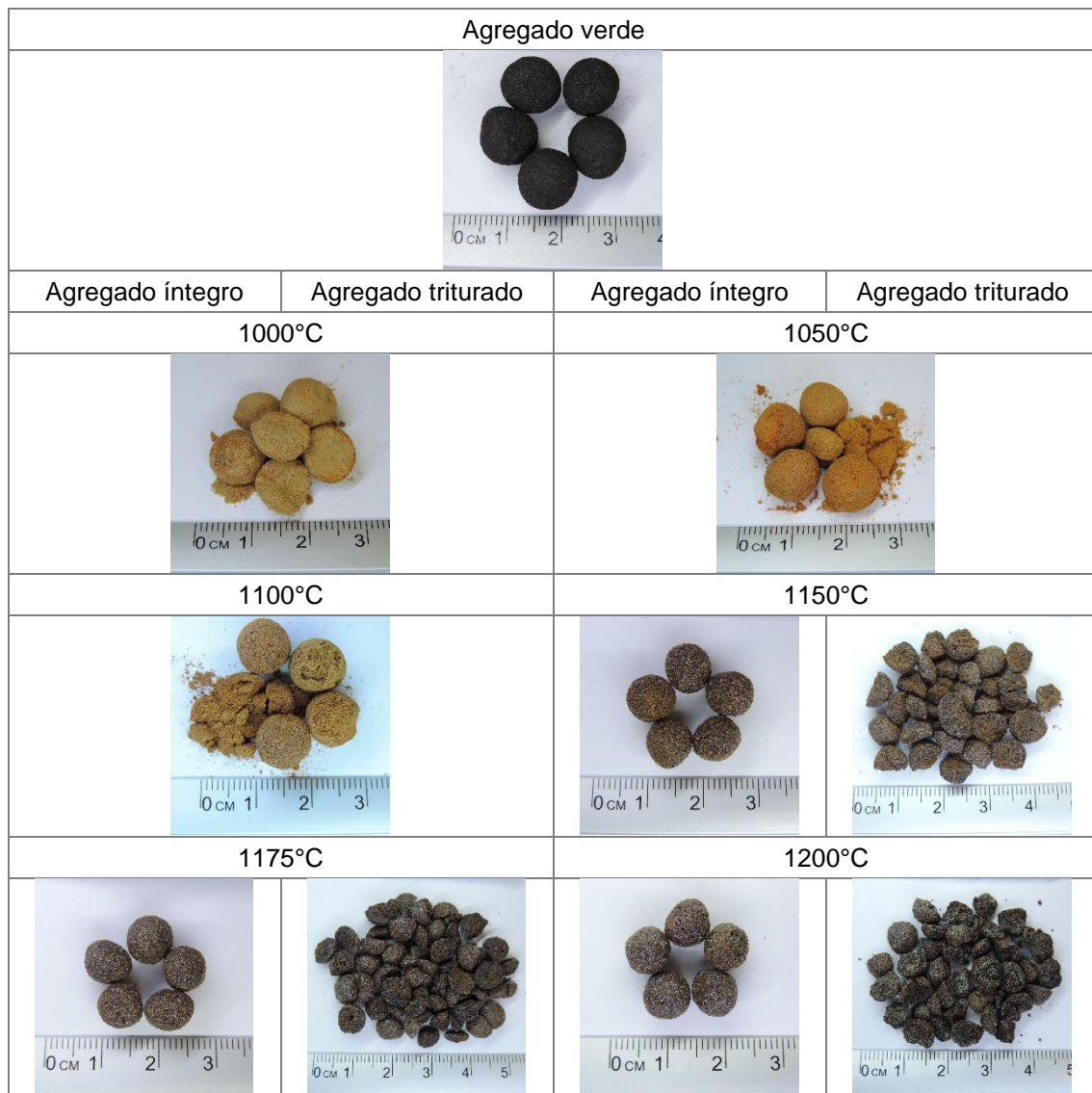


Figura 4.27 - Análise visual da mistura RBC-MF-90%.

- Massa específica aparente e absorção de água

A Figura 4.28 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica aparente e absorção de água para os agregados do grupo RBC-MF's. Pode ser observado que apenas os agregados de ARG-V apresentam valores superiores ao limite estabelecido para agregados leves de 2,00 g/cm³ (EN 13055, 2016), e, que mesmo nessa mistura, o tratamento térmico a partir de 1200°C, ocasionou a redução da massa específica aparente para valores inferiores ao respectivo limite.

Já quanto à absorção de água, a mistura ARG-V apresenta valores inferiores a 10%, e a partir da temperatura de 1100°C, a absorção cai ainda mais e apresenta valores entre 0% e 1%. Mostrando que provavelmente, a presença da argila vermelha contribui para a formação de uma casca de baixa porosidade responsável por diminuir a absorção de água desses agregados.

Todos os agregados desse grupo que passaram por sinterização a temperaturas a partir de 1100°C apresentam valores de absorção de água inferiores ao limite de 20% observado por Ayati *et al.* (2018), e a maioria apresenta valores inferiores ou muito próximos a 15%, valor apontado por Neville (2016) como normalmente observado em agregados de boa qualidade destinados ao uso em concretos estruturais.

Comparando o presente grupo (RBC-MF's) com o anterior (RGM's) verifica-se que o grupo RBC-MF's aponta resultados melhores quanto a massa específica aparente e absorção de água, principalmente em relação a esta última.

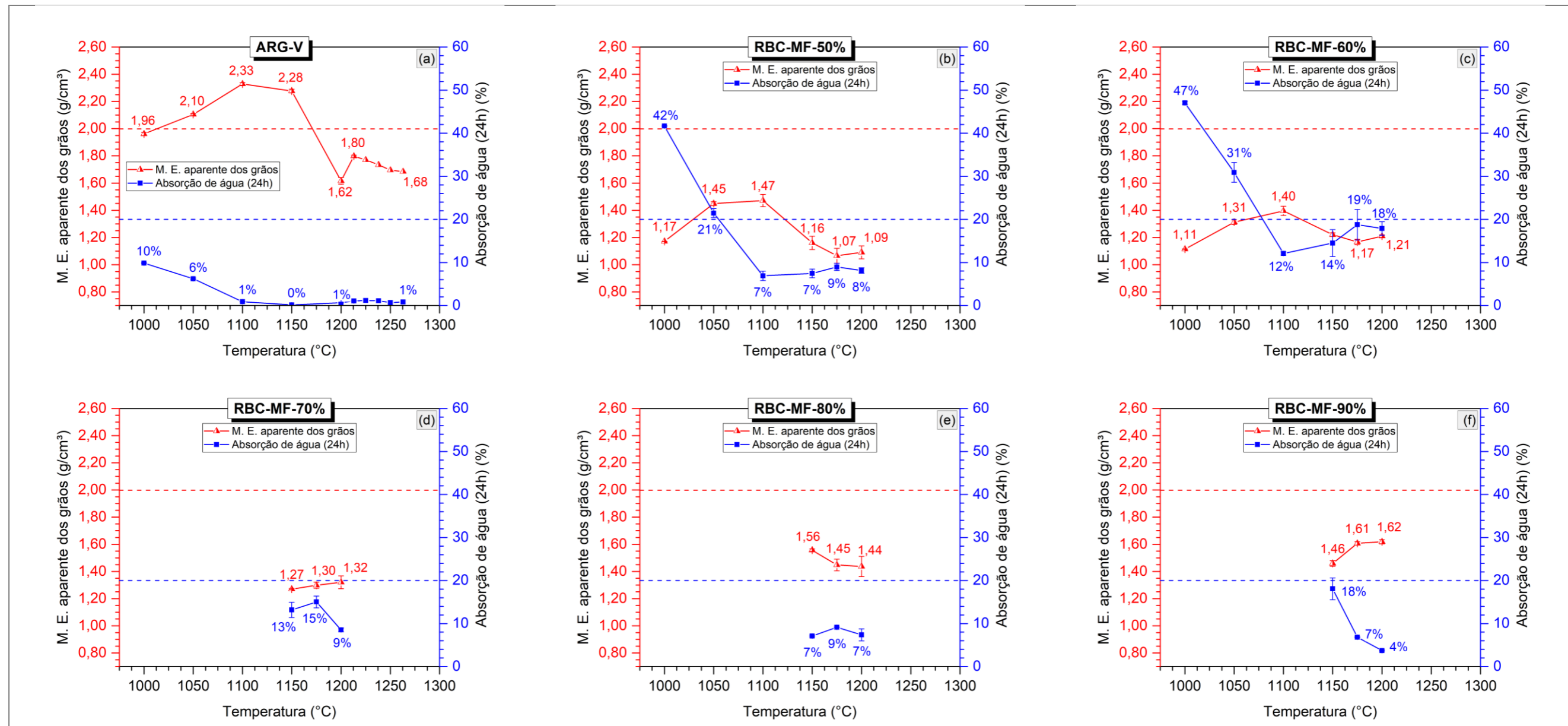


Figura 4.28 - Resultados dos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água (24h) dos agregados do grupo RBC-MF's.

O menor valor registrado para a massa específica aparente foi de 1,07 g/cm³ referente a mistura RBC-MF-50% sinterizada a 1175°C, que apresentou absorção de água de 9%. Destaca-se também os agregados RBC-MF-60% a 1175°C com massa específica aparente de 1,17 g/cm³ e absorção de água de 19%, e, os agregados RBC-MF-70% a 1150°C apresentando valores de 1,27 g/cm³ e 13%, para as mesmas propriedades.

- Módulo de deformação

A Figura 4.29 apresenta os valores de módulo de deformação dos agregados do grupo RBC-MF's, onde é possível verificar que exceto os agregados da mistura ARG-V sinterizados a 1050°C, 1100°C e 1150°C apresentam módulo de deformação superior ao intervalo de valores de referência dos agregados comercializados (Lytag, Solite, Liapor, Leca, Arlita e CINEXPAN, vide item 3.3.5.5), entre 3 e 35 GPa.

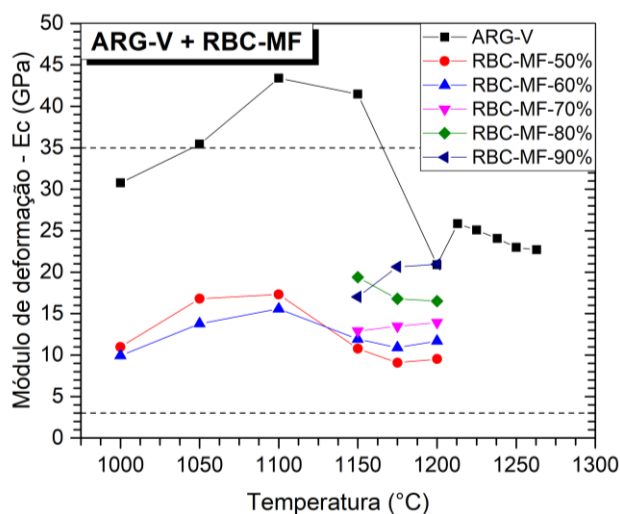


Figura 4.29 - Módulo de deformação dos agregados do grupo RBC-MF's

- Resistência à tração

A Figura 4.30 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RBC-MF's; neste grupo foram realizadas rupturas nas temperaturas de 1150°C, 1175°C e 1200°C. Observa-se que as resistências à tração alcançadas pelos agregados produzidos pela mistura de argila e resíduo são inferiores ao valor de referência, de 2,23 MPa.

Por outro lado, os agregados produzidos com apenas argila vermelha (ARG-V) foram bastante superiores. No gráfico os valores estão marcados com asterisco (*), pois, não foi possível aferir o valor de carga exato por exceder o limite do equipamento utilizado³. Porém, foi possível estimar que o valor de resistência à tração para este é superior a 28 MPa.

Entre os agregados produzidos pela mistura da argila e resíduo, os melhores resultados registrados foram do RBC-MF-50% a 1175°C e 1200°C, com 1,15 MPa e 1,05 MPa, respectivamente; o RBC-MF-80% a 1150°C, com 1,16 MPa; e, o RBC-MF-90% a 1150°C e 1175°C, com 1,43 MPa e 1,35 MPa, respectivamente. Os demais registraram valores inferiores a 0,85 MPa.

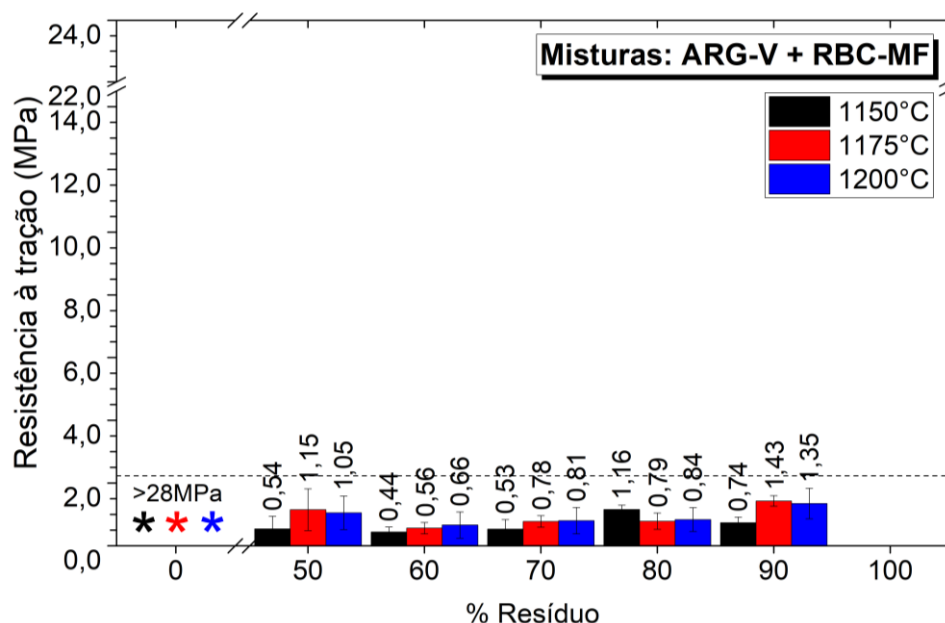


Figura 4.30 - Resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RBC-MF's.

Esses resultados que corroboram com a análise das propriedades de massa específica aparente e absorção de água apresentadas na Figura 4.28, pois, verifica-se que o aumento da resistência à tração está associado ao aumento da massa específica aparente desses agregados, corroborando com análises de autores anteriores (AYATI *et al*, 2018; NEVILLE, 2016).

³ O limite de carga do equipamento é de 2,5kN, como especificado no item 3.3.5.8, porém, o laboratório estabeleceu, por segurança, como carga máxima de trabalho o valor de 2,0kN. Ao atingir 2,0kN o ensaio foi finalizado e a resistência foi estimada com base nesse carregamento.

- Massa unitária (agregado triturado)

A Figura 4.31 apresenta a massa unitária dos agregados do grupo RBC-MF's, juntamente com os respectivos valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$. Nesta é possível observar que todos os agregados produzidos pela mistura de RBC-MF com argila vermelha (ARG-V) estão abaixo do valor de referência para massa unitária de agregados graúdos leves, de $0,88 \text{ g/cm}^3$ (ASTM C331, 2010).

Porém, nenhum dos agregados de ARG-V atendem ao requisito na norma. Já quando à relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$, apenas a mistura ARG-V, possui valor entre 1,00 a 3,85, (Tabela 3.4, item 3.3.1), as demais misturas registram valores inferiores a 1,00, ou seja, possuem um elevado teor de óxidos fundentes na mistura.

Os valores da relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ para as misturas de RBC-MF com argila, estão entre 0,73 e 0,51, sendo que, os melhores resultados de massa unitária foram registrados nas misturas RBC-MF-50% a 1175°C e 1200°C , com $0,62 \text{ g/cm}^3$ e $0,58 \text{ g/cm}^3$, respectivamente; e, RBC-MF-60% a 1000°C e 1175°C , com $0,62 \text{ g/cm}^3$.

Observa-se que a propriedade de massa unitária, em geral, acompanha a tendência já observada na análise da massa específica, ou seja, valores mais baixos de massa específica, também registram valores baixos para a massa unitária. Outrossim, para a maioria dos agregados o aumento de temperatura resultou em diminuição da massa unitária, e, o inverso significa que houve densificação do agregado, o que foi registrado na mistura RBC-MF-90%, de menor valor de relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$, 0,51.

