

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**Processamento e caracterização térmica da laterita para aplicação
na construção civil**

RAFAELA MARQUES SILVA

Orientador: Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza

Campo Grande – MS
03 de junho de 2024

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI
Cidade Universitária | Unidade 5 |
Fone 67 3345 7485
79070-900 | Campo Grande | MS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**Processamento e caracterização térmica da laterita para aplicação
na construção civil**

RAFAELA MARQUES SILVA

Orientador: Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS – Instituto de Física - INFI, para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Área de concentração: Física e Química de Materiais.

Campo Grande – MS
03 de junho de 2024

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI
Cidade Universitária | Unidade 5 |
Fone 67 3345 7485
79070-900 | Campo Grande | MS

AGRADECIMENTOS:

Ao Instituto de Física, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul de Dourados-MS.

À Faculdade de Engenharia e ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Ao meu orientador Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza, por suas contribuições, pelos seus ensinamentos, por todo apoio prestado e principalmente por sua extraordinária dedicação ao me orientar na realização desta pesquisa.

Ao Prof. Andrés Batista Cheung (UFMS) e ao Prof. Sandro Marcio Lima (UEMS) por me permitirem utilizar seus laboratórios e me auxiliarem em análises fundamentais para a conclusão da minha pesquisa.

Aos meus colegas de laboratório, Munique, Marco Antônio e Duílio pelos auxílios no decorrer do meu estudo e também pelas atitudes de incentivo, motivação e companheirismo.

Ao corpo docente e técnicos do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (UFMS), do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais (UEMS-Dourados) e do curso de Engenharia Civil (UFMS), pelos ensinamentos e instruções concedidos a mim, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À minha avó Maria (in memorian), ao meu avô Reinaldo (in memorian), à minha mãe Marilda, e ao meu pai Vicente por todos os cuidados e ensinamentos que me permitiram chegar até aqui.

Ao meu noivo Eduardo e sua família, pelo acolhimento e apoio prestados em todos estes anos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

O setor da construção civil realiza pesquisas para tornar suas atividades mais sustentáveis e econômicas. Estão sendo realizadas pesquisas para desenvolver e empregar novos materiais e novos processos que atendam aos critérios de sustentabilidade ambiental e socioeconômica, sem que haja redução na confiabilidade e durabilidade dos materiais e processos já existentes. Neste contexto, existe a laterita, um tipo de solo abundante em diversas regiões geográficas e amplamente empregada na história da construção civil. O objetivo deste trabalho foi realizar o processamento e a caracterização de uma nova placa cerâmica a base de laterita e obter um padrão de corpos de provas com propriedades que possam ser utilizados como um material de baixo custo, projetando e confeccionando um novo produto de construção civil dentro das normas da ABNT e que atenda às demandas do mercado. O processamento das amostras foi realizado com a trituração dos torrões de laterita até a granulometria de 45 Mesh. As amostras na forma de pastilhas foram obtidas prensando o pó de laterita com uma carga de 1,5 ton/cm². As pastilhas foram submetidas a diferentes processos de sinterização, usando intervalo de 100 °C, partindo da temperatura ambiente até 600 °C. Estas amostras foram submetidas às análises térmicas de TG e DSC, aos ensaios de MEV, EDS, DRX, FTIR e microdureza Vickers. Os corpos de prova na forma de placas cerâmicas foram obtidos prensando o pó de laterita utilizando uma prensa isostática a uma pressão manométrica de 140 Kg/cm². Os corpos de prova foram sinterizados da mesma forma que as pastilhas e submetidos à análise dimensional, teste de absorção de água e teste de flexão em três pontos. Os resultados das análises TG e DSC mostraram a estabilidade térmica após 600 °C e dois picos endotérmicos, o primeiro relacionado à transição das fases da gibsite e da nacrite para formar fase da caulinita e o segundo pico endotérmico está associado à desidroxilação da caulinita. Os resultados do MEV mostraram através das micrografias um excelente grau de homogeneidade das amostras e a diminuição da porosidade superficial em função da temperatura de sinterização. Com o EDS foi possível identificar a presença de óxido de Fe, e Al em maior concentração nas amostras. Os resultados de DRX mostraram a transição das fases da gibsite e da nacrite para formar a fase da caulinita e a transição da caulinita, que após passar por uma desidroxilação, se transformou na metacaulinita de estrutura amorfa. O FTIR mostrou a estabilidade dos grupos funcionais dos minerais identificados no material nas temperaturas de sinterização de 300 °C e 600 °C. O ensaio de microdureza Vickers mostrou a influência da temperatura de sinterização para o aumento da dureza das amostras. A análise dimensional apresentou a homogeneidade morfológica e geométrica das placas cerâmicas. O teste de absorção de água apresentou índices de acordo com as normas para as placas cerâmicas sinterizadas de 300 °C a 600 °C. O teste de flexão em três pontos mostrou que a placa cerâmica sinterizada à 600 °C apresentou o maior módulo de resistência à flexão. Concluiu-se que as placas cerâmicas de laterita sinterizadas entre 300 °C e 600 °C estão de acordo com as normas vigentes de absorção de água, sendo classificadas como placas cerâmicas pertencentes ao Grupo III, de alta absorção de água e prensadas a seco. Conforme os resultados obtidos as placas cerâmicas de laterita sinterizadas entre 300 °C e 600 °C podem ser aplicadas na construção civil e a sinterização destas placas cerâmicas é fundamental para o aumento da dureza e do módulo de resistência á flexão.

Palavras-chave: Cerâmica, Sustentabilidade, Sinterização, Solos, Intemperização.

