



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

RAFAELLA CAVALCANTE REGIS

ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA A
OBTENÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS A PARTIR DE ARGILAS DO
MUNICÍPIO DE RUSSAS - CE

FORTALEZA

2024

RAFAELLA CAVALCANTE REGIS

ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA A OBTENÇÃO
DE PRODUTOS CERÂMICOS A PARTIR DE ARGILAS DO MUNICÍPIO DE RUSSAS -
CE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais e Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de Concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R265a Regis, Rafaella Cavalcante.
Análise das variáveis do processo de fabricação para a obtenção de produtos cerâmicos a partir de argilas do município de Russas - CE / Rafaella Cavalcante Regis. – 2024.
89 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

1. Adoquim. 2. Argila. 3. Piso intertravado. 4. Cerâmica vermelha. 5. APL. I. Título.

CDD 620.11

RAFAELLA CAVALCANTE REGIS

ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO PARA A OBTENÇÃO
DE PRODUTOS CERÂMICOS A PARTIR DE ARGILAS DO MUNICÍPIO DE RUSSAS-
CE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais e Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de Concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

Aprovada em: 06/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dr^ª. Janete Eunice Zorzi
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

A Deus.

A minha família, por acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças e perseverança.

A minha avó Maria Estela, minha eterna gratidão.

Agradeço a minha família, em especial ao meu querido sobrinho Cauã, por todo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Ricardo Emílio Nogueira, pelo empenho dedicado à elaboração desta dissertação.

Aos professores Dra. Janete Zorzi e Dr. Cândido Lobo, pela participação na minha banca examinadora.

Aos meus amigos e amigas.

Adicionalmente, agradeço à Funcap pelo suporte financeiro.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuiu para tornar esta etapa mais leve.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O piso intertravado cerâmico, também conhecido como adoquim, é um produto amplamente empregado no mercado exterior, porém pouco difundido no Brasil. Possui alto valor agregado com potencial de impulsionar o desenvolvimento do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Russas, localizado no Estado do Ceará. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da carga de compactação e temperatura de sinterização na produção de peças cerâmicas a partir de massas argilosas da região, visando a fabricação de adoquins que atendam às normas internacionais de aplicação referentes às propriedades mecânicas, físicas e estéticas. As matérias-primas utilizadas são argilas oriundas do município de Russas/CE, cidade polo do referido APL. As argilas foram submetidas à caracterização mineralógica, química e física, através das técnicas de espectroscopia de dispersão de energia (EDS), microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia óptica, difração de raios x (DRX), análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA), análise granulométrica e determinação do índice de plasticidade. Foram produzidos corpos de prova no laboratório por meio de prensagem a 5 kN, 10 kN, 10 kN e 12,5 kN, submetido à queima nas temperaturas de 910 °C, 930 °C, 950 °C e 990°C. As amostras cerâmicas foram caracterizadas quanto às propriedades físicas referente à retração linear, massa específica aparente, porosidade e absorção de água e, quanto às propriedades mecânicas relativas a resistência à compressão, resistência à flexão e índice de abrasão e, quanto à microestrutura, por MEV e DRX. Os dados foram avaliados estatisticamente com o teste ANOVA (análise de variância) e o teste de Tukey. Os resultados apontam que, de acordo com as normas colombianas e estadunidenses, as peças cerâmicas produzidas neste estudo são adequadas para pavimentos de tráfego leve. A análise dos resultados mostra que os corpos de prova sinterizados a 910 °C com carga de compactação de 5 kN apresentam propriedades físicas e mecânicas comparáveis ou superiores às amostras sinterizadas a temperaturas mais altas. Essas peças podem ser classificadas como tipo II, para áreas de abrasão intermediária, e tipo III, para ambientes de baixa abrasão. Assim, os resultados confirmam a viabilidade de produzir adoquins cerâmicos para vias de tráfego leve, com resistência à abrasão média e baixa.

Palavras chave: Adoquim; argila; piso intertravado; cerâmica vermelha; APL.

ABSTRACT

The ceramic interlocking pavement, also known as paver, is a product widely used in the international market but not well known in Brazil. It has high added value and the potential to boost the development of the Local Productive Arrangement of Red Ceramics in Russas, located in the State of Ceará. This study aims to evaluate the influence of compaction load and sintering temperature on the production of ceramic pieces from clay masses in the region, with the goal of manufacturing pavers that meet international application standards regarding mechanical, physical, and aesthetic properties. The raw materials used are clays from the municipality of Russas/CE, the central city of the mentioned LPA. The clays were subjected to mineralogical, chemical, and physical characterization using techniques such as energy-dispersive spectroscopy (EDS), scanning electron microscopy (SEM), optical microscopy, x-ray diffraction (XRD), thermogravimetric and differential thermal analysis (TG/DTA), granulometric analysis, and determination of the plasticity index. Test specimens were produced in the laboratory by pressing at 5 kN, 10 kN, and 12.5 kN, and fired at temperatures of 910 °C, 930 °C, 950 °C, and 990 °C. The ceramic samples were characterized for their physical properties, including linear shrinkage, apparent specific mass, porosity, and water absorption, as well as their mechanical properties, such as compressive strength, flexural strength, and abrasion index, and their microstructure, using SEM and XRD. The data were statistically evaluated using ANOVA (analysis of variance) and the Tukey test. The results indicate that, according to Colombian and American standards, the ceramic pieces produced in this study are suitable for light traffic pavements. The analysis of the results shows that the test specimens sintered at 910 °C with a compaction load of 5 kN have physical and mechanical properties comparable to or superior to samples sintered at higher temperatures. These pieces can be classified as type II, for intermediate abrasion areas, and type III, for low abrasion environments. Thus, the results confirm the feasibility of producing ceramic pavers for light traffic roads, with medium and low abrasion resistance.

Keywords: Adoquim; clay; interlocked floor; red ceramics; APL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Russas no Estado do Ceará.....	18
Figura 2 - Processamento de cerâmica vermelha.	20
Figura 3 - Adoquins cerâmicos.....	23
Figura 4 - Matéria-prima: a) argila gorda, b) argila magra e c) mistura argila gorda e magra.	29
Figura 5 - Fluxograma da metodologia experimental adotada no estudo.....	30
Figura 6 - Amostras de (a) argila gorda (b) argila magra e (c) mistura de argila gorda e magra.	31
Figura 7 - Quarteamento e destorroamento das amostras.....	31
Figura 8 - Microscópio eletrônico de varredura bancada VEGA XMU.....	32
Figura 9 - Ensaio de (a) limite de liquidez e (b) limite de plasticidade.	34
Figura 10 - Matrizes metálicas submetidas à prensagem (a) CP Tipo 1 e (b) CP Tipo 2.	36
Figura 11 - Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1.....	38
Figura 12 - Defletômetro para determinação da tensão de ruptura à flexão.....	39
Figura 13 - Micrografias MEV e EDS das amostras de (a) argila gorda e (b) argila magra.	42
Figura 14 - Difratoograma da argila gorda: N – nontronita, Mu – Muscovita, I – illita, C – Caulinita, Q – Quartzo, Mi – Microclínio e A – Albita.....	43
Figura 15 - Difratoograma da argila magra: N – nontronita, M - muscovita, I - illita, C – Caulinita, Q – quartzo, A – albita e Mi - microclínio.....	44
Figura 16 - Micrografia obtida por MO da massa argilosa natural.	44
Figura 17 - Distribuição de tamanho de partículas das amostras.	45
Figura 18 - Diagrama de Winkler.....	46
Figura 19 - Limites de Atterberg de acordo com a projeção de Bain e Highly (1978).	47
Figura 20 - TG/DTA das amostras de argila gorda e argila magra.	48
Figura 21 - DRX da massa argilosa formada pela mistura de argila gorda e argila magra: N – nontronita, Mu – Muscovita, I – illita, C – Caulinita, Q – Quartzo, A – Albita, M – Microclínio.....	49
Figura 22 - DRX das cerâmicas sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C: Mu – Muscovita, I – illita, Q – Quartzo, A – Albita, M – Microclínio, H – Hematita, G – Goethita.....	50
Figura 23 - MEV da superfície externa da amostra A011 ampliada em 1000x e 4000x.....	52
Figura 24 - MEV da superfície de fratura das amostras A101, A102, A103 e A104.....	53

Figura 25 - MEV da superfície da amostra D011 ampliada em 1000x e 4000x.	54
Figura 26 - MEV da superfície da amostra D011 ampliada em 5000x.	55
Figura 27 - MEV da superfície de fratura das amostras D101, D102, D103 e D104.....	56
Figura 28 - Aspecto visual dos corpos de prova sinterizados.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos ¹ para produção de adoquim cerâmico, de acordo com a ASTM C 902: 2015 e ASTM C 1272: 2017.....	25
Tabela 2 - Requisitos ¹ para produção de adoquim cerâmico, de acordo com a NTC 5282 e 3829: 2004.	26
Tabela 3 - Requisitos ¹ para produção de adoquim cerâmico, de acordo com a UNE-EN 1344/2015.	27
Tabela 4 - Requisitos para peças pré-moldadas de concreto, de acordo com a NBR 9781: 2013.	28
Tabela 5 - Critérios da massa argilosa de acordo com o índice de plasticidade.....	34
Tabela 6 - Quantidade de corpos de prova.	35
Tabela 7 - Valores de EDS das amostras de argila gorda e argila magra.....	41
Tabela 8 - Classificação das amostras de acordo com o diâmetro dos grãos.	45
Tabela 9 - Limites de consistência de Atterberg das matérias-primas.	47
Tabela 10 - Massa específica aparente a verde.....	59
Tabela 11 - Quadro resumo de acordo com as normas Estadunidense e Colombiana.	66
Tabela 12 - Teste da ANOVA para os CP compactados a 5 kN.	67
Tabela 13 - Teste de Tukey para os CP compactados a 5 kN.	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Retração linear das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	58
Gráfico 2 - Massa específica aparente das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	59
Gráfico 3 - Dureza Rockwell B das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	60
Gráfico 4 - Porosidade das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	61
Gráfico 5 - Resistência à flexão das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	62
Gráfico 6 - Resistência à compressão das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	63
Gráfico 7 - Absorção de água das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	64
Gráfico 8 - Índice de abrasão das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Retração linear	34
Equação 2 - Absorção de água	34
Equação 3 – Porosidade	34
Equação 4 - Massa específica aparente	35
Equação 5 - Resistência à compressão	35
Equação 6 - Índice de abrasão	35
Equação 7 - Resistência à flexão	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo geral.....	17
1.2	Objetivos específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Indústria de cerâmica vermelha.....	18
2.2	Cerâmica vermelha.....	20
2.3	Argila	21
2.4	Adoquim cerâmico.....	23
2.5	Legislação e propriedades tecnológicas	24
2.5.1	<i>Norma estadunidense – ASTM.....</i>	<i>24</i>
2.5.2	<i>Norma colombiana – NTC</i>	<i>25</i>
2.5.3	<i>Norma espanhola – UNE</i>	<i>27</i>
2.5.4	<i>Norma brasileira - PPC</i>	<i>27</i>
3	MATERIAL	29
4	METODOLOGIA.....	30
4.1	Caracterização da matéria-prima	31
4.1.1	<i>Beneficiamento das matérias-primas</i>	<i>31</i>
4.1.2	<i>Espectroscopia de dispersão de energia (EDS) e microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	<i>32</i>
4.1.3	<i>Difração de raios X (DRX)</i>	<i>32</i>
4.1.4	<i>Microscopia óptica.....</i>	<i>33</i>
4.1.5	<i>Análise térmica TG/DTA.....</i>	<i>33</i>
4.1.6	<i>Análise granulométrica</i>	<i>33</i>
4.1.7	<i>Índice de plasticidade.....</i>	<i>33</i>
4.2	Produção laboratorial	34
4.2.1	<i>Planejamento de produção</i>	<i>34</i>
4.2.2	<i>Processamento dos corpos de prova.....</i>	<i>35</i>
4.3	Ensaio físicos e mecânicos	37
4.3.1	<i>Retração linear.....</i>	<i>37</i>
4.3.2	<i>Massa específica aparente</i>	<i>37</i>
4.3.3	<i>Dureza Rockwell B</i>	<i>37</i>
4.3.4	<i>Porosidade.....</i>	<i>38</i>

4.3.5	<i>Resistência à flexão</i>	38
4.3.6	<i>Resistência à compressão</i>	39
4.3.7	<i>Absorção de água</i>	39
4.3.8	<i>Índice de abrasão</i>	40
4.4	<i>Classificação das amostras</i>	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Caracterização do material	41
5.1.1	<i>EDS e MEV</i>	41
5.1.2	<i>Difração de raios X</i>	42
5.1.3	<i>Microscopia óptica</i>	44
5.1.4	<i>Análise granulométrica</i>	45
5.1.5	<i>Índice de plasticidade</i>	46
5.1.6	<i>Termogravimetria e análise térmica diferencial</i>	48
5.2	Propriedades microestruturais, físicas e mecânicas das cerâmicas	49
5.2.1	<i>Difração de raios X</i>	49
5.2.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	51
5.2.2.1	<i>MEV 910 °C</i>	51
5.2.2.2	<i>MEV 970 °C</i>	54
5.2.3	<i>Análise visual</i>	57
5.2.4	<i>Retração Linear</i>	58
5.2.5	<i>Massa específica aparente</i>	58
5.2.6	<i>Dureza</i>	60
5.2.7	<i>Porosidade</i>	61
5.2.8	<i>Resistência à flexão em três pontos</i>	62
5.2.9	<i>Resistência à compressão</i>	63
5.2.10	<i>Absorção de água</i>	64
5.2.11	<i>Índice de abrasão</i>	65
5.2.12	<i>Classificação das amostras de acordo com as normas.</i>	65
5.2.13	<i>Análise estatística</i>	67
6	CONCLUSÕES	69
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RETRAÇÃO LINEAR - VARIACÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO	78

APÊNDICE B: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RETRAÇÃO LINEAR - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO.....	79
APÊNDICE C: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO.....	80
APÊNDICE D: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO ..	81
APÊNDICE E: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DUREZA - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO.....	82
APÊNDICE F: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DUREZA - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO.....	83
APÊNDICE G: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO.....	84
APÊNDICE H: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO.....	85
APÊNDICE I: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO	86
APÊNDICE J: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO	87
APÊNDICE K: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO.....	88
APÊNDICE L: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO.....	89

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a indústria de cerâmica vermelha se destaca como um dos setores de grande importância na economia, responsável por fornecer diversos produtos empregados na construção civil, como telhas, blocos e tubos cerâmicos. De acordo com os dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica, atualmente existem 5.578 empresas de cerâmicas e olarias e a produção corresponde a cerca de 6,5 bilhões de blocos e telhas por ano (ANICER, 2023).

No âmbito do Ceará, tendo em vista o grande volume de produção de artefatos cerâmicos e número de indústrias, foi criado, em 2004, o Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Russas (RODRIGUES NETO, 2016). Este APL contempla 115 empresas ceramistas em 4 municípios do estado do Ceará, das quais 76 % da produção de produtos cerâmicos são oriundas da cidade polo Russas (CENTEC, 2022).

São muitas as vantagens inerentes aos materiais cerâmicos, que vão desde a matéria-prima de custo relativamente baixo e disponível em abundância na natureza, até a qualidade técnica e estética dos produtos. Atualmente, há uma crescente busca por produtos que estejam em conformidade com as normas de qualidade estabelecidas nas políticas públicas. Os consumidores estão se tornando cada vez mais exigentes ao procurar por novos produtos, levando em consideração critérios como segurança e eficácia. Essa demanda está impulsionando mudanças no mercado, com as empresas se adaptando para oferecer produtos inovadores e que atendam às exigências de qualidade.

Reconhece-se que o piso intertravado cerâmico, também chamado de adoquim cerâmico, apresenta inúmeros benefícios como vida útil longa, resistência mecânica e durabilidade elevada, diversidade de cores exuberantes e fácil reparação (PINHEIRO, 2012). Entretanto, não há no Brasil legislação que regulamenta os padrões tecnológicos para a produção do adoquim cerâmico. Portanto, foi realizada uma correlação entre normas internacionais dos Estados Unidos e Colômbia, cujo conceito é bastante difundido para a fabricação do produto inovador *paver* cerâmico.

Nesse cenário, evidencia-se a necessidade de estudos que viabilizem a inserção de produto um inovador com alto valor agregado, que potencialize a capacidade produtiva e competitiva desse segmento.

1.1 Objetivo geral

Determinar as variáveis do processo de fabricação para a obtenção de um produto cerâmico inovador, denominado de piso intertravado cerâmico, a partir de massa argilosa oriunda do município de Russas, interior do Estado do Ceará.

1.2 Objetivos específicos

Espera-se ao final deste estudo, alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) Examinar as características físicas, químicas e mineralógicas das matérias-primas utilizando ensaios físicos e técnica de espectroscopia;
- b) Investigar microestruturalmente as alterações resultantes do aumento da temperatura e da carga de compactação;
- c) Avaliar o impacto da variação da carga de compactação sobre as propriedades físicas e mecânicas, visando identificar condições que otimizem essas características;
- d) Analisar a influência da variação da temperatura de sinterização que atribua propriedades superiores, como dureza, resistência à compressão e flexão;
- e) Identificar e avaliar as propriedades físicas e mecânicas correlacionando-as às normas internacionais voltadas para a produção de intertravado cerâmico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria de cerâmica vermelha

A indústria de cerâmica vermelha pode ser classificada como uma das indústrias de transformação pioneiras estabelecidas no contexto brasileiro. É o segmento responsável pela produção de materiais de cor avermelhada, como telhas, blocos e tubos cerâmicos, os quais compõem um setor fundamental na construção civil brasileira. Essa esfera é majoritariamente composta por micro e pequenas empresas, muitas das quais se caracterizam por não terem um modelo organizacional bem definido e dependem da demanda por matéria-prima mineral (argila) em grandes quantidades. Nesse contexto, estima-se que, em nível nacional, existam aproximadamente sete mil olarias e cerâmicas de pequeno e médio porte, gerando 293 mil empregos diretos e cerca de 900 mil empregos indiretos (ANICER, 2019).

No âmbito do Ceará, Russas é um município brasileiro localizado na mesorregião do Baixo Jaguaribe (Figura 1), destacando-se como um polo econômico com o crescente desenvolvimento de seus serviços e a expansão das indústrias. Russas é reconhecida como a localidade que concentra a maior atividade no ramo das indústrias cerâmicas no estado, com 90 empresas de cerâmica (CENTEC, 2024). A produção média corresponde a 76.000 milhões/mês, nas quais cerca de 3.200 empregos diretos são oferecidos (INT, 2012).

Figura 1 - Localização do município de Russas no Estado do Ceará.



Fonte: CENTEC (2023).

Os Arranjos Produtivos Locais (APLs) correspondem a aglomerações de empresas que operam em torno de uma atividade produtiva principal e que têm a capacidade de desenvolver redes colaborativas, fortalecendo a competitividade e fomentando a inovação e a interação entre as empresas (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2019).

A APL de Cerâmica Vermelha de Russas, por sua vez, é um tipo único de organização econômica e teve seu funcionamento iniciado por volta do ano de 2004. Atualmente, esse APL conta com a participação de 115 empresas entre os quatro municípios congregados: Russas, Limoeiro do Norte, Alto Santo e Quixeré (CENTEC, 2022). Essa iniciativa foi desenvolvida com o objetivo de promover o processo de organização do setor, por meio do aprimoramento tecnológico e fortalecimento da gestão empresarial vigente, visando contribuir para a consolidação e crescimento da economia regional (REGIS, 2025; RODRIGUES NETO; MOTA, 2017).

Esta atividade teve início quando se descobriu a potencialidade da região para a extração de argilas, uma vez que a cidade se situa em plena bacia sedimentar do Rio Jaguaribe, área naturalmente propícia ao acúmulo de macros minerais (argilas), durante os períodos chuvosos quando o rio transporta grande quantidade de sedimentos. Este fato natural estimulou a população local a aproveitar esta matéria-prima para a fabricação da cerâmica vermelha (LUCENA, 2021).

Nessa região, mesmo contendo uma quantidade significativa de fábricas em funcionamento e constituindo um aglomerado de reconhecimento nacional, o conhecimento científico e tecnológico estruturado e sistematizado ainda não se aproximou do setor (EL OUAHABI *et al.*, 2019; NUNES, BARRETO, 2019; RODRIGUES NETO, 2016). Estudos realizados no contexto local evidenciam um baixo grau de inovação empregada no setor, tanto relacionada à matéria-prima e ao processo produtivo, quanto aos produtos comercializados, predominantemente, telhas e blocos de vedação (GONDIM, 2021; HUANCA, 2013). Além disso, também é registrada a baixa qualificação da mão de obra, caracterizada por possuir baixo nível de escolaridade, na grande maioria com idade que varia de 19 a 25 anos (IEL/SEBRAE/ SINDICERÂMICA, 2002).

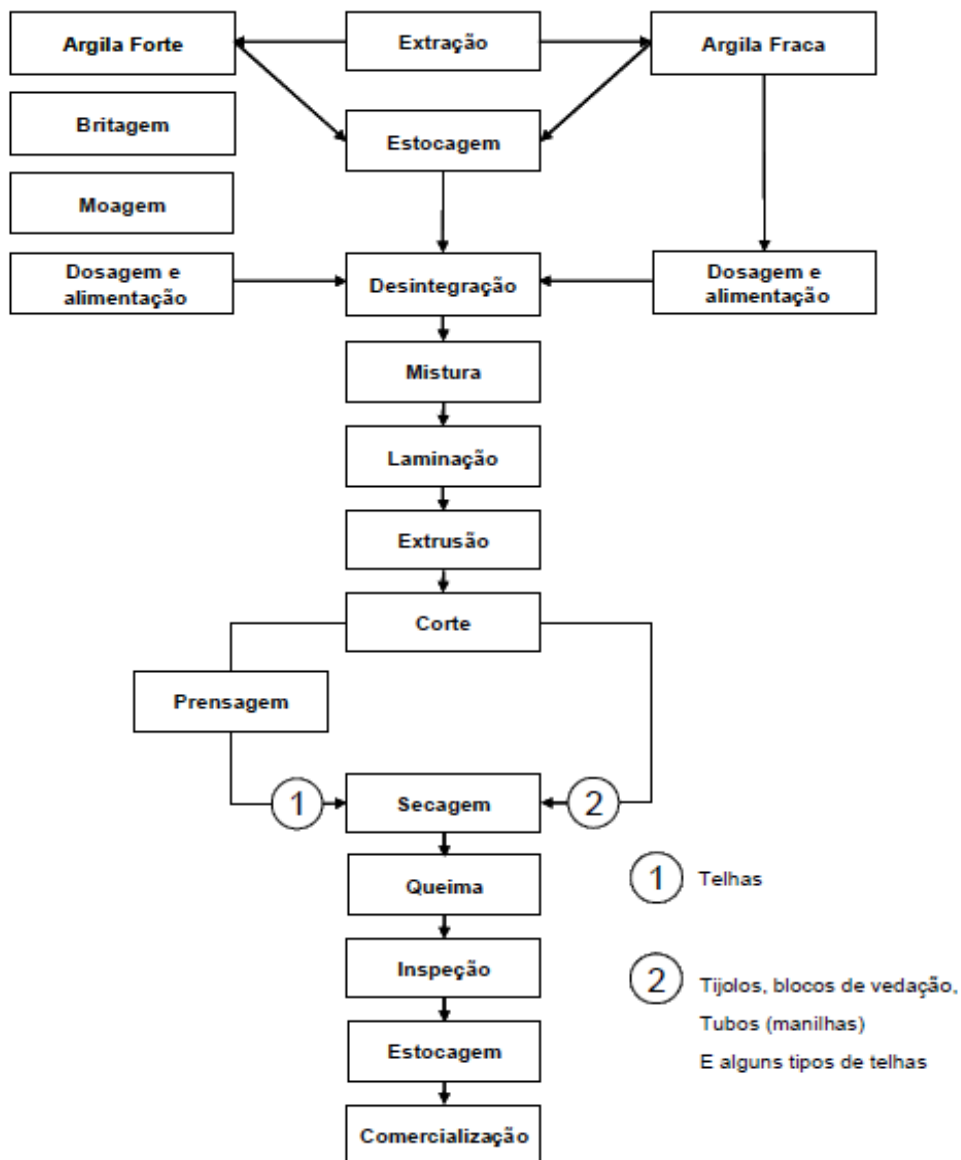
Há uma uniformidade no porte das empresas de cerâmica vermelha da região. Em uma amostragem simples de 50 empresas, observa-se que 84 % caracterizam-se como pequenas empresas, contendo de 20 a 99 empregados, e 16 % são microempresas (BRASIL, 2008). Conforme a pesquisa realizada por IEL/SEBRAE/ SINDICERÂMICA (2002), nessas empresas, é comum a prática do empirismo, do conhecimento tácito e prático, portanto, não é

comum a realização de treinamentos e capacitação da mão de obra, exceto através de orientações na própria empresa e cursos técnicos realizados no arranjo.