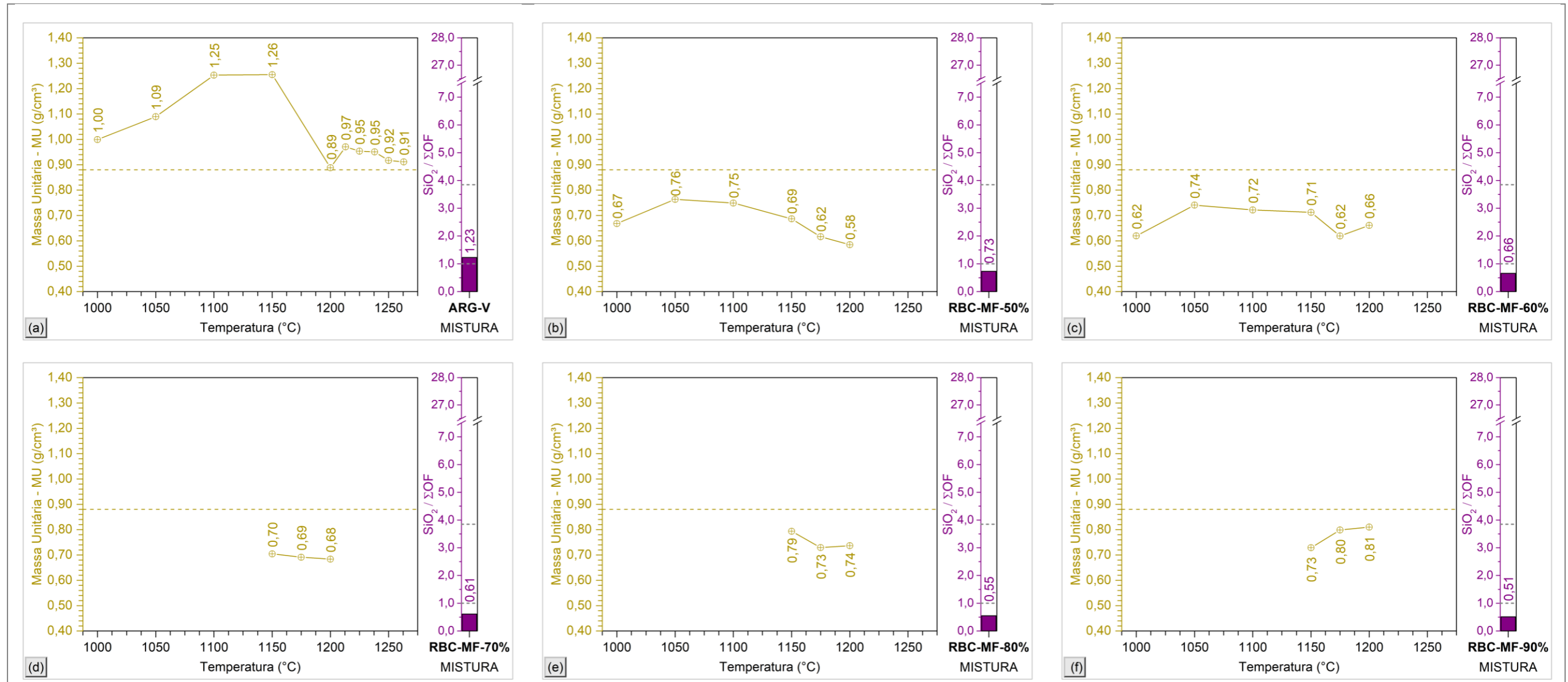


Figura 4.31 - Resultados do ensaio de massa unitária dos agregados triturados das misturas do grupo RBC-MF's e respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF.

- Índice de inchaço e Perda de massa

O índice de inchaço e perda de massa dos agregados do grupo RBC-MF's são apresentados na Figura 4.32, onde é possível observar que, em geral, os agregados não apresentaram inchaço e o incremento de temperatura provocou maior retração dos agregado. A exceção é o agregado da mistura ARG-V, que apresentou inchaço significativo, da ordem de 8%, na temperatura de 1200°C.

Verifica-se na Figura 4.32 que um menor valor da relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ está associado a maiores valores de retração. Os agregados com maior teor de resíduo e menor valor da respectiva relação, a mistura RBC-MF-90%, apresenta maior retração em relação aos demais. O valor mais baixo registrado para o índice de inchaço (maior retração) foi de -27%. Por outro lado, a mistura RBC-MF-50% apresentou os menores valores de retração entre as misturas binárias, o índice de inchaço foi de -1,8% e -3,7%, quando submetidos a temperatura de 1150° e 1175°C respectivamente.

O incremento do resíduo nas misturas provocou aumento considerável da perda de massa nas misturas, enquanto os agregados de argila vermelha pura (ARG-V) registram perda de massa de 10%±1%, as misturas com resíduo (RBC-MF) apresentam valores entre 23% e 37%, relacionadas com teor de matéria orgânica e alto teor de umidade da mistura. Sendo a maior perda de massa registrada na mistura com maior teor de resíduo, a mistura RBC-MF-90%.

A maior perda de massa na mistura RBC-MF-90% corrobora com a análise térmica do resíduo RBC-MF (item 4.1.4), que registrou um evento exotérmico a 321°C indicando, possivelmente, um alto teor de matéria orgânica. A perda de massa a 1000°C desse resíduo também foi a mais alta registrada entre os materiais precursores da pesquisa, com 32% de perda.

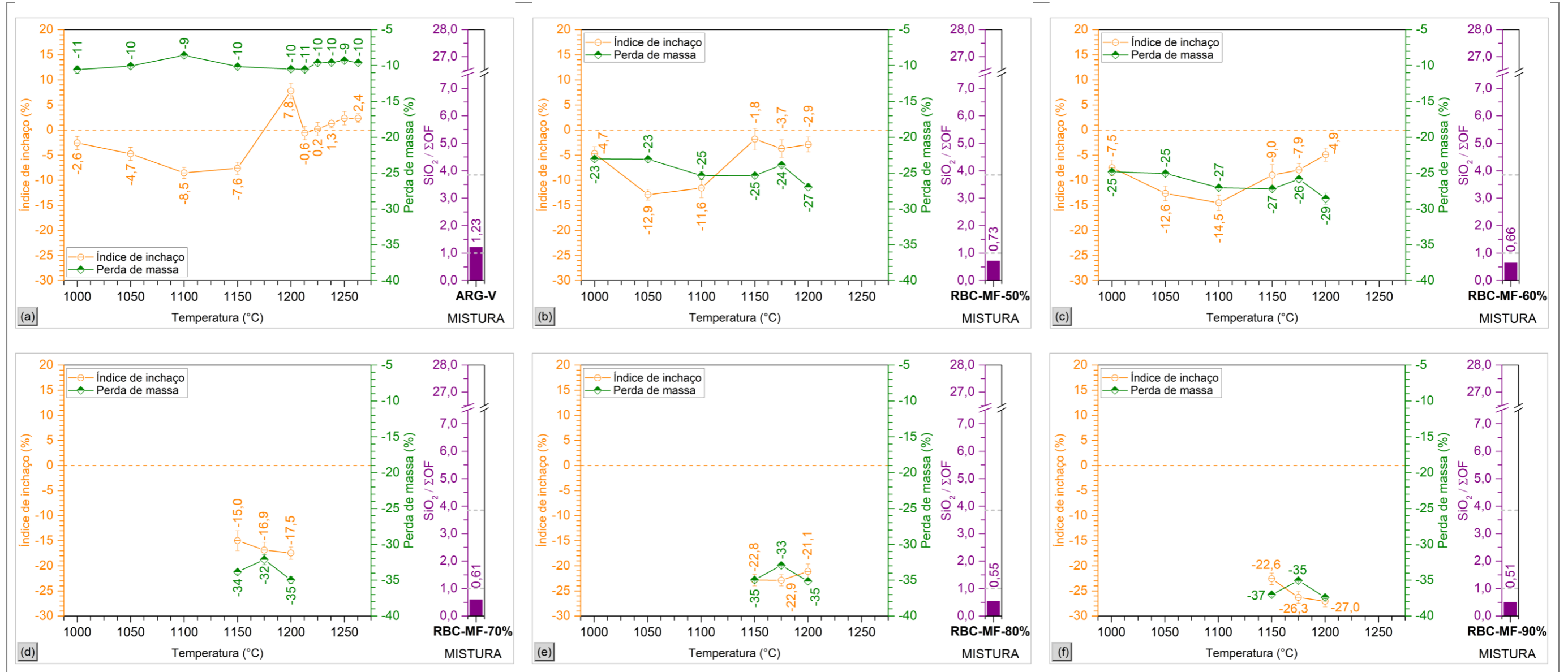


Figura 4.32 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RBC-MF's e seus respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF.

Conclui-se que, apesar de não serem registrados inchaços significativos nos agregados do grupo RBC-MF's, foi possível produzir agregados leves que atendem aos requisitos de massa específica, absorção água e massa unitária, com excelentes resultados, no entanto, os agregados desse grupo apresentam as resistências à tração mais baixas entre os agregados analisados.

A partir da análise das diversas propriedades destacam-se os agregados da mistura RBC-MF-50% a 1175°C, RBC-MF-60% a 1175°C e RBC-MF-70% a 1150°C como os de melhor desempenho do grupo, ressaltando-se, que todos os agregados do presente grupo produzidos pela sinergia argila e resíduo apresentaram excelentes resultados quanto a massa específica aparente, absorção de água e massa unitária, porém, baixas resistências à tração.

4.2.3 Agregados do grupo RBC-MB's – Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído no moinho de bolas

A seguir são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados nas misturas RBC-MB-50%, RBC-MB-60%, RBC-MB-70%, RBC-MB-80%, RBC-MB-90% e RBC-MB-100%. Resultados da mistura ARG-V podem ser vistos em alguns gráficos (propriedades) apenas para facilitar a visualização e comparação entre as misturas do presente grupo, porém, a apresentação completa da mistura está contida no item do grupo RBC-MF's (item 4.2.2).

- Índice de encolhimento

A Figura 4.33 apresenta os resultados de índice de encolhimento dos agregados do grupo RBC-MB's, onde pode ser observado assim como no grupo anterior (RBC-MF's), que o incremento de resíduo proporcionou redução da retração. Porém, essa influência parece ter sido mais forte para o resíduo RBC-MF, pois, na mistura com 50% desse (RBC-MF-50%) o índice de encolhimento, em relação aos agregados de ARG-V, já havia caído de 11,4% para 2,4%, e, o índice para a mistura com mesmo teor de RBC-MB (RBC-MB-50%) é de 8,7%.

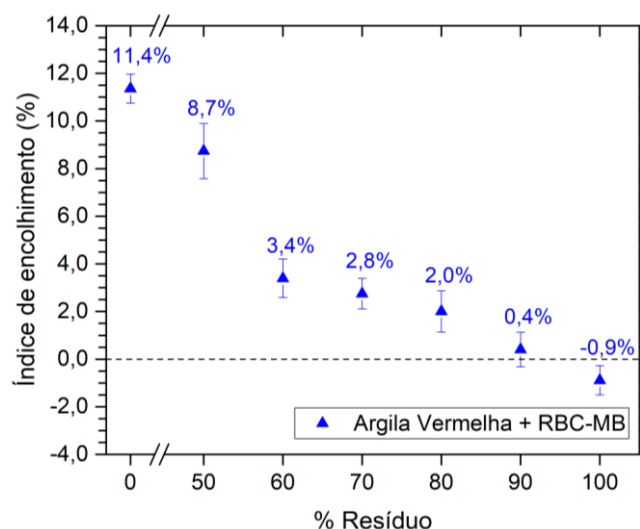


Figura 4.33 - Índice de encolhimento dos agregados do grupo RBC-MB's.

Muito embora o RBC-MB e o RBC-MF apresentem certo teor de matéria orgânica, o alto teor de sílica pode ter sido preponderante para conter a retração dos agregados, e, a diferença de granulometria (item 4.1.1), pode explicar o melhor desempenho na diminuição da retração do RBC-MF. Além do RBC-MB ser mais fino, possui maior plasticidade, o que pode gerar maior retração.

- Análise visual

Apresentam-se a seguir as imagens obtidas a partir da análise visual dos agregados produzidos a partir das misturas RBC-MB-50%, RBC-MB-60%, RBC-MB-70%, RBC-MB-80%, RBC-MB-90% e RBC-MB-100%. Onde pode ser observado que, em geral, os agregados sinterizados a 1000°C apresentam coloração laranja e com o incremento de temperatura vão passando por colorações mais esbranquiçadas ou acinzentadas e por fim passam para um marrom bem escuro.

Os agregados com 100% de resíduo (RBC-MB-100%) apresentam cores mais claras que as demais misturas do grupo, e, essa foi a única mistura do grupo, na qual, não foram observados agregados com formação de casca brilhosa de baixa porosidade. Outrossim, esses agregados apresentam fissuras quando submetidos a temperaturas superiores a 1150°C.

Em relação ao grupo anterior (RBC-MF's), os agregados produzidos com RBC-MB apresentam uma casca de textura menos rugosa, mas alguns

agregados também perderam sua esfericidade. Os agregados da mistura RBC-MB-50%, quando sinterizados a 1200°C, apresentaram grande deformação, formação de uma casca vítrea, brilhosa e bastante lisa.

Além disso, esses agregados apresentaram certo derretimento e aderiram parcialmente a placa refratária, e, na remoção desses ocorreu desgaste parcial de alguns agregados. Também não foi possível manter a identificação dos agregados pela referência de localização (item 3.3.4) impedindo a realização dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa, que envolvem valores medidos antes e depois da queima em cada agregado.

Ressalta-se nesse contexto que a mistura RBC-MB-50% é a que possui maior teor de óxidos fundentes entre as misturas do grupo, conseqüentemente, apresenta a menor relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$, o que pode ter contribuído para a diminuição da temperatura na qual ocorre o derretimento da mistura e explicar por que o fenômeno não foi observado na mesma intensidade nas demais misturas quando sinterizadas na mesma temperatura (1200°C).

A mudança de coloração entre a casca e o núcleo é visível em todas as misturas do grupo, sendo mais sutil para os agregados com 100% de resíduo (RBC-MB-100%). Em geral o interior do núcleo se apresenta bastante escuro (próximo a cor preta). Assim como no grupo anterior, verifica-se em diversos agregados, a formação de um núcleo esférico que se desprende da casca vítrea formando um grande bolsão de ar dentro do agregado.