ABSTRACT

The civil construction sector conducts research to make its activities more sustainable and economical. Research is being conducted to develop and employ new materials and processes that meet environmental and socioeconomic sustainability criteria without reducing the reliability and durability of existing materials and processes. In this context, there is laterite, a type of soil abundant in various geographic regions and widely used in the history of civil construction. The objective of this work was to process and characterize a new laterite-based ceramic tile and to obtain a standard for test specimens with properties that can be used as a low-cost material, designing and producing a new construction product within ABNT standards that meets market demands. The processing of the samples was carried out by crushing the laterite clods to a granulometry of 45 Mesh. The samples in the form of pellets were obtained by pressing the laterite powder with a load of 1.5 ton/cm². The pellets were subjected to different sintering processes, using a 100 °C interval, starting from room temperature up to 600 °C. These samples were subjected to TG and DSC thermal analyses, MEV, EDS, DRX, FTIR, and Vickers microhardness tests. The test specimens in the form of ceramic plates were obtained by pressing the laterite powder using an isostatic press at a gauge pressure of 140 Kg/cm². The test specimens were sintered in the same way as the pellets and subjected to dimensional analysis, water absorption test, and three-point bending test. The results of the TG and DSC analyses showed thermal stability after 600 °C and two endothermic peaks, the first related to the transition of the gibbsite and nacrite phases to form the kaolinite phase, and the second endothermic peak is associated with the dehydroxylation of kaolinite. The MEV results showed through micrographs an excellent degree of homogeneity of the samples and a decrease in porosity as a function of sintering temperature. With EDS, it was possible to identify the presence of Fe and Al oxides in higher concentration in the samples. The DRX results showed the transition of the gibbsite and nacrite phases to form the kaolinite phase and the transition of kaolinite, which after undergoing dehydroxylation, transformed into amorphous metakaolinite. FTIR showed the stability of the functional groups of the minerals identified in the material at sintering temperatures of 300 °C and 600 °C. The Vickers microhardness test showed the influence of sintering temperature on the increase in sample hardness. Dimensional analysis showed the morphological and geometric homogeneity of the ceramic plates. The water absorption test showed indices according to the standards for ceramic plates sintered from 300 °C to 600 °C. The three-point bending test showed that the ceramic plate sintered at 600 °C had the highest flexural strength modulus. It was concluded that the laterite ceramic plates sintered between 300 °C and 600 °C meet current water absorption standards, being classified as ceramic plates belonging to Group III, with high water absorption and dry pressed. According to the results obtained, the laterite ceramic plates sintered between 300 °C and 600 °C can be applied in civil construction, and the sintering of these ceramic plates is fundamental for increasing the hardness and flexural strength modulus.

Keywords: Ceramic, Sustainability, Sintering, Soils, Weathering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As 14 redes de Bravais	26
Figura 2 – Estrutura básica da hematita	27
Figura 3 – Estrutura cristalina da hematita.....	27
Figura 4 – Tetraedro do quartzo	28
Figura 5 – Estrutura cristalina do quartzo	28
Figura 6 – Estrutura básica da gibbsita	29
Figura 7 – Estrutura cristalina da gibbsita	29
Figura 8 – Estrutura básica da caulinita	30
Figura 9 – Estrutura cristalina da nacrite e da caulinita	30
Figura 10 – Fluxograma das etapas dos materiais e métodos	32
Figura 11 – Torrões de laterita	33
Figura 12 – Pó de laterita	33
Figura 13 – Prensa Hidráulica para 15 toneladas - MARCON-MPH-15, pastilhador e pastilhas de laterita	34
Figura 14 – Representação esquemática da sinterização das pastilhas de laterita	35
Figura 15 – Forno mufla EDG 1800 com as pastilhas de laterita	35
Figura 16 – Analisador térmico simultâneo STA 449 F3 Jupiter	37
Figura 17 – Bench Coater para Microscopia Eletrônica e Preparação de Amostras Denton Vacuum Desk III	38
Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura	39
Figura 19 – Difrátômetro de raios x Rigaku MiniFlex	40
Figura 20 – Espectrofotômetro com transformada de Fourier Thermo Nicolet Nexus	41
Figura 21 – Forma da impressão no ensaio de microdureza Vickers	41
Figura 22 – Microdurômetro Vickers Shimadzu modelo HMV-2T E	42
Figura 23 – Representação esquemática das medidas do corpo de prova antes de sinterizar	43
Figura 24 – Prensa para Corpos de Prova, Corpos de Prova de laterita	43
Figura 25 – Representação esquemática da sinterização dos corpos de prova de laterita.....	44
Figura 26 – Forno mufla EDG 1800 com os corpos de prova de laterita.....	44
Figura 27 – Corpos de prova de laterita submersos durante o teste de absorção de água.....	46
Figura 28 – Representação esquemática da aplicação da carga no corpo de prova	46
Figura 29 – Flexometro modelo Gabbrielli CRAB 424 com um corpo de prova de laterita ..	47
Figura 30 – Imagens do MEV das pastilhas de laterita com ampliação de 20.000x	51
Figura 31 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra verde	52
Figura 32 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 100 °C	53
Figura 33 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 200 °C	54

Figura 34 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 300 °C	55
Figura 35 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 400 °C	56
Figura 36 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 500 °C	57
Figura 37 – Espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 600 °C	58
Figura 38 – Difração de raios x da amostra verde	59
Figura 39 – Difração de raios x da amostra sinterizada a 100 °C	60
Figura 40 – Difração de raios x da amostra sinterizada a 200 °C	60
Figura 41 – Difração de raios x da amostra sinterizada a 300 °C	61
Figura 42 – Difração de raios x da amostra sinterizada a 400 °C	62
Figura 43 – Difração de raios x da amostra sinterizada a 500 °C	62
Figura 44 – Difração de raios x da amostra sinterizada a 600 °C	63
Figura 45 – Espectro no infravermelho por transformada de Fourier nas amostras de laterita verde e sinterizadas à 300 °C e 600 °C	65
Figura 46 – Representação da localização das diagonais das impressões nas pastilhas	65
Figura 47 – Corpos de prova após a sinterização em diferentes temperaturas.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra verde	52
Tabela 2 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 100 °C.....	53
Tabela 3 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 200 °C.....	54
Tabela 4 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 300 °C.....	55
Tabela 5 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 400 °C.....	56
Tabela 6 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 500 °C.....	57
Tabela 7 – Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 600 °C	58
Tabela 8 – Resultado do ensaio de microdureza Vickers	67
Tabela 9 – Identificação dos corpos de prova, temperatura de sinterização, massa inicial, massa final, massa específica aparente inicial MEA (1), massa específica aparente final MEA (2) e perda de massa final	69
Tabela 10 – Índice de absorção de água	71
Tabela 11 – Corpo de prova, temperatura de sinterização (°C), largura do corpo de prova (mm), distância entre os apoios (mm), carga na fratura (N) e carga de ruptura (N)	71
Tabela 12 – Corpo de prova, temperatura de sinterização (°C), altura do corpo de prova (mm), carga de ruptura (N) e Módulo de resistência à flexão (N/mm ²).....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado da Análise Térmica	49
Gráfico 2 – Microdureza Vickers (HV) em função da temperatura de sinterização das pastilhas (°C)	67
Gráfico 3 – Massa específica aparente em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C)	69
Gráfico 4 – Carga de ruptura (N) em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C)	72
Gráfico 5 – Módulo de resistência à flexão (N/mm ²) em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C)	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