2.2 Cerâmica vermelha

O processo de fabricação da cerâmica vermelha ocorre de forma similar na maioria das empresas do segmento (Figura 2), havendo pouca variação no que concerne às características peculiares de cada matéria prima ou ao produto final.

Figura 2 - Processamento de cerâmica vermelha.



A extração é executada por meio de retroescavadeiras e escavadeiras e o traslado da jazida para a cerâmica é realizado através de caminhões. A argila é separada em montes em função das diferentes camadas encontradas no solo e estocadas por um longo período no pátio a céu aberto da empresa. Essa técnica é chamada de sazonalidade, cujos processos de intemperismo provocam o alívio de tensões dos blocos de argila, melhoram sua plasticidade e homogeneizam a umidade (CAVALCANTE, 2014).

Após o processo de sazonalidade destinado ao descanso das matérias-primas, a massa é obtida a partir da mistura entre a argila forte e a argila fraca. A massa é umidificada acima do limite de plasticidade, dosada em caixão alimentador, homogeneizada em misturador e laminador, de forma a garantir a desagregação dos torrões. A seguir, o material é conformado em extrusora (comumente chamado de marombas) e cortado na forma final de blocos de cerâmicos. Quando se refere a telhas, um passo é incluído, destinado à prensagem. Após a extrusão, os blocos são empilhados e levados para a secagem à temperatura ambiente ou em estufas e, em seguida, queimado em fornos (LIMA, 2009).

2.3 Argila

Na indústria ceramista, a matéria-prima essencial é a argila, cuja característica principal é a plasticidade. As argilas são solos sedimentares que se formam ao longo dos anos em função do intemperismo físico e químico sobre as rochas cristalinas e sedimentares (ARAÚJO, 2000).

Na região do Baixo Jaguaribe, as argilas presentes não mostram uma composição mineralógica homogênea uma vez que constituem depósitos secundários ou alóctones. Logo, a matéria-prima ali existente não foi formada *in situ*, mas sim transportada de muitos quilômetros de distância, em suspensão, pelas águas do rio, e depositadas em calhas e nas planícies de inundação ao longo do seu curso inferior.

A argila utilizada para fabricação da cerâmica vermelha é um material natural terroso, de baixa granulometria e que apresenta em sua composição argilominerais e minerais acessórios, como por exemplo, quartzo, feldspato, mica e hematita. Os argilominerais dão as características primordiais no material cerâmico, enquanto alguns minerais atuam como fundentes e outros inertes com a função de enchimento, como a presença de impurezas e materiais orgânicos.

Apresenta plasticidade quando misturado à água e a propriedade de retração, cujo

volume varia de acordo com a variação da umidade. A porosidade (relação entre volume de vazios e volume total) influencia na resistência mecânica e na densidade e está diretamente associada à temperatura de tratamento (CAVALCANTE, 2014).

A adição de água na massa argilosa facilita a moldagem ao atuar como um lubrificante entre as partículas, permitindo que elas deslizem umas sobre as outras. Isso é especialmente importante em processos de conformação como extrusão e prensagem, onde a massa deve ser suficientemente moldável para formar peças densas e uniformes. Um controle adequado da quantidade de água é essencial para minimizar a porosidade excessiva, que pode comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do material. A eliminação gradual da água durante a secagem permite minorar a formação de fissuras e defeitos estruturais.

Para Andrade *et al.* (2008), a massa cerâmica é descrita como triaxial, sendo formada por argilas, quartzo e feldspato. No processo de fabricação da cerâmica tradicional, esses três componentes têm a função de promover e regular a plasticidade, a fusibilidade e a capacidade refratária.

Os argilominerais são os minerais típicos das argilas, definidos quimicamente como silicatos hidratados de alumínio ou magnésio, compostos também por outros elementos, sendo eles ferro, potássio, lítio, entre outros. Após o processo de moagem, constituem juntamente com a água uma pasta de consistência mais ou menos plástica, na qual passa por um processo de endurecimento após a secagem ou queima (SOUTO, 2008).

A característica de plasticidade das argilas está fortemente relacionada a esses elementos, em função das forças de atração entre as partículas lamelares de argilominerais eletricamente carregadas e, ao efeito lubrificante da água presente entre essas partículas. Ainda, a granulometria dos argilominerais presentes nas massas cerâmicas está associada a forma e tamanho das partículas, a permeabilidade e a resistência mecânica em estado verde e após a secagem dos produtos cerâmicos (ZACCARON *et al.*, 2015; SOUTO, 2008).

De acordo com Perez (2008), a presença de feldspato na argila é fundamental para a produção de cerâmica vermelha, desempenhando um papel crucial na eliminação da porosidade intergranular. As pressões de compactação empregadas atualmente na fabricação de cerâmicas não são suficientes para alcançar essa eliminação. Durante o processo de sinterização, o feldspato, ao fundir, atua como um componente líquido que preenche os vazios intergranulares. Este líquido possui a viscosidade adequada para penetrar nos capilares e também, é capaz de dissolver os grãos refratários não reagidos, promovendo uma microestrutura mais densa e resistente.

O quartzo é um mineral estável que ajuda a manter a forma da cerâmica durante o processo de queima. Sua estrutura cristalina resistente contribui para a estabilidade dimensional da peça final, minimizando a deformação.

2.4 Adoquim cerâmico

O adoquim cerâmico é um tipo de pavimento intertravado com grande potencial de aplicação em projetos de urbanização e paisagismo. O processo de fabricação tradicional, similar ao da cerâmica vermelha, consiste na moagem por via seca das matérias-primas (argilas), conformação por extrusão seguida de uma etapa de secagem das peças, que na maioria das indústrias ocorre ao ar livre. Posteriormente, o adoquim passa pela etapa de queima em fornos contínuos ou descontínuos, cuja duração costuma ser em torno de 24 horas.

Este tipo de produto dispõe de inúmeras características atrativas ao mercado da construção civil. Uma das principais é a elevada resistência mecânica e grande durabilidade, tornando-o propício à utilização em áreas com trânsito de veículos e pedestres, suportando as condições climáticas e desgaste (SILVA, 2020).

Além disso, apresenta a facilidade de manejo, aplicação e reparação, tendo em vista que as obras podem ser liberadas ao tráfego imediatamente após a execução (FERREIRA, 2019). O adoquim cerâmico apresenta uma variedade de formatos, coloração natural e texturas, o que permite criar diferentes padrões e designs exuberantes, conforme apresentado na Figura 3, possibilitando a criação de espaços urbanos esteticamente agradáveis e funcionais (ALMEIDA *et al.*, 2020).

Figura 3 - Adoquins cerâmicos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma das vantagens desse tipo de bloco, é que podem ser fabricados com matérias-primas naturais, não precisando de aditivos especiais e podem conter materiais reciclados de outros processos industriais (FERREIRA *et al.*, 2019).

2.5 Legislação e propriedades tecnológicas

Na Europa e em outros países da América Latina a sua utilização é mais difundida, porém essa prática ainda é pouco observada no Brasil, pela inexistência desse produto no mercado local (DIAS *et al.*, 2016; SANTOS, 2013).

Tendo em vista a inexistência de normas brasileiras, foi sugerida a caracterização de adoquins mediante a correlação das normas colombianas NTC 5282 e NTC 3829 e das normas estadunidenses ASTM C 902 e ASTM C 1272, devido ao posicionamento geográfico e maior proximidade entre os fatores ambientais do Brasil (ICONTEC, 2004a; ICONTEC, 2004b; ASTM, 2015; ASTM, 2017). A norma espanhola UNE-NE 1344 e a norma brasileira para peças pré-moldadas de concreto ABNT NBR 9781 foram mencionadas como ilustração (ABNT, 2013; UNE, 2015).

2.5.1 Norma estadunidense – ASTM

As normas da American Society for Testing and Materials - ASTM C 1272 e C 902 classificam, respectivamente, os adoquins para pavimentação em vias de tráfego pesado e leve.

A ASTM C 1272 – Standard Specification for Heavy Vehicular Paving Brick, destina-se à utilização de adoquins em pavimentação de lugares com alto volume de tráfego de veículos pesados, como ruas, calçadas comerciais e pistas de táxi de aeroporto. Adoquins de pavimentação veicular são classificados de acordo com o tipo de instalação, como Tipo R ou Rígidos e Tipo F ou flexíveis:

Tipo R: Adoquins assentados sobre camada de argamassa e apoiados em base de concreto, ou assentados sobre asfalto e apoiados em base de concreto ou asfalto.

Tipo F: Adoquins assentados sobre leito de areia com juntas de areia e base adequada.

A ASTM C 902 – Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick é destinada a pavimentos sujeitos a tráfego de pedestre e baixo volume de trânsito

veicular. Além disso, são classificados quanto ao clima e intensidade de exposição ao tráfego, descritos a seguir:

SX: O tijolo pode ser congelado enquanto estiver saturado com água.

MX: Destinado ao uso externo onde a resistência ao congelamento não seja um fator.

NX: Destinado ao uso interno

Tipo 1: Adoquim submetido a alta abrasão (calçadas e espaços públicos).

Tipo 2: Adoquim submetido a abrasão intermediária (calçadas residenciais e calçadas com muito movimento).

Tipo 3: Adoquim submetido a baixa abrasão (pisos ou pátios de residências).

A Tabela 1 indica os requisitos físicos e mecânicos para produção de adoquins cerâmicos, de acordo com as normas técnicas da American Society for Testing and Materials para tráfego pesado e leve.

Tabela 1 - Requisitos¹ para produção de adoquim cerâmico, de acordo com a ASTM C 902: 2015 e ASTM C 1272: 2017.

Tráfego	Norma ASTM	Tipo	RC mín. (MPa)	AA máx. (%)	Tipo	IA máx. (%)	VPA (cm ³ /cm ²)
Pesado	C 1272/2006	Tipo R	55	6	Tipo R	0,11	1,7
	C 1272/2006	Tipo F	69	6	Tipo F	0,11	1,7
Leve	C 902/2006	SX	55,2	8	Tipo I	0,11	1,7
	C 902/2006	MX	20,7	14	Tipo II	0,25	2,7
	C 902/2006	NX	20,7	Sem limite	Tipo III	0,5	4

¹ Especificações técnicas, média de 5 unidades; AA – Absorção de água; RC – Resistência à compressão; IA – Índice de abrasão; VPA - Volume perdido por abrasão.

Fonte: Adaptado das normas ASTM (2015) e ASTM (2017).

2.5.2 Norma colombiana – NTC

As normas colombianas NTC 5282 e NTC 3829 classificam, respectivamente, os adoquins para pavimentação em vias de tráfego pesado e tráfego leve.

A NTC 5282 – Adoquim de arcilla para tráfico vehicular pesado, referencia a

utilização do material em lugares com alto volume de tráfego veicular. Projetadas para uso em locais como ruas, entradas de veículos em prédios comerciais, estacionamentos públicos de grande volume (aeroportos e shopping centers), podendo ser classificada, de acordo com o tipo de instalação, como Tipo R ou Rígidos e Tipo F ou flexíveis:

Tipo R: Adoquins assentados sobre camada de argamassa e apoiados em base de concreto, ou assentados sobre asfalto e apoiados em base de concreto ou asfalto.

Tipo F: Adoquins assentados sobre uma camada de areia, com juntas de areia e suportada por uma base adequada, conformada por materiais granulares compactados.

A NTC 5282 – Adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano é destinada a pavimentos articulados, capaz de suportar trânsito de pedestres e veículos leves. De acordo com a severidade das condições de uso, são subdivididos em três tipos:

Tipo 1: Adoquim exposto à alta abrasão (edifícios públicos e comerciais).

Tipo 2: Adoquim exposto à abrasão intermediária (lojas e passarelas externas).

Tipo 3: Adoquim exposto à baixa abrasão (pisos ou pátios de casas unifamiliares).

A Tabela 2 indica os requisitos físicos e mecânicos para produção de adoquim cerâmicos, de acordo com as Normas Técnicas Colombianas para tráfego pesado e leve.

Tabela 2 - Requisitos¹ para produção de adoquim cerâmico, de acordo com a NTC 5282 e 3829: 2004.

Tráfego	Norma NTC	Tipo	RC mín. (MPa)	AA máx. (%)	IA máx. (%)	VPA (cm³/cm²)
Pesado	5282/2004	Tipo R	55	6	0,11	1,7
	5282/2004	Tipo F	69	6	0,11	1,7
Leve	3829/2004	Tipo I	55,2	8	0,11	1,7
	3829/2004	Tipo II	38	14	0,25	2,7
	3829/2004	Tipo III	20,7	Sem limite	0,5	4

¹ Especificações técnicas, média de 5 unidades; AA – Absorção de água; RC – Resistência à compressão; IA – Índice de abrasão; VPA - Volume perdido por abrasão.

2.5.3 Norma espanhola – UNE

A norma UNE-EN 1344/2015 Adoquines de arcilla cocida - Especificaciones y métodos de ensayo apresenta os parâmetros de aceitação de adoquins cerâmicos na Espanha. A Tabela 3 indica os parâmetros mínimos necessários para produção de adoquim cerâmico.

Tabela 3 - Requisitos¹ para produção de adoquim cerâmico, de acordo com a UNE-EN 1344/2015.

Propriedades	Limites admissíveis
Resistência a gelo/degelo	Resistente
Carga de ruptura transversal	Valor médio ≥ 80 N/mm
Resistência à abrasão	Valor médio ≤ 450 mm ³
Resistência ao deslizamento	≥ 55
Resistência aos ácidos	$\leq 7\%$

¹ Especificações técnicas, média de 5 unidades
Fonte: Adaptado da norma UNE (2015).

Esta norma apresenta-se direcionada a um país pertencente à Europa com variações climáticas significativas, onde devem ser consideradas superfícies escorregadias e oscilação entre gelo e degelo, entre outros. Diante da generalidade da norma, optou-se citá-la apenas como referência.

2.5.4 Norma brasileira - PPC

Para fins de comparação, a norma NBR 9781 (2013) estabelece os requisitos físicos de Peças Pré-moldadas de Concreto - PPC para pavimentação intertravada seja para tráfego leve que abrange o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais, quanto para o tráfego pesado, no qual compreende o tráfego de veículos especiais e solicitações que produzam abrasão acentuada.

A Tabela 4 indica os requisitos físicos e mecânicos para produção de PPC, de acordo com as Normas Técnicas Brasileiras.

Tabela 4 - Requisitos para peças pré-moldadas de concreto, de acordo com a NBR 9781: 2013.

Requisitos		Limites admissíveis	
Tolerância dimensional	Comprimento	$\pm 3,0$ mm	Máx. 250 mm
	Largura	$\pm 3,0$ mm	Mín. 97 mm
	Altura	$\pm 5,0$ mm	Mín. 60 mm
Resistência à compressão	Tráfego leve	$\geq 35,0$ (Mpa)	
	Tráfego pesado	$\geq 50,0$ (Mpa)	
Absorção de água	Tráfego leve e pesado	≤ 6 %	
Resistência à abrasão (opcional)	Tráfego leve	≤ 23 mm	
	Tráfego pesado	≤ 20 mm	

Fonte: Adaptado da norma ABNT (2013).

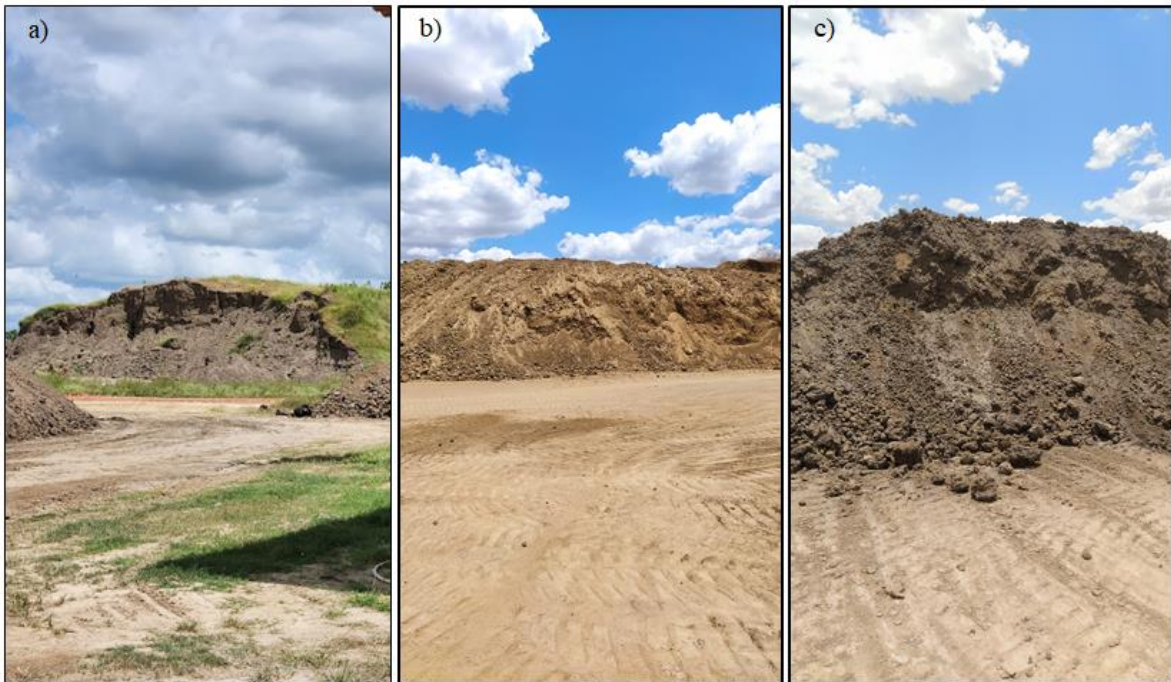
Observando as tabelas anteriores, é possível notar que os requisitos técnicos para a produção de intertravado cerâmico tendem a seguir um mesmo modelo, de modo a abranger as condições climáticas de cada país. O clima do Brasil é predominantemente tropical, cujas variações climáticas abruptas ocorrem especialmente no sul do país. Deste modo, algumas propriedades não se aplicam às condições dos demais estados brasileiros, como por exemplo, a resistência ao gelo/degelo (SANTOS, 2013).

3 MATERIAL

As argilas estudadas são oriundas da jazida localizada no Estado do Ceará, situada no município de Russas, região do baixo Jaguaribe, coletadas pela empresa colaboradora, Cerâmica Kappa. Correspondem às matérias-primas utilizadas na massa cerâmica, cuja formulação de massa consiste na adição de argila gorda e argila magra.

Foi obtido, inicialmente, cerca de 20 kg das matérias-primas para caracterização dos materiais, na qual foram coletadas diretamente do depósito ao ar livre e encaminhadas ao Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, para realização dos ensaios. A Figura 4 apresenta, respectivamente, a argila gorda, a argila magra e a mistura argilosa dispostas em pilhas no pátio da cerâmica.

Figura 4 - Matéria-prima: a) argila gorda, b) argila magra e c) mistura argila gorda e magra.



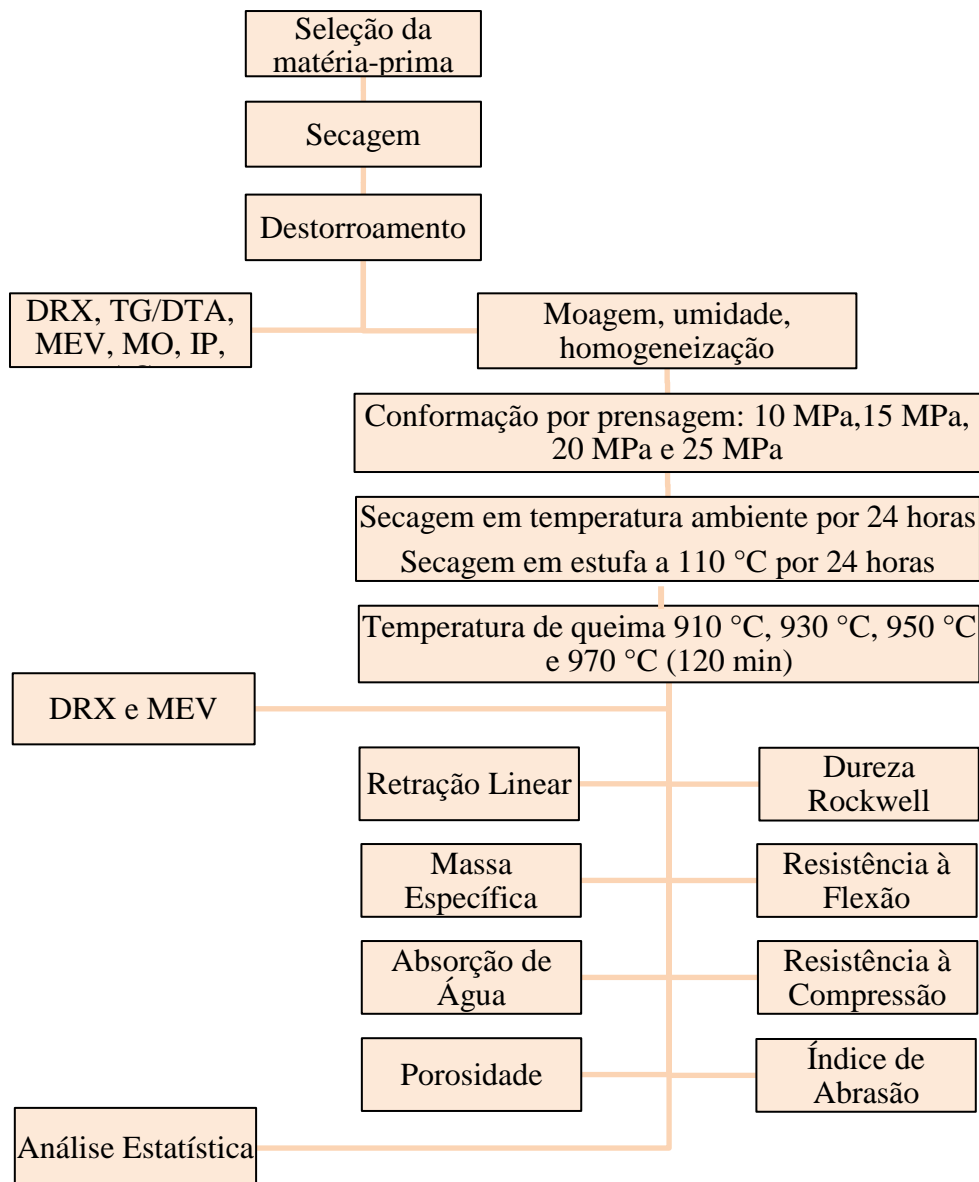
Fonte: Elaborado pela autora.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada para o procedimento experimental consiste na caracterização das matérias-primas, produção laboratorial e determinação das propriedades tecnológicas do produto.