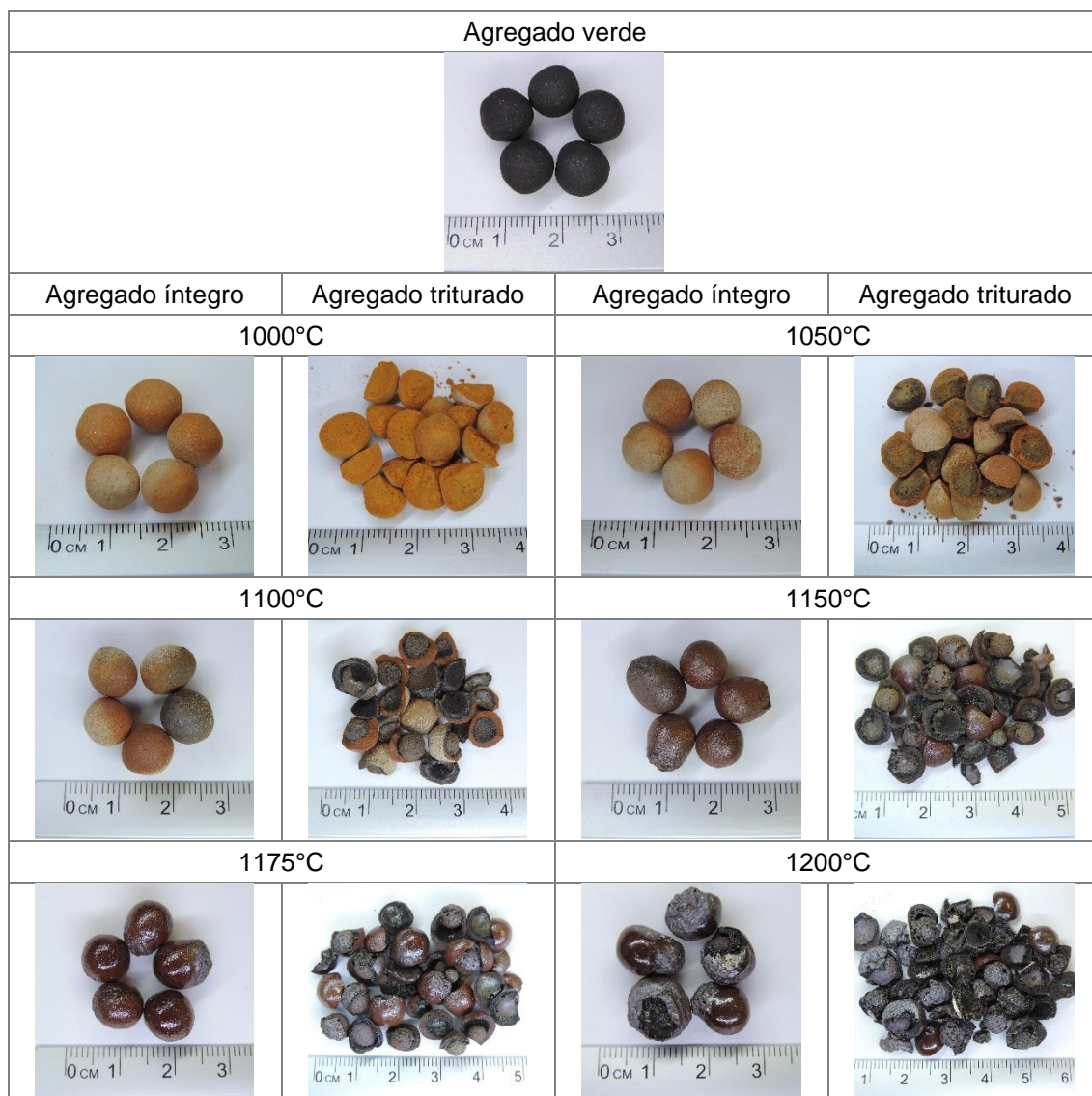


Figura 4.34 - Análise visual da mistura RBC-MB-50%.

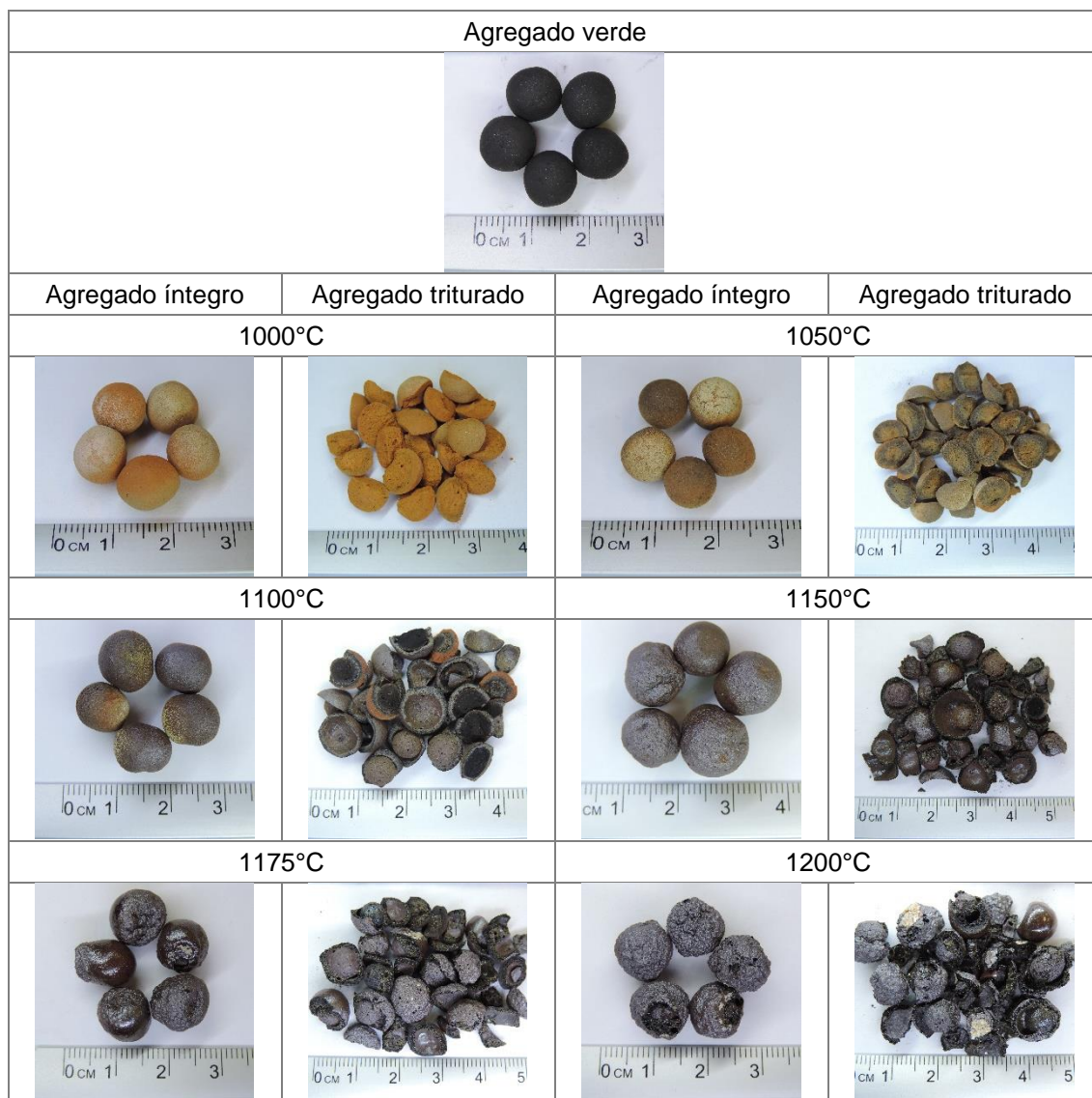


Figura 4.35 - Análise visual da mistura RBC-MB-60%.

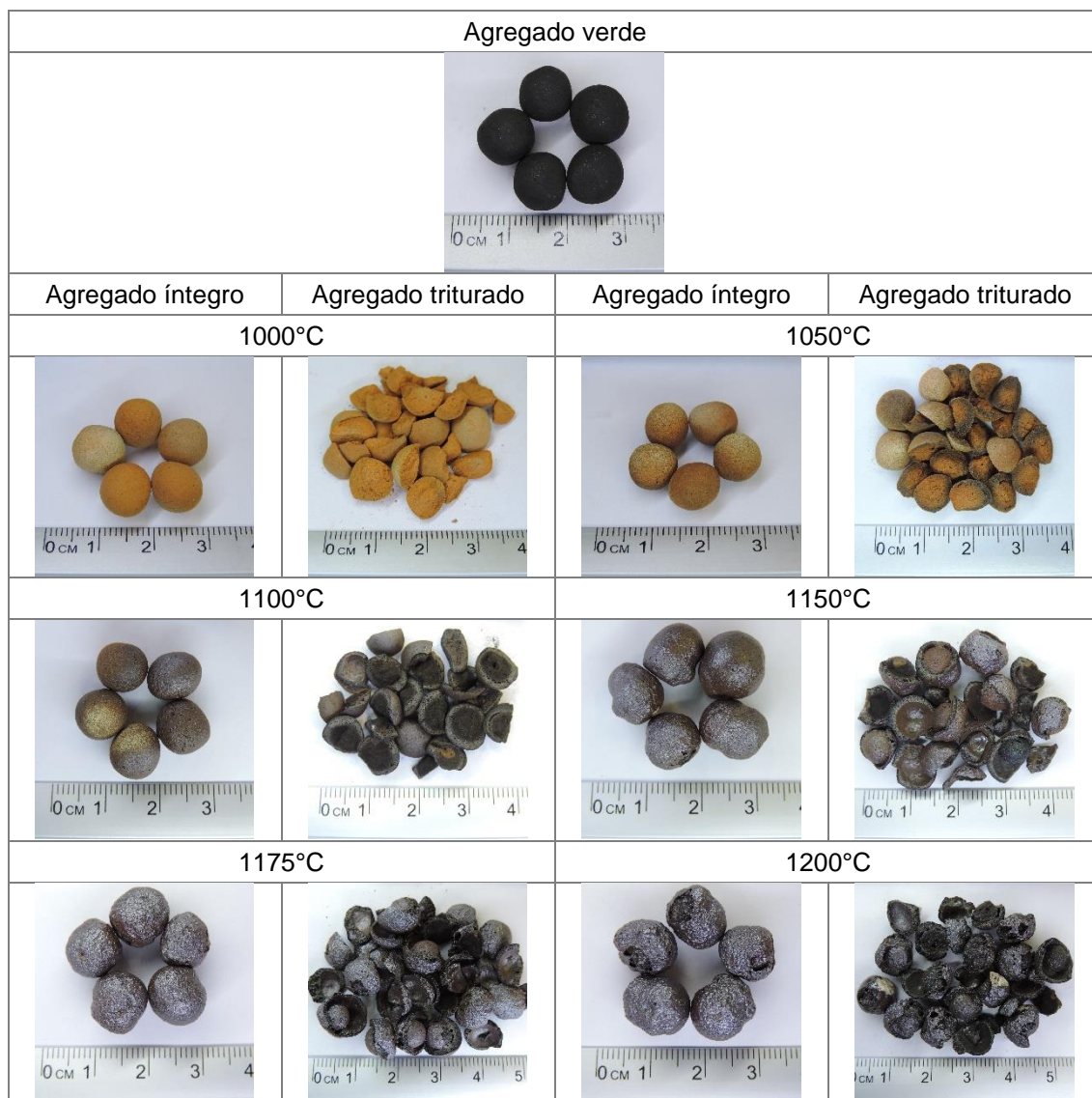


Figura 4.36 - Análise visual da mistura RBC-MB-70%.



Figura 4.37 - Análise visual da mistura RBC-MB-80%.

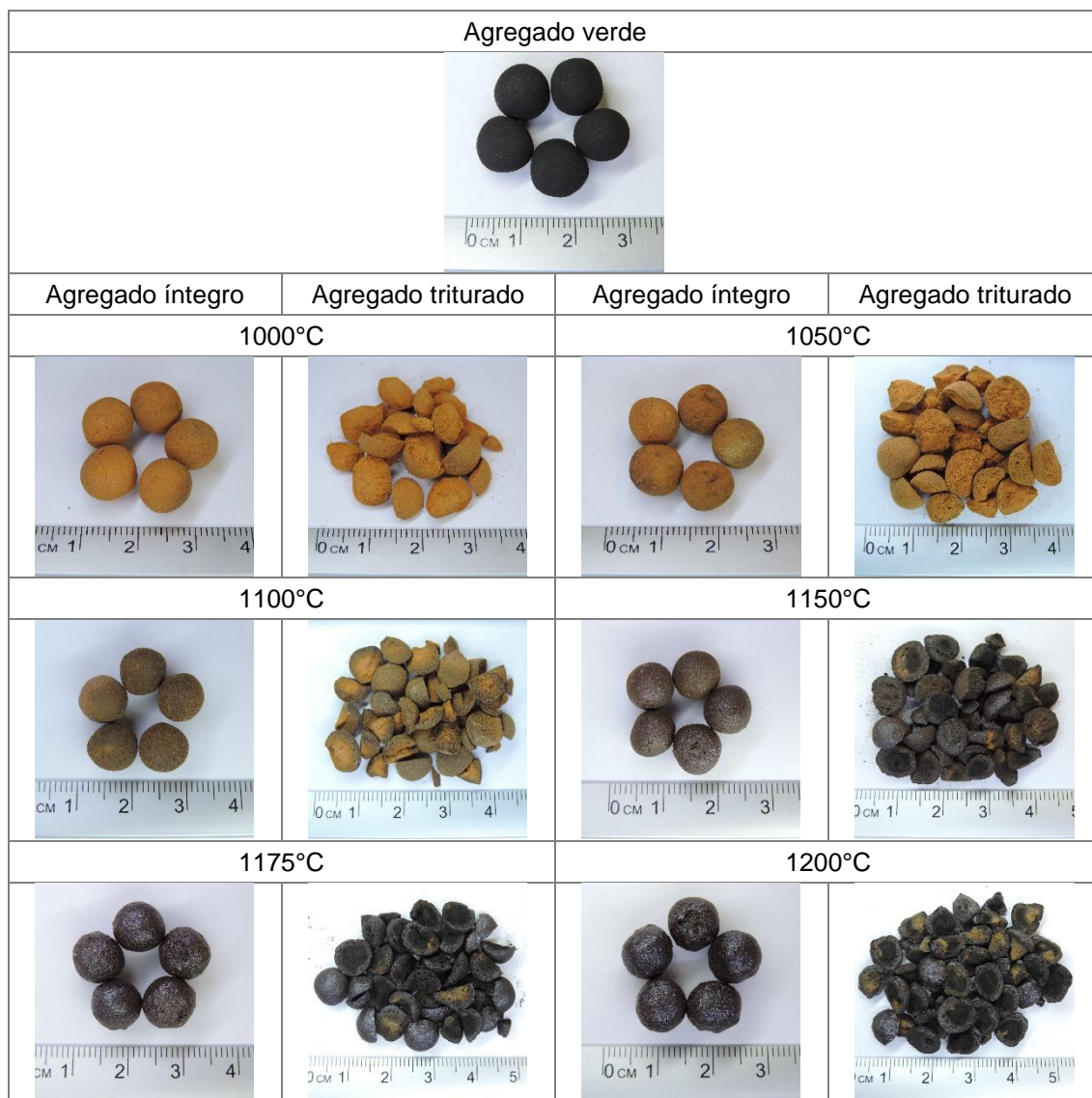


Figura 4.38 - Análise visual da mistura RBC-MB-90%.

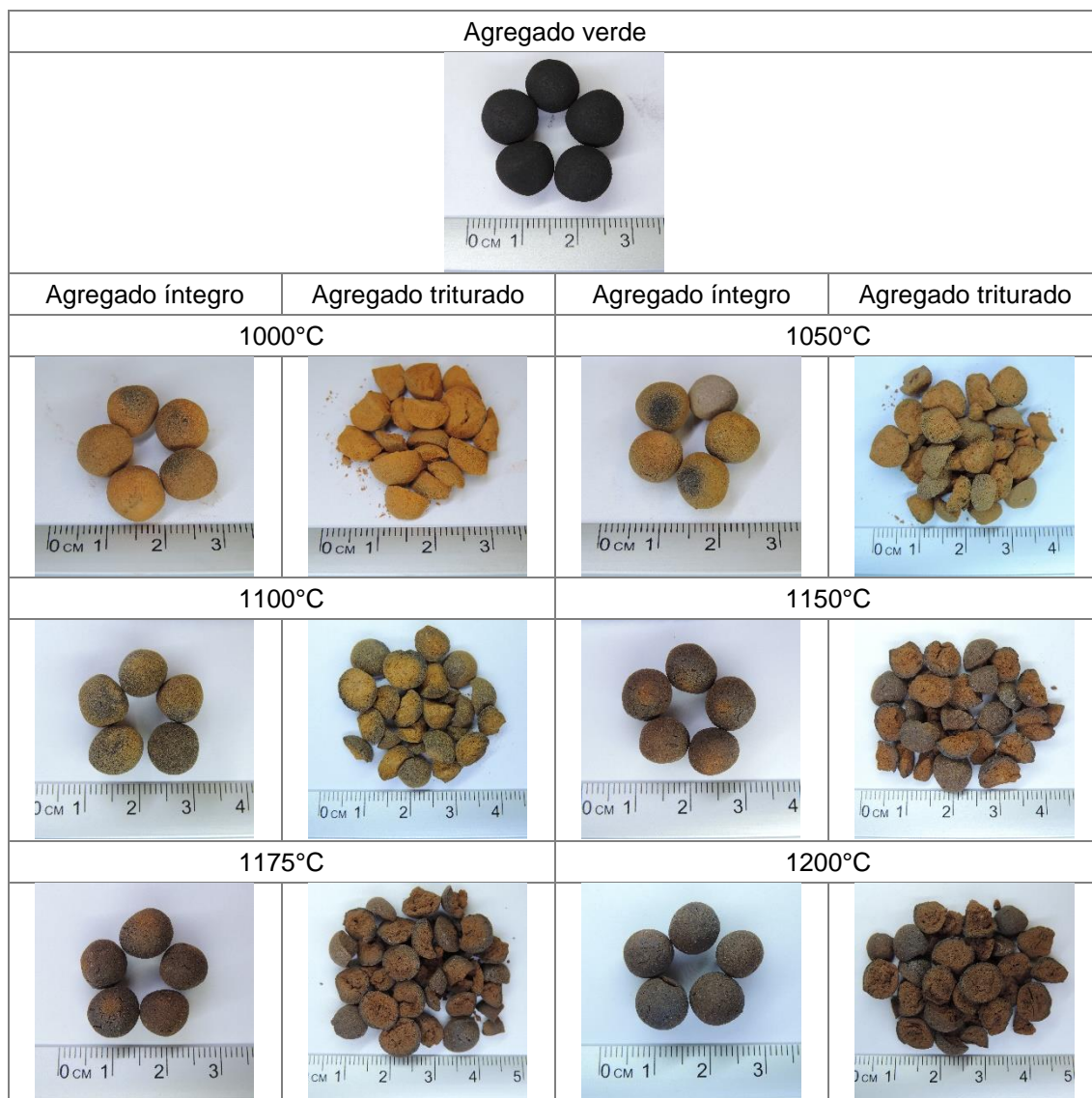


Figura 4.39 - Análise visual da mistura RBC-MB-100%.