DRX - Difractometria de Raio-X

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

EDS - Espectroscopia por Energia Dispersiva

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

TG - Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 O histórico da construção civil no mundo	15
3.2 O histórico da construção civil no Brasil.....	15
3.3 A questão socioeconômica da construção civil e habitação no Brasil.....	16
3.4 Histórico sobre a laterita	16
3.5 Processamento e extração de laterita	18
3.6 Propriedades físicas e químicas da laterita	19
3.7 Introdução à laterita na construção civil	20
3.8 A laterita como material sustentável.....	21
3.9 Impacto econômico da laterita na construção civil.....	22
3.10 Engenharia de materiais	23
3.11 Propriedades mecânicas das cerâmicas.....	24
3.12 Cristalografia da laterita	25
3.12.1 Cristalografia da hematita ($Fe_2 O_3$)	26
3.12.2 Cristalografia do quartzo ($Si O_2$)	27
3.12.3 Cristalografia do gibbsita ($Al (O H)_3$).....	28
3.12.4 Cristalografia da caulinita ($Al_2 Si_2 O_5 (O H)_4$)	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	31
4.1 Primeira etapa - Preparo do material para análises físico-químicas	32
4.1.1 Obtenção das amostras de solo	32
4.1.2 Maceração dos torrões de laterita	33
4.1.3 Prensagem das pastilhas.....	34
4.1.4 Sinterização das pastilhas	34
4.2 Segunda etapa – Caracterização físico-química	36
4.2.1 Análise de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) ..	36
4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS).....	37
4.2.3 Difração de raios-X (DRX).....	39

4.2.4 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	40
4.2.5 Microdureza Vickers.....	41
4.3 Terceira etapa - Preparo dos corpos de prova e ensaios mecânicos	43
4.3.1 Prensagem dos corpos de prova.....	43
4.3.2 Sinterização dos corpos de prova	44
4.3.3 Análise dimensional dos corpos de prova	45
4.3.4 Teste de absorção de água	45
4.3.5 Teste de flexão em três pontos	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 Análise de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	48
5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	49
5.3 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	51
5.4 Difração de raios-X (DRX).....	58
5.5 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	63
5.6 Microdureza Vickers.....	65
5.7 Análise dimensional	68
5.8 Teste de absorção de água	70
5.9 Teste de flexão em três pontos, determinação da carga de ruptura e do módulo de resistência à flexão	71
6. CONCLUSÃO	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem como desafio manter o crescimento de suas atividades com sustentabilidade ambiental. Para isso são estudadas inovações de sustentabilidade, sendo elas o desenvolvimento de novos materiais, o emprego de materiais alternativos e o desenvolvimento de novos processos [1].

Além do desafio de tornar suas atividades mais sustentáveis, o setor da engenharia civil também enfrenta a problemática socioeconômica, uma vez que os custos com materiais de construção são inacessíveis à população de baixa renda. A falta de acesso a materiais de construção por parte da população de baixa renda contribui diretamente a condições precárias de moradia, risco de desmoronamento e conseqüentemente, risco à vida destes indivíduos.

Desta forma, é fundamental a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais de construção que atendam às demandas de sustentabilidade ambiental e socioeconômica. Neste sentido, este é um trabalho inédito em que se obteve o processamento, a caracterização e a aplicação da laterita da região de Maracaju-MS na construção civil.

A laterita é um tipo de solo com alta concentração de hidróxidos de ferro e alumínio. É comum em regiões de climas tropicais e subtropicais [2]. A formação deste solo é influenciada pelo clima quente e úmido, que propicia o intemperismo da rocha [3]. O solo laterítico apresenta coloração vermelha ou amarelada. A palavra "laterita" é originária do termo em latim "later", que significa "tijolo", em razão de sua utilização em construções [3].

Este material já foi amplamente utilizado em construções históricas em regiões onde sua presença é abundante. Além de tijolos e blocos de construção, a laterita já foi usada em pavimentação de estradas e também como material de fundação devido sua estabilidade ao solo [4]. Os solos lateríticos apresentam baixa fertilidade, sendo necessária a aplicação de técnicas e recursos para que o solo se torne mais produtivo para o uso agrícola [5]. A mineração de laterita é realizada para a extração de minerais como o níquel, bauxita, ferro e cobalto [6].

A aplicação da laterita em projetos de construção civil pode apresentar benefícios socioeconômicos para populações locais. Devido a abundante disponibilidade deste solo em regiões de clima tropical e subtropical é possível cortar custos de transporte, tornando a construção mais acessível em áreas remotas. A laterita apresenta baixo custo em comparação a outros materiais de construção, como o concreto. A extração e processamento da laterita gera a possibilidade de empregabilidade de mão de obra local, além de impulsionar o desenvolvimento

econômico da região e melhorar a infraestrutura de comunidades economicamente desfavorecidas.

O uso da laterita na construção civil também apresenta benefícios de sustentabilidade em comparação com materiais de construção sintéticos que requerem recursos não renováveis, reduzindo os impactos ambientais em atividades de construção [7]. Além dos benefícios sociais, econômicos e ambientais, este material é seguro para a saúde humana, pois ao contrário de materiais como o amianto, a laterita não libera substâncias tóxicas.