Foi estabelecido um fluxograma determinando as etapas da metodologia experimental do estudo conforme a Figura 5:

Figura 5 - Fluxograma da metodologia experimental adotada no estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Caracterização da matéria-prima

4.1.1 Beneficiamento das matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas a ensaios de caracterização química, morfológica, mineralógica e física. Para isso, as amostras coletadas foram previamente secas em temperatura ambiente e, em seguida, posto em estufa a 60 °C durante 24 horas. A Figura 6 indica as amostras coletadas de argila gorda, argila magra e mistura de argila gorda e magra (MAGM – 4:1 em volume).

Figura 6 - Amostras de (a) argila gorda (b) argila magra e (c) mistura de argila gorda e magra.



Fonte: Elaborado pela autora.

Posteriormente, o material passou pelo processo de quarteamento a fim de se obter uma amostra representativa e em seguida, destorroada manualmente com almofariz e pistilo, conforme Figura 7.

Figura 7 - Quarteamento e destorroamento das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Espectroscopia de dispersão de energia (EDS) e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A espectroscopia de dispersão de energia (EDS) é uma técnica analítica que permite a caracterização química e análise elementar de materiais, enquanto a microscopia eletrônica de varredura (MEV) fornece informações sobre a morfologia. O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, através do microscópio eletrônico de bancada TESCAN modelo VEGA XMU, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Microscópio eletrônico de varredura bancada VEGA XMU.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.3 Difração de raios X (DRX)

As medidas de difração de raios X das argilas foram conduzidas em difratômetro PANalytical (X'pert Pro MPD), operando em modo contínuo e radiação k_{α} proveniente do tubo de cobalto operado com foco linear a 40 kV e 45 mA. Os difratogramas foram obtidos no intervalo de 3° a 50° (2θ), no Laboratório de Raios X da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. A identificação de fases cristalinas foi realizada por meio do software X-Pert HighScore Plus (Panalytical) com bases de dados Crystallography Open Database (COD).

4.1.4 Microscopia óptica

As amostras das argilas foram analisadas por microscopia óptica através do estereomicroscópio da marca NIKON, modelo SMZ18, disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici.

4.1.5 Análise térmica TG/DTA

As matérias-primas foram avaliadas termicamente pelas análises TG (termogravimétrica) e DTA (análise térmica diferencial), realizadas simultaneamente no equipamento modelo STA 449 F3 Jupiter, Netzsch, em taxa de 10 °C/min em atmosfera de nitrogênio, disponível no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici.

4.1.6 Análise granulométrica

As distribuições granulométricas das argilas foram determinadas por técnicas de peneiramento e sedimentação de acordo com as normas NBR 6457-16 (ABNT, 2016a) e NBR 7181-16 (ABNT, 2016d). Após a preparação das amostras, o material passou pelo peneiramento grosso, até a peneira de 2 mm, peneiramento fino, até a peneira de 0,075 mm e sedimentação, material passado na peneira de 0,075 mm. A sedimentação baseia-se na Lei de Stokes na qual a velocidade terminal de sedimentação depende do tamanho de partícula e viscosidade do fluido determinado (PINHEIRO, 2012).

4.1.7 Índice de plasticidade

De acordo com Pinheiro (2012), o limite de plasticidade (LP) indica a quantidade mínima de água necessária para que se atinja o estado de consistência plástica e o limite de liquidez (LL) está associado à quantidade de água em que o material apresenta consistência de lama, excedendo, deste modo, a faixa de consistência plástica. Já o índice de plasticidade (IP) é a diferença entre LL e LP, indicando a faixa de consistência plástica. Esses critérios são estabelecidos de acordo com a Tabela 5:

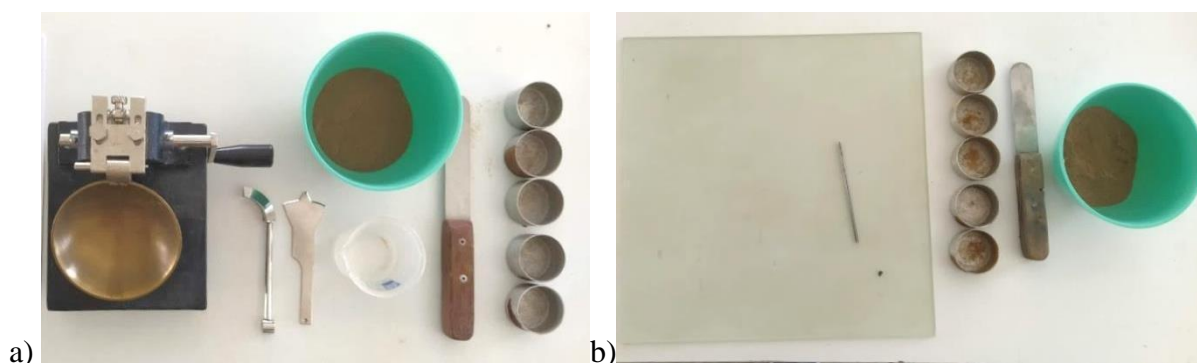
Tabela 5 - Critérios da massa argilosa de acordo com o índice de plasticidade.

Índice de plasticidade IP (%)	Nível de plasticidade da matéria prima
IP = 0	Não plástico
$1 < IP < 7$	Pouco plástico
$7 < IP < 15$	Plasticidade média
IP > 15	Muito plástico

Fonte: Adaptado de Lima (2009).

O índice de plasticidade das argilas foi determinado de acordo com as normas NBR 6459-16 (ABNT, 2016b) e NBR 7180-16 (ABNT, 2016c) para cálculo dos limites de Atterberg (Figura 9).

Figura 9 - Ensaio de (a) limite de liquidez e (b) limite de plasticidade.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Produção laboratorial

4.2.1 Planejamento de produção

A massa corresponde à mistura entre argila gorda e argila magra na proporção de 4:1. Diante disso, estipulou-se a seguinte quantidade de corpos de prova para cada parâmetro de processamento, conforme a Tabela 6:

Tabela 6 - Quantidade de corpos de prova.

C.C. Temp.	CP TIPO 1				CP TIPO 2			
	5 kN	7,5 kN	10 kN	12,5 kN	28,3 kN	42,5 kN	56,7 kN	70,9 kN
910 °C	15	15	15	15	5	5	5	5
930 °C	15	15	15	15	5	5	5	5
950 °C	15	15	15	15	5	5	5	5
970 °C	15	15	15	15	5	5	5	5

C.C.: Carga de compactação; Temp.: Temperatura de sinterização; CP TIPO 1: Corpos de prova destinados aos ensaios de retração linear, absorção de água, massa específica aparente, dureza, compressão axial, índice de abrasão e microscopia eletrônica de varredura; CP TIPO 2: Corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à flexão.

Fonte: Elaborado pela autora.

O seguinte código foi utilizado para facilitar a identificação dos corpos de prova: Temperatura + n° do CP + Carga de Compactação.

Onde n° de CP corresponde ao número sequencial do corpo de prova.

A	910 °C	+ n° do CP +	1	5 kN
B	930 °C		2	7,5 kN
C	950 °C		3	10 kN
D	970 °C		4	12,5 kN

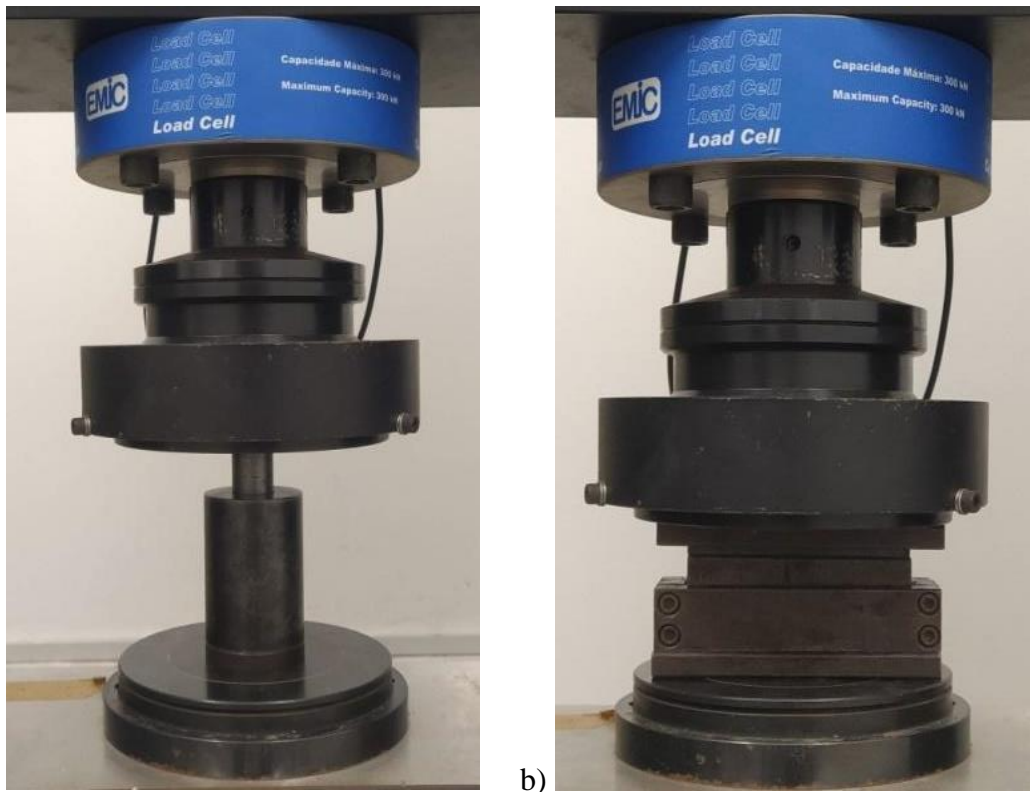
Para ilustrar, o código B094 corresponde à amostra sinterizada a 930°C, corpo de prova de número 09, submetido à carga de compactação 12,5 kN.

4.2.2 Processamento dos corpos de prova

A massa argilosa foi submetida à secagem em estufa à temperatura de 100 °C durante 24 horas. Após a etapa de secagem, a formulação cerâmica foi destorroada com o auxílio de almofariz e pistilo para realizar a desagregação das partículas e, em seguida, homogeneizada em misturador com a adição de aproximadamente 8 % de água.

Os corpos de prova foram conformados por meio de prensagem uniaxial (Figura 10) em molde metálico nas seguintes dimensões médias: (a) CP TIPO 1 – 25 x 17,5 mm (D x A) e (b) CP TIPO 2 - 115 x 24 x 15,5 mm (C x L x A).

Figura 10 - Matrizes metálicas submetidas à prensagem (a) CP Tipo 1 e (b) CP Tipo 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os corpos de prova do Tipo 1 foram submetidos às pressões de compactação de 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa e 25 MPa, na máquina de ensaio universal EMIC com capacidade máxima de até 300 kN, presente no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFC, Campus de Russas.

A secagem lenta é um fator determinante para evitar o trincamento das peças durante a queima. Deste modo, os blocos foram secos em temperatura ambiente por 72 horas e, em seguida, secos em estufa com temperatura de 110 °C até alcançarem peso constante.

As amostras foram queimadas em forno laboratorial tipo mufla elétrica, modelo Linn Elektro Therm, equipada com um sistema de controle de temperatura e tempo, presente no Laboratório Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, nas temperaturas de 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C. O ciclo de queima consiste na taxa de aquecimento de aproximadamente 2 °C/min e tempo de permanência de 120 minutos ao atingir as respectivas temperaturas de patamar. As peças passaram pelo resfriamento dentro do próprio forno e, em seguida, foram retiradas em temperatura ambiente.

4.3 Ensaios físicos e mecânicos

4.3.1 Retração linear

O ensaio de retração linear foi realizado utilizando um paquímetro digital, no qual foram realizadas as medições dos corpos de prova verdes (secas e não cozidas) e, em seguida, nas peças sinterizadas. A retração linear foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$RL (\%) = \frac{L_o - L_q}{L_o} * 100\% \quad [1]$$

Onde L_o é o comprimento do corpo antes da queima (mm) e L_q é o comprimento do corpo após a queima (mm).

4.3.2 Massa específica aparente

A determinação da massa específica aparente foi realizada conforme a razão entre o peso da peça após a queima e o volume total (volume das partículas e volume dos poros). A massa específica aparente (g/cm^3) foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$MEA (g/cm^3) = \frac{M}{V} \quad [2]$$

Onde M é a massa (g) do corpo de prova seco ou queimado e V é o volume (cm^3) do corpo de prova seco ou queimado.

4.3.3 Dureza Rockwell B

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado utilizando duas amostras referentes a cada característica estudada. As medidas dos ensaios foram feitas através de um Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1, pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici.

Para a realização do ensaio de dureza Rockwell B foram realizadas cerca de quatro indentações por amostra, no qual determina a resistência à penetração de um metal duro submetida a uma carga de 100 kgf e tempo de penetração de 10 s.

A Figura 11 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio de dureza Rockwell B.

Figura 11 - Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.4 Porosidade

O cálculo da porosidade foi realizado pela relação entre o peso de água incorporada ao corpo de prova e seu volume total, com o objetivo de entender a quantidade de poros em relação ao volume total.

A porosidade foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$P (\%) = \frac{M_u - M_s}{V} * 100\% \quad [3]$$

Onde M_u é a massa (g) úmida do corpo de prova, M_s é massa (g) seca do corpo de prova e V o volume do corpo de prova seco (cm^3).

4.3.5 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado utilizando 5 corpos de prova em forma de barra (CP TIPO 2) referentes a cada característica estudada. Estas barras foram inicialmente apoiadas em dois cutelos e, em seguida, aplicadas uma carga crescente na região superior central da amostra. O esforço foi aumentado gradualmente até ocorrer a ruptura.

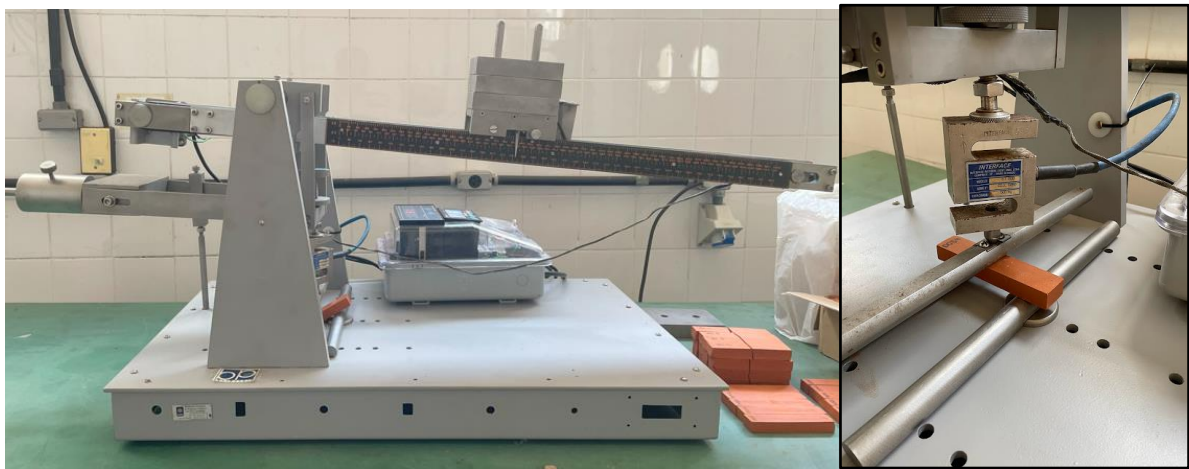
Para determinação da resistência à flexão a 3 pontos foi utilizado um deflectômetro BP/20 da BP Engenharia (Figura 12) pertencente ao Laboratório de Materiais

Cerâmicos da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. Os resultados foram obtidos fazendo uso da equação a seguir:

$$\sigma = \frac{3*P*l}{2*b*d^2} \quad [4]$$

Onde P é a força, l a distância entre cutelos, b a largura do corpo de prova e d a espessura do corpo de prova.

Figura 12 - Defletômetro para determinação da tensão de ruptura à flexão.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.6 Resistência à compressão

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaio universal EMIC com capacidade máxima de até 300 kN, presente no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas. A resistência à compressão (MPa) foi dada de acordo com a equação:

$$RC = \frac{F}{A} \quad [5]$$

Onde F é a carga (N) aplicada no corpo de prova no momento de ruptura e A é a área de aplicação da carga (mm²).

4.3.7 Absorção de água

A absorção de água foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 15270-2 (2023) para blocos cerâmicos. A absorção de água é dada pela seguinte equação:

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} * 100\% \quad [6]$$

Onde M_u é a massa (g) úmida do corpo de prova e M_s é massa (g) seca do corpo de prova.

4.3.8 Índice de abrasão

O cálculo do índice de abrasão (IA) foi realizado conforme as preconizações das normas NTC 3829 e NTC 5282 (2004), que determinam que o IA deve ser calculado relacionando a porcentagem de absorção de água, em valor absoluto, e a resistência à compressão em MPa, de acordo com a seguinte equação:

$$IA = \frac{0,69 * AA}{RC} \quad [7]$$

Onde AA é a absorção de água em valor absoluto (%) e RC é a resistência à compressão (MPa).

4.4 Classificação das amostras

Os dados obtidos foram classificados de acordo com as normas dos Estados Unidos e Colômbia para a produção de adoquins. Os resultados de resistência à compressão e absorção de água foram sujeitos a tratamento estatístico em duas etapas: o teste ANOVA (análise de variância) e teste de Tukey. A ANOVA é uma técnica estatística usada para testar se há diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos. Ela avalia a hipótese nula de que todas as médias dos grupos são iguais contra a hipótese alternativa de que pelo menos uma média é diferente. O teste de Tukey é um teste *post-hoc* utilizado após a ANOVA com resultados significativos, para determinar quais grupos diferem significativamente entre si.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da caracterização da matéria-prima e os ensaios realizados para caracterização física, mecânica e microestrutural das peças cerâmicas.

5.1 Caracterização do material

5.1.1 EDS e MEV

A Tabela 7 apresenta os percentuais coletados das medições de espectroscopia de dispersão de energia (EDS) das amostras de argila gorda e argila magra. O resultado indica que a composição básica das amostras estudadas é formada majoritariamente por sílica, alumina e óxido de ferro, característico de matérias-primas usadas na indústria de cerâmica vermelha.

Tabela 7 - Valores de EDS das amostras de argila gorda e argila magra.

Amostra	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	FeO	CaO	TiO ₂
Argila gorda	2,417	23,395	46,822	4,488	22,969	-	-
Argila magra	2,724	22,182	51,079	4,743	16,136	1,313	1,824

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme a Tabela 7, o teor de óxido de silício (SiO₂) varia entre 46 e 51 %, estando associado à presença de silicatos e sílica livre (quartzo, feldspato, mica, entre outros). O óxido de alumínio (Al₂O₃), em sua maior parte disponível na forma combinada, varia entre 22 e 23 % e contribui para a formação dos argilominerais, como a caulinita. A presença de argilominerais que contém alumina aumenta a plasticidade da argila e confere um produto mecanicamente resistente (DIAO *et al.*, 2021).

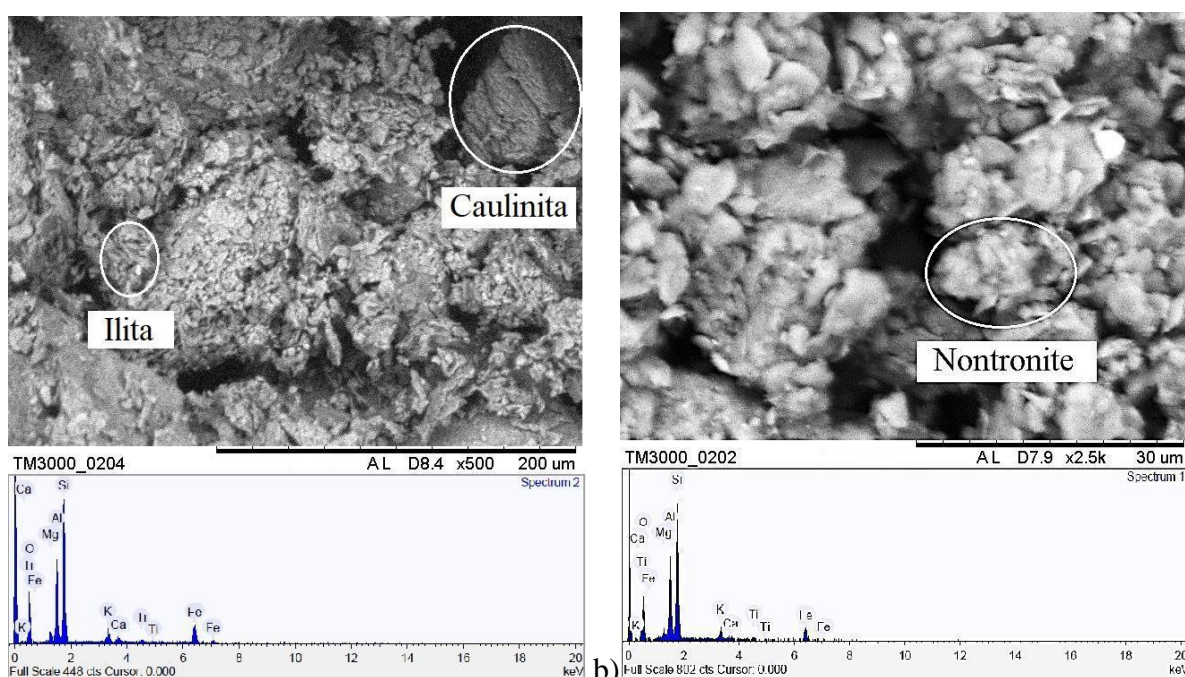
O óxido de magnésio (MgO), o óxido de potássio (K₂O) e o óxido de cálcio (CaO), são agentes fundentes, que contribuem para a formação da fase líquida durante o processo de queima e, são responsáveis pela vitrificação dos materiais cerâmicos.