- Massa específica e absorção de água

A Figura 4.40 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água para os agregados do grupo RBC-MB's. Onde pode ser observado que todas as misturas apresentam valores inferiores ao limite estabelecido para agregados leves de $2,00 \text{ g/cm}^3$ (EN 13055, 2016). E que, exceto a mistura RBC-MB-100%, todas as misturas apresentam agregados que atendem ao limite de absorção de água de 20% observado por Ayati *et al.* (2018).

Entre as misturas com teor entre 50% a 90% de RBC-MB, todos os agregados que passaram por sinterização a temperaturas a partir de 1150°C apresentam valores inferiores a 15%, valor apontado por Neville (2016) como normalmente observado em agregados de boa qualidade destinados ao uso em concretos estruturais.

Verifica-se que o incremento de resíduo corroborou para uma diminuição da massa específica aparente e aumentou absorção de água dos agregados, porém, mesmo gerando esse aumento, observa-se que a maioria dos agregados atendem simultaneamente os requisitos de agregado leve, em relação as propriedades analisadas neste tópico.

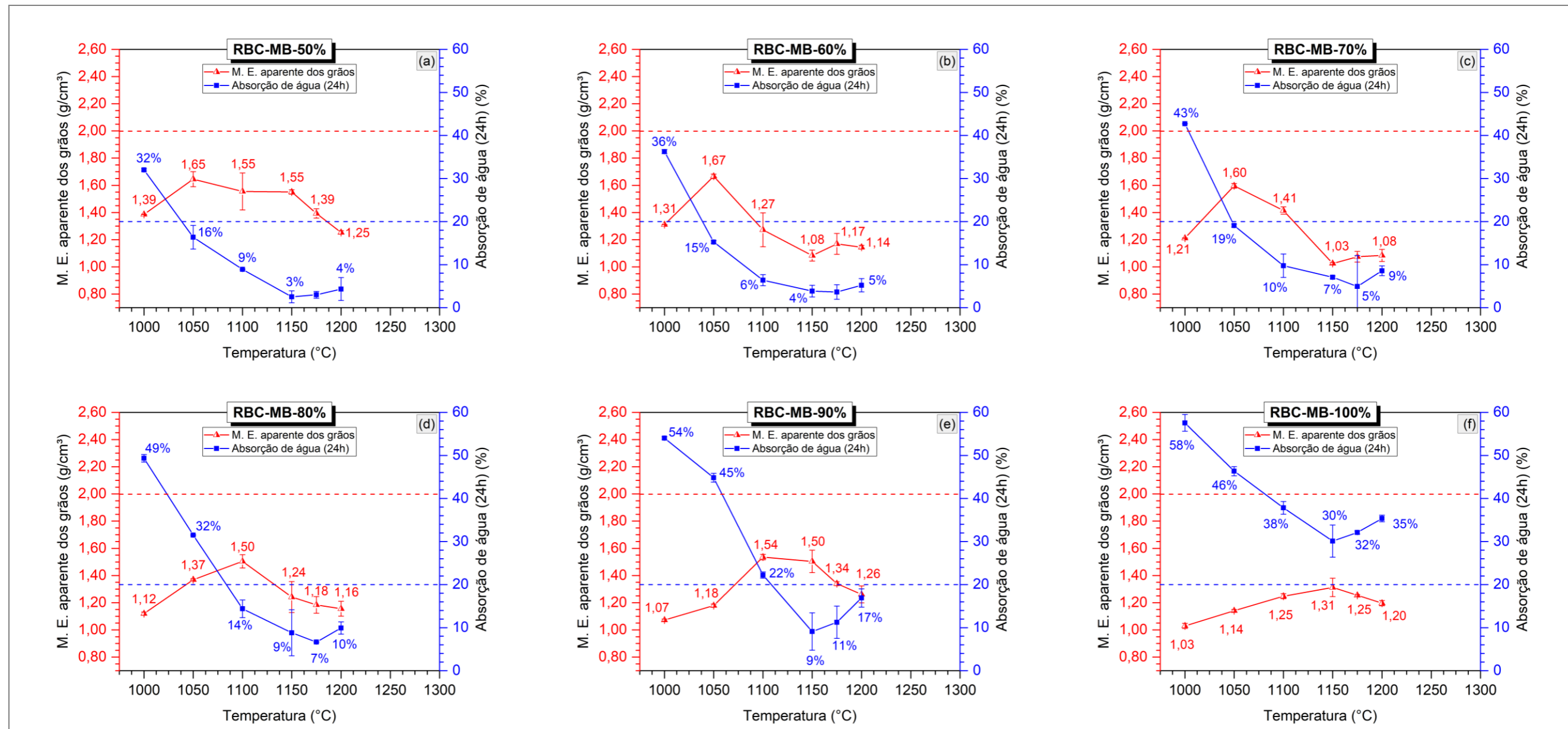


Figura 4.40 - Resultados dos ensaios de massa específica aparente dos grãos e absorção de água (24h) dos agregados do grupo RBC-MB's.

A Tabela 4.8 apresenta um resumo dos agregados com massa específica aparente inferior $1,11 \text{ g/cm}^3$ (referência do agregado comercializado AE-1506, item 3.3.5.4) e absorção inferior a 20%, destacando-se os excelentes resultados apresentados pelos agregados pro presente grupo. Onde o menor valor registrado para a massa específica aparente foi de $1,03 \text{ g/cm}^3$ referente a mistura RBC-MB-70% sinterizada a 1150°C , que apresentou absorção de água de 7%, sendo o agregado de melhor desempenho do grupo, nessas propriedades.

Tabela 4.8 – Resumo dos melhores resultados de massa específica aparente e absorção de água do grupo RBC-MB's.

Mistura	Temperatura	Massa específica aparente	Absorção de água
RBC-MB-60%	1150°C	$1,08 \text{ g/cm}^3$	4%
	1150°C	$1,03 \text{ g/cm}^3$	7%
RBC-MB-70%	1175°C	$1,07 \text{ g/cm}^3$	5%
	1200°C	$1,08 \text{ g/cm}^3$	9%

▪ Módulo de deformação

A Figura 4.41 apresenta os valores de módulo de deformação dos agregados do grupo RBC-MB's e também dos agregados da mistura ARG-V, apenas para complementar a informação, onde é possível verificar que todos os agregados desse grupo se apresentam dentro do intervalo de valores de módulo de elasticidade dos agregados comercializados, entre 3 e 35 GPa, e, abaixo dos valores registrados para os agregados produzidos com 100% de argila vermelha.

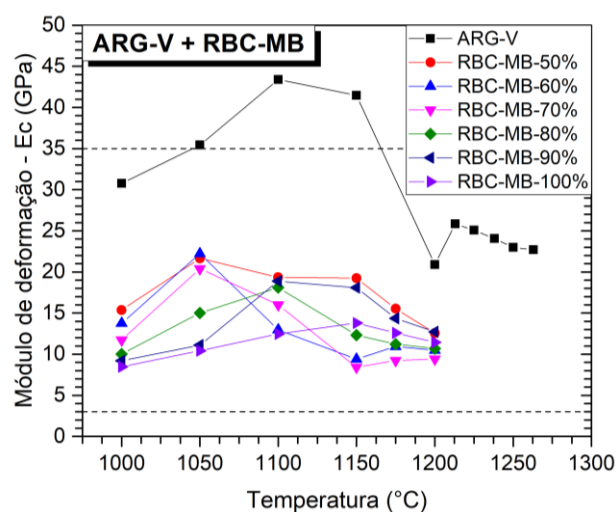


Figura 4.41 - Módulo de deformação dos agregados do grupo RBC-MB's.

- Resistência à tração

A Figura 4.42 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RBC-MB's nas temperaturas de 1150°C, 1175°C e 1200°C, e, para complementar o gráfico os resultados da ARG-V também são apresentados. Onde, verifica-se que as combinações binárias de argila e RBC-MB, apresenta resistências ligeiramente maiores que o grupo anterior (RBC-MF's), porém, em geral, os agregados também apresentam valores inferiores em relação a referência de 2,23 MPa (AE-1506 - item 3.3.5.8).

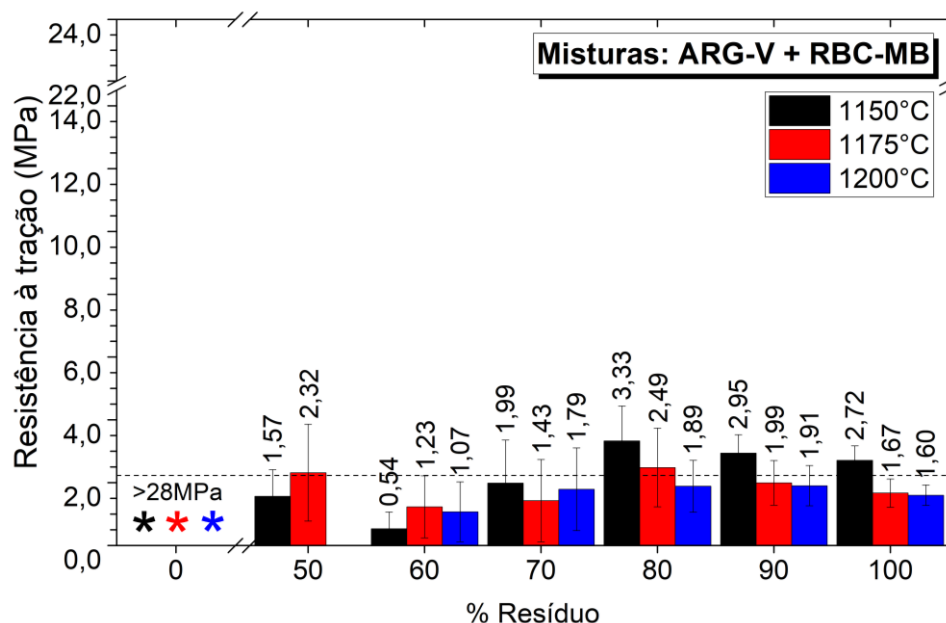


Figura 4.42 - Resultados do ensaio de resistência à tração realizado nos agregados do grupo RBC-MB's.

Na Tabela 4.9 é apresentado um resumo com os melhores resultados (acima de 1,90 MPa) do presente grupo, registrando 5 ocorrências superiores à referência de 2,23 MPa.

Tabela 4.9 – Melhores resultados de resistência à tração do grupo RBC-MB's.

Mistura	Temperatura	Resistência à tração
RBC-MB-50%	1175°C	2,32 MPa
RBC-MB-70%	1150°C	1,99 MPa
RBC-MB-80%	1150°C	3,33 MPa
	1175°C	2,49 MPa
RBC-MB-90%	1150°C	2,95 MPa
	1175°C	1,99 MPa
	1200°C	1,91 MPa
RBC-MB-100%	1150°C	2,72 MPa

A maior resistência à tração registrada foi da mistura RBC-MB-80% a 1150°C, com 3,33 MPa, porém, considerando as propriedades anteriormente analisadas, essa apresentou desempenho inferior a mistura RBC-MB-70% sinterizada na mesma temperatura, e que apresenta resistência de 1,99 MPa, ressaltando-se porém que todos os agregados apresentados na Tabela 4.9, exceto o RBC-MB-100%, apresentam simultaneamente massa específica aparente inferior a 2,00 g/cm³ e a absorção de água inferior à 20%.

- Massa unitária (agregado triturado)

A Figura 4.43 apresenta a massa unitária dos agregados do grupo RBC-MB's, juntamente com os respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF, por mistura. Observa-se que todos os agregados do grupo registram valores inferiores a 0,88 g/cm³, limite superior para agregados leves graúdos (ASTM C331, 2010), exceto os da mistura RBC-MB-60% a 1050°C de massa unitária de 0,90 g/cm³.

Quanto à relação SiO₂/ΣOF, apenas as misturas RBC-MB-90% e RBC-MB-100% estão fora do intervalo entre 1,00 a 3,85 (Tabela 3.4, item 3.3.1), com relações de 3,91 e 4,51, respectivamente. Os melhores resultados para a propriedade de massa unitária foram observados na mistura RBC-MB-70%, com relação de 3,00, e, massa unitária de 0,55 g/cm³, quando sinterizados à 1150°C e 1175°C e 0,57 g/cm³ à 1200°C.

Os agregados das misturas RBC-MB-60% a 1150°C e RBC-MB-80% a 1175°C, também apresentam as massas unitárias mais baixas registradas no grupo, com valores de 0,60 g/cm³ e 0,61 g/cm³, respectivamente. Observa-se que a propriedade de massa unitária, em geral, acompanha a tendência já observada na análise da massa específica, ou seja, valores mais baixos de massa específica, também registram valores baixos para a massa unitária.

A mistura de melhor desempenho do grupo quanto a massa unitária foi a RBC-MB-70%, sinterizada a 1150°C e 1175°C, ressaltando que os agregados sinterizados a 1150°C obteve desempenho superior aos da temperatura de 1175°C, nas propriedades já analisadas.

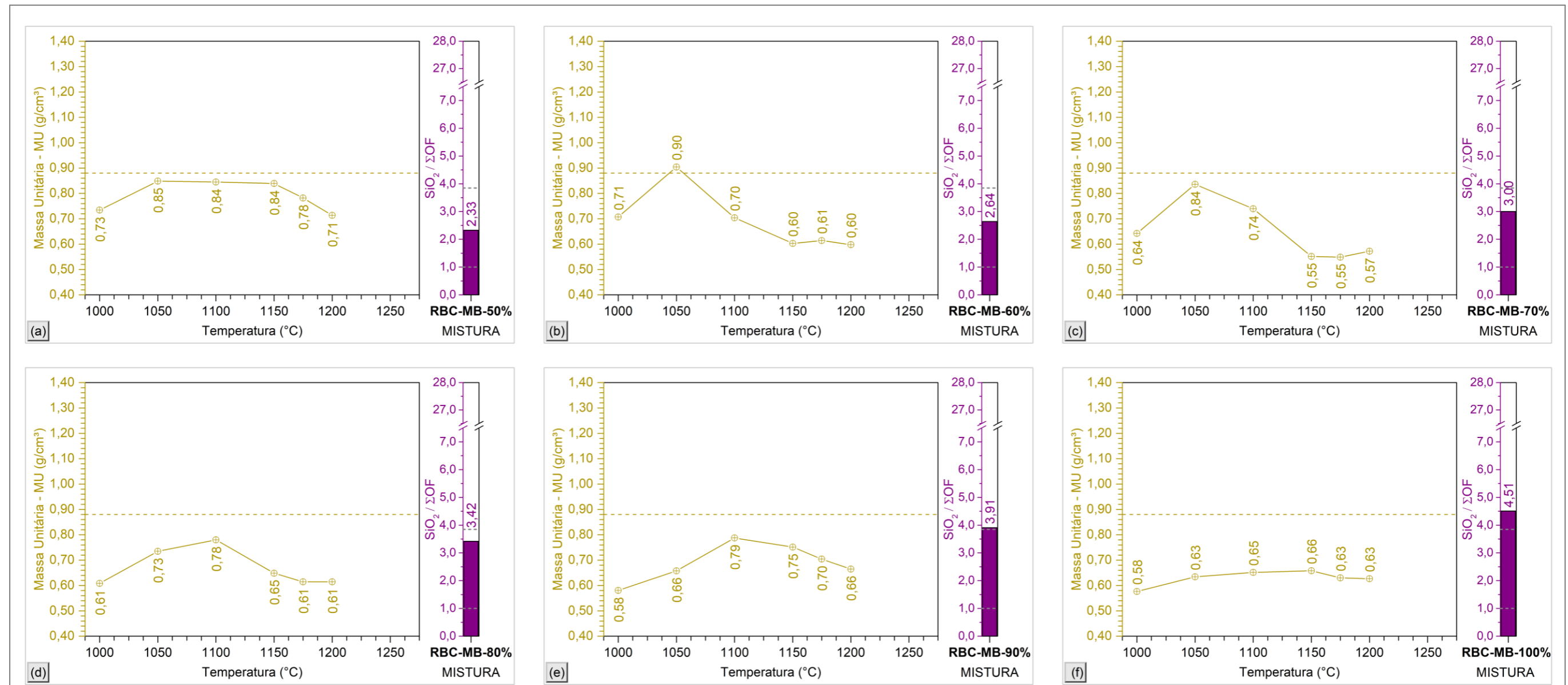


Figura 4.43 - Resultados do ensaio de massa unitária dos agregados triturados das misturas do grupo RBC-MB's e respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF.