O processamento e a caracterização da laterita são fundamentais antes de sua aplicação em projetos de engenharia civil. Isto ocorre, pois a composição química da laterita altera de acordo com a região geográfica em que é encontrada. A presença de alguns minerais pode variar em sua composição, assim como as proporções. Sendo assim, é de grande importância realizar testes e avaliações específicas antes de utilizar a laterita em projetos de construção ou em outras aplicabilidades.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar o processamento e a caracterização térmica das amostras de laterita extraídas da região de Maracaju - MS. Produzir uma nova placa cerâmica a base de laterita e obter um padrão com propriedades que possam ser utilizadas como um material de baixo custo, que atenda as normas da ABNT e as demandas do mercado de construção civil.

2.2 Objetivos Específicos

- Interpretar os resultados de análise térmica TG e DSC da amostra precursora para obter a temperatura de estabilidade térmica e os picos característicos de transição de fase do material;
- Examinar as micrografias do MEV para compreender a morfologia e observar a porosidade da superfície das amostras conforme as temperaturas de sinterização;
- Observar os resultados de EDS para identificar os elementos químicos e suas proporções, assim como a estabilidade destes elementos em diferentes temperaturas;
- Analisar os resultados de DRX para verificar as fases cristalinas dos minerais presentes na amostra e as transições de fase em função da temperatura de sinterização;
- Interpretar os resultados de FTIR para obter os grupos funcionais dos minerais presentes na amostra e a estabilidade destes grupos funcionais em altas temperaturas;
- Verificar a influência da microdureza das pastilhas de laterita em função da temperatura de sinterização;
- Medir as dimensões das placas cerâmicas de laterita antes e depois da sinterização para verificar a perda de massa e o aspecto dos corpos de prova;
- Obter o índice de absorção de água das pastilhas cerâmicas sinterizadas em diferentes temperaturas e comparar com as normas ABNT;
- Verificar o módulo de resistência à flexão das placas cerâmicas em função da temperatura de sinterização;
- Classificar a placa cerâmica de laterita conforme as normas ABNT.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O histórico da construção civil no mundo

A construção civil teve início nas antigas civilizações, como os egípcios, mesopotâmicos e gregos em 3000 a.C [8]. Entre os séculos II a.C. e V d.C. os romanos realizaram aprimoramentos nas técnicas conhecidas de construção e engenharia, com isso, construíram arcos, abóbadas, cúpulas e aquedutos [9].

No século XIX, após a primeira Revolução Industrial, além das técnicas, foi possível aprimorar também a matéria prima das construções. Nesta época foram introduzidos o ferro e o aço na construção de pontes e edifícios. Este fator permitiu que as construções alcançassem maiores alturas e durabilidade.

No século XX foram introduzidas novas técnicas e materiais, como o concreto armado. No século XXI um dos grandes focos de desenvolvimento industrial na área da engenharia civil é a construção sustentável [10]. A construção sustentável tem como propósito principal o uso eficiente dos recursos. Isto gera a necessidade de estudos para o desenvolvimento de novos materiais, que sejam mais sustentáveis e que sejam capazes de substituir adequadamente os materiais sintéticos amplamente utilizados.

3.2 O histórico da construção civil no Brasil

As primeiras construções habitacionais do Brasil foram construídas pelos povos indígenas. Os materiais e técnicas de construção variavam de acordo com as diferentes culturas e etnias indígenas presentes no país, assim como a localização geográfica de cada população, matéria prima disponível e suas necessidades específicas de construção.

No Período Colonial, com a colonização portuguesa, passaram a surgir construções a base de taipa de pilão e pau a pique [11]. A taipa de pilão consiste em uma mistura de solo, areia e argila compactada com o auxílio de um pilão para criar paredes. O pau a pique ou taipa de mão é uma técnica de entrelaçamento de madeiras verticais fincadas ao solo e vigas horizontais amarradas entre si por cipós formando um painel, que após ser preenchido por barro forma uma parede.

No Período Imperial os edifícios com técnicas europeias mais avançadas de construção surgiram no cenário brasileiro. Durante o Período da República Velha houve um grande crescimento da infraestrutura urbana com prédios públicos e estradas. Na Era Vargas (1930 a 1945) o Brasil passou por um intenso período de industrialização com a construção de fábricas [12]. Este processo de industrialização deu início ao êxodo rural, que resultou na crescente construção de edifícios habitacionais nas áreas urbanas. Entre as décadas de 1970 e 1980 houve o "Boom Imobiliário", devido a intensa construção de condomínios, edifícios de escritórios e centros comerciais em todo o país.

3.3 A questão socioeconômica da construção civil e habitação no Brasil

No Brasil existe um profundo e complexo problema socioeconômico, marcado pela desigualdade social e pobreza extrema. Esta situação se deve a uma combinação de fatores históricos, econômicos, sociais e políticos. A distribuição desigual de terras, o acesso desigual à educação, a desigualdade de renda, a corrupção, má gestão, políticas públicas inadequadas, entre outros fatores, resultam no grave problema de desigualdade social que o Brasil enfrenta.

Como consequência da desigualdade social, existe o déficit habitacional, com milhões de famílias vivendo em condições precárias [13]. Um dos grandes obstáculos para a resolução da problemática do déficit habitacional está no alto custo de construção. Sendo assim, o desenvolvimento de materiais construtivos de baixo custo e fácil acesso à população brasileira é necessário e urgente.

3.4 Histórico sobre a laterita

A laterita é um material de origem sedimentar que se forma em regiões tropicais e subtropicais que possui uma grande importância histórica e geológica. O seu nome é derivado do latim “later” que significa “tijolo” em referência a cor avermelhada do material. Sua descoberta ocorreu há muitos séculos atrás e seu nome foi dado por Buchanan em 1807, esse nome identificava esse minério extraído na Índia de partes inferiores do solo que quando entravam em contato com o sol endureciam e poderiam ser utilizados em construções de casas como matéria prima para tijolos [14]. O termo passou por alterações conforme o tempo, porém a laterita se mantém até os dias atuais para descrever esse minério.

Esse minério foi descoberto na Índia, por volta do século XVI, porém, o seu uso já era conhecido em outras regiões do mundo, como por exemplo, na África e na América do Sul. No passado, esse minério era utilizado principalmente em construções em razão da sua alta durabilidade, tornando-a ideal para a construção de estruturas, como casas, templos e até mesmo fortalezas. Além do quesito resistência, sua cor conferia um aspecto estético único às edificações.