Os altos teores de óxido de ferro (FeO) variam entre 16 e 22 %, conferindo ao material uma cor avermelhada e refratariedade reduzida. A presença de óxidos alcalinos e alcalino-terrosos propicia o aumento da resistência mecânica dos tijolos e leva a uma

temperatura de sinterização mais baixa (BRITO *et al.*, 2015; MACÊDO *et al.*, 2011; REGIS *et al.*, 2024; REHMAN, AHMAD, RASHID, 2020).

A Figura 13 apresenta as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) da argila gorda no estado natural (a) e da argila magra (b). As análises demonstraram uma morfologia característica de argilominerais do tipo illita, caulinita e nontronite, posteriormente confirmado no DRX.

Figura 13 - Micrografias MEV e EDS das amostras de (a) argila gorda e (b) argila magra.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2 Difração de raios X

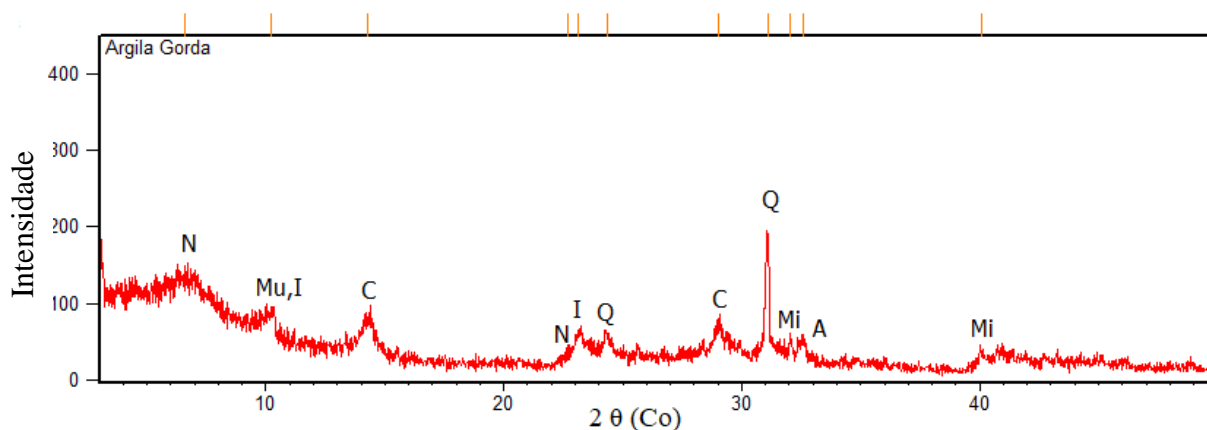
Os difratogramas obtidos a partir da análise das duas argilas mostram características semelhantes, conforme apresentados nas Figuras 14 e 15. Os argilominerais identificados nas amostras foram pertencentes aos grupos da esmectita, mica e caulinita, e os minerais não argilosos encontrados correspondem ao quartzo e feldspato.

O quartzo é constituído de dióxido de silício (SiO_2), o que corrobora os dados obtidos na análise de composição química. A ocorrência de feldspato também é justificada, uma vez que este mineral é formado por silicatos de sódio, potássio e cálcio, elementos

detectados na análise por espectroscopia de dispersão de energia.

A Figura 14 ilustra o difratograma referentes à argila gorda. Dentre os picos identificados, temos a nontronita (ICOD 00-002-0004), pertencente ao grupo das esmectitas, ocorre sob a fórmula química $(\text{Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_5(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$ e pico de maior intensidade em torno $15,6 \text{ \AA}$. A caulinita (ICOD 01-080-0886) aparece com sua fórmula química expressa por $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, pico característico igual a $7,1 \text{ \AA}$, podendo estar associada ao quartzo. A ilita (ICOD 00-002-0050) e a muscovita (ICOD 01-074-2428) são argilominerais relativo ao grupo das micas, ocorrem sob as fórmulas empíricas expressas respectivamente por $\text{Al}_2\text{H}_{24}\text{K}_4\text{Mg}_3\text{O}_{68}\text{Si}_{24}$ e $\text{Al}_3\text{H}_2\text{KO}_{12}\text{Si}_3$, com o pico característico em torno de 10 \AA . O quartzo (ICOD 01-086-1560) aparece sob a fórmula química de SiO_2 e o pico de maior intensidade apresenta-se em $3,33 \text{ \AA}$. O microclínio (ICOD 01-076-0829) e a albita (ICOD 01-080-1094) são feldspatos que ocorrem respectivamente sob às fórmulas químicas KAlSi_3O_8 e $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ e o pico característico em $3,23 \text{ \AA}$ e $3,18 \text{ \AA}$.

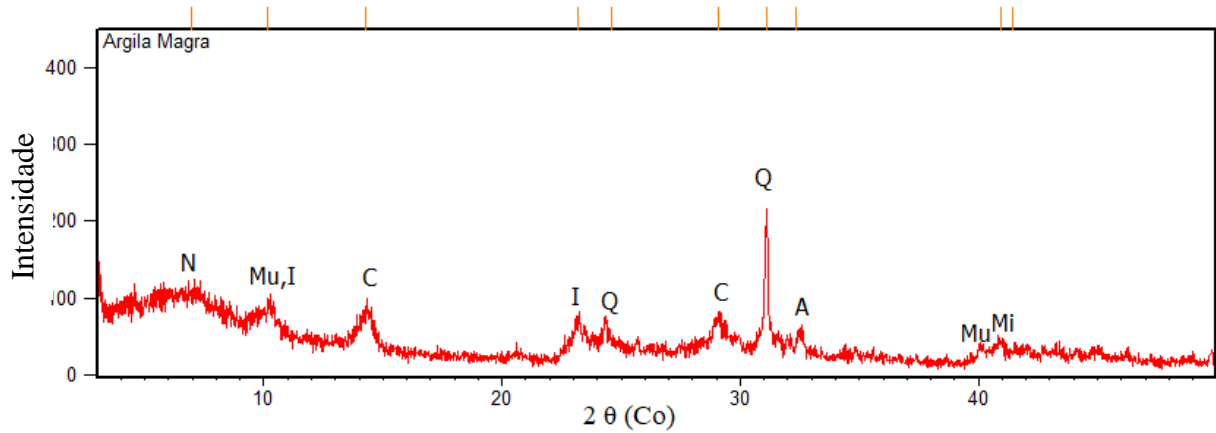
Figura 14 - Difratograma da argila gorda: N – nontronita, Mu – Muscovita, I – ilita, C – Caulinita, Q – Quartzo, Mi – Microclínio e A – Albita.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 15 apresenta o difratograma referente à argila magra. Observa-se que os difratogramas 14 e 15 são bastante similares, ao passo que todas as fases foram identificadas mutuamente. Além disso, nas amostras de argila gorda e argila magra é observado um halo amorfo entre 3° e 15° em 2θ e entre 23° e 33° , indicando a presença de fases vítreas de aluminossilicato.

Figura 15 - Difratoograma da argila magra: N – nontronita, M - muscovita, I - ilita, C – Caulinita, Q – quartzo, A – albita e Mi - microclínio.

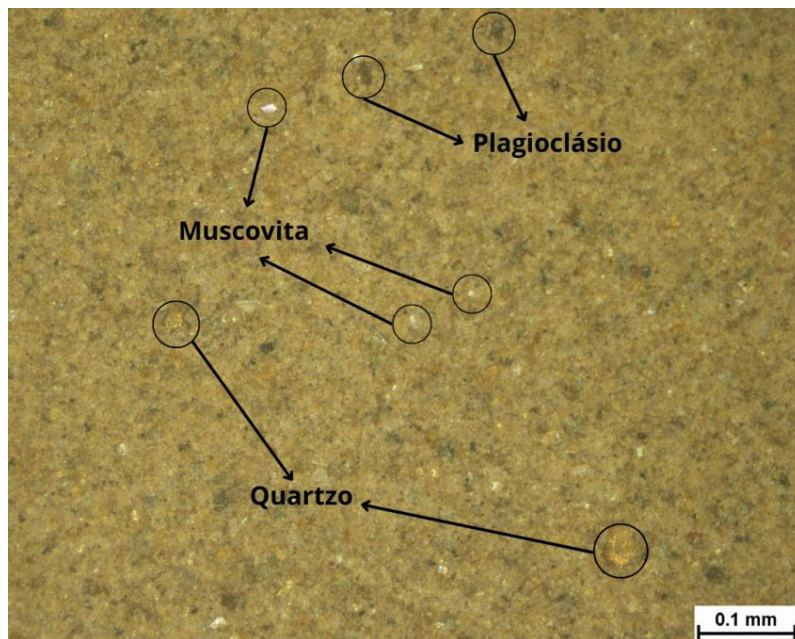


Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.3 Microscopia óptica

A Figura 16 apresenta as micrografias obtidas por microscopia óptica da massa argilosa natural. Destacou-se a presença do mineral quartzo, muscovita e plagioclásio do tipo albita. As partículas avermelhadas e pretas estão associadas aos óxidos de ferro e titânio, e o aglomerado amarelo em toda a extensão do material está associado à presença dos argilominerais. A identificação desses minerais confirma os resultados discutidos no DRX.

Figura 16 - Micrografia obtida por MO da massa argilosa natural.

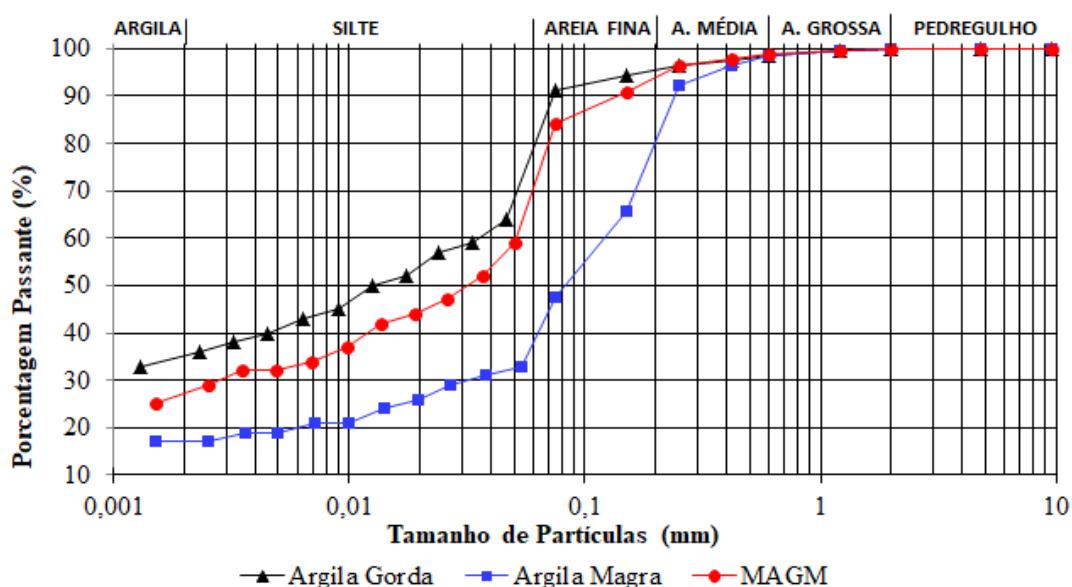


Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.4 Análise granulométrica

A Figura 17 mostra as curvas de distribuição do tamanho de partículas das matérias-primas. Observa-se que o teor de "fração argila", associada ao tamanho de partícula inferior a 0,002 mm, é de 36 % para a amostra de argila gorda, 17 % para a argila magra e 29 % para a massa composta pela mistura de argila gorda e argila magra (MAGM).

Figura 17 - Distribuição de tamanho de partículas das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 8 apresenta a classificação das amostras de acordo com a porcentagem de diâmetros dos grãos. As partículas de argila são menores que 2 μm , o que confere uma área de superfície específica grande, proporcionando-lhes uma grande capacidade de adsorver água, bem como outras substâncias. Essa grande superfície adsorvente, formada pelas partículas de argila, permite a moldagem da mistura em sua forma úmida, de forma obter uma massa coesa de acordo com o processo gradual de secagem (BRADY; WEIL, 2010).

Tabela 8 - Classificação das amostras de acordo com o diâmetro dos grãos.

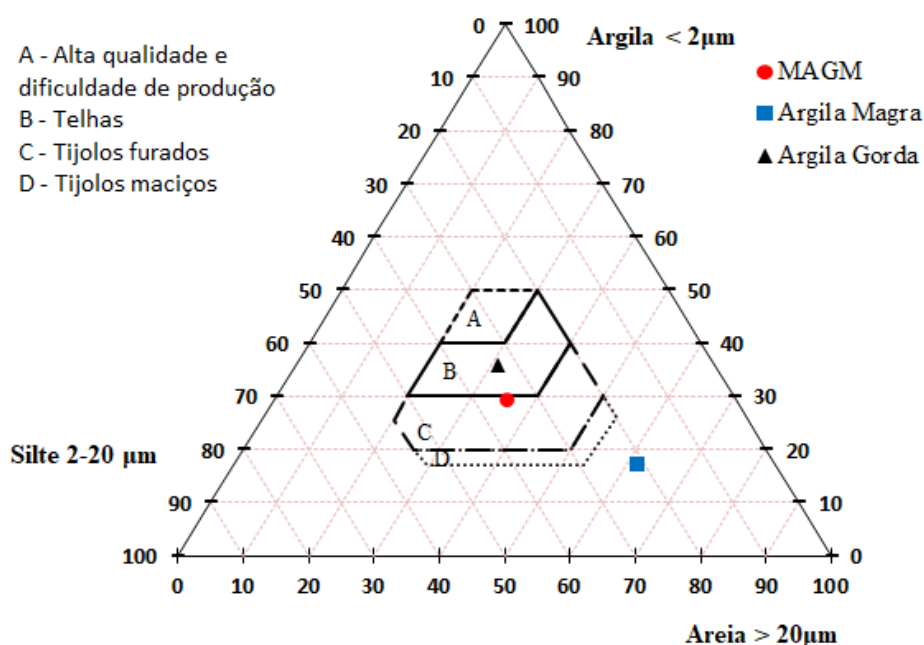
Amostra	Argila < 2 μm	Areia > 20 μm	Silte 2-20 μm
Argila gorda	36	31	33
Argila magra	17	62	21
MAGM	29	36	35

Fonte: Elaborado pela autora.

A classificação das propriedades do solo adequadas para a produção de cerâmica vermelha é realizada de acordo com o diagrama de Winkler, no qual relaciona o tamanho de partícula das misturas com as diferentes aplicações (DJERAN-MAIGRE *et al.*, 2023; MESRAR *et al.*, 2021).

A Figura 18 mostra o diagrama de Winkler aplicado aos valores de granulometria obtidos na Tabela 8. A amostra de argila apresenta maior potencial para a produção de telhas, e a mistura da argila gorda e magra (MAGM) apresentou melhores resultados para a produção de tijolos furados. A argila magra está fora das áreas identificadas, caracterizando um ponto de descontinuidade que deve ser analisada antes do uso.

Figura 18 - Diagrama de Winkler.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.5 Índice de plasticidade

O comportamento plástico das matérias-primas foi determinado mediante os limites de consistência de Atterberg. A Tabela 9 apresenta os limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade. A argila gorda possui um alto nível de plasticidade e, portanto, é classificada como muito plástica, enquanto a argila magra possui plasticidade média. A massa cerâmica usada na fabricação de blocos e telhas cerâmicas, formada pela adição de argila gorda e magra, alcança o resultado desejado: obtenção de uma massa menos plástica.

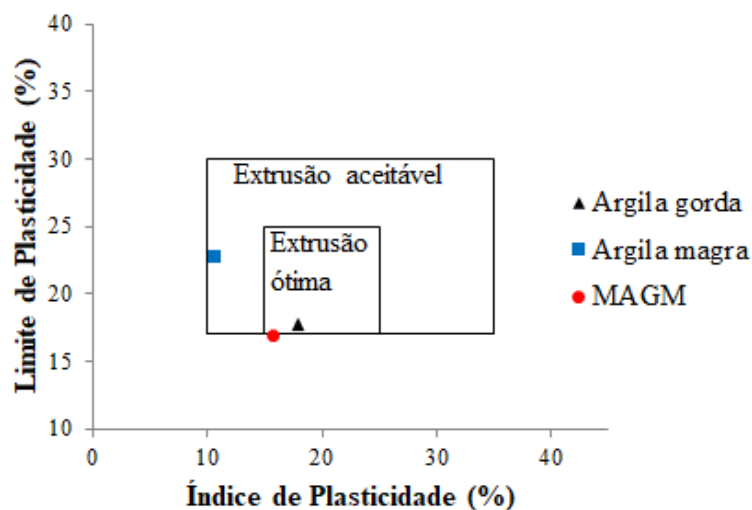
Tabela 9 - Limites de consistência de Atterberg das matérias-primas.

Amostra	Limite de liquidez (LL%)	Limite de plasticidade (LP%)	Índice de plasticidade (%)	Classificação
Argila gorda	34,40%	17,76%	18,00%	Muito plástico
Argila magra	33,44%	22,79%	10,65%	Plasticidade média
MAGM	32,65%	16,95%	15,70%	Muito plástico

Fonte: Elaborado pela autora.

A plasticidade é um dos parâmetros mais importantes para a fabricação de produtos cerâmicos argilosos, havendo a relação entre os limites de Atterberg obtidos e o prognóstico de extrusão, mediante a tabela de trabalhabilidade de Bain e Highly (1978). Considerando o diagrama de trabalhabilidade exposto na Figura 19, a argila investigada está localizada dentro da região de extrusão ótima, implicando em um material com boas propriedades plásticas de moldagem (RAT *et al.*, 2023).

Figura 19 - Limites de Atterberg de acordo com a projeção de Bain e Highly (1978).



Fonte: Elaborado pela autora.

O limite de plasticidade da argila gorda foi de 17,76 %, correspondendo à quantidade de água necessária para que a matéria-prima atinja a consistência plástica, permitindo a sua formação por extrusão. O índice de plasticidade foi de 18 %, e está associado à quantidade máxima de água que pode ser acrescentada à argila, a partir de seu

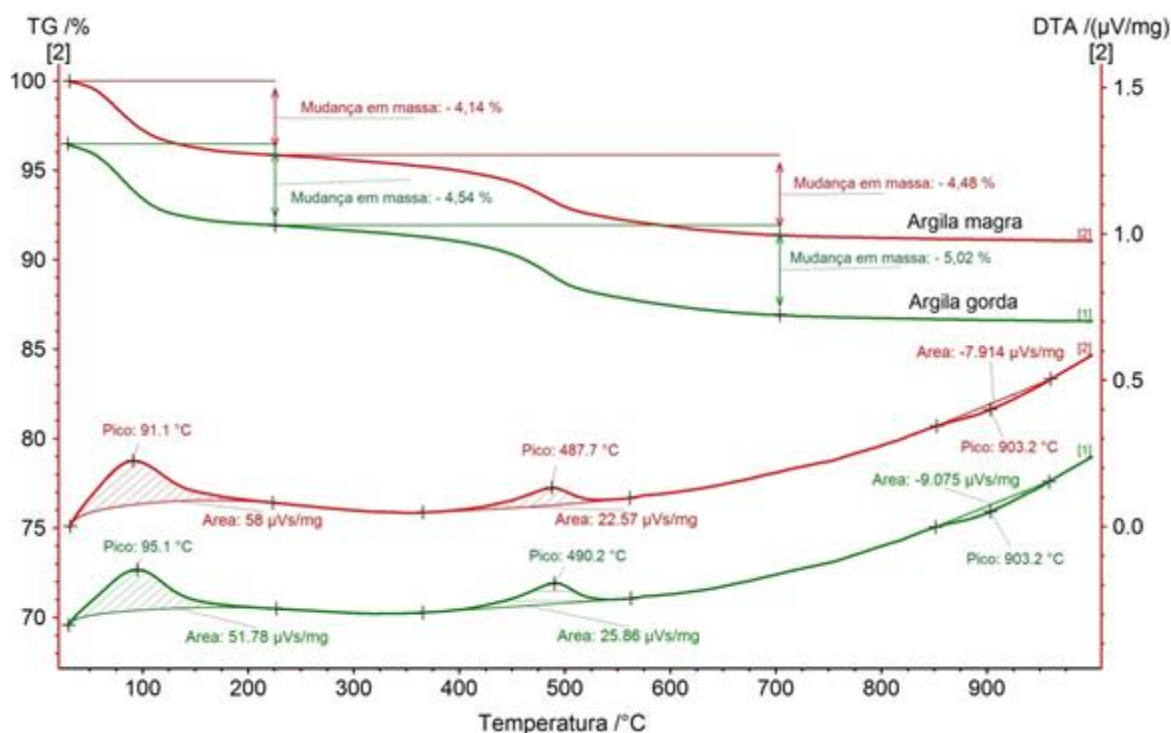
limite de plasticidade, de modo que ela mantenha o aspecto plástico (MORENO-MAROTO; ALONSO-AZCARATEY, 2018). De maneira semelhante, a massa composta pela argila gorda e a argila magra apresentou altos níveis de plasticidade.

A argila magra está em uma zona de extrusão aceitável, com um limite de plasticidade de 22,79 %, necessitando de mais água que a argila gorda e a MAGM para que atinja a consistência plástica, entretanto, também possibilita a extrusão. O índice de plasticidade encontrado é de 10,65 %, sendo associado à máxima quantidade de água na qual pode ser absorvida de modo a manter a consistência plástica, considerando seu limite de plasticidade de 34,4 %.

5.1.6 Termogravimetria e análise térmica diferencial

A Figura 20 apresenta o comportamento térmico das amostras através das técnicas termoanalíticas de termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA). Os resultados indicam uma perda de massa de 9,56 % e 8,62 % entre 30 °C e 1000 °C para as amostras de argila gorda e argila magra, respectivamente.

Figura 20 - TG/DTA das amostras de argila gorda e argila magra.



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a Figura 20, as perdas de massas de 4,54 % e 4,14 % são referentes à perda de água de hidratação, em virtude da evaporação da água de umidade, entre 0 °C e 230 °C com pico endotérmico em aproximadamente 95 °C e 91 °C. Entre 230 °C e 680 °C há um segundo pico de perda de massa da argila gorda e magra de, respectivamente, 5,02 % e 4,48 %, associados à perda de água estrutural dos argilominerais, transição da caulinita para metacaulinita e possível oxidação da matéria orgânica, com picos endotérmicos em aproximadamente 490 °C e 487 °C (RAT *et al.*, 2023; SOUSA, 2017).