- Índice de inchaço e Perda de massa

O índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RBC-MB's são apresentados na Figura 4.44, com os respectivos valores para a relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$. A partir dessa figura é possível observar que os agregados com 50% a 70% de RBC-MB apresentam inchaço entre 1,7% e 10,1%, registrando o melhor desempenho nesta propriedade entre todos os grupos estudados. Os valores para a relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ dessas misturas está entre 2,33 e 3,00.

O incremento do teor de resíduo aumentou o teor de sílica na mistura, conseqüentemente aumentando o valor da relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$. Verifica-se que as misturas com valor da relação fora do intervalo ou muito próximas do limite superior (1,00 a 3,85 - Tabela 3.4) apresentaram índices de inchaço negativos, ou seja, apresentaram retração e que a menor retração foi observada na mistura RBC-MB-80%, com relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ de 3,42.

O valor mais baixo registrado para o índice de inchaço (maior retração) foi de -17% na mistura RBC-MB-90%, mostrando um melhor desempenho em relação ao grupo anterior. Por outro lado, a mistura RBC-MB-60% apresentou os maiores valores de inchaço entre as misturas do grupo, valores de 10,1%, 6,7% e 6,2%, sinterizados a 1150°C, 1175°C e 1200°C, respectivamente, corroborando com as resistências à tração registradas para esses agregados, que foram as mais baixas do grupo.

Outro fato relevante é que muito embora os agregados de RBC-MB-60% tenham apresentado o maior inchaço, suas massas específicas e unitárias foram ligeiramente superiores aos agregados de RBC-MB-70%, que também apresentou bons resultados de inchaço com 3,4%, 4,9% e 2,0% quando sinterizados a 1150°C, 1175°C e 1200°C, respectivamente. Além disso os agregados RBC-MB-70% também registram resistências à tração superiores ao RBC-MB-60%.

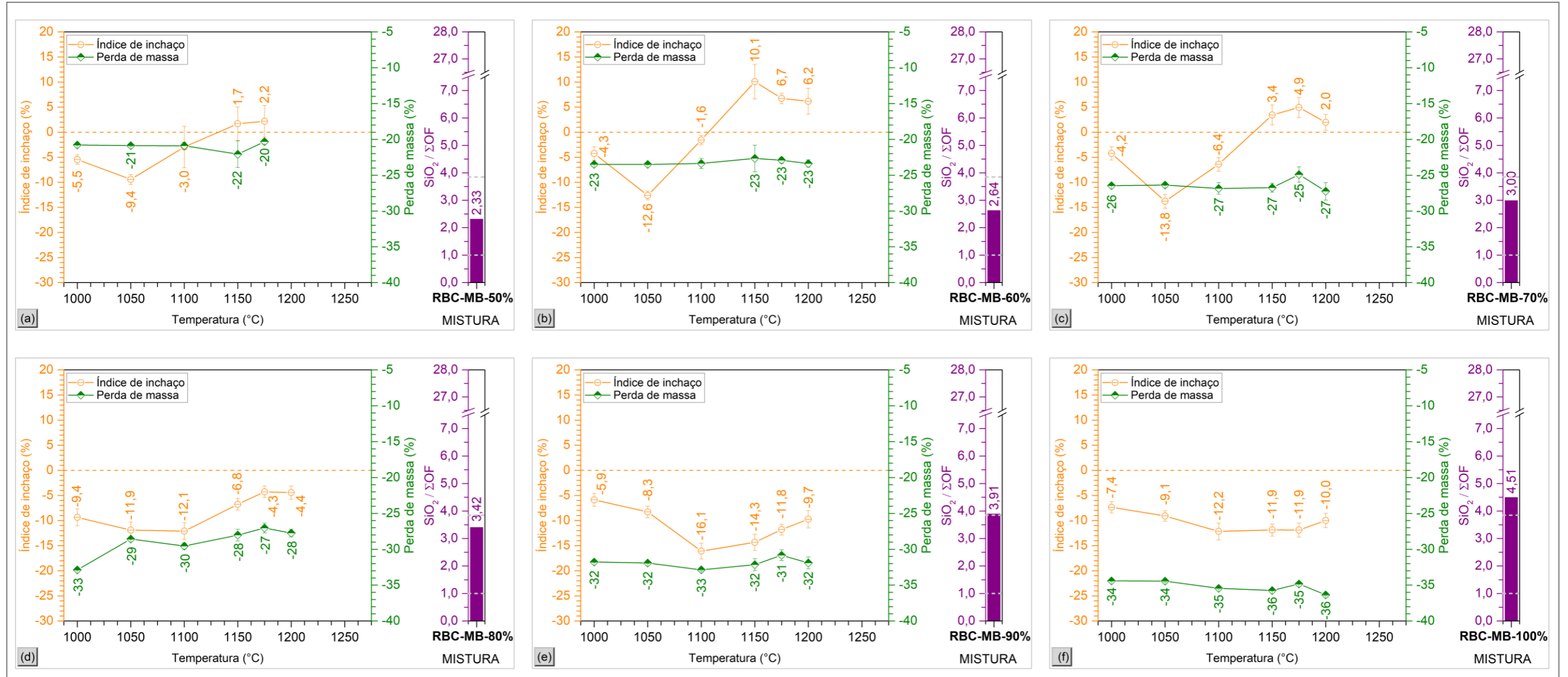


Figura 4.44 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados das misturas do grupo RBC-MB's e seus respectivos valores da relação SiO₂/ΣOF.

Por fim, destaca-se na Tabela 4.10 os agregados de melhor desempenho do grupo RBC-MB's, considerando todas as propriedades analisadas, ressaltando que outros agregados também apresentaram excelentes resultados.

Tabela 4.10 – Resumo dos agregados de melhor desempenho do grupo RBC-MB's.

Propriedades	RBC-MB 50% 1175°C	RBC-MB 70% 1150°C	RBC-MB 80% 1150°C	RBC-MB 80% 1175°C	RBC-MB 90% 1150°C
Relação SiO ₂ /ΣOF	2,33	3,00	3,42	3,42	3,91
Índice de encolhimento (%)	8,7	2,8	2,0	2,0	0,4
Análise visual	C	C	C	C	C
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,39	1,03	1,24	1,18	1,50
Absorção de água (%)	3	7	9	7	9
Módulo de deformação (GPa)	16	8	12	11	18
Resistência à tração (MPa)	2,32	1,99	3,33	2,49	2,95
Massa unitária (g/cm ³)	0,78	0,55	0,65	0,61	0,75
Índice de inchaço (%)	2,2	3,4	-6,8	-4,3	-14,3
Perda de massa (%)	20	27	28	27	32

4.2.4 Análise morfológica dos agregados

Considerando a análise realizada nos três últimos tópicos (itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3) foram selecionadas 6 amostras para realização de análise morfológica a partir da microscopia de varredura eletrônica (MEV). Quanto ao grupo de RGM's, 3 agregados leves foram destacados com bons desempenhos, dos quais optou-se por realizar a análise naquele que apresentou massa específica mais baixa, o RGM-70% a 1213°C.

Quanto ao grupo dos RBC-MB's, diversos agregados apresentaram desempenhos excelentes, como já destacado na Tabela 4.10, e optou-se por selecionar os agregados RBC-MB-50% a 1175°C e o RBC-MB-70% a 1150°C. O primeiro atende a todos os requisitos estabelecidos para agregados leves, é um agregado leve, apresentou inchaço e possui resistência à tração superior ao do agregado comercializado AE-1506 (CINEXPAN).

Já o RBC-MB-70% a 1150°C também apresentou inchaço e muito embora apresente resistência à tração inferior ao AE-1506, foi o agregado que apresentou massas específica e unitária mais baixas do grupo, sendo também mais leves que o AE-1506.

Entre os agregados destacados nos resultados do grupo RBC-MF's, optou-se por selecionar aquele que apresentou menor massa específica e absorção de água, os agregados RBC-MF-50% a 1175°C, e selecionou-se também os agregados RBC-MF-70% a 1150°C afim de viabilizar a comparação entre os beneficiamentos do RBC, uma vez que a mistura com 70% de RBC-MB a 1150°C foi selecionada como as de mais baixas massas específica e unitária.

Também com o intuito de estabelecer um fator comparativo entre as misturas, optou-se por realizar a análise morfológica em uma amostra do agregado comercializado AE-1506 da CINEXPAN.

Na Tabela 4.11 é apresentado um resumo com as propriedades analisadas das misturas selecionadas. Nas Figura 4.45 a Figura 4.50 são apresentadas as imagens da análise MEV, que foram realizadas em ampliações de 19x a 450x, visando observar principalmente a distribuição de poros do agregado em geral, próximo a casca e no núcleo.

As ampliações entre 19x e 30x permitiram visualizar o agregado inteiro, dessa forma verificou-se a possível diferença entre a região de casca e a região mais interna do agregado. Para os agregados que não apresentaram diferença entre as duas regiões realizou-se ampliações de 100x, 200x e 450x em regiões próximas à casca, observadas nas Figura 4.49 e Figura 4.50, referentes as amostras RGM-70% a 1213°C e a AE-1506, respectivamente.

Quanto aos agregados que apresentaram variação significativa entre as regiões de casca e núcleo, foram realizadas ampliações de 100x e 450x em cada região. As respectivas imagens são apresentadas nas Figura 4.45 a Figura 4.48, relativas as misturas RBC-MF-50% a 1175°C, RBC-MB-70% a 1175°C, RBC-MF-70% a 1150°C, e RBC-MB-70% a 1150°C.

Tabela 4.11 – Resumo das propriedades investigadas dos agregados submetidos à análise pela MEV.

Propriedades	RBC-MF 50% 1175°C	RBC-MB 50% 1175°C	RBC-MF 70% 1150°C	RBC-MB 70% 1150°C	RGM 70% 1213°C	AE-1506 (Figura 4.50)
	(Figura 4.45)	(Figura 4.46)	(Figura 4.47)	(Figura 4.48)	(Figura 4.49)	
Relação SiO ₂ /ΣOF	0,73	2,33	0,61	3,00	1,19	3,71
Índice de encolhimento (%)	2,4	8,7	0,3	2,8	1,3	-
Análise visual	C	C	C	C	C	-
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,07	1,39	1,27	1,03	1,56	1,11*
Absorção de água (%)	9	3	13	7	8	7*
Módulo de deformação (GPa)	9	16	13	8	19	10**
Resistência à tração (MPa)	1,15	2,32	0,53	1,99	****	2,23***
Massa unitária (g/cm ³)	0,62	0,78	0,70	0,55	0,85	0,60*
Índice de inchaço (%)	-3,7	2,2	-15,0	3,4	-4,0	-
Perda de massa (%)	24	20	34	27	23	-

*Informado pelo fabricante.

**Calculado (item 3.3.5.8) a partir do valor de massa específica aparente de 1,11 g/cm³.

***Resultado de ensaio realizado na pesquisa (item 3.3.5.8).

****Não foram realizadas rupturas à 1213°C, porém a mistura apresenta resistências de 3,19 MPa e 8,98 MPa, quando sinterizado à 1150°C e 1200°C respectivamente.

C – Formação de casca de baixa porosidade brilhosa.

A partir da análise da Tabela 4.11, observa-se que todos os agregados atendem aos parâmetros estabelecidos para agregados leves, quanto a massa unitária inferior a 0,88 g/cm³ (ASTM C331, 2010), a massa específica aparente inferior a 2,00 g/cm³ (EN 13055, 2016) e absorção de água inferior ao limite de 15% apontado por Neville (2016) como normalmente observado em agregados de boa qualidade destinados ao uso em concretos estruturais.

A Figura 4.45 apresenta a morfologia do agregado RBC-MF-50% a 1175°C, ressaltando que esse apresentou massa específica aparente e relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ entre as mais baixas entre os agregados analisados no presente item.

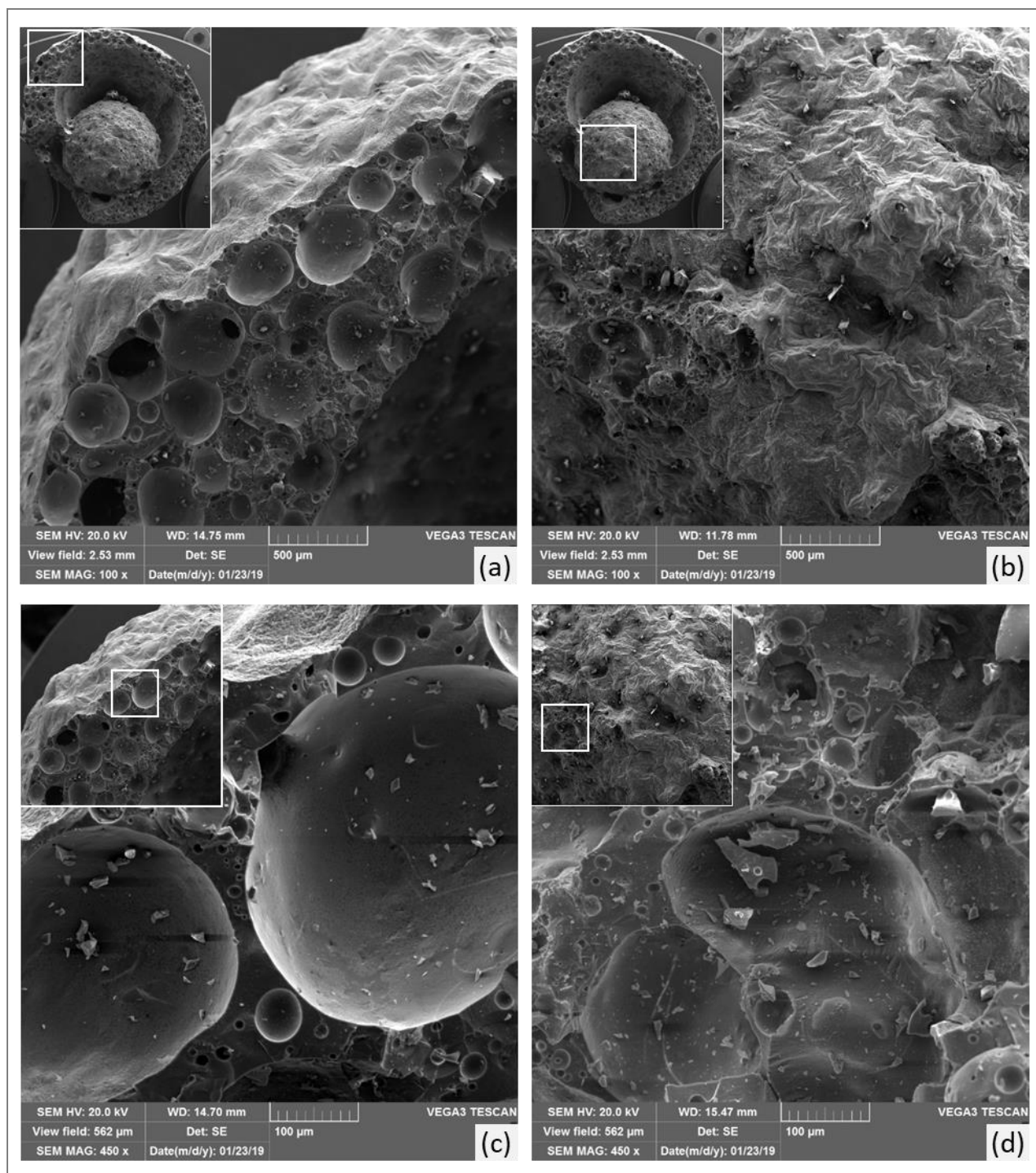


Figura 4.45 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MF-50% a 1175°C.