A pesquisa e procura por esse material se fortaleceu com o decorrer dos anos, pois além da utilização como material da construção, foi encontrada na laterita importantes reservas de metais nativos como o Fe, Au e Pt, oxi-hidróxidos de Al, como gibbsita e bohemita, fósforo, e resistatos, como turmalina, rutilo, zircão e cassiterita [3].

Devido a definição de Buchanan sobre a laterita extraída da Índia, foi aguçada a curiosidade de vários pesquisadores da área. Os geólogos britânico e indiano, Newbold, Oldham e Lake, documentaram sobre a ocorrência deste solo em outras partes da Índia [3]. Ao decorrer dos anos, os estudos foram aprofundados e a definição de laterita usada por Buchanan não poderia ser classificada de forma complexa, pois era restrita a um horizonte plúntico encontrado em solos hidromórficos, diferente do que se encontra na atualidade [15].

No mundo todo esse solo era usado e descoberto, porém não se referiam a ele com o mesmo nome, desta forma o conhecimento não era aprofundado e científico. Foram identificados vários materiais confeccionados com laterita em diferentes partes da Terra, isso deixa claro que este material era conhecido em seus diversos locais de origem [3].

Atualmente, com estudos dos últimos 50 anos, os cientistas pedológicos têm se dedicado a compreender as características desse minério em relação à precipitação de Fe dissolvido no solo para a formação de laterita [16]. Hoje o minério laterita é definido como um depósito residual endurecido oriundo do intemperismo das rochas e materiais superficiais em alteração, situados em posições variadas do relevo regional [17].

Esse minério pode ser formado, com temperatura entre 18° C a 24° C, em solos pobres de nutrientes e com muitos resíduos de hidróxido de Fe e Al. Sendo uma alternativa para a construção de casas onde não há recursos suficientes para investir em materiais de alto custo. Por ser uma alternativa econômica, o emprego da laterita em construções tem sido alvo de pesquisas, principalmente pelo fato de ser um material em abundância em várias regiões do Brasil e do mundo.

A laterita está presente em construções históricas de regiões tropicais e subtropicais, como a Índia, Sudeste Asiático e África. Este solo foi utilizado na construção do templo de Angkor Wat no Camboja, considerado Patrimônio Mundial da UNESCO [14]. Além de templos e monumentos históricos, a laterita já foi utilizada na construção de fortalezas e estruturas defensivas, como por exemplo, em Kerala, na Índia [14].

Tijolos de laterita já foram utilizados na construção de habitações tradicionais, principalmente de áreas rurais e remotas na Índia, África Ocidental, Sudeste Asiático, e América do Sul. Além da vantagem da disponibilidade local, a laterita apresenta grande resistência à erosão, alta durabilidade e alta resistência ao clima tropical. Por estes motivos foi escolhida por diferentes civilizações ao longo dos anos.

3.5 Processamento e extração de laterita

A extração e o processamento desse minério são parte de um processo importante na indústria de mineração. A laterita faz parte de um tipo de solo caracterizado por sua cor avermelhada devido à alta concentração de óxido de ferro. Essa matéria-prima é versátil e muito utilizada na produção de metais como o níquel e o cobalto [18]. Atualmente, as pesquisas no tratamento de lateritas contendo níquel têm recebido grande atenção devido ao esgotamento parcial das reservas de sulfetos deste metal [19].

A extração desse minério envolve técnicas de mineração a partir da identificação e mapeação de áreas com depósito desse material. Para isso basta analisar solos lixiviados a partir de chuvas e ventos recorrentes, temperatura característica de climas tropicais e também verificar a abundância de Fe e Al na área [20]. Esses são os critérios primordiais para extração desse minério.

Quando o solo é exposto e há a formação de laterita o solo é chamado de solo laterítico. Na mineração ocorre a remoção de seções do solo para ser processado. Este processo é realizado por escavadeiras, draglines e outros equipamentos de extração. Como a laterita encontra-se na camada superficial da crosta terrestre, a extração é de baixo custo e baixo impacto ambiental.

Ao fim da extração, a laterita entra em um processo de britagem, onde será reduzida em pequenas partes para ser facilmente transportada. Quando chega ao destino de processamento, esse material será submetido a secagem para retirada da umidade e a cimentação do material. Esse processo deve ser bem executado, pois pode afetar negativamente

a qualidade do produto final. A mineralogia e a estabilização química natural devido ao intemperismo tornam este material poroso e suficientemente resistente, por isso é cortado e utilizado como blocos de construção [21].

A partir do processo de secagem o material laterítico pode ser processado de diversas formas de acordo com o seu destino final. Para a obtenção de níquel e cobalto, podem ser extraídos da laterita por meio da biolixiviação heterotrófica, que produz ácidos orgânicos capazes de formar prótons complexos com íons metálicos [22]. Após a extração dos metais ocorrem processos de purificação por extração química. Essas etapas contribuem para atingir a pureza dos materiais que serão introduzidos na indústria para uma ampla gama de funções, como por exemplo, ligas metálicas, baterias e outros produtos.

3.6 Propriedades físicas e químicas da laterita

A laterita é um minério caracterizado como um geopolímero formado por alterações na caulinita por minerais de Fe pelo fenômeno de endurecimento [2]. As superfícies ricas em Fe são chamadas de laterita e as mais ricas em Al de bauxita [23]. O tipo de solo onde é encontrado esse minério se caracteriza, principalmente por ser comum em regiões tropicais e subtropicais, no qual é possível a alta concentração de óxidos de Fe e Al. A sua formação está vinculada principalmente ao intemperismo que resulta na lixiviação de nutrientes e minerais, deixando uma camada superficial rica em óxidos de Fe e Al [24].

O solo laterítico pode ser encontrado sob várias formas físicas, como as formas vesicular, pisolítica, concrecionária, celular e vermicular [20]. O termo laterita é aplicado hoje aos produtos do intemperismo da rocha, compostos principalmente de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e de argilossilicato [3]. Além do fator intemperismo é necessário analisar outros fatores influentes na formação do minério, como por exemplo, atmosfera, magnitude de chuvas, temperaturas, natureza da rocha mãe e propriedades da superfície do leito [20].