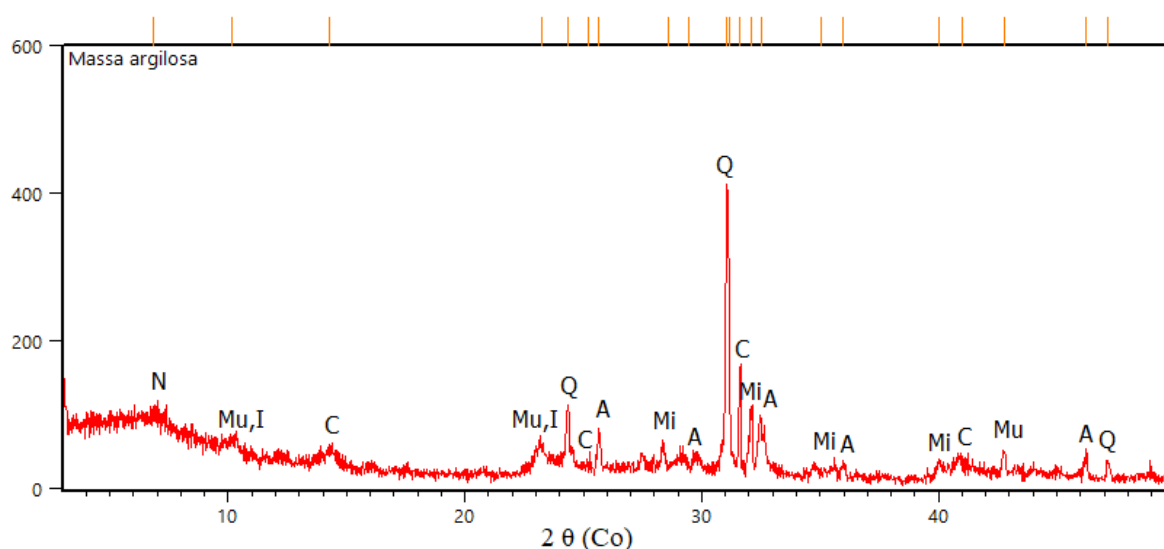
Entre 680 °C e 1000 °C não ocorre perda significativa de massa, porém é verificado um pico exotérmico em aproximadamente 903 °C, em ambos os materiais, indicando a formação de uma nova de fase, através da recristalização e formação da mulita.

5.2 Propriedades microestruturais, físicas e mecânicas das cerâmicas

5.2.1 Difração de raios X

A Figura 21 ilustra a difração de raios X da massa argilosa constituída pela adição da argila gorda e argila magra em seu estado natural. Conforme mencionado no item 5.1.3, a matéria-prima é constituída por argilominerais do grupo caulinita, esmectita do tipo nontronita e micas dos tipos ilita e muscovita. Os minerais identificados correspondem ao quartzo e aos feldspatos alcalinos microclínio (feldspato potássico) e albita (feldspato sódico).

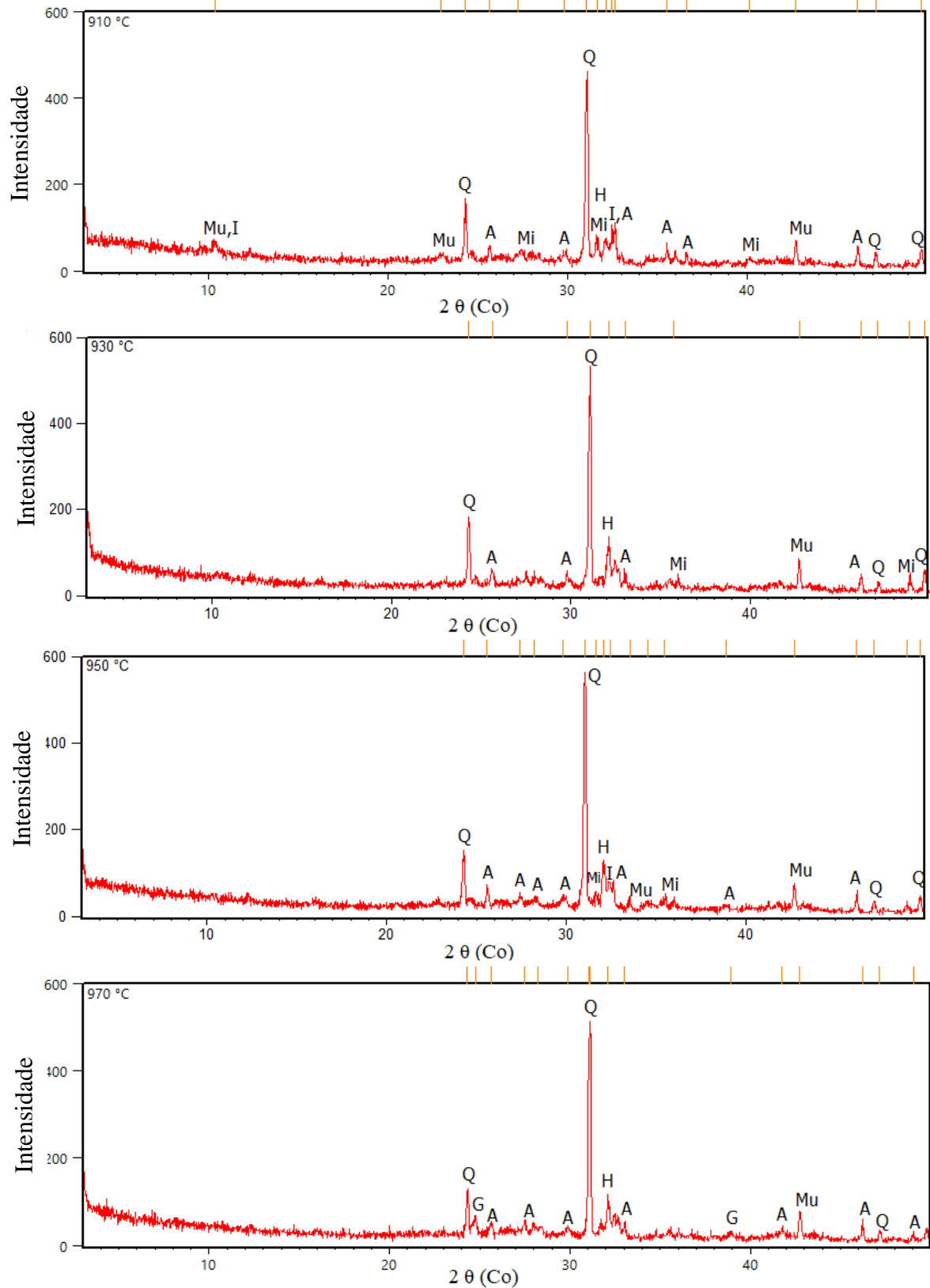
Figura 21 - DRX da massa argilosa formada pela mistura de argila gorda e argila magra: N – nontronita, Mu – Muscovita, I – ilita, C – Caulinita, Q – Quartzo, A – Albita, M - Microclínio.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 22 são apresentados os DRX das cerâmicas compactadas a 5 kN.

Figura 22 - DRX das cerâmicas sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C: Mu – Muscovita, I – ilita, Q – Quartzo, A – Albita, M – Microclínio, H – Hematita, G - Goethita.



Fonte: Elaborado pela autora.

A difração de raios X teve como objetivo analisar o grau de cristalinidade, acompanhando o aumento da fase vítrea e amorfização das fases. O resultado aponta que as cerâmicas são compostas principalmente por quartzo, muscovita, albita e microclínio, fases cristalinas de grande importância na indústria cerâmica, atuando em todas as etapas do processamento cerâmico, influenciando diretamente as características finais dos produtos (PINHEIRO, 2016).

Observando a Figura 22, percebeu-se a presença um halo amorfo entre 3° e 13° em 2θ , para todas as temperaturas de sinterização das amostras. Além disso, o aumento seguido da redução da intensidade dos picos cristalinos a 970°C indica que o aquecimento proporcionou reações nos minerais e está possivelmente associado à presença de fase amorfa.

A caulinita é tipicamente encontrada nos solos sedimentares. Ao passar pelo processo de sinterização, perde sua água de constituição e se transforma em metacaulinita, fase amorfa, podendo ser observado na Figura 21 pela redução e desaparecimento dos picos de caulinita à medida que a temperatura aumenta. Isso ocorre porque a partir de 500°C a caulinita inicia reações que levam ao desaparecimento das reflexões basais desse argilomineral (CARVALHO, 2015; SANTOS, 1989).

O gráfico mostra a redução gradual da albita, microclínio, muscovita e ilita à medida que ocorre o aumento da temperatura, seguida da redução total do microclínio e da ilita ao ser atingida a temperatura de 970°C . A albita e o microclínio são minerais feldspáticos fundentes, indicando que está ocorrendo a formação de fase vítrea, enquanto a muscovita e a ilita são minerais do grupo das micas.

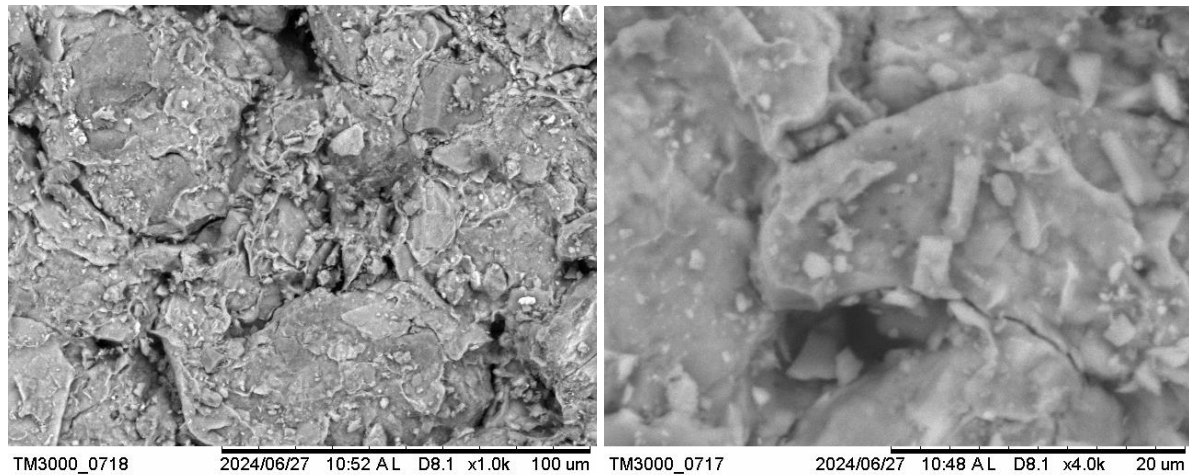
A hematita (ICOD 00-016-0895) foi evidenciada em todas as temperaturas de queima, ocorre sob a fórmula empírica Fe_2O_3 , corresponde a um óxido de ferro que, quando presente em materiais cerâmicos, é responsável pela coloração vermelha. A goethita (ICOD 00-003-0251) foi verificada em 970°C , indicando a formação em temperaturas mais elevadas.

5.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

5.2.2.1 MEV 910°C

A Figura 23 ilustra a morfologia de superfície externa do corpo de prova compactado a 5 kN e sinterizado a 910°C , visto por microscopia eletrônica de varredura (MEV) submetido a ampliação de 1000x e 4000x.

Figura 23 - MEV da superfície externa da amostra A011 ampliada em 1000x e 4000x.



Fonte: Elaborado pela autora.

A micrografia (Figura 23) indica uma região consolidada com predominância de áreas lisas típicas de vitrificação. Os vazios identificados são possivelmente devido ao escape de gás provenientes da redução dos compostos de ferro, ou perda de água de constituição dos minerais argilosos (SOUZA; MONTEIRO; VIEIRA, 2004).

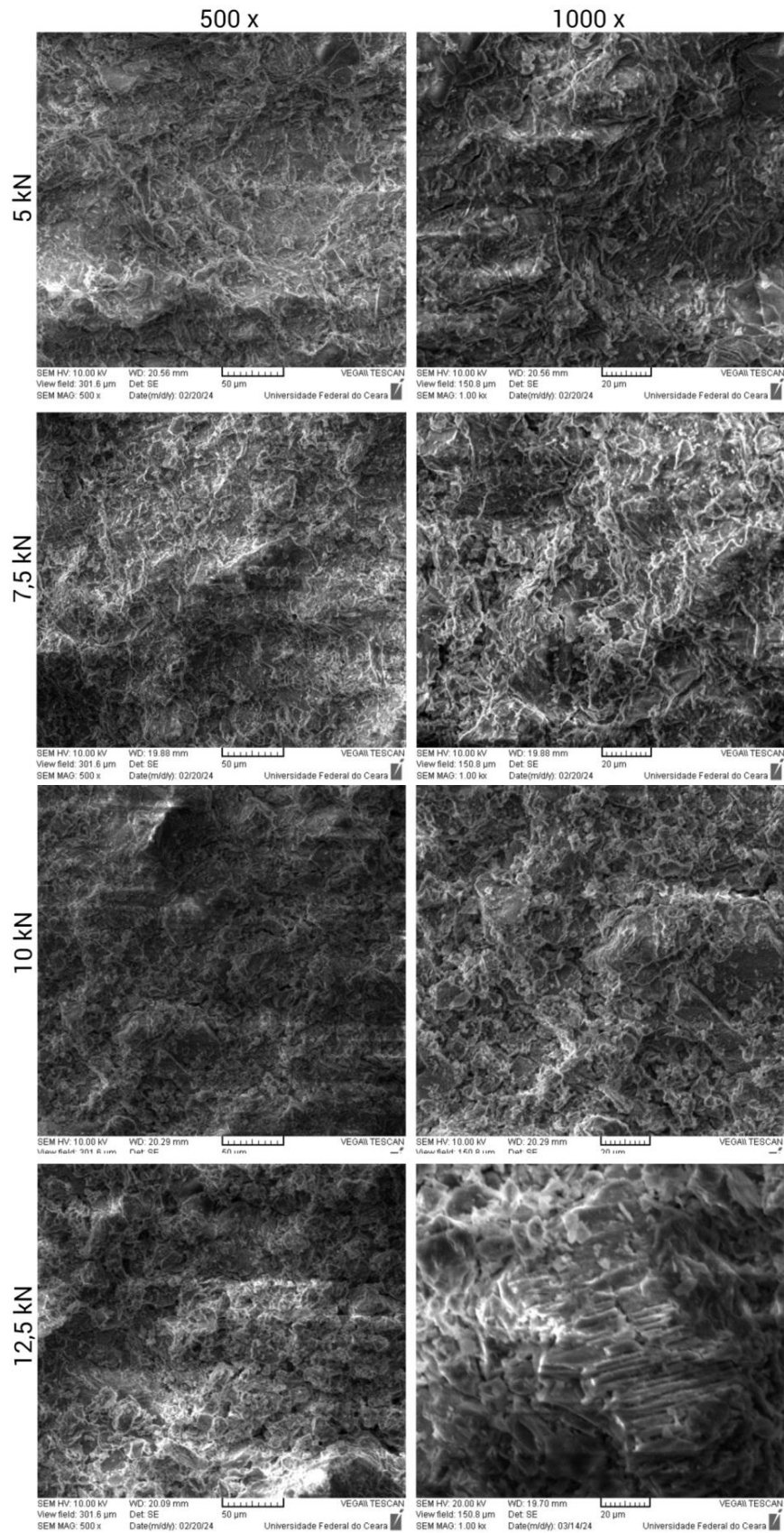
Devido à microestrutura alcançada, é possível prever elevadas propriedades mecânicas e físicas aos materiais cerâmicos, dispondo de resistência excepcionalmente elevada a diversos tipos de tensões, como resistência à compressão e à flexão e alta dureza.

Pela micrografia da Figura 23, nota-se uma estrutura densificada e textura lisa. É possível perceber o gel formado da fusão dos constituintes, marcado pela massa fundida envolvendo os grãos, característico de uma boa sinterização. A densificação do corpo cerâmico está associada à formação de uma quantidade maior de fase vítrea, o que promove a redução da porosidade e, conseqüentemente, diminui a absorção de água.

Ainda na Figura 23 é destacada a presença de uma microfissura podendo estar associada a expansão volumétrica ocorrida durante a transformação alotrópica do quartzo (PINHEIRO, 2012). O mapeamento de EDS permitiu confirmar a presença de feldspatos tabulares potássicos, anteriormente identificados no DRX.

A Figura 24 ilustra a morfologia de superfície de fratura dos corpos de prova sinterizados a 910 °C compactados a 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN. Em todas as amostras são visíveis superfícies contínuas, o que sugere sinterização com a presença de fase líquida de forma similar entre os corpos de prova indicando que, nesta temperatura, as variações da carga de compactação não influenciaram em mudanças na morfologia das peças.

Figura 24 - MEV da superfície de fratura das amostras A101, A102, A103 e A104.

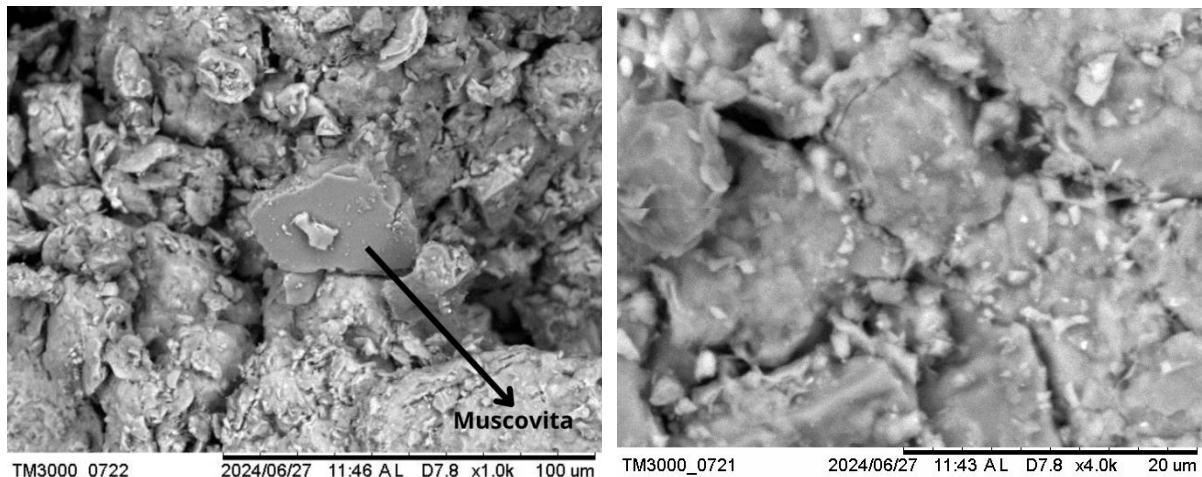


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2.2 MEV 970 °C

A Figura 25 ilustra a morfologia de superfície externa dos corpos de prova sinterizados a 970 °C, cargas de compactação de 5 kN, visto por microscopia eletrônica de varredura (MEV) submetidos a ampliação de 1000x e 4000x.

Figura 25 - MEV da superfície da amostra D011 ampliada em 1000x e 4000x.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a micrografia, nota-se que não há aderência dos grãos e não possui a mesma coesão da massa sinterizada a 910 °C. Pode-se observar a natureza porosa da peça através da superfície irregular e a presença de agregados não uniformes em toda a extensão. Essas características são indicativas de que a sinterização não foi completamente consolidada ou houve super queima do material.

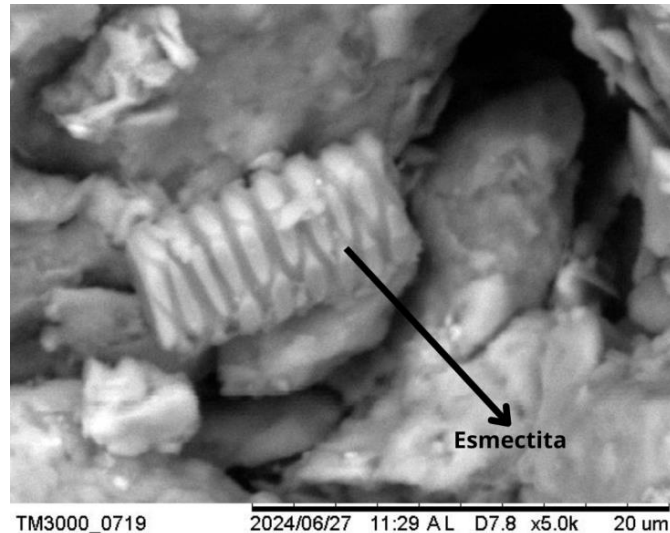
A fusão excessiva pode ocorrer em altas temperaturas devido à liquefação dos componentes vítreos e resultar em uma degradação da estrutura cerâmica, levando à deformação e à perda de forma. Em temperaturas elevadas podem promover uma matriz vítrea que não se solidifica adequadamente e a formação de uma microestrutura desuniforme. Estas falhas nos cristais podem resultar em tensões internas, aumentando a fragilidade e susceptibilidade a fraturas.

Além disso, a estrutura se torna mais porosa, resultando em uma diminuição da resistência à compressão e à flexão. A falta de coesão entre os grãos cerâmicos e a formação de zonas de fraqueza aumenta a probabilidade de falhas quando a cerâmica é submetida a tensões. Assim, a superexposição térmica compromete a integridade e funcionalidade do

produto final.

A Figura 26 apresenta a micrografia da superfície da amostra ampliada 5000x, no qual identifica a presença do argilomineral do tipo esmectita.

Figura 26 - MEV da superfície da amostra D011 ampliada em 5000x.



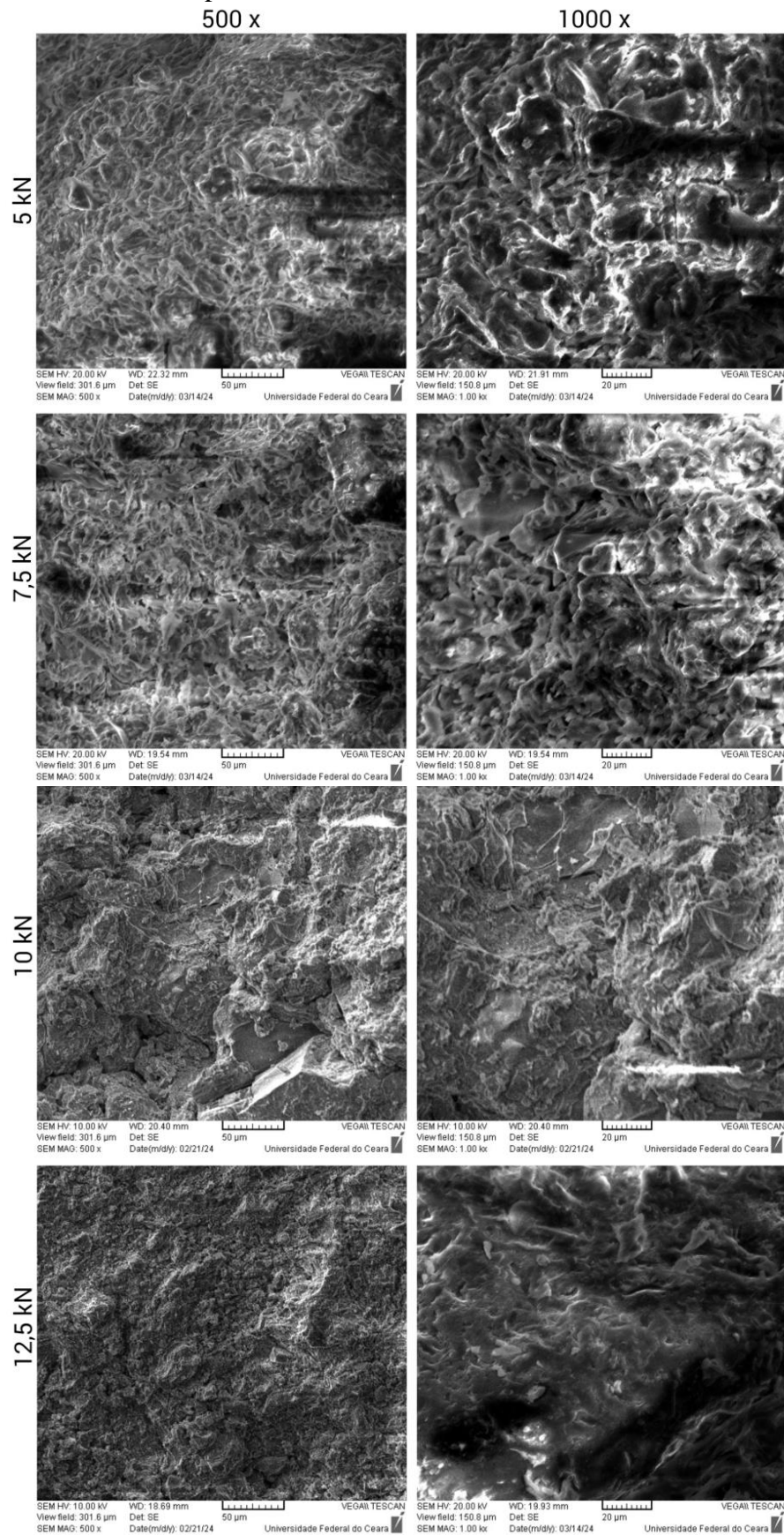
Fonte: Elaborado pela autora.