A visão geral do agregado RBC-MF-50% a 1175°C mostra que foi formado um núcleo esférico envolto em um bolsão de ar e protegido por uma casca e as Figura 4.45-(a) e (c) apresentam detalhes da região de casca, onde é possível observar que na região externa não é aparente a presença de poros aberta o que corrobora com a baixa absorção de água desses (9%), já na região interna da casca verifica-se a presença de diversos poros de tamanhos variados.

Já a Figura 4.45-(b) e (d) apresenta detalhes da região do núcleo do agregado, onde observa-se a superfície externa do núcleo com menor presença de poros, em relação a região interna da casca, porém, a análise não observou a região interna do núcleo.

A Figura 4.46 apresenta a morfologia do agregado RBC-MB-50% a 1175°C, ressaltando que esse foi o agregado de melhor desempenho analisado na presente pesquisa, pois, simultaneamente apresentou baixas massa específica aparente, massa unitária, absorção de água e resistência à tração superior ao agregado comercializado AE-1506, além de apresentar inchaço.

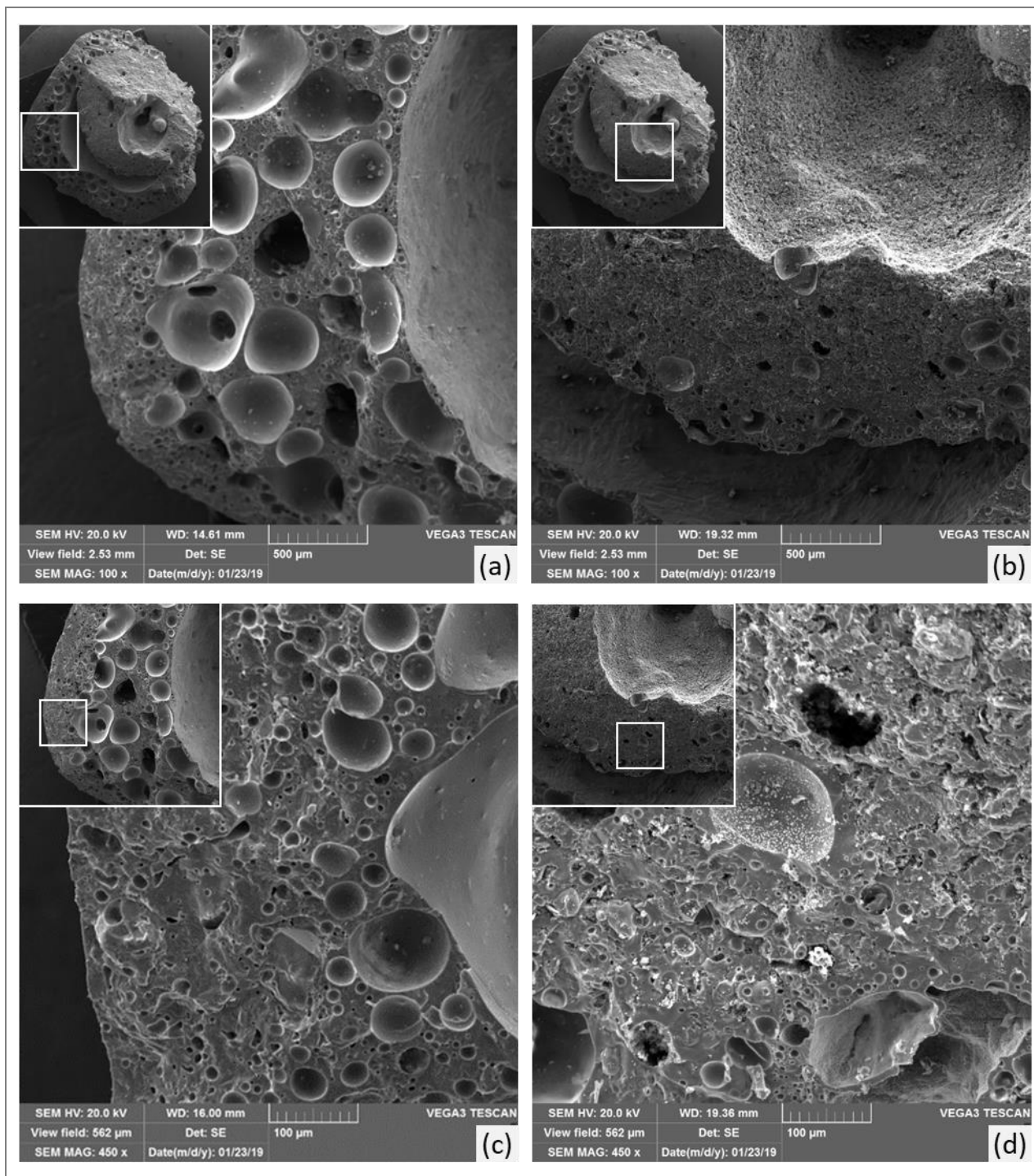


Figura 4.46 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MB-50% a 1175°C.

A visão geral do agregado RBC-MB-50% a 1175°C apresentado na Figura 4.46 mostra um núcleo aproximadamente esférico ligeiramente desprendido da casca que o envolve, e dentro desse, verifica-se um espaço vazio e uma pequena esfera.

As Figura 4.46-(a) e (c) apresentam detalhes da casca, onde é possível observar uma camada mais densa na região externa corroborando com a baixa absorção de água do agregado (3%), já na região interna da casca verifica-se a presença de diversos poros de tamanhos e formatos variados. Já a Figura 4.46-(b) e (d) apresenta detalhes da região do núcleo do agregado, onde observa-se um maior número de poros pequenos, quando comparado a região da casca.

Comparando a mistura RBC-MB-50% a 1175°C (Figura 4.46) e a mistura RBC-MF-50% a 1175°C (Figura 4.45), verifica-se grande diferença entre eles, principalmente em relação aos núcleos, onde o agregado de RBC-MB apresenta núcleo mais conectado a casca quando comparado ao agregado de RBC-MF, corroborando com os resultados de resistência à tração que apontam maior resistência dos agregados de RBC-MB.

A Figura 4.47 apresenta a morfologia do agregado RBC-MF-70% a 1150°C, ressaltando que esse foi o que apresentou a menor resistência a tração entre os agregados, corroborando com o fato de também ter sido o que apresentou menor relação de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$, ou seja, o teor de fundentes superou o teor de sílica na mistura o que pode ter provocado a baixa resistência.

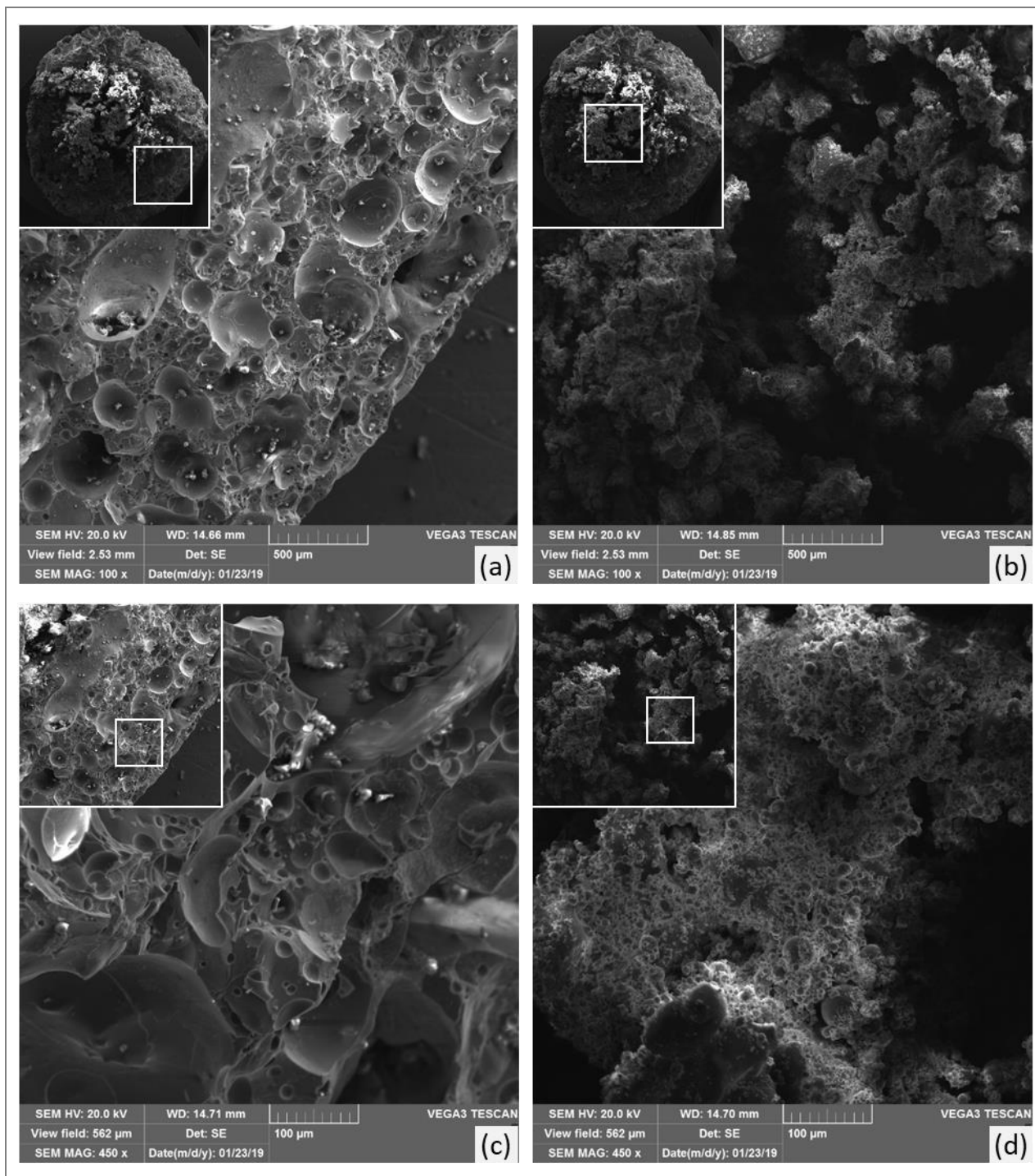


Figura 4.47 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MF-70% a 1150°C.

A Figura 4.47 mostra a visão geral do agregado RBC-MF-70% a 1150°C, detalhes da região próxima a casca ((a) e (c)) e da região do núcleo do agregado ((b) e (d)). Nota-se a presença de muitos poros de tamanhos e formatos diversos na casca e o núcleo apresenta uma morfologia significativamente diferente do analisado na Figura 4.46 (RBC-MB-50%), como pequenas esferas aglutinadas.

A Figura 4.48 apresenta a morfologia do agregado RBC-MB-70% a 1150°C, ressaltando que esse foi o que apresentou massa específica aparente e unitária mais baixas entre os agregados analisados. Foi também o agregado que apresentou características mais próximas do agregado AE-1506, em relação aos agregados analisados (Tabela 4.11).

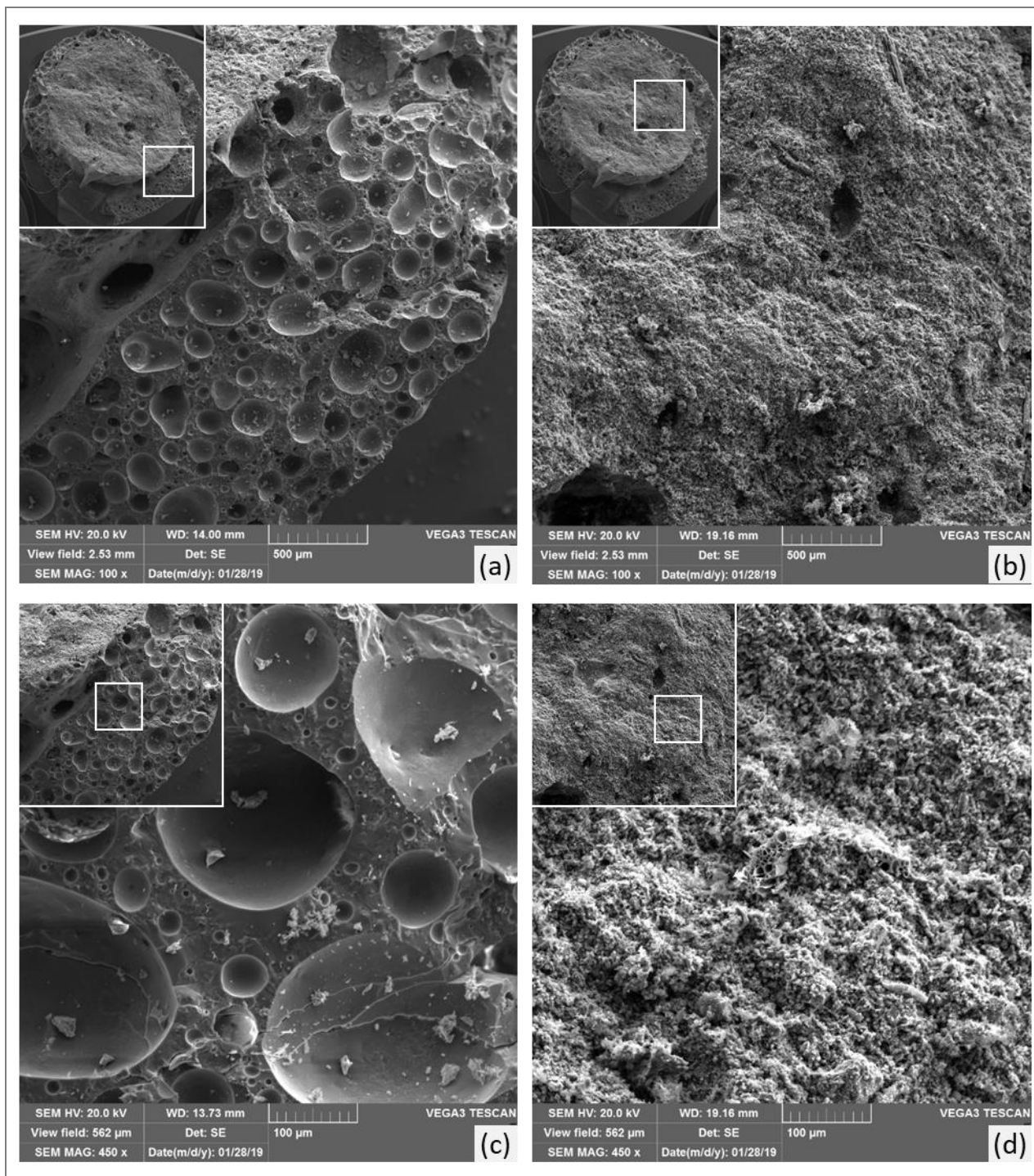


Figura 4.48 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RBC-MB-70% a 1150°C.

Na Figura 4.48 observa-se na visão geral do agregado RBC-MB-70% a 1150°C que o desprendimento do núcleo ocorreu de forma mais sutil entre os agregados já analisados. Nos detalhes da casca (Figura 4.48-(a) e (c)), pode ser observado que o tamanho e a distribuição dos poros são mais homogêneos, entre os agregados produzidos com RBC. Seu núcleo também apresenta morfologia bem diferente da casca, parecida com a observada no agregado RBC-MF-70% a 1150°C, porém com aspecto menos desagregado.