Fatores atmosféricos como a gravidade podem influenciar o processo de formação desse minério, quanto maior a gravidade específica, maior o grau de laterização [25]. Os principais óxidos elementais, como SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , estão presentes na laterita e essas quantidades são predominantemente superiores a 70% da composição total de óxidos elementares [20]. A mineralogia da laterita geralmente envolve quartzo, caulinita, hematita, goethita e raramente maghemita [26].

Há também a acidez do solo como fator predominante para as características físico-químicas desse minério, pois esse fator é influenciado principalmente pela presença dos óxidos de Al (Al_2O_3) e Fe (Fe_2O_3). Quando a acidez se torna elevada ocorre a interferência na disponibilidade de nutrientes no solo. Além disso, a capacidade de troca catiônica do solo (CTC) é um importante fator físico-químico desse minério, pois ele apresenta alta CTC em razão da sua formação de argila tornando-o menos poroso e permeável [14].

Além disso, outra característica pertinente é a drenagem e compactação desse solo, pois de acordo com a presença dos óxidos de Fe (Fe_2O_3) e Al (Al_2O_3) pode haver a agregação instável, ocasionando solos compactados e com baixa capacidade de drenagem. Os solos tropicais, abundantes no norte e nordeste do Brasil, existem onde o clima induziu à dessecação profunda do perfil de solo ou onde ocorre umidade sazonal seca e severa, isso faz com que a tensão efetiva do solo varie de acordo com a época do ano [23].

Devido a propriedade de compactação, os blocos de laterita possuem alta capacidade de suportar cargas, o que os tornam adequados para a construção de estruturas como fundações, paredes e pisos. Sua resistência mecânica é geralmente maior do que a de outros solos tropicais, como a argila, o que a torna uma escolha assertiva na construção civil.

Do ponto de vista químico, a laterita contém minerais que conferem alta capacidade de aderência e resistência ao desgaste. Isto a torna adequada para uso em revestimentos de pisos e paredes. A laterita também é resistente à corrosão, o que a torna uma opção durável. Outra propriedade da laterita é a sua capacidade de reter nutrientes como fósforo, potássio e cálcio em razão da presença dos óxidos de Fe (Fe_2O_3) e Al (Al_2O_3).

3.7 Introdução à laterita na construção civil

Nas últimas décadas, a utilização da laterita como matéria-prima em diversas aplicações de construção se destacou devido às questões sociais e ecológicas [20]. No contexto da construção civil, a laterita é valorizada por suas propriedades físicas e químicas, essas propriedades caracterizam-se pela alta porosidade, tornando-a um material de excelente drenagem, com alta resistência mecânica, durabilidade e capacidade de aderência.

Os materiais lateríticos podem ser classificados como concreções ferruginosas resistentes, solos arenosos finos de comportamento laterítico ou solos gráudos de comportamento laterítico [4]. Uma das principais utilizações da laterita na construção civil é

como material de base para estradas e pavimentos, devido a sua alta capacidade de suportar cargas e resistência ao desgaste, proporcionando uma base sólida e durável para as estruturas.

A laterita é viável para a fabricação de blocos, lajes e tijolos, materiais fundamentais para a construção civil. Ao produzir materiais a base de laterita, obtém-se uma opção sustentável em contrapartida a utilização de materiais convencionais, pois sua aderência, durabilidade e resistência à corrosão a tornam uma ótima opção.

Do ponto de vista da rentabilidade, a utilização da laterita na construção civil pode ser vantajosa em regiões onde o solo é abundante e facilmente acessível. Isso reduz os custos de transporte e a dependência de materiais importados, tornando a construção mais econômica. Além disso, a durabilidade da laterita ajuda a reduzir custos futuros de manutenção e reposição de materiais.

A relação entre a laterita na construção civil e a sustentabilidade é notável. Em primeiro lugar, a laterita é um material natural e com ampla disponibilidade, o que reduz a necessidade de extração de recursos não renováveis. Além disso, a sua utilização como material de construção pode ajudar a reduzir o impacto ambiental associado à produção de materiais tradicionais, como o cimento. A laterita também possui propriedades que contribuem para a sustentabilidade das construções. Sua alta porosidade favorece a drenagem de água, reduzindo problemas de infiltração e ajudando a evitar inundações.

3.8 A laterita como material sustentável

O emprego da laterita como alternativa ecológica na construção civil abrange um contexto de sustentabilidade em forte discussão nos dias atuais, visto que a construção civil é um dos setores que requerem maior consumo de recursos naturais do planeta [27]. A crescente demanda por materiais de construção civil não pode ser satisfeita apenas pelos recursos naturais ou pelos materiais tradicionais, sendo assim, é necessário desenvolver alternativas e técnicas inovadoras para ser possível atender a estas demandas e solucionar esta complicação [27].

Em razão do motivo apresentado no parágrafo anterior, entende-se que a utilização de fontes renováveis e com maior disponibilidade são alternativas viáveis e que visam a diminuição do impacto desse setor de forma sustentável. Sendo a laterita um minério de grande abundância nos solos do Brasil e do mundo, ela se encaixa como uma alternativa para a resolução da problemática ambiental na construção civil [28].

A utilização da laterita como material alternativo pode contribuir para a redução do desperdício na construção civil, pois muitos projetos de construção geram grandes quantidades de resíduos. Esses resíduos são normalmente descartados em aterros ou áreas de deposição. Ao aproveitar esse minério como um material de caráter sustentável e reciclável, podemos reduzir a quantidade de resíduos acumulados nesses aterros e, ao mesmo tempo, reduzir a extração de novos recursos naturais promovendo a manutenção e menor degradação do meio ambiente.

Além da aplicação em construções de casas e edifícios, a laterita também pode ser utilizada na construção de estradas, como sub-base e bases para estradas de baixo custo e transporte de tráfego baixo a médio [29]. O material, de acordo com os estudos realizados, apresenta resultados promissores como fonte alternativa e de menor impacto ambiental para a construção civil, podendo compor agregados em concretos e argamassas e diminuindo os custos de construções e tornando-as econômicas e acessíveis.