Os efeitos adversos da fusão excessiva podem ser mitigados com o aumento da compactação e o consequente aumento do contato intergranular entre as partículas de argila, facilitando a sinterização e promovendo ligações mais robustas entre os grãos. A compactação resulta na redução da porosidade inicial, minimizando a formação de bolhas de gás e defeitos durante a queima, o que leva a uma estrutura mais densa e maior resistência mecânica.

Uma cerâmica bem compactada pode manter sua integridade estrutural em temperaturas elevadas, especialmente se a temperatura não alcançar o ponto de fusão dos componentes. Portanto, a compactação pode favorecer a formação de uma fase vítrea que preenche os vazios intersticiais, melhorando a coesão da matriz cerâmica, além de contribuir para a distribuição de forma uniforme das tensões internas, reduzindo a probabilidade de fraturas quando submetidas a cargas.

Este fato pode ser verificado nas micrografias eletrônicas de varredura realizadas nas superfícies de fratura das peças cerâmicas submetidas às cargas de compactação de 5 kN, 7,5 k, 10 kN e 12,5, sinterizadas a 970 °C, apresentado na Figura 27.

Figura 27 - MEV da superfície de fratura das amostras D101, D102, D103 e D104.



Fonte: Elaborado pela autora.

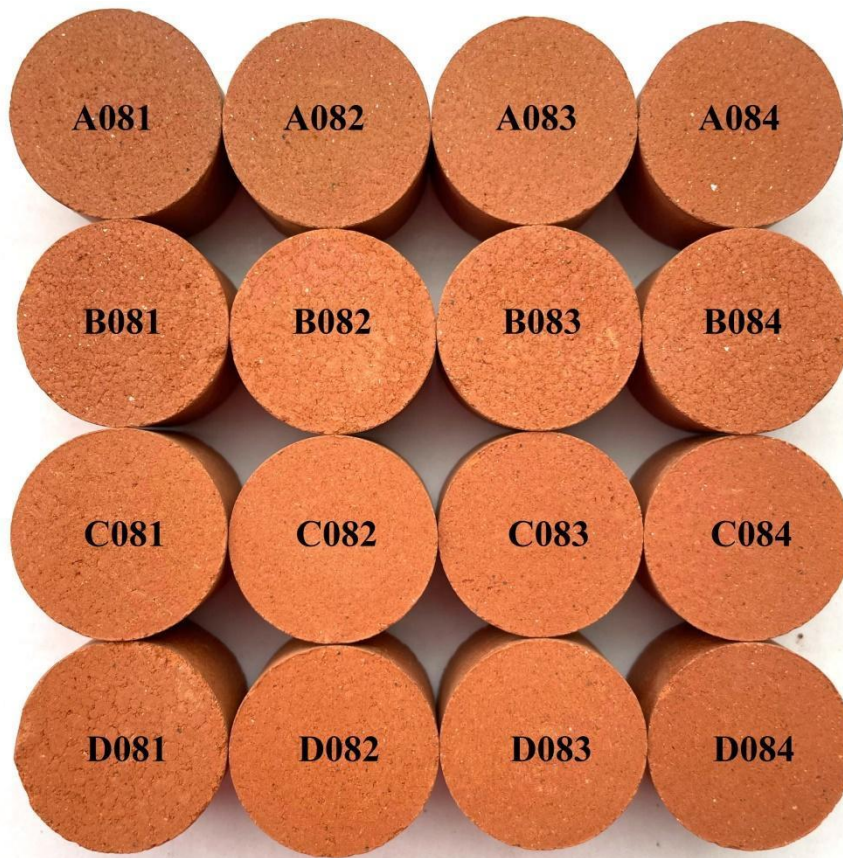
5.2.3 *Análise visual*

A Figura 28 mostra a superfície externa das amostras. Nota-se a queima dos corpos de prova evidenciada pela coloração avermelhada e a superfície fosca, comumente associada à cerâmica vermelha.

As análises das amostras sinterizadas a 910 °C demonstram uma textura lisa e a 930 °C uma textura rugosa. Tais superfícies se mantêm consistentes, independentemente das variações na carga de compactação durante a fabricação.

Os corpos de prova sinterizados a 950 °C e 970 °C, quando submetidos a uma carga de compactação mais baixa, exibem uma textura rugosa sugerindo que a baixa pressão de compactação afeta adversamente a formação da microestrutura, resultando em um acabamento superficial menos refinado e possivelmente maior porosidade, o que pode impactar as propriedades mecânicas das peças, tornando-as mais suscetíveis a falhas. Em contrapartida, à medida que a carga de compactação foi incrementada, esta rugosidade diminuiu, apresentando uma superfície mais homogênea.

Figura 28 - Aspecto visual dos corpos de prova sinterizados.

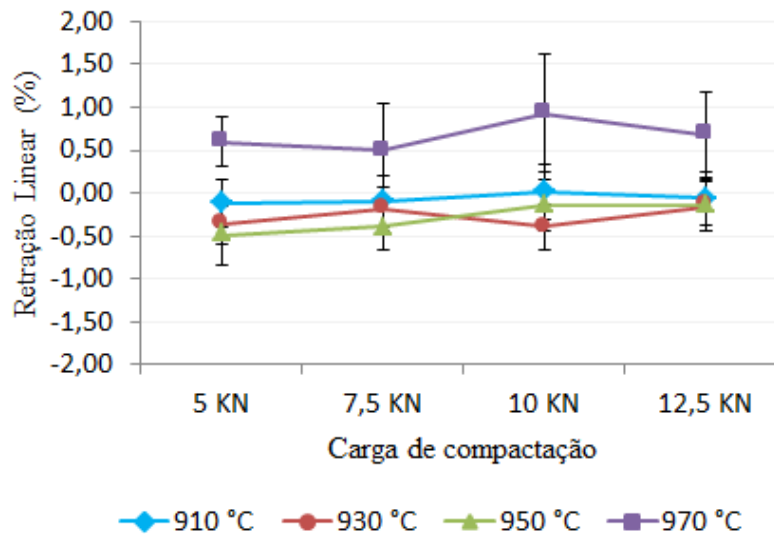


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.4 Retração Linear

O Gráfico 1 indica os valores de retração linear referente aos corpos de prova Tipo 1, sinterizados nas temperaturas de 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C, submetidos às cargas de compactação de 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN.

Gráfico 1 - Retração linear das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando o desvio padrão das amostras, observa-se que as linhas das séries se aproximam de retas horizontais, indicando que a retração linear das peças sofre pouca influência da carga de compactação para cada temperatura de sinterização. Os dados foram submetidos às análises estatísticas da ANOVA e teste de Tukey a fim de validar a afirmação.

Com base nos resultados apresentados no Apêndice A, a variação da carga de compactação não influencia na retração linear das amostras. De acordo com o Apêndice B, entre as temperaturas de 910 °C e 950 °C não há diferenças de retração linear significativas entre si, enquanto a 970 °C (em todas as cargas de compactação) a retração linear é aumentada. Contudo, vale salientar que os módulos dos resultados estão abaixo de 1 %, evidenciando baixa variação volumétrica.

5.2.5 Massa específica aparente

A Tabela 10 apresenta a massa específica aparente dos corpos de prova a verde. Observa-se que à medida que aumenta a carga de compactação, a densidade aumenta, devido

ao incremento do empacotamento das partículas.

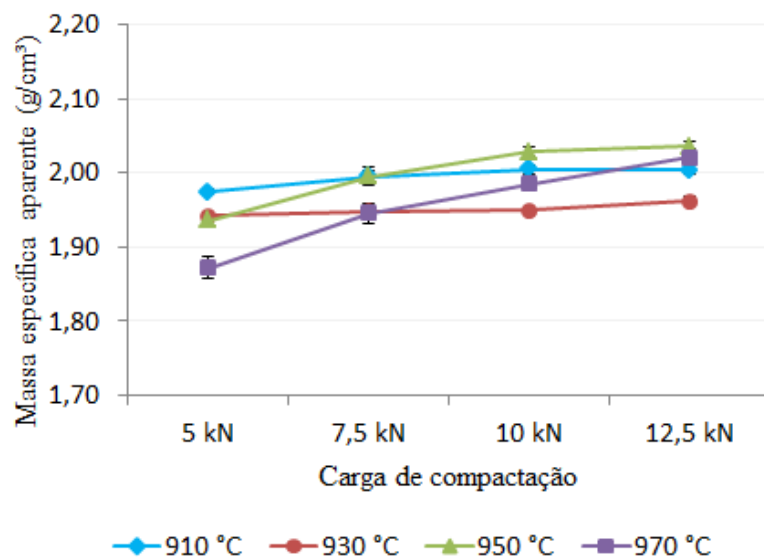
Tabela 10 - Massa específica aparente a verde.

Carga de Compactação	Média (g/cm ³)	SD
5 KN	2,06	0,02
7,5 KN	2,10	0,01
10 KN	2,12	0,03
12,5 KN	2,14	0,04

Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 2 indica a massa específica aparente dos corpos de prova sinterizados nas quatro temperaturas diferentes, submetidos às quatro cargas de compactação. As barras de erro apresentadas correspondem ao desvio padrão.

Gráfico 2 - Massa específica aparente das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em termos gerais, analisando o Gráfico 2 em concomitância a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey apresentados no Apêndice C, o aumento da carga de compactação tem um impacto estatisticamente significativo na massa específica aparente, ou seja, à medida que ocorre o incremento da carga de compactação a densidade aumenta. As únicas ressalvas consistem entre 7,5 kN e 10 kN sinterizados a 930 °C e 950 °C, que não há diferenças

significativas entre si.

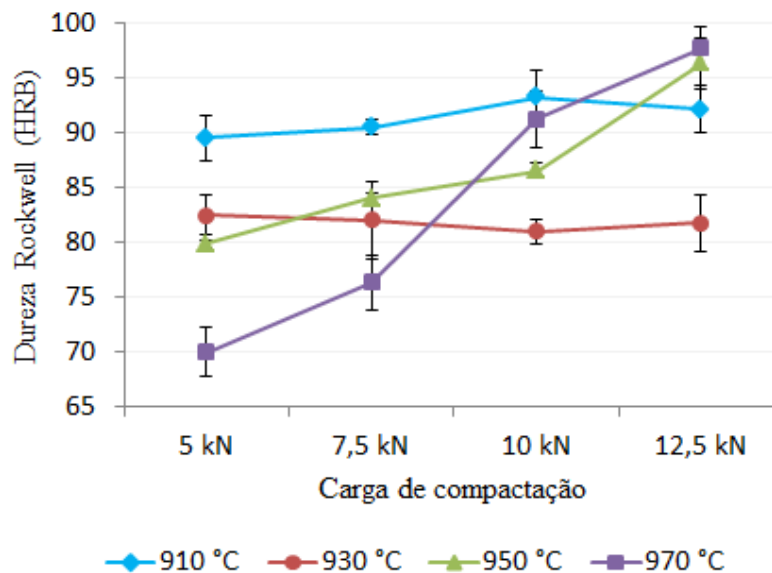
A influência da temperatura na massa específica aparente das amostras segue uma tendência similar à observada com a variação da carga de compactação. Para cada carga de compactação aplicada, a temperatura exerce um efeito estatisticamente significativo na massa específica aparente, conforme descrito no Apêndice D. No entanto, há exceções nos pontos de convergência: em 7,5 kN e temperaturas de 910 °C e 950 °C, assim como em 12,5 kN e temperaturas de 910 °C e 970 °C, onde os valores da massa específica aparente são estatisticamente iguais.

5.2.6 Dureza

A medição da dureza é uma importante ferramenta na caracterização de materiais cerâmicos porque está relacionada com suas propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste e capacidade de suportar cargas. Foi utilizada a escala de dureza Rockwell B levando em consideração investigações anteriores do grupo de pesquisa (REGIS, 2022).

O Gráfico 3 apresenta os resultados referentes a Dureza Rockwell B das peças cerâmicas produzidas.

Gráfico 3 - Dureza Rockwell B das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise do Gráfico 3 revela um elevado desvio padrão na Dureza Rockwell B, um fenômeno frequentemente observado em peças cerâmicas devido à heterogeneidade do material e à sua microestrutura complexa. Diante dos altos índices de dureza obtidos

próximos a 100 HRB, o resultado pode tornar-se impreciso, sendo recomendado utilizar a próxima escala mais dura, Rockwell C (ENGECEER, 2005).

Devido a essa alta variabilidade, a análise de variância indicou que, para as temperaturas de 910 °C e 930 °C, a variação da carga de compactação não apresenta significância estatística. Conseqüentemente, não é necessária a aplicação do teste de Tukey para essas condições, conforme mencionado no Apêndice E. Entretanto, às temperaturas de 950 °C e 970 °C, o aumento da carga de compactação permitiu o aumento da dureza das peças cerâmicas.

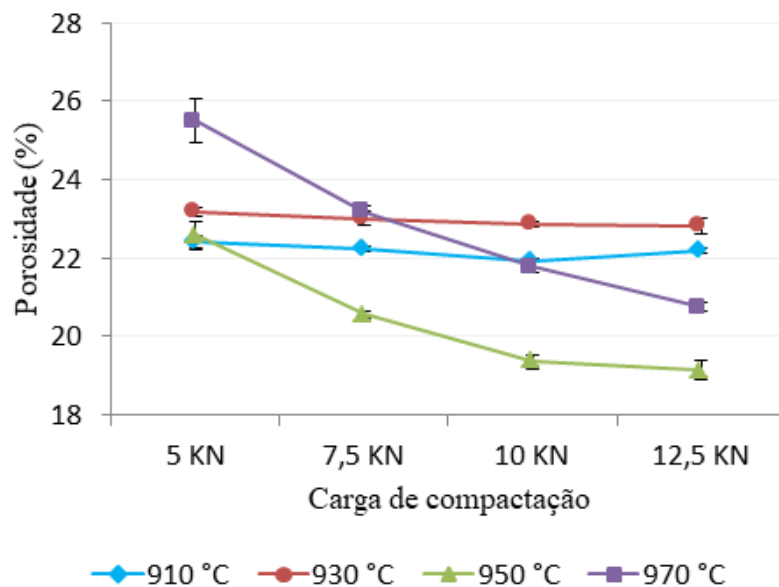
As diferentes temperaturas resultaram em valores de dureza significativamente distintos entre si, confirmando que a temperatura tem uma influência determinante na dureza das peças, de acordo com os resultados demonstrados no Apêndice F.

5.2.7 Porosidade

A porosidade refere-se à quantidade de espaço vazio dentro de um material. É geralmente expressa como a porcentagem do volume total do material que é composto por poros (espaços vazios).

O Gráfico 4 apresenta os dados de porosidade das amostras sinterizadas.

Gráfico 4 - Porosidade das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando o Gráfico 4 e os resultados do tratamento estatístico, incluindo

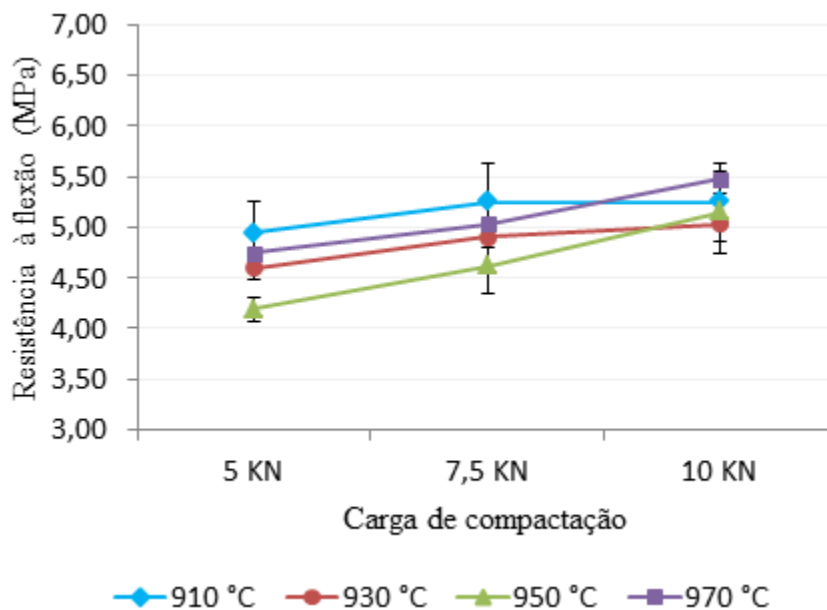
ANOVA e o teste de Tukey, disponibilizados no Apêndice G, observa-se que, nas temperaturas de 910 °C e 930 °C, as porosidades permaneceram constantes mesmo com o aumento da carga de compactação. No entanto, a 950 °C e 970 °C, o aumento da carga de compactação resultou em uma redução significativa no índice de porosidade. Adicionalmente, como demonstrado no Apêndice H, a temperatura contribui de forma significativa para a variação na porosidade das amostras.

Este fenômeno corrobora os resultados obtidos para a massa específica aparente. Com a diminuição da porosidade, a proporção de espaços vazios em relação ao volume total do material é reduzida, resultando na densificação das peças e no aumento da massa específica.

5.2.8 Resistência à flexão em três pontos

O teste de resistência à flexão é utilizado para avaliar a capacidade mecânica dos materiais cerâmicos, fornecendo informações sobre seu desempenho sob cargas de compressão e tração. Durante o processo de fabricação, ocorreu uma limitação na produção dos corpos de prova compactados a 12,5 kN, associado a deformação da matriz metálica. Em função dessa limitação, o Gráfico 5, que ilustra a resistência à flexão das amostras cerâmicas, está incompleto.

Gráfico 5 - Resistência à flexão das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

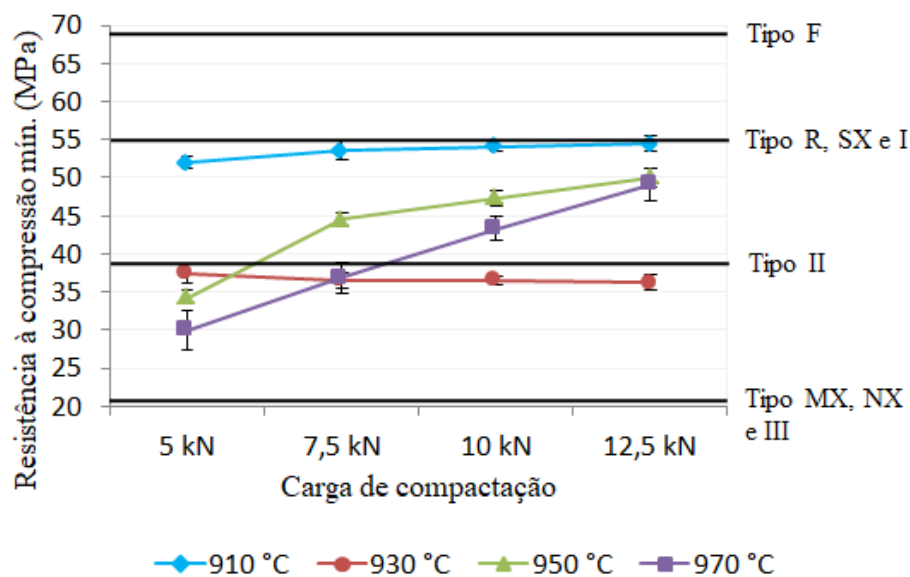
Dado o objetivo do estudo de comparar quatro temperaturas e quatro níveis de carga de compactação, a falta de dados completos resultou na impossibilidade de realizar a análise de variância para essa propriedade.

No entanto, conforme ilustrado pelo Gráfico 5, nota-se que o aumento da carga de compactação tende a elevar a resistência mecânica da peça, o que é evidenciado pelo incremento progressivo na resistência à flexão.

5.2.9 Resistência à compressão

O Gráfico 6 apresenta os resultados referentes à resistência à compressão das peças cerâmicas. De maneira geral, observa-se uma elevada resistência à compressão nas amostras analisadas.

Gráfico 6 - Resistência à compressão das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que o aumento da pressão de compactação nas peças sinterizadas a 910 °C e 930 °C não exerce uma influência substancial na resistência à compressão, conforme análise estatística detalhada no Apêndice I. Entretanto, para as amostras sinterizadas a 950 °C e 970 °C observa-se um crescimento significativo na propriedade mecânica com o incremento da compactação. Além disso, de acordo com os resultados apresentados no Apêndice J, a temperatura de sinterização influencia diretamente na resistência à compressão.

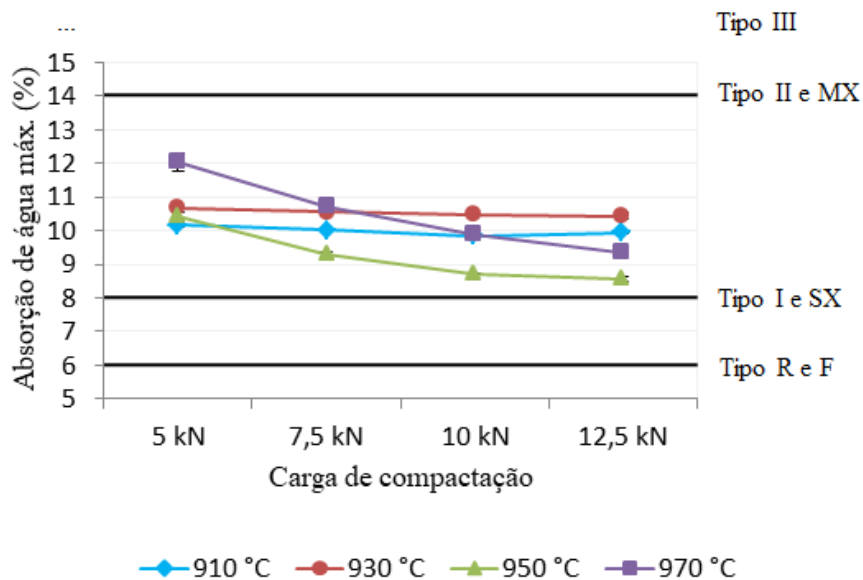
Todas as formulações atendem aos requisitos mínimos para fabricação de adoquins do tipo III (NTC 3829: 2004) e classes MX e NX (ASTM C902: 2014). Além disso, a 910 °C (5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN), 950 °C (7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN) e 970 °C (10 kN e 12,5 kN) atendem ao tipo II (NTC 3829: 2004).