A Figura 4.49 apresenta a morfologia do agregado RGM-70% a 1213°C, ressaltando que esse foi o que apresentou as massas específica aparente e unitária mais altas entre os agregados analisados, e, muito embora não tenha sido realizado o ensaio de resistência à tração para essa temperatura, estima-se que sua resistência seja superior à 9,00 MPa, cerca de 4x mais alta que a do agregado AE-1506.

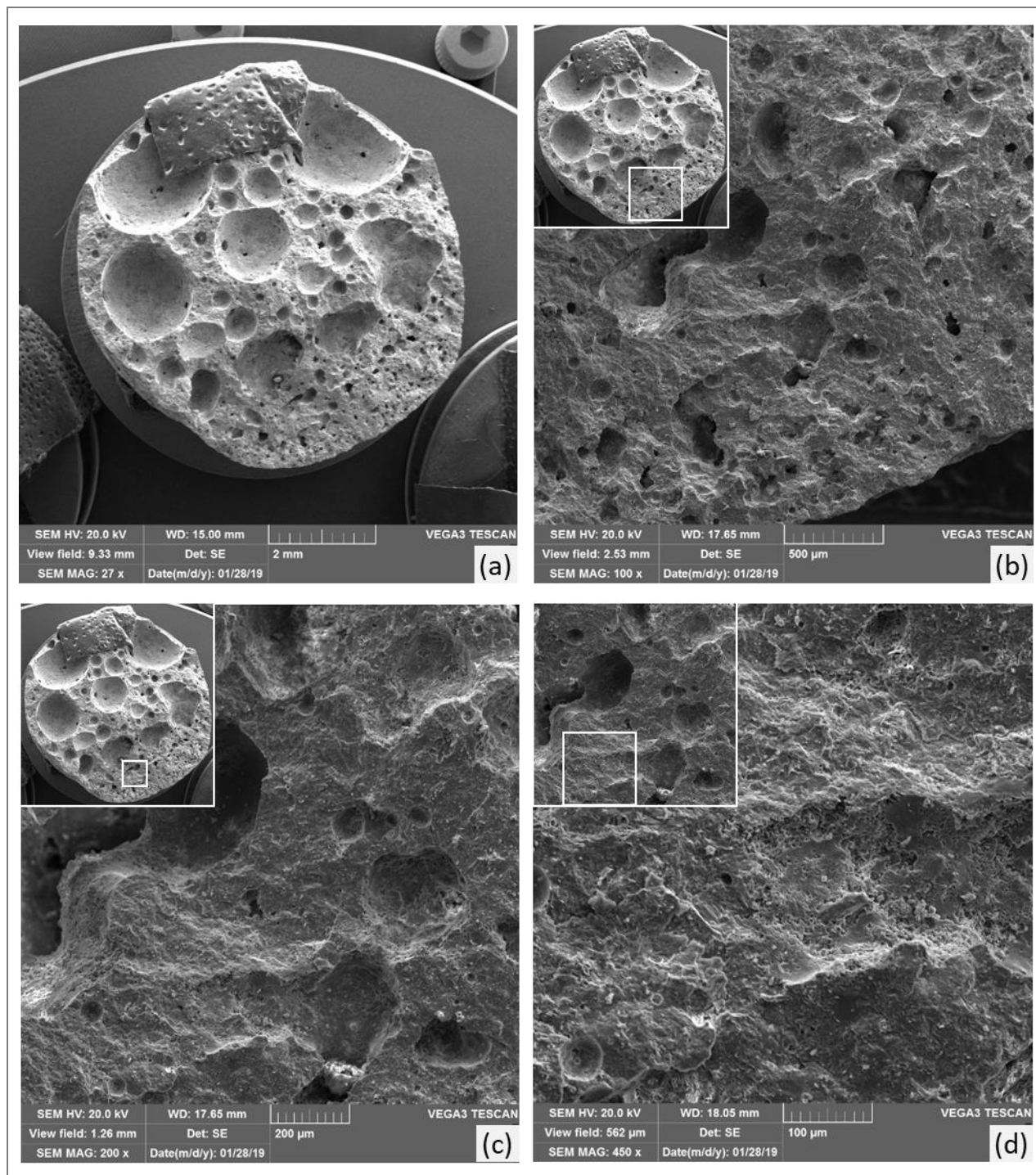


Figura 4.49 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada na mistura RGM-70% a 1213°C.

A visão geral do agregado RGM-70% a 1213°C (Figura 4.49) mostra que não houve diferença significativa entre o núcleo e a casca, onde a presença de poros maiores e menores ocorre ao longo de todo o agregado, muito embora o tamanho e a distribuição desses não seja homogênea; na parte inferior da

imagem nota-se a concentração de poros menores, enquanto na parte superior nota-se a presença de poros significativamente maiores.

Apesar de verificada a presença de poros, o agregado RGM-70% a 1213°C apresenta regiões mais densas quando comparado aos demais agregados investigado pela análise morfológica, corroborando com o fato de ser o de maior massa específica aparente e massa unitária entre os mesmos (Tabela 4.11), com valores de 1,56 g/cm³ e 0,85 g/cm³ respectivamente. Ainda em comparação com os demais agregados analisados esse é o que apresenta melhor aspecto morfológico.

A concentração de poros menores na parte inferior do agregado também ocorreu na mistura com 50% de RGM apresentada por Soltan *et al.* (2016), onde os autores apontaram que a fluidez rápida da fase líquida menos viscosa da amostra impôs aos poros menores a movimentação do fundo do agregado para cima. E, que esse movimento é encorajado pela pressão exercida pela perda de massa. Os autores ainda ressaltaram que esse mecanismo de fluidez da fase líquida explica os poros menos conectados da amostra, e que, a que a presença de poros de forma elíptica é resultado da possível fusão entre os poros menores e a expansão continuada das bolhas na fase líquida menos viscosa.

Na Figura 4.50 apresentam-se imagens do agregado comercializado AE-1506 da CINEXPAN, onde, pode ser verificada uma estreita região mais densa próxima à casca do agregado e uma alta quantidade de poros de tamanhos e distribuição homogênea ao longo de todo o agregado. Nota-se também que os poros presentes nesse agregado possuem tamanho inferior aos observados nos demais agregados.

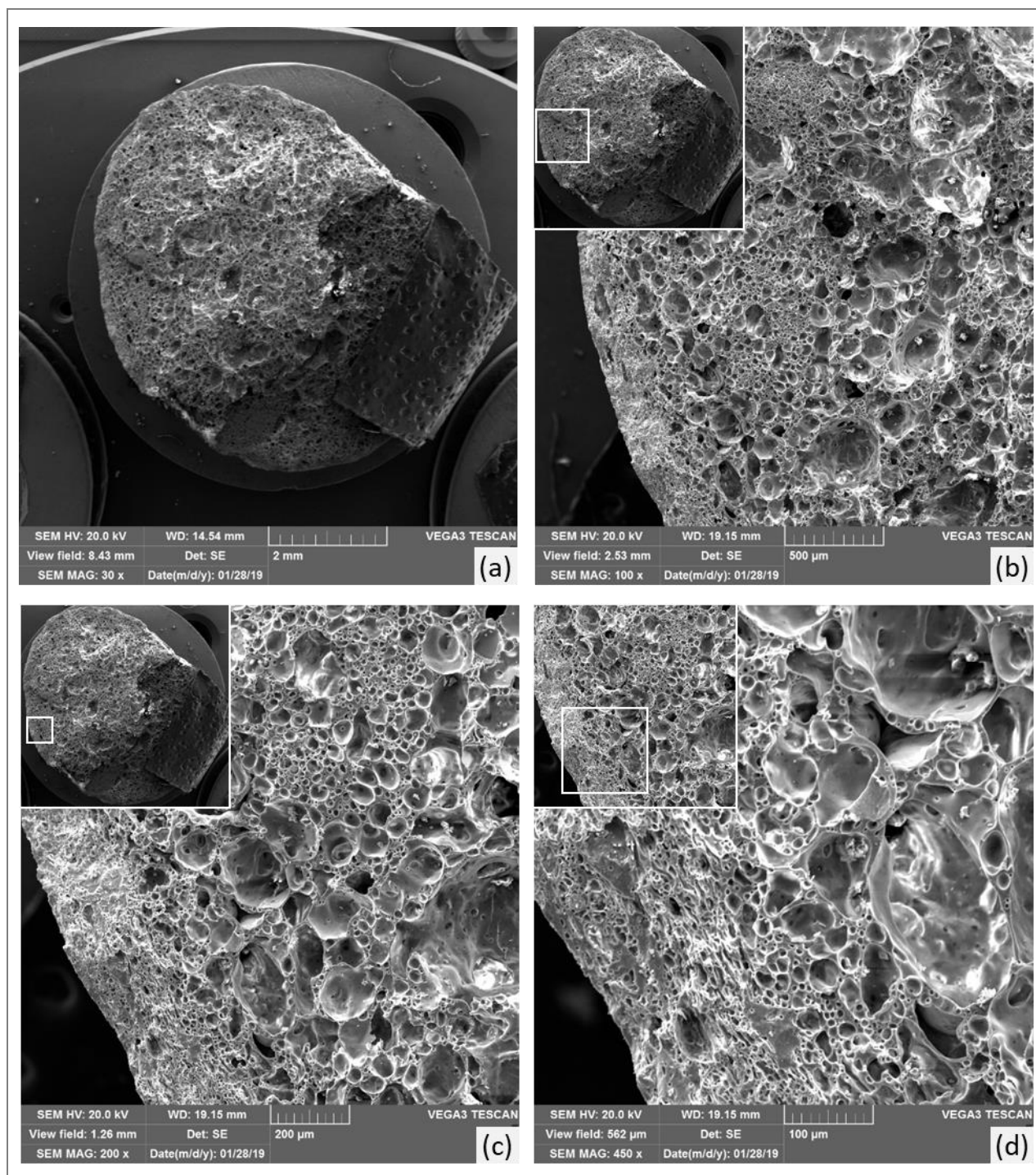


Figura 4.50 - Imagens da microscopia por varredura eletrônica realizada no agregado comercializado AE-1506 - CINEXPAN.

A morfologia do agregado comercializado não é semelhante à dos agregados produzidos na pesquisa, porém, foi possível produzir agregados com alta quantidade de poros e baixa absorção de água, massa unitária e massa específica aparente. O estudo da morfologia desses agregados corroborou com as demais análises, mostrando que os agregados produzidos com RBC,

possuem maior número de poros em relação aos produzidos com RGM, o que possivelmente tornou esses agregados mais leves, porém, menos resistentes.

Essa diminuição de resistência também pode estar relacionada à diferença de morfologia entre a casca e o núcleo dos agregados produzidos com RBC, prejudicando a distribuição uniforme de tensões dentro do agregado, o que, geralmente se associa a diminuição da resistência mecânica.

4.2.5 Compilação dos principais resultados

Na Tabela 4.12 apresenta-se uma compilação dos principais resultados referentes aos agregados produzidos com argilas puras (ARG-B e ARG-V) e a partir das misturas com RGM. Já na Tabela 4.13 seguem os agregados produzidos com RBC-MF e RBC-MB. A coloração vermelha indica que o valor referente a propriedade não atende aos requisitos definidos para agregados leves, e, o inverso, valor que atende ao requisito, é marcado em verde.

Os requisitos referem-se aos seguintes intervalos:

- Relação $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$ entre 1,00 e 3,85 (Tabela 3.4);
- Massa específica aparente inferior à $2,00 \text{ g/cm}^3$ (EN 13055, 2016);
- Absorção de água inferior à 20% (AYATI *et al.*, 2018);
- Módulo de deformação entre 3 e 35 GPa (item 3.3.5.5);
- Resistência à tração superior à 2,23 MPa (item 3.3.5.8); e,
- Massa unitária inferior à $0,88 \text{ g/cm}^3$ (ASTM C331, 2010).

Tabela 4.12 – Compilação dos principais resultados das misturas com RGM e argilas puras (ARG-B e ARG-V)

Propriedades		Relação Si ₂ O ₃ /SiO ₂	Análise visual	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Módulo de deformação (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Massa unitária (g/cm ³)
ARG-B	1000°C	27,91	SA	1,42	31	16	-	0,75
	1050°C		SA	1,42	31	16	-	0,73
	1100°C		SA	1,42	32	16	-	0,74
	1150°C		SA	1,45	30	17	1,25	0,77
	1200°C		SA	1,55	25	19	2,68	0,83
	1213°C		SA	1,58	24	20	-	0,83
	1225°C		SA	1,60	23	21	4,40	0,83
	1238°C		SA	1,65	22	22	-	0,86
	1250°C		SA	1,66	21	22	-	0,84
	1263°C		SA	1,71	20	23	-	0,92
RGM-50%	1000°C	1,75	SA	1,49	28	18	-	0,78
	1050°C		SA	1,47	29	17	-	0,76
	1100°C		SA	1,44	29	17	-	0,76
	1150°C		SA	1,45	30	17	4,47	0,75
	1200°C		SA	1,46	25	17	6,52	0,76
	1213°C		SA	1,47	25	17	-	0,75
	1225°C		SA	1,53	22	19	11,91	0,77
	1238°C		SA	1,67	16	22	-	0,87
	1250°C		MV	2,11	4	36	-	1,08
	1263°C		D	-	-	-	-	-
RGM-60%	1000°C	1,43	SA	1,49	28	18	-	0,77
	1050°C		SA	1,46	30	17	-	0,74
	1100°C		SA	1,43	30	16	-	0,73
	1150°C		SA	1,45	31	17	3,91	0,73
	1200°C		SA	1,47	25	17	6,04	0,75
	1213°C		MV	1,56	23	19	-	0,80
	1225°C		MV	2,02	8	33	23,13	1,02
	1238°C		D	-	-	-	-	-
	1250°C		D	-	-	-	-	-
	1263°C		D	-	-	-	-	-
RGM-70%	1000°C	1,19	SA	1,49	29	18	-	0,76
	1050°C		SA	1,45	31	17	-	0,75
	1100°C		SA	1,44	32	17	-	0,73
	1150°C		SA	1,43	32	16	3,19	0,74
	1200°C		MV	1,66	20	22	8,98	0,87
	1213°C		C	1,56	8	19	-	0,85
	1225°C		D	-	-	-	-	-
	1238°C		D	-	-	-	-	-
	1250°C		D	-	-	-	-	-
	1263°C		D	-	-	-	-	-
ARG-V	1000°C	1,23	MV	1,96	10	31	-	1,00
	1050°C		MV	2,10	6	35	-	1,09
	1100°C		C	2,33	1	43	-	1,25
	1150°C		C	2,28	0	41	> 28,00	1,26
	1200°C		C	1,62	1	21	> 28,00	0,89
	1213°C		C	1,80	1	26	-	0,97
	1225°C		C	1,77	1	25	> 28,01	0,95
	1238°C		C	1,73	1	24	-	0,95
	1250°C		C	1,70	1	23	-	0,92
	1263°C		C	1,68	1	23	-	0,91
RGM-80%	1000°C	1,01	E	-	-	-	-	-
	1050°C		SA	1,38	35	15	-	0,71
	1100°C		SA	1,37	36	15	-	0,71
	1150°C		SA	1,35	37	15	2,25	0,72
	1200°C		C	1,76	5	25	4,09	0,92
	1213°C		D	-	-	-	-	-
	1225°C		D	-	-	-	-	-
	1238°C		D	-	-	-	-	-
	1250°C		D	-	-	-	-	-
	1263°C		D	-	-	-	-	-
RGM-90%	1000°C	0,87	E	-	-	-	-	-
	1050°C		E	-	-	-	-	-
	1100°C		SA	1,30	40	14	-	0,67
	1150°C		SA	1,29	39	13	1,21	0,68
	1200°C		MV	1,58	23	20	8,05	0,83
	1213°C		MV	2,08	9	35	-	1,06
	1225°C		C	2,44	0	48	> 31,00	1,27
	1238°C		D	-	-	-	-	-
	1250°C		D	-	-	-	-	-
	1263°C		D	-	-	-	-	-
RGM-100%	1000°C	0,76	E	-	-	-	-	-
	1050°C		E	-	-	-	-	-
	1100°C		E	-	-	-	-	-
	1150°C		SA	1,26	40	13	0,51	0,65
	1200°C		MV	1,29	35	13	2,49	0,66
	1213°C		MV	1,27	35	13	-	0,65
	1225°C		MV	1,32	33	14	5,86	0,66
	1238°C		MV	1,44	28	17	-	0,73
	1250°C		MV	1,50	25	18	-	0,74
	1263°C		MV	1,52	25	18	-	0,78

Legenda: SA - Sem alteração significativa; MV - Mudança visual significativa; C - Formação de casca de baixa porosidade e brilhosa; D - Derretimento; E - Esfarelamento.