3.9 Impacto econômico da laterita na construção civil

O uso da laterita pode reduzir significativamente os custos na construção civil, tornando os empreendimentos mais acessíveis. A aplicação da laterita na construção civil torna o processo de construção mais ecológico e econômico [30]. A utilização da laterita também gera benefícios socioeconômicos, pois impulsiona o mercado de extração e pode propiciar a geração de empregos, além de auxiliar comunidades em vulnerabilidade econômica e distantes dos grandes centros urbanos a expandirem o comércio e fortalecer a cadeia produtiva da construção civil local. A dinamização do setor da construção é capaz de impulsionar o desenvolvimento socioeconômico do país e de pequenas regiões onde a laterita é abundante.

A redução de custos em utilizar a laterita em substituição aos materiais convencionais ocorre devido ao baixo custo de extração e processamento, enquanto o concreto convencional requer a combinação de cimento, areia, brita e água, além de possuir um processamento mais complexo e mais caro. Esta substituição pode ocorrer de forma parcial ou total, ensaios realizados em laboratórios concluíram que na indisponibilidade dos agregados mais comuns, o uso de laterita foi economicamente eficiente [31, 32].

3.10 Engenharia de materiais

Os materiais sólidos são classificados em três grupos principais: materiais metálicos, materiais cerâmicos e materiais poliméricos. Esta classificação é realizada baseada na estrutura atômica e nas ligações químicas predominantes em cada material [33].

Os materiais metálicos são compostos por combinações de elementos metálicos. Os materiais cerâmicos são obtidos por meio da combinação de metais com elementos não metálicos, como por exemplo óxidos, nitretos e carbonetos. O conjunto de materiais cerâmicos incluem argilo-minerais, cimento e vidros. Os polímeros são compostos por macromoléculas orgânicas sintéticas ou naturais. Plásticos e borrachas são polímeros sintéticos, couro e seda são polímeros naturais.

A classificação dos materiais é importante para auxiliar a seleção de materiais para aplicação em projetos. Decisões de aplicação de materiais inapropriados para projetos de engenharia podem resultar em consequências catastróficas do ponto de vista econômico e de segurança [34]. Desta forma, os materiais de construção fabricados a base de laterita são classificados como materiais cerâmicos, sendo eles os tijolos e as placas cerâmicas.

Os materiais cerâmicos são amplamente empregados na construção civil pois são produtos leves, de elevada dureza e baixa tenacidade [35]. Os materiais cerâmicos podem ser empregados como blocos estruturais, telhas, placas de revestimento interno ou externo, entre outros.

Para que um produto seja aplicado na construção civil brasileira, é fundamental que atenda às normas vigentes. A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) é responsável pela elaboração de normas que avaliam a conformidade de produtos, serviços e sistemas para garantir a segurança, ética e credibilidade da indústria, comércio, fornecedores e clientes.

A aplicação de placas cerâmicas na construção civil é regida por uma série de critérios que este produto deve atender, para isso, é necessário determinar as dimensões, determinar o índice de absorção de água e determinar a carga de ruptura e módulo de resistência à flexão, entre outros parâmetros descritos na ABNT NBR 10545-1/2017 [36].

3.11 Propriedades mecânicas das cerâmicas

Os materiais cerâmicos são amplamente empregados na construção civil pois são produtos leves, de elevada dureza e baixa tenacidade [35]. Os materiais cerâmicos podem ser empregados como blocos estruturais, telhas, placas de revestimento interno ou externo, entre outros.

A ductilidade é a capacidade de um material em deformar quando submetido a uma carga. Fragilidade é o oposto da ductilidade. As cerâmicas são materiais frágeis pois ao serem submetidas a cargas em um ponto de sua superfície fraturam com facilidade. Isto ocorre devido a presença de microtrincas que resultam na amplificação das tensões de tração aplicadas [37].

As microtrincas presentes em materiais cerâmicos ocorrem devido a poros internos, inclusões e vértices de grãos, impossíveis de serem eliminados ou controlados [34]. O tratamento térmico dos materiais cerâmicos reduz a porosidade, porém não a elimina completamente, logo uma parte da porosidade residual permanece.

A elasticidade é a capacidade de um material retornar à sua forma original quando a força que o deforma deixa de atuar. A plasticidade é o oposto da elasticidade, ou seja, a capacidade de um material em permanecer deformado mesmo quando a força que alterou sua forma deixe de atuar. Devido a fragilidade das cerâmicas, elas não apresentam boas propriedades de elasticidade ou plasticidade, pois qualquer porosidade residual influencia negativamente suas propriedades elásticas e elas fraturam antes mesmo que qualquer deformação plástica ocorra [35].

A resiliência corresponde a capacidade de um metal em absorver energia ao ser deformado elasticamente e devolvê-la, ao descarregar o esforço que provocou sua deformação. A tenacidade é a capacidade do material em se deformar plasticamente e absorver energia antes do ponto de ruptura. Como as cerâmicas não apresentam boas propriedades de elasticidade ou plasticidade, conseqüentemente sua resiliência e tenacidade são baixas.

A dureza é a propriedade mecânica de um material em resistir à deformação plástica. Os materiais cerâmicos se destacam devido aos seus altos níveis de dureza. Uma razão para a dureza dos materiais cerâmicos é a dificuldade do escorregamento ou movimento das discordâncias, pois suas ligações são predominantemente iônicas, resultando em poucos sistemas de escorregamento de planos e direções cristalográficas para que as discordâncias podem se movimentar [34].

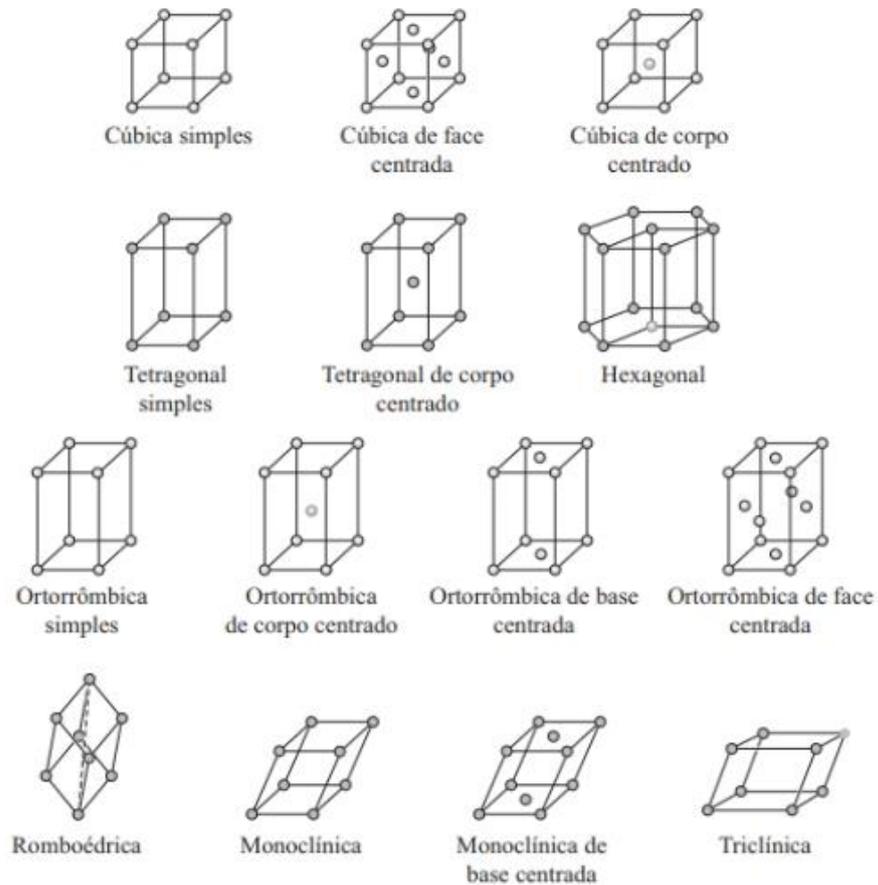
A prensagem e sinterização é um dos métodos mais econômicos para a produção de peças cerâmicas. Durante a prensagem uma tensão de compressão é aplicada em única direção no pó cerâmico. Na sinterização ocorre a difusão no contorno e no volume do grão que contribui para o aumento da massa específica da [37]. O aumento da densidade contribui para o aumento da resistência e dureza do material.

3.12 Cristalografia da laterita

A laterita apresenta uma grande variação em sua composição química e mineralógica de acordo com a região em que é encontrada. Sendo assim, é fundamental descobrir e entender os grupos minerais presentes em cada amostra para que seja possível compreender os resultados das análises físico químicas e explicar o comportamento do material conforme os ensaios em que é submetido.

Para que seja possível classificar os grupos minerais presentes na amostra de laterita, é necessário utilizar os sistemas cristalinos, que são conhecidos como cúbico, tetragonal, ortorrômbico, romboédrico, hexagonal, monoclínico e triclínico. Além dos sete sistemas cristalinos, podemos classificar uma célula unitária conforme o arranjo de seus pontos.

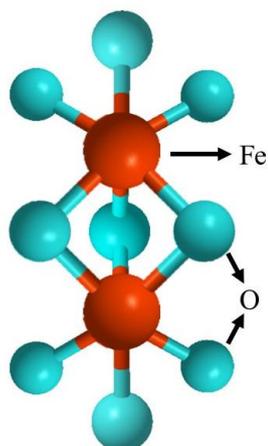
Combinando os sete sistemas cristalinos com a disposição das partículas em cada uma das células unitárias, temos as 14 redes de Bravais. As redes de Bravais correspondem às células unitárias presentes em uma estrutura cristalina, estas células correspondem à menor subdivisão de uma rede cristalina, que possui as características gerais de todo o sólido cristalino. Por meio da replicação das células unitárias é possível reconstruir o sólido cristalino por completo. A Figura 1 representa as 14 redes de Bravais.

Figura 1 – As 14 redes de Bravais [37]

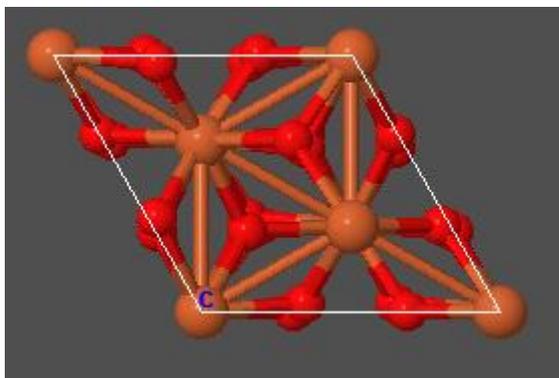
Foram identificadas nas amostras de laterita as fases minerais de hematita, quartzo, gibbsita e caulinita. Estas fases minerais foram estudadas conforme suas estruturas básicas, suas estruturas cristalinas e suas propriedades de isomorfismo e polimorfismo.

3.12.1 Cristalografia da hematita ($Fe_2 O_3$)

A estrutura básica da hematita é composta por dois átomos de ferro ligados a três átomos de oxigênio. A hematita é um óxido de ferro comum de ser encontrado em solos degradados. A Figura 2 corresponde à estrutura básica da hematita.

Figura 2 – Estrutura básica da hematita [38]

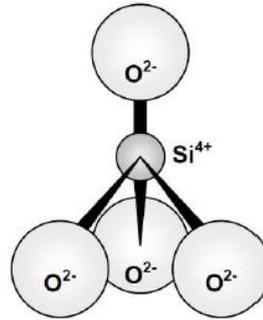
A estrutura cristalina da hematita, é classificada como romboédrica. O sistema cristalino romboédrico também é chamado de trigonal em algumas literaturas. Esta estrutura possui três eixos de comprimentos iguais e horizontais que formam ângulos de 120° entre si, e um eixo vertical perpendicular aos demais. A Figura 3 representa a estrutura cristalina da hematita

Figura 3 – Estrutura cristalina da hematita [39]

3.12.2 Cristalografia do quartzo