Vale salientar que a resistência à compressão das peças queimadas a 910 °C aproximou-se satisfatoriamente do limite mínimo para produção de adoquins do tipo I (NTC 3829: 2004) e classes R e SX (ASTM C902: 2014).

5.2.10 Absorção de água

O Gráfico 7 indica os dados de absorção de água das peças cerâmicas.

Gráfico 7 - Absorção de água das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da análise do Gráfico 7 e dos dados estatísticos do Apêndice K, constata-se que, nas temperaturas de 910 °C e 930 °C, o índice de absorção de água permanece inalterado com o aumento da carga de compactação, enquanto nas temperaturas de 950 °C e 970 °C, a elevação da carga de compactação leva a uma redução substancial no índice de absorção de água. Além disso, conforme evidenciado no Apêndice L, a temperatura exerce uma influência significativa sobre a variação do índice de absorção de água.

Os resultados estão em consonância com os dados de porosidade e resistência à compressão, pois um aumento na quantidade de poros eleva a capacidade de absorção de água que, por sua vez, compromete a integridade do material e reduz a resistência mecânica.

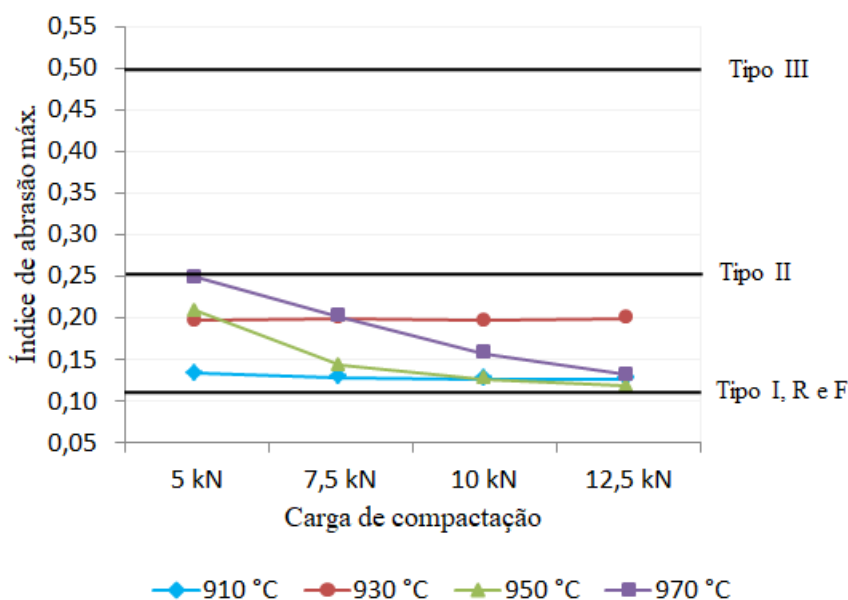
Analisando o Gráfico 7, quanto a propriedade de absorção de água, todas as variações de temperaturas e cargas de compactação atendem aos requisitos das normas para os tipos II e III (NTC 3829: 2004) e classe MX (ASTM C902: 2014). Portanto, o aumento da temperatura de queima e da carga de compactação não implica a alteração do tipo de aplicabilidade do adoquim, no que se refere à absorção de água.

5.2.11 Índice de abrasão

Ao aplicar a relação apresentada na Equação 5 entre a resistência à compressão e absorção de água, obteve-se o índice de abrasão disposto no Gráfico 8. Este índice pode ser um bom indicador de durabilidade do material e, neste caso, quanto menor o índice de abrasão maior será a durabilidade do corpo cerâmico.

De acordo com o Gráfico 8, todas as variações de temperaturas e cargas de compactação atendem aos requisitos das normas para os tipos II e III (NTC 3829: 2004). Logo, para estas condições de processamento e variáveis aplicadas, o aumento da temperatura de sinterização e da carga de compactação não é determinante para a mudança do tipo de aplicabilidade do adoquim, no que se refere ao índice de abrasão.

Gráfico 8 - Índice de abrasão das amostras sinterizadas a 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.12 Classificação das amostras de acordo com as normas.

Após analisar os resultados de resistência à compressão, absorção de água e índice

de abrasão é possível classificar as amostras, em suas diferentes temperaturas e cargas de compactação, nas normas existentes dos Estados Unidos e da Colômbia. A Tabela 11 apresenta a classificação de cada amostra estudada.

A classificação indica que todas as formulações apresentam potencial para fabricação de adoquins sujeitos a tráfego leve. Observou-se que à medida que ocorre o aumento da temperatura de sinterização, os corpos de prova tiveram as propriedades físicas e mecânicas reduzidas. Dentre as variações, a depender da formulação, é possível produzir adoquins submetidos à média abrasão em ambientes externos e internos (TIPO II, MX, NX), como lojas e corredores ao ar livre, e adoquins submetidos à baixa abrasão (TIPO III).

Tabela 11 - Quadro resumo de acordo com as normas Estadunidense e Colombiana.

Temp. (°C)	CC (kN)	RC (Mpa)	AA (%)	IA	COLÔMBIA		ESTADOS UNIDOS	
					NTC 3829/04 (leve)	NTC 5282/04 (pesado)	ASTM C 902/15 (leve)	ASTM C 1272/17 (pesado)
910 °C	5,00	52,04	10,16	0,13	II e III	-	MX, NX, II e III	-
	7,5	53,52	10,01	0,13	II e III	-	MX, NX, II e III	-
	10	54,10	9,85	0,13	II e III	-	MX, NX, II e III	-
	12,5	54,51	9,95	0,13	II e III	-	MX, NX, II e III	-
930 °C	5,00	37,43	10,67	0,20	III	-	MX, NX e III	-
	7,5	36,49	10,55	0,20	III	-	MX, NX e III	-
	10	36,58	10,49	0,20	III	-	MX, NX e III	-
	12,5	36,28	10,43	0,20	III	-	MX, NX e III	-
950 °C	5,00	34,33	10,43	0,21	III	-	MX, NX e III	-
	7,5	44,51	9,29	0,14	II e III	-	MX, NX, II e III	-
	10	47,34	8,71	0,13	II e III	-	MX, NX, II e III	-
	12,5	50,07	8,57	0,12	II e III	-	MX, NX, II e III	-
970 °C	5,00	29,90	12,03	0,28	III	-	MX, NX e III	-
	7,5	36,90	10,73	0,20	III	-	MX, NX e III	-
	10	43,28	9,90	0,16	II e III	-	MX, NX, II e III	-
	12,5	49,09	9,35	0,13	II e III	-	MX, NX, II e III	-

Fonte: Elaborado pela autora.

A análise dos resultados revela que os corpos de prova sinterizados a 910 °C submetidos a uma carga de compactação de 5 kN apresentam propriedades físicas e mecânicas comparáveis ou superiores às obtidas em amostras sinterizadas a temperaturas mais elevadas. Essas peças podem ser classificadas como tipo II, que são direcionadas para uso em áreas com abrasão intermediária, como lojas e passarelas externas, e tipo III, apropriadas para ambientes de baixa abrasão, como pisos e pátios de residências unifamiliares.

5.2.13 Análise estatística

A fim de validar este resultado e confirmar a influência da temperatura de sinterização nas propriedades indicadas em norma de resistência à compressão e absorção de água, foi realizada uma avaliação minuciosa da análise de variância (ANOVA) nos resultados das amostras compactadas a 5 kN. Desse modo, na Tabela 12 é verificada a confiabilidade da hipótese e avaliado se existem diferenças estatisticamente significativas entre as temperaturas.

Tabela 12 - Teste da ANOVA para os CP compactados a 5 kN.

Resistência à compressão 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 1416,29	3	472,10	201,50	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 37,4856	16	2,34		
Total	SQT = 38,43				

Absorção de água 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 11,501	3	3,83	167,89	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,36535	16	0,02		
Total	SQT = 10,80				

Fonte: Elaborado pela autora.

A análise de variância (ANOVA) revelou uma diferença estatisticamente

significativa entre as médias dos grupos ($F(3,16) = 201,534$, $p < 0,05$) da propriedade de resistência à compressão e entre as médias dos grupos ($F(3,16) = 167,89$, $p < 0,05$) da propriedade de absorção de água. Os F calculados foram maiores que o valor crítico ($F_{crít} = 3,24$), o que nos permite rejeitar a hipótese nula e afirmar que há variações significativas entre as médias dos grupos.

A Tabela 13 mostra o Teste de Tukey para os pares de temperatura, indicando a presença ou ausência de diferenças significativas entre as médias dos resultados de resistência à compressão e absorção de água.

Tabela 13 - Teste de Tukey para os CP compactados a 5 kN.

Resistência à compressão 5 kN			Absorção de água 5 kN		
e	q	DMS	e	q	DMS
0,6845213	4,05	2,772311235	0,0675784	4,05	0,2736925
Comparação	DEM	Significativo?	Comparação	DEM	Significativo?
A-B	14,610	Sim	A-B	0,61444	Sim
A-C	17,700	Sim	A-C	0,39383	Sim
A-D	22,130	Sim	A-D	1,98265	Sim
B-C	3,090	Sim	B-C	1,3682	Sim
B-D	7,520	Sim	B-D	1,3682	Sim
C-D	4,430	Sim	C-D	1,58881	Sim

Fonte: Elaborado pela autora.

O Teste de Tukey demonstrou que houve diferença significativa entre todos os pares das médias dos resultados da resistência à compressão e de absorção de água. Isso implica concluir com 95 % de confiança que todos os pares de temperaturas apresentaram resistência à compressão e absorção de água estatisticamente diferente entre si.

A aplicação da ANOVA confirma que há uma diferença significativa entre pelo menos dois grupos estudados, para os corpos de prova compactados a 5 kN, sugerindo que a variável independente (temperatura) influencia significativamente nas variáveis dependentes (resistência à compressão e absorção de água). O Teste de Tukey confirmou a diferença estatisticamente significativa entre a temperatura A (910 °C) e as demais, destacando a significância estatística do resultado e validando a conclusão geral do trabalho.

6 CONCLUSÕES

A partir do estudo da matéria-prima empregada na fabricação de peças de cerâmica vermelha no município de Russas - CE foram alcançadas as seguintes conclusões:

1. Caracterização da matéria-prima

A análise química revela que as matérias-primas são compostas predominantemente por sílica e alumina, com uma presença significativa de óxido de ferro e por agentes fundentes, como óxido de magnésio e óxido de potássio.

A análise microestrutural permitiu a identificação de argilominerais do grupo caulinita, esmectita do tipo nontronita, micas representadas pelos tipos illita e muscovita, assim como o mineral quartzo e feldspatos do tipo microclínio e albita. A avaliação morfológica por MEV possibilitou confirmar a presença dos argilominerais illita, caulinita e nontronita, e a microscopia óptica proporcionou a visualização do quartzo, muscovita e plagioclásio.

Os parâmetros físicos dos limites de consistência apontam que a massa argilosa apresenta capacidade de extrusão ótima e, mediante análise da distribuição granulométrica, constatou-se que a massa está dentro do intervalo indicado para sua utilização em produtos de cerâmica vermelha de alta qualidade.

2. Microestrutura das amostras sinterizadas

O resultado aponta que as cerâmicas são compostas principalmente por quartzo, muscovita, albita, hematita e microclínio. A análise microestrutural evidenciou que o aumento da temperatura culminou na amorfização da caulinita, nontronita, microclínio e illita.

A morfologia da superfície externa e interna das peças sinterizadas a 910 °C, sob diferentes cargas de compactação, indicou uma superfície densa e textura lisa de forma similar. Isso sugere que, a essa temperatura, as variações na carga de compactação não provocaram alterações significativas na morfologia. A baixa presença de vazios permite antecipar que os materiais cerâmicos possuem propriedades físicas e mecânicas elevadas.

A análise morfológica da superfície externa da amostra sinterizada a 970 °C submetida à carga de compactação de 5 kN evidenciou a superfície irregular e a presença de agregados não uniformes em toda a extensão. A fusão excessiva em altas temperaturas pode provocar a liquefação dos componentes vítreos, resultando na degradação da estrutura cerâmica, deformação e perda de forma. Esse processo cria uma microestrutura desuniforme e

gera tensões internas que aumentam a fragilidade e a susceptibilidade a fraturas, além de elevar a porosidade e reduzir a resistência à compressão e à flexão.

A inspeção visual das peças sinterizadas a 970 °C demonstrou que o aumento da carga de compactação mitigou esses efeitos adversos. A compactação melhora o contato entre as partículas de argila, reduzindo a porosidade e minimizando a formação de defeitos durante a queima. Isso resulta em uma estrutura cerâmica mais densa e resistente, mantendo melhor a integridade em temperaturas elevadas e reduzindo a probabilidade de fraturas.

3. Carga de compactação

A análise estatística dos dados revela que a variação na carga de compactação influenciou significativamente as propriedades de massa específica aparente, dureza, porosidade, resistência à compressão e absorção de água.

No entanto, é importante destacar que, nas temperaturas de 910 °C e 930 °C, a dureza, porosidade, retração linear e absorção de água não apresentaram variação significativa com a mudança na carga de compactação. Portanto, pode-se afirmar com 95% de certeza que, nas temperaturas de 950 °C e 970 °C, as propriedades mencionadas são influenciadas pela variação na carga de compactação. De maneira geral, a retração linear não foi afetada pelo aumento da carga de compactação.

4. Temperatura de sinterização

A análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey indicam que a variação na temperatura de sinterização impactou as propriedades de massa específica aparente, dureza, porosidade, resistência à compressão e absorção de água. No entanto, a retração linear não sofreu influência com o aumento da temperatura.

5. Classificação de acordo com as normas dos Estados Unidos e Colômbia

Conforme as normas internacionais dos Estados Unidos e da Colômbia para a produção de adoquins cerâmicos, os resultados deste estudo indicam a viabilidade da produção de adoquins destinados a vias de tráfego leve, que requerem resistência à abrasão intermediária (tipo II) e baixa (tipo III), a partir da produção cerâmica compactada a 5 kN e sinterizado a 910 °C.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho constituiu a caracterização de cerâmicas vermelhas produzidas a partir de argilas do município de Russas – CE, visando à utilização como piso intertravado. Entretanto, estes resultados são preliminares, havendo um conjunto de variáveis a serem exploradas e investigadas para consolidar as ideias aqui desenvolvidas. Dessa forma, algumas sugestões seguem para trabalhos futuros:

- Realizar teste industrial com características geométricas idênticas às PPC comercializadas no Brasil;
- Analisar de forma comparativa os custos associados à produção do adoquim frente à fabricação das peças pré-moldadas de concreto;
- Realizar o ensaio de desgaste nas peças cerâmicas;
- Executar o ensaio de dureza rockwell na escala C;
- Realizar a sinterização em outras temperaturas, de forma a aperfeiçoar e identificar a temperatura ideal de queima;
- Incorporar aditivos visando obter melhores propriedades físicas e mecânicas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, K.S.; SOARES, R. A. L.; MATOS, J.M.E.; ALMEIDA, C.S.M.; ALMEIDA, J.S. Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 25, abr./dez. 2020. (Edição especial). Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2020.005>. Acesso em: 28 mai. 2025.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C902**: pedestrian and light traffic paving brick. United States: ASTM, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1272**: heavy vehicular paving brick. United States: ASTM, 2017.
- ANDRADE, M. C.; SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; BUOSO, A. RMIs: rochas e minerais para cerâmica de revestimento. *In: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 723-745. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2835>. Acesso em: 28 mai. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Preparação para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Determinação da análise granulométrica dos solos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781**: Peças em concreto para pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ANICER. **Dados do Setor**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso em: 31 mai. 2025.
- ANICER. **Dados oficiais**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/>. Acesso em: 31 mai. 2025.
- ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Editora Universidade Rural, 2000. (Coleção Construções Rurais, 1, p.203).
- BAIN, J. A.; HIGHLEY, D. E. Regional Appraisal of Clay Resources: Challenge to the Clay Mineralogist. **Developments in sedimentology**, Londres, v. 27, p. 437-446, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)70741-6](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)70741-6). Acesso em: 28 mai. 2025.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elements of the nature and properties of soils**. New Jersey: Pearson Education International, 2010.

BRASIL. Ministério De Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Seminário de apresentação dos planos de desenvolvimento de Pernambuco e Ceará**. Brasília, 2008.

BRITO, I. P.; ALMEIDA, E. P.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SILVA, V. J.; SANTANA, L. N. L. Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61 n. 360, p. 391-398, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601926>. Acesso em: 28 mai. 2025.

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte I – Introdução e a Indústria de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 20-34, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.003>. Acesso em: 28 mai. 2025.

CARVALHO, J. P. R. G. **Estudo dos parâmetros técnicos do adoqueim cerâmico com incorporação de resíduo de rocha ornamental**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/>. Acesso em: 31 mai. 2025.

CAVALCANTE, V. M. M. *et al.* **A produção de cerâmica vermelha na Região do Baixo Jaguaribe – CE: lavra, beneficiamento, industrialização e meio ambiente**. Fortaleza, CE: Gráfica LCR, 2014. p. 100.

CENTEC. **Identificação, mapeamento e caracterização estrutural de arranjos produtivos locais por região de planejamento no Estado do Ceará**. Fortaleza, CE: CENTEC, 2022. Disponível em: <https://www.centec.org.br/impulsionaceara/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

CENTEC. **Fichas Técnicas dos Arranjos Produtivos Locais do Estado do Ceará**. Fortaleza, CE: CENTEC, 2023. (PROGRAMA IMPULSIONA CEARÁ: Fortalecendo os Arranjos Produtivos Locais). Disponível em: <https://www.centec.org.br/impulsionaceara/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

DIAO, I.; DIAGNE, M.; DIA, I. Characterization of Fired Clay Bricks for an Economic Contribution of the Exploitation of Thick Clay Deposit. **Materials Sciences and Applications**, [s. l.], v. 12, p. 389-416, out./dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/msa.2021.129027>. Acesso em: 28 mai. 2025.

DIAS, L. L.; MENEGAZZO, A. P. M.; QUINTEIRO, E.; SERAFIM, M. A. Desenvolvimento de um novo produto cerâmico para pavimentação de passeios e áreas públicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 155-165, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000400111>. Acesso em: 28 mai. 2025.

DJERAN-MAIGRE, I.; RAZAKAMANANTSOA, A.; LEVACHER, D.; HUSSAIN, M.; Delfosse, E. A relevant characterization of Usumacinta river sediments for a reuse in earthen construction and agriculture. **Journal of South American Earth Sciences**, Villeurbanne, v. 125, e-104317, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104317>. Acesso

em: 28 mai. 2025.

EL OUAHABI, M.; EL BOUDOUR EL IDRISSE, H.; DAOUDI, L.; EL HALIM, M.; FAGEL, N. Moroccan clay deposits: Physico-chemical properties in view of provenance studies on ancient ceramics. **Applied Clay Science**, Bélgica, v. 172, p. 65–74, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.02.019>. Acesso em: 28 mai. 2025.

ENGECEER. Dureza – Conceito e breve histórico. **Boletim informativo da Engeccer: Cerâmica de alta energia**, São Carlos, ano 1, n. 6, 2005. Disponível em: <https://www.engeccer.com.br/pdfs/boletim06.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2025.

FERREIRA, D. S.; GOMES, R. M. M.; ARAÚJO, W. M. P.; SOARES, R. A. L. Estudo da potencialidade da produção de adoquim com massa cerâmica utilizada em telhas prensadas. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 40-46, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.005>. Acesso em: 28 mai. 2025.

GONDIM, I. L. M. **Análise da eficiência do secador rápido do tipo talisca em indústrias de cerâmica vermelha: produtividade na fabricação de telhas – estudo de caso localizado na cidade de Russas-CE**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Campus Russas. Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/61183>. Acesso em: 28 mai. 2025.

HUANCA, K. Z. **Produção de suporte cerâmico poroso para a redução de material particulado da indústria cerâmica vermelha**. 2013. Dissertação (Mestrado em Saneamento ambiental). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/7983>. Acesso em: 28 mai. 2025.

ICONTEC. **NTC 3829**: Adoquín de arcilla para tránsito peatonal e vehicular leviano. Bogotá: ICONTEC, 2004a.

ICONTEC. **NTC 5282**: Adoquín de arcilla para tránsito peatonal e vehicular pesado. Bogotá: ICONTEC, 2004b.

IEL; SEBRAE; SINDICERÂMICA. **Plano de desenvolvimento do APL de cerâmica vermelha de Russas/CE**. Fortaleza: IEL, 2002. Disponível em: <https://www.gov.br/empresas-e-negocios/pt-br/portais-desconhecidos/observatorioapl/biblioteca-apl/planos-de-desenvolvimento-dos-apls/ceramica-vermelha-de-russas-ok.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

INT. **Panorama da indústria de cerâmica vermelha no Brasil**. Rio de Janeiro: EELA, 2012.

LIMA, R. H. C. **Estudo de formulação de massas através do Controle da mistura: argilas aluvionares do Pólo cerâmico de Russas – Ceará**. 2009. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/103000>. Acesso em: 28 mai. 2025.

LUCENA, R. P. O potencial de uso das jazidas de argila na planície fluvial do rio jaguaribe em Russas-CE. **Revista GeoUECE**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 328–329, 2021. Disponível em:

<https://revistas.uece.br/index.php/GeoUECE/article/view/7002>. Acesso em: 28 maio. 2025.

MACÊDO, A. N.; PEREIRA E COSTA, D. H.; TRINDADE, S. R. dos S.; SOUZA, J. A. da S.; CARNEIRO, R. J. F. M. Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 25–36, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000400003>. Acesso em: 28 maio. 2025.

MESRAR, L.; BENAMAR, A.; DUCHEMIN, B.; BRASSELET, S.; BOURDIN, F.; JABRANE, R. Engineering properties of dredged sediments as a raw resource for fired bricks. **Bull Eng Geol Environ**, [s. l.], v. 80, p. 2643–2658, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02068-3>. Acesso em: 28 maio. 2025.

MORENO-MAROTO, J. M.; ALONSO-AZCÁRATE, J. What is clay? A new definition of “clay” based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. **Applied Clay Science**, Toledo, v. 161, p. 57–63, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.011>. Acesso em: 28 maio. 2025.

NUNES, A. B. D. A.; BARRETO, T. M. D. L. Avaliação de impactos da indústria cerâmica do polo de Russas - CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABES, 2019. p. 1-8.

PEREZ F. Fundentes: Como Escolher e Como Usar. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n.4, p. 31-35, jul./ago. 2008. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657367f8c9d6e028b4744>. Acesso em: 28 mai.2025.

PINHEIRO, R. M. **Desenvolvimento de pavimento argiloso extrudado: adoquim cerâmico**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de ciência e tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 2012. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Desenvolvimento-de-pavimento-argiloso-extrudado-adoquim-cer%C3%A2mico.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

PINHEIRO, H. S. **Formulação e caracterização de peças cerâmicas fabricadas a partir do rejeito do granito asa branca com adição dos produtos da combustão do carvão mineral**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15473>. Acesso em: 28 mai. 2025.

RAT, E.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; SÁNCHEZ-GARRIDO, J. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; GARZÓN, E.; SÁNCHEZ-SOTO, P. J. Characterization, thermal and ceramic properties of clays from Alhabia (Almería, Spain). **Ceramics International**, [s. l.], v. 49, n. 9, p. 14814-14825, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.328>. Acesso em: 28 mai. 2025.

REGIS, R. C.; LIMA, K. P.; OLIVEIRA, E. B. de; REGIS, R. C.; LOBO, C. J. de S.; CABRAL, A. E. B.; NOGUEIRA, R. E. F. Q. Potencialidade das matérias-primas argilosas extraídas do município de Russas, CE: análises químicas, térmicas e tecnológicas. **Ambiente**

Construído, Porto Alegre, v. 25, e138859, jan./dez. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212025000100813>. Acesso em: 31 mai. 2025.

REGIS, R. C.; LOBO, C. J. S.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; FIGUEIREDO, Y. A.; PINHEIRO, H. S. Influência das variáveis de processamento nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmicas à base de subproduto do granito Corumbá. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 27, n.1, p. 01-1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2022.009>. Acesso em: 31 mai. 2025.

REGIS, R. C.; MIRANDA, A. C. B.; BERNARDO, L. H. C.; IRINEU, M. B.; LOBO, C. J. S.; NOGUEIRA, R. E. F. Q. Reaproveitamento de detritos da indústria de rochas ornamentais como estratégia de mitigação ambiental. **Caderno pedagógico**, [s. l.], v. 21, n.4, p. 01-20, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-074>. Acesso em: 31 mai. 2025.

REHMAN, M. U.; AHMAD, M.; RASHID, K. Influence of fluxing oxides from waste on the production and physico-mechanical properties of fired clay brick: A review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 8, 100965, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100965>. Acesso em: 31 mai. 2025.

RODRIGUES NETO, Abrão. **Arranjos Produtivos Locais em Russas-CE: o caso da cerâmica vermelha**. 2014. 154 f., il. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/21332>. Acesso em: 29 mai. 2025.

RODRIGUES NETO, A.; MOTA, J. A. Arranjos produtivos locais na indústria da cerâmica vermelha: Um estudo de caso no Nordeste Brasileiro. **Revista econômica do Nordeste**, [s. l.] v. 47 n. 1, p. 127-142, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.61673/ren.2016.594>. Acesso em: 29 mai. 2025.

SANTOS, O. C. **Formulação de bloco intertravado cerâmico com adição de resíduos urbanos e industriais**. 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12832>. Acesso em: 29 mai. 2025.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1989. v. 1.

SILVA, J. P. S.; SANTOS, P. J. L. S.; SOARES, R. A. L. Influência da temperatura de queima nas propriedades tecnológicas e microestruturais do piso intertravado cerâmico. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 3, out. 2020. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15519>. Acesso em: 29 mai. 2025.

SOUTO, F. A. F. **Avaliação das características físicas, químicas e mineralógicas da matéria-prima utilizada na indústria de cerâmica vermelha nos municípios de Macapá e Santana-AP**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11690>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SOUZA, E.; MONTEIRO, S.; VIEIRA, C. M. Ceramic tile with granite and kaolinitic clay.

Cerâmica, v. 50. p.122-127, 2004. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/262739975_Ceramic_tile_with_granite_and_kaolinic_clay. Acesso em: 28 mai. 2025.

SOUSA, J. P. **Caracterização tecnológica de argilas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha no Município do Crato - Ceará**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geologia),

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em:

<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/24529>. Acesso em: 31 mai. 2025.

UNE. **UNE - ES 1344**: Adoquines de arcilla cocida. Especificaciones y métodos de ensayo. Madrid, Asociación Española De Normalización, 2015.

ZACCARON, A.; NANDI, V. S.; FRASSON, F.; PASINI, R. D.; FERNANDES, P.

Influência de Aditivos e da Temperatura da Água na Plasticidade de uma Formulação para Fabricação de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 11- 13, 2015.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2015.004>. Acesso em: 31 mai. 2025.

APÊNDICE A: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RETRAÇÃO LINEAR - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO

ANOVA

TESTE DE TUKEY

Retração linear 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 5,62082	3	1,87	20,56	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 5,46695	60	0,09		
Total	SQT = -0,06				

Retração linear 910 °C		
e	q	DMS
0,0754635	3,74	0,282233556
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,017	Não
1-3	0,128	Não
1-4	0,049	Não
2-3	0,111	Não
2-4	0,032	Não
3-4	0,017	Não

Retração linear 930 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 4,55201	3	1,52	23,46	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 3,88059	60	0,06		
Total	SQT = -0,27				

Retração linear 930 °C		
e	q	DMS
0,0635789	3,74	0,237785135
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,177	Não
1-3	0,024	Não
1-4	0,205	Não
2-3	0,202	Não
2-4	0,027	Não
3-4	0,229	Não

Retração linear 950 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 64,5846	3	21,53	243,13	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 5,31276	60	0,09		
Total	SQT = 0,67				

Retração linear 950 °C		
e	q	DMS
0,0743917	3,74	0,278224876
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,063	Não
1-3	0,311	Sim
1-4	0,310	Sim
2-3	0,248	Não
2-4	0,247	Não
3-4	0,001	Não

Retração linear 970 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 17,6995	3	5,90	4,75	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 74,5765	60	1,24		
Total	SQT = 0,67				

Retração linear 970 °C		
e	q	DMS
0,2787182	3,74	1,042406068
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,060	Não
1-3	0,369	Não
1-4	0,120	Não
2-3	0,429	Não
2-4	0,180	Não
3-4	0,249	Não

APÊNDICE B: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RETRAÇÃO LINEAR - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO.

ANOVA

Retração linear 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 14,3516	3	4,78	66,65	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 4,30677	60	0,07		
Total	SQT = -0,09				

Retração linear 7,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 14,7307	3	4,91	38,16	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 7,72021	60	0,13		
Total	SQT = -0,04				

Retração linear 10 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 26,5989	3	8,87	49,14	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 10,8249	60	0,18		
Total	SQT = 0,11				

Retração linear 12,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 15,5826	3	5,19	32,12	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 9,70298	60	0,16		
Total	SQT = 0,08				

TESTE DE TUKEY

Retração linear 5 kN		
e	q	DMS
0,0669793	3,74	0,250502399
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,246	Não
A-C	0,344	Sim
A-D	0,671	Sim
B-C	0,099	Não
B-D	0,917	Sim
C-D	1,015	Sim

Retração linear 7,5 kN		
e	q	DMS
0,0896766	3,74	0,335390353
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,086	Não
A-C	0,298	Não
A-D	0,594	Sim
B-C	0,213	Não
B-D	0,680	Sim
C-D	0,892	Sim

Retração linear 10 kN		
e	q	DMS
0,1061884	3,74	0,397144699
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,398	Não
A-C	0,161	Não
A-D	0,913	Sim
B-C	0,237	Não
B-D	1,310	Sim
C-D	1,074	Sim

Retração linear 12,5 kN		
e	q	DMS
0,1005349	3,74	0,376000574
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,090	Não
A-C	0,084	Não
A-D	0,742	Sim
B-C	0,007	Não
B-D	0,833	Sim
C-D	0,826	Sim

**APÊNDICE C: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE -
VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO**

ANOVA

Massa específica aparente 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,00791	3	0,00	73,31	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,00216	60	0,00		
Total	SQT = 2,00				

Massa específica aparente 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,00395	3	0,00	68,81	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,00115	60	0,00		
Total	SQT = 1,95				

Massa específica aparente 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,2482	3	0,08	1287,39	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,00386	60	0,00		
Total	SQT = 1,95				

Massa específica aparente 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,18819	3	0,06	23,74	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,15856	60	0,00		
Total	SQT = 1,95				

TESTE DE TUKEY

Massa específica aparente 910 °C

e	q	DMS
0,0014994	3,74	0,005607689
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,018	Sim
1-3	0,022	Sim
1-4	0,024	Sim
2-3	0,004	Não
2-4	0,006	Sim
3-4	0,001	Sim

Massa específica aparente 930 °C

e	q	DMS
0,0010935	3,74	0,004089709
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,005	Sim
1-3	0,007	Sim
1-4	0,018	Sim
2-3	0,002	Não
2-4	0,013	Sim
3-4	0,011	Sim

Massa específica aparente 950 °C

e	q	DMS
0,0020041	3,74	0,00749545
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,067	Sim
1-3	0,095	Sim
1-4	0,106	Sim
2-3	0,028	Sim
2-4	0,039	Sim
3-4	0,010	Sim

Massa específica aparente 970 °C

e	q	DMS
0,0128516	3,74	0,0480651
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,062	Sim
1-3	0,111	Sim
1-4	0,140	Sim
2-3	0,048	Sim
2-4	0,078	Sim
3-4	0,030	Sim

**APÊNDICE D: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE -
VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO**

ANOVA

TESTE DE TUKEY

Massa específica aparente 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,09902	3	0,03	359,49	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,00551	60	0,00		
Total	SQT = 1,93				

Massa específica aparente 5 kN

e	q	DMS
0,0023955	3,74	0,008959191
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,039	Sim
A-C	0,050	Sim
A-D	0,107	Sim
B-C	0,010	Sim
B-D	0,067	Sim
C-D	0,057	Sim

Massa específica aparente 7,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,05848	3	0,02	231,22	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,00506	60	0,00		
Total	SQT = 1,97				

Massa específica aparente 7,5 kN

e	q	DMS
0,0022955	3,74	0,00858524
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,052	Sim
A-C	0,001	Não
A-D	0,063	Sim
B-C	0,051	Sim
B-D	0,011	Sim
C-D	0,063	Sim

Massa específica aparente 10 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,06547	3	0,02	566,69	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,00231	60	0,00		
Total	SQT = 2,01				

Massa específica aparente 10 kN

e	q	DMS
0,0015514	3,74	0,00580208
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,055	Sim
A-C	0,023	Sim
A-D	0,019	Sim
B-C	0,078	Sim
B-D	0,036	Sim
C-D	0,042	Sim

Massa específica aparente 12,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,05333	3	0,02	52,10	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,02047	60	0,00		
Total	SQT = 2,01				

Massa específica aparente 12,5 kN

e	q	DMS
0,0046182	3,74	0,017271892
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,045	Sim
A-C	0,032	Sim
A-D	0,010	Não
B-C	0,077	Sim
B-D	0,055	Sim
C-D	0,023	Sim

APÊNDICE E: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DUREZA - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO

ANOVA

TESTE DE TUKEY

Dureza 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 58,7292	3	19,58	3,93	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 39,83	8	4,98		
Total	SQT = 91,79				

NÃO APLICÁVEL

Dureza 930 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 54,4825	3	18,16	3,01	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 48,26	8	6,03		
Total	SQT = 81,78				

NÃO APLICÁVEL

Dureza 950 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 455,229	3	151,74	2324,41	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 0	8	0,00		
Total	SQT = 86,79				

Dureza 950 °C

e	q	DMS
0,0079542	4,53	0,029748877
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	4,167	Sim
1-3	7,167	Sim
1-4	16,500	Sim
2-3	3,000	Sim
2-4	12,333	Sim
3-4	9,333	Sim

Dureza 970 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 1573,06	3	524,35	1782,60	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 0	8	0,00		
Total	SQT = 84,13				

Dureza 970 °C

e	q	DMS
0,0112736	4,53	0,042163094
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	6,333	Sim
1-3	22,500	Sim
1-4	27,667	Sim
2-3	16,167	Sim
2-4	21,333	Sim
3-4	5,167	Sim

APÊNDICE F: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DUREZA - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO

ANOVA

Dureza 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 642,063	3	214,02	67,59	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 25,33	8	3,17		
Total	SQT = 80,63				

Dureza 7,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 387,417	3	129,14	24,70	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 41,8333	8	5,23		
Total	SQT = 83,42				

Dureza 10 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 331,563	3	110,52	2324,41	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 0	8	0,00		
Total	SQT = 88,38				

Dureza 12,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 510,787	3	170,26	1782,60	4,07
Dentro dos grupos	SQD = 0	8	0,00		
Total	SQT = 92,07				

TESTE DE TUKEY

Dureza 10 kN		
e	q	DMS
0,4448783	4,53	2,01529852
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	7,333	Sim
A-C	10,167	Sim
A-D	20,000	Sim
B-C	2,833	Sim
B-D	12,667	Sim
C-D	9,833	Sim

Dureza 12,5 kN		
e	q	DMS
0,5716843	4,53	2,589729791
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	9,333	Sim
A-C	7,333	Sim
A-D	15,000	Sim
B-C	2,000	Sim
B-D	5,667	Sim
C-D	7,667	Sim

Dureza 10 kN		
e	q	DMS
0,0079542	4,53	0,029748877
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	12,667	Sim
A-C	6,333	Sim
A-D	0,833	Sim
B-C	6,333	Sim
B-D	11,833	Sim
C-D	5,500	Sim

Dureza 12,5 kN		
e	q	DMS
0	4,53	0,042163094
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	10,733	Sim
A-C	3,833	Sim
A-D	5,167	Sim
B-C	14,567	Sim
B-D	15,900	Sim
C-D	1,333	Sim

APÊNDICE G: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO

ANOVA

Porosidade 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,310108	3	0,10	6,12	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,270294	16	0,02		
Total	SQT = 22,14				

Porosidade 930 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,731741	3	0,24	10,74	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,363229	16	0,02		
Total	SQT = 22,97				

Porosidade 950 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 42,9829	3	14,33	679,69	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,337276	16	0,02		
Total	SQT = 20,42				

Porosidade 970 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 18,43705	3	6,15	238,48	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,412315	16	0,03		
Total	SQT = 22,11				

TESTE DE TUKEY

Porosidade 910 °C		
e	q	DMS
0,0581264	4,05	0,235
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,013	Não
1-3	0,090	Não
1-4	0,031	Não
2-3	0,077	Não
2-4	0,044	Não
3-4	0,121	Não

Porosidade 930 °C		
e	q	DMS
0,0673822	4,05	0,272897981
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,167	Não
1-3	0,305	Sim
1-4	0,348	Sim
2-3	0,137	Não
2-4	0,180	Não
3-4	0,043	Não

Porosidade 950 °C		
e	q	DMS
0,0649304	4,05	0,263
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	2,181	Sim
1-3	3,397	Sim
1-4	3,723	Sim
2-3	1,216	Sim
2-4	1,542	Sim
3-4	0,326	Sim

Porosidade 970 °C		
e	q	DMS
0,071791	4,05	0,290753399
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	-0,325	Sim
1-3	1,078	Sim
1-4	2,086	Sim
2-3	1,403	Sim
2-4	2,411	Sim
3-4	1,009	Sim

APÊNDICE H: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO

ANOVA

TESTE DE TUKEY

Porosidade 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 33,25056	3	11,08	117,40	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 1,510521	16	0,09		
Total	SQT = 23,39				

Porosidade 5 kN		
e	q	DMS
0,13741	4,05	0,557
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	1,010	Sim
A-C	0,579	Não
A-D	3,319	Sim
B-C	0,431	Não
B-D	2,309	Sim
C-D	2,740	Sim

Porosidade 7,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 21,64334	3	7,21	259,58	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,444678	16	0,03		
Total	SQT = 22,22				

Porosidade 7,5 kN		
e	q	DMS
0,0745551	4,05	0,301948352
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,856	Sim
A-C	1,588	Sim
A-D	1,001	Sim
B-C	2,444	Sim
B-D	0,145	Não
C-D	2,589	Sim

Porosidade 10 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 34,70563	3	11,57	1007,96	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,183636	16	0,01		
Total	SQT = 21,51				

Porosidade 10 kN		
e	q	DMS
0,0479108	4,05	0,194
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,796	Sim
A-C	2,727	Sim
A-D	0,325	Sim
B-C	3,523	Sim
B-D	1,121	Sim
C-D	2,403	Sim

Porosidade 12,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 43,29907	3	14,43	749,12	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,308264	16	0,02		
Total	SQT = 21,19				

Porosidade 12,5 kN		
e	q	DMS
0,062075	4,05	0,251403676
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,632	Sim
A-C	3,175	Sim
A-D	1,455	Sim
B-C	3,806	Sim
B-D	2,086	Sim
C-D	1,720	Sim

APÊNDICE I: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO

ANOVA

Resistência à compressão 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 30,4512	3	10,15	12,55	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 12,941	16	0,81		
Total	SQT = 53,57				

Resistência à compressão 930 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 19,1385	3	6,38	6,67	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 15,3053	16	0,96		
Total	SQT = 36,70				

Resistência à compressão 950 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 725,414	3	241,80	847,36	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 17,1217	60	0,29		
Total	SQT = 44,06				

Resistência à compressão 970 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 1092,02	3	364,01	320,12	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 68,2247	60	1,14		
Total	SQT = 39,79				

TESTE DE TUKEY

Resistência à compressão 910 °C		
e	q	DMS
0,4021978	4,05	1,628901134
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	1,588	Não
1-3	2,058	Sim
1-4	2,468	Sim
2-3	0,470	Não
2-4	0,880	Não
3-4	0,410	Não

Resistência à compressão 930 °C		
e	q	DMS
0,437397	4,05	1,771457657
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,940	Não
1-3	0,845	Não
1-4	1,150	Não
2-3	0,095	Não
2-4	0,210	Não
3-4	0,305	Não

Resistência à compressão 950 °C		
e	q	DMS
0,1335482	3,74	0,499470178
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	10,175	Sim
1-3	13,010	Sim
1-4	15,733	Sim
2-3	2,835	Sim
2-4	5,558	Sim
3-4	2,723	Sim

Resistência à compressão 970 °C		
e	q	DMS
0,2665848	3,74	0,997026992
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	7,003	Sim
1-3	13,380	Sim
1-4	19,187	Sim
2-3	6,378	Sim
2-4	12,184	Sim
3-4	5,806	Sim

APÊNDICE J: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO

ANOVA

Resistência à compressão 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 1416,29	3	472,10	201,50	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 37,4856	16	2,34		
Total	SQT = 38,43				

Resistência à compressão 7,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 992,027	3	330,68	176,08	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 30,0475	16	1,88		
Total	SQT = 42,86				

Resistência à compressão 10 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 824,913	3	274,97	978,98	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 16,8526	60	0,28		
Total	SQT = 45,33				

Resistência à compressão 12,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 951,106	3	317,04	622,35	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 30,5651	60	0,51		
Total	SQT = 47,49				

TESTE DE TUKEY

Resistência à compressão 5 kN		
e	q	DMS
0,6845213	4,05	2,772311235
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	14,610	Sim
A-C	17,700	Sim
A-D	22,130	Sim
B-C	3,090	Sim
B-D	7,520	Sim
C-D	4,430	Sim

Resistência à compressão 7,5 kN		
e	q	DMS
0,6128571	4,05	2,482071411
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	17,029	Sim
A-C	9,009	Sim
A-D	16,616	Sim
B-C	8,020	Sim
B-D	0,413	Não
C-D	7,607	Sim

Resistência à compressão 10 kN		
e	q	DMS
0,1324944	3,74	0,495529109
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	17,513	Sim
A-C	6,753	Sim
A-D	10,817	Sim
B-C	10,760	Sim
B-D	6,696	Sim
C-D	4,064	Sim

Resistência à compressão 12,5 kN		
e	q	DMS
0,1784339	3,74	0,667342944
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	18,228	Sim
A-C	4,440	Sim
A-D	5,421	Sim
B-C	13,787	Sim
B-D	12,807	Sim
C-D	0,980	Sim

APÊNDICE K: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA - VARIAÇÃO DA CARGA DE COMPACTAÇÃO

ANOVA

Absorção de água 910 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,10711	3	0,04	10,61	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,05383	16	0,00		
Total	SQT = 9,97				

Absorção de água 930 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 0,21592	3	0,07	18,93	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,06083	16	0,00		
Total	SQT = 10,53				

Absorção de água 950 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 11,2556	3	3,75	2453,04	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,09177	60	0,00		
Total	SQT = 9,24				

Absorção de água 970 °C, à 5 kN, 7,5 kN, 10 kN e 12,5 kN					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 20,818	3	6,94	1139,90	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,36526	60	0,01		
Total	SQT = 10,50				

TESTE DE TUKEY

Absorção de água 910 °C		
e	q	DMS
0,025939	4,05	0,105052957
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,086	Não
1-3	0,143	Sim
1-4	0,097	Não
2-3	0,057	Não
2-4	0,011	Não
3-4	0,046	Não

Absorção de água 930 °C		
e	q	DMS
0,027576	4,05	0,111682729
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	0,112	Não
1-3	0,177	Sim
1-4	0,238	Sim
2-3	0,065	Não
2-4	0,126	Não
3-4	0,060	Não

Absorção de água 950 °C		
e	q	DMS
0,0097772	3,74	0,036566578
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	1,140	Sim
1-3	1,723	Sim
1-4	1,918	Sim
2-3	0,583	Sim
2-4	0,778	Sim
3-4	0,195	Sim

Absorção de água 970 °C		
e	q	DMS
0,0195059	3,74	0,072951949
Comparação	DEM	Significativo?
1-2	1,307	Sim
1-3	2,136	Sim
1-4	2,684	Sim
2-3	0,830	Sim
2-4	1,377	Sim
3-4	0,548	Sim

APÊNDICE L: ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO

ANOVA

Absorção de água 5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 10,8284	3	3,61	162,62	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,35513	16	0,02		
Total	SQT = 10,82				

Absorção de água 7,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 10,8284	3	3,61	162,62	3,24
Dentro dos grupos	SQD = 0,35513	16	0,02		
Total	SQT = 10,15				

Absorção de água 10 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 8,39767	3	2,80	4731,15	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,0355	60	0,00		
Total	SQT = 9,75				

Absorção de água 12,5 kN, à 910 °C, 930 °C, 950 °C e 970 °C					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	F - Crítico
Entre os grupos	SQE = 10,2819	3	3,43	3552,30	2,76
Dentro dos grupos	SQD = 0,05789	60	0,00		
Total	SQT = 9,56				

TESTE DE TUKEY

Absorção de água 5 kN		
e	q	DMS
0,0666269	4,05	0,269838966
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,522	Sim
A-C	0,301	Sim
A-D	1,890	Sim
B-C	1,368	Sim
B-D	1,368	Sim
C-D	1,589	Sim

Absorção de água 7,5 kN		
e	q	DMS
0,0666269	4,05	0,269838966
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,522	Sim
A-C	0,301	Sim
A-D	1,890	Sim
B-C	0,221	Não
B-D	1,368	Sim
C-D	1,589	Sim

Absorção de água 10 kN		
e	q	DMS
0,006081	3,74	0,022742955
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,580	Sim
A-C	1,198	Sim
A-D	0,011	Sim
B-C	1,778	Sim
B-D	0,591	Sim
C-D	1,187	Sim

Absorção de água 12,5 kN		
e	q	DMS
0,0077654	3,74	0,029042454
Comparação	DEM	Significativo?
A-B	0,474	Sim
A-C	1,439	Sim
A-D	0,604	Sim
B-C	1,913	Sim
B-D	1,078	Sim
C-D	0,834	Sim