Legenda: SA - Sem alteração significativa; MV - Mudança visual significativa; C - Formação de casca de baixa porosidade e brilhosa; D - Derretimento; E - Esfarelamento.

Tabela 4.13 – Compilação dos principais resultados das misturas com RBC-MF e RBC-MB.

Propriedades		Relação Si ₂ O/ΣOF	Análise visual	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Módulo de deformação (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Massa unitária (g/cm ³)
Legenda: SA - Sem alteração significativa; MV - Mudança visual significativa; C - Formação de casca de baixa porosidade e brilhosa; D - Derretimento; E - Esfarelamento.	RBC-MF-50%	0,73	MV	1,17	42	11	-	0,67
			MV	1,45	21	17	-	0,76
			C	1,47	7	17	-	0,75
			C	1,16	7	11	0,54	0,69
			C	1,07	9	9	1,15	0,62
			C	1,09	8	10	1,05	0,58
	RBC-MF-60%	0,66	MV	1,11	47	10	-	0,62
			MV	1,31	31	14	-	0,74
			C	1,40	12	16	-	0,72
			C	1,22	14	12	0,44	0,71
			C	1,17	19	11	0,56	0,62
			C	1,21	18	12	0,66	0,66
	RBC-MF-70%	0,61	E	-	-	-	-	-
			E	-	-	-	-	-
			E	-	-	-	-	-
			C	1,27	13	13	0,53	0,70
			C	1,30	15	13	0,78	0,69
			C	1,32	9	14	0,81	0,68
	RBC-MF-80%	0,55	E	-	-	-	-	-
			E	-	-	-	-	-
			E	-	-	-	-	-
			C	1,56	7	19	1,16	0,79
			C	1,45	9	17	0,79	0,73
			C	1,44	7	17	0,84	0,74
RBC-MF-90%	0,51	E	-	-	-	-	-	
		E	-	-	-	-	-	
		E	-	-	-	-	-	
		C	1,46	18	17	0,74	0,73	
		C	1,61	7	21	1,43	0,80	
		C	1,62	4	21	1,35	0,81	

Propriedades		Relação Si ₂ O/ΣOF	Análise visual	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Módulo de deformação (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Massa unitária (g/cm ³)
Legenda: SA - Sem alteração significativa; MV - Mudança visual significativa; C - Formação de casca de baixa porosidade e brilhosa; D - Derretimento; E - Esfarelamento.	RBC-MB-50%	2,33	MV	1,39	32	15	-	0,73
			MV	1,65	16	22	-	0,85
			MV	1,55	9	19	-	0,84
			C	1,55	3	19	1,57	0,84
			C	1,39	3	16	2,32	0,78
			C	1,25	4	13	-	0,71
	RBC-MB-60%	2,64	MV	1,31	36	14	-	0,71
			MV	1,67	15	22	-	0,90
			C	1,27	6	13	-	0,70
			C	1,08	4	9	0,54	0,60
			C	1,17	4	11	1,23	0,61
			C	1,14	5	10	1,07	0,60
	RBC-MB-70%	3,00	MV	1,21	43	12	-	0,64
			MV	1,60	19	20	-	0,84
			C	1,41	10	16	-	0,74
			C	1,03	7	8	1,99	0,55
			C	1,07	5	9	1,43	0,55
			C	1,08	9	9	1,79	0,57
	RBC-MB-80%	3,42	MV	1,12	49	10	-	0,61
			MV	1,37	32	15	-	0,73
			C	1,50	14	18	-	0,78
			C	1,24	9	12	3,33	0,65
			C	1,18	7	11	2,49	0,61
			C	1,16	10	11	1,89	0,61
RBC-MB-90%	3,91	MV	1,07	54	9	-	0,58	
		MV	1,18	45	11	-	0,66	
		MV	1,54	22	19	-	0,79	
		C	1,50	9	18	2,95	0,75	
		C	1,34	11	14	1,99	0,70	
		C	1,26	17	13	1,91	0,66	
RBC-MB-100%	4,51	MV	1,03	58	8	-	0,58	
		MV	1,14	46	10	-	0,63	
		MV	1,25	38	12	-	0,65	
		MV	1,31	30	14	2,72	0,66	
		MV	1,25	32	13	1,67	0,63	
		MV	1,20	35	11	1,60	0,63	

CAPÍTULO 5

Conclusões

A presente pesquisa teve como hipótese a possibilidade de produção de novos agregados leves a partir de matérias-primas regionais (Rio Grande do Norte/Nordeste/Brasil) e teve como principais objetivos a caracterização das matérias-primas, estabelecer proporções ideais entre essas para a produção de agregados leves graúdos, bem como, diagnosticar temperaturas ótimas de sinterização para essas misturas.

A hipótese do trabalho foi atingida, pois, foi possível produzir diversas composições que atenderam simultaneamente aos requisitos prescritos para agregado graúdo leve, como massa específica aparente inferior a $2,00 \text{ g/cm}^3$ (EN 13055, 2016), massa unitária inferior a $0,88 \text{ g/cm}^3$ (ASTM C331, 2010), e, absorção de água inferior 20% (AYATI *et al.*, 2018).

A composição química dos precursores, em especial a relação entre os teores de $\text{SiO}_2/\Sigma\text{OF}$, é apontada na bibliografia como fator importante na produção de agregados leves, porém, observou-se que mesmo atendendo a um intervalo estabelecido a partir de referências de autores anteriores e agregados comercializados, houve agregados que não atingiram aos requisitos prescritos para agregados leves e o inverso também foi percebido. Logo, verifica-se que a composição química dos precursores é apenas um dos fatores que convergem para produção de agregados leves, o qual não é decisivo.

As argilas utilizadas apresentam alto teor de SiO_2 , acima de 40%, e os resíduos apresentam alta perda de massa, em torno de 30%, e composições binárias entre argila e resíduo, esse último em teores de 50% a 90%, foram capazes de produzir agregados leves, atendendo aos requisitos normativos já mencionados. Dessa forma a sinergia entre os altos teores de sílica e a

porcentagem de perda de massa, além do teor de óxidos fundentes podem ser preponderantes para produção de agregados leves.

A diferença entre os beneficiamentos do RBC alterou a granulometria do resíduo, tornando o RBC-MB bem mais fino que o RBC-MF, e, uma diferença significativa na composição química também é observada. Onde o teor de Si_2O é bastante superior no RBC-MB, o que foi compensado considerando que teor de ΣOF no RBC-MF é consideravelmente mais alto. Portanto, tornou-se inconclusa a análise da influência apenas da granulometria dos resíduos, necessitando-se de ensaios e análises complementares para tal.

Quanto ao índice de encolhimento, verificou-se que a inclusão de resíduo na mistura, para todos os resíduos estudados (RGM, RBC-MF e RBC-MB), foi positiva para diminuição da retração ocorrida na secagem dos agregados. Essa diminuição foi principalmente observada nas misturas com RBC-MF, registrando diminuição de 80% a 100% do índice de encolhimento comparando as misturas de 100% de argila vermelha com as de teores 50% a 80% do resíduo.

Não foi possível produzir agregados leves contendo 100% de nenhum dos resíduos estudados, porém, mostrou-se possível criar formulações com altos teores de resíduos que atendem simultaneamente os requisitos para agregados leves, relativos as propriedades de massa específica aparente, absorção de água e massa unitária. Para o resíduo RGM foram três formulações possíveis: RGM-50% a 1238°C e RGM-70% a 1200°C e a 1213°C.

Para o resíduo RBC-MF, observou-se as seguintes formulações possíveis para agregados leves, ressaltando que as temperaturas analisadas foram 1000°C, 1050°C, 1100°C, 1150°C, 1175°C e 1200°C: RBC-MF-50% e RBC-MF-60% em temperatura superior ou igual a 1100°C e RBC-MF-70%, RBC-MF-80%, RBC-MF-90% em temperatura superior ou igual a 1150°C.

Já para o resíduo RBC-MB, cujas temperaturas analisadas foram as mesmas do resíduo RBC-MF, observou-se as seguintes formulações possíveis: RBC-MB-50% e RBC-MB-70% em temperatura superior ou igual a 1050°C, RBC-MB-60% e RBC-MB-80% em temperatura superior ou igual a 1100°C e RBC-MB-90% em temperatura superior ou igual a 1150°C.

Quanto a resistência à tração dos agregados analisados, produzidos a partir da mistura de argila com resíduo, observou-se que apenas os agregados com RGM e RBC-MB apresentam resistências superiores à 2,23 MPa, referência de agregado comercializado no Brasil (AE-1506 – CINEXPAN). Considerando apenas os agregados que atenderam aos critérios de classificação de agregados leves, os que apresentam resistência à tração igual ou superior à 2,23 MPa são os seguintes: RGM-50% a 1238°C e RGM-70% a 1200°C e a 1213°C; e, RBC-MB-50% a 1175°C, RBC-MB-80% a 1150°C e 1175°C e RBC-MB-90% a 1150°C. Ressalta-se porém, que não foram observadas exigências normativas para o valor mínimo de resistência à tração de agregados leves.

Mostrou-se possível a produção de agregados leves sem que esses apresentassem inchaço, e, entre os agregados supracitados que atendem aos requisitos de classificação de agregados leves, o índice de inchaço só se apresentou positivo (ou seja, foi registrado inchaço) nas misturas RBC-MB-50%, RBC-MB-60% e RBC-MB-70%, quando sinterizados em temperaturas iguais ou superiores a 1150°C.

Entre as formulações executadas na pesquisa, produzidas a partir de cada resíduo estudado (RGM, RBC-MF e RBC-MB), ressaltam-se como as de melhor desempenho geral, considerando todas as propriedades analisadas, em especial as propriedades de massa específica aparente, absorção de água e massa unitária, as seguintes misturas: RGM-70% a 1213°C, o RBC-MF-50% a 1175°C e o RBC-MB-70% a 1150°C.

Ressalta-se por fim que os agregados produzidos pela mistura RBC-MB-50% quando sinterizado à 1175°C, atendem aos requisitos de classificação de agregados leves, quanto às propriedades de massa específica aparente (1,39 g/cm³), absorção de água (3%) e massa unitária (0,78 g/cm³). Além disso, esses agregados apresentam resistência à tração (2,32 MPa) superior à referência do agregado comercializado no Brasil supracitado, e, apresentaram inchaço (2,2%).

Referências

ABIROCHAS (Brasília/DF). **Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais**. 2019. Disponível em: <<http://abirochas.com.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 213 R-03: **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. Farmington Hills, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 331: **Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units**. West Conshohocken, 2010.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. 126f. Dissertação (Mestrado) - Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, SP, 2014.

ANJOS, M. A. **Adição de resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados**. 2009. 172f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009.

ANJOS, M. A., MARTINELLI, A. E. **Caracterização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias**. In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto de Galinhas, Brasil, 2008.

ANJOS, M. A. S.; FERREIRA, D. F.; BORJA, E. V. Influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal. **Holos**, v. 2, p. 44-57, 2012. IFRN.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 35: **Agregados leves para concreto estrutural - Especificações**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 6458: **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 6457: **Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 7180: **Solo — Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 11579: **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

AYATI, Bamdad; FERRÁNDIZ-MAS, Veronica; NEWPORT, Darryl, CHEESEMAN, Christopher. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 162, p.124-131, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018>.

BARROS, R. M. M. **Incorporação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações cerâmicas**. 2015. 107f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

BENTO, Adegilson; SILVA, Dione; MONTEIRO, Eliana. **Avaliação da resistência do concreto produzido com a cinza da queima do bagaço da cana-de-açúcar em substituição do cimento Portland**. In: XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 2017, Crato, Brasil.

BETHANIS, S.; CHEESEMAN, C. Production of lightweight aggregate from incinerator bottom ash and pulverised fuel ash. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 78, 2004. ISSN 1853127388.

BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos leves estruturais**. 2011. 231f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Materiais Refratários e Abrasivos. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 20. p.619-656.

CASCUDO, O; CARASEK, H; HASPARYK, N. P. Microestrutura dos materiais cerâmicos. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 11. p.325-354.

CINEXPAN (Várzea Paulista/SP). **Cinexpan – Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda**. 2019. Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

CHEESEMAN, C.; VIRDI, G. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 45, n. 1, p. 18-30, 2005. ISSN 0921-3449.

CLARKE, J. L. **Structural lightweight aggregate concrete**. CRC Press, 2002. ISBN 0203487664.

CONAB (Brasília/DF). **Companhia Nacional de Abastecimento**. 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement And Concrete Research**, v. 97, p.41-49, jul. 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. 2018. 160f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

EUROPEAN STANDARD. EN 13055: **Lightweight aggregates**. Brussels, 2016.

EUROPEAN STANDARD. EN 459-2: **Building lime - Part 2: Test methods**. Brussels, 2010.

FARIAS; Evilane Cássia; LEAL. Nathaly Santana; ANJOS, Marcos Alyssandro; BORJA, Edilberto Vitorino. **Avaliação de Concretos autoadensáveis eco-eficientes com adição de resíduos da biomassa da cana-de-açúcar**. In: I Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. 2014, Guimarães, Portugal.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, Beatriz *et al.* Valorization of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 116, p.252-262, jul. 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.095>.

HAN, M.; HAN, D.; SHIN, J. Use of bottom ash and stone dust to make lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 192-199, 2015. ISSN 0950-0618.

HIRAMATSU, Y.; OKA, Y. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.89-90, maio 1966. Elsevier . [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(66\)90002-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(66)90002-7).

KAZMIERCZAK, C. de S. Produtos de Cerâmica Vermelha. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 18. p. 565-588.

LAU, P. C.; TEO, D. C. L.; MANNAN, M. A. Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 558-567, 2017. ISSN 0950-0618.

LI, Yongdan *et al.* Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts. **Powder Technology**, [s.l.], v. 113, n. 1-2, p.176-184, nov. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0032-5910\(00\)00231-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0032-5910(00)00231-x).

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 2016. 134f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON. 2014.

MENDES, E. L. S. **Caracterização e composição de agregados reciclados para obtenção de concreto autoadensável leve reciclado com fins estruturais**. 2016. 116f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil: Estruturas. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2016.

MORENO-MAROTO, J. M; GONZÁLES-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODRÍGUEZ, L.; ACOSTA, A.. Development of lightweight aggregates from stone cutting sludge, plastic wastes and sepiolite rejections for agricultural and environmental purposes. **Journal of Environmental Management**, v. 200, p. 229-242, 2017a. ISSN 0301-4797.

_____. Manufacturing of lightweight aggregates with carbon fiber and mineral wastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, 335-348, 2017b. ISSN 0958-9465.

NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

PINHEIRO, A. S. **Produção de grês porcelanato a partir de matérias-primas do Rio Grande do Norte e queima a gás natural**. 2006. 118f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

RÍOS-PARADA V.; JIMÉNEZ-QUERO, V. G.; VALDEZ-TAMEZ, P. L.; MONTES-GARCÍA, P. Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 83-95, 2017. ISSN 0950-0618.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Pini, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A, AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 42. p. 1531-1568.

SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 04, p. 1442-1450, 2010. ISSN 1517-7076.

SANTIS, B. C. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutura: viabilidade da cerâmica vermelha do Estado de São Paulo**. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado). Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

SANTIS, B. C. **Concretos leves com agregados inovadores de argila vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais**. 2016. 110 f. Tese (Doutorado) - Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

SANTIS, B. C.; ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da influência de agregados leves de argila calcinada no desempenho de concretos estruturais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 21-32, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SOLTAN, A. M. M; KAHL, W.; EL-RAOOF, F. A.; EL-KALIOUBY, B. A.; SERRY, M. A.; ABDEL-KADER; N. A. Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 139-149, 2016. ISSN 0959-6526.

TANG, P.; FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H. Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash. **Journal of Cleaner Production**, 2017. ISSN 0959-6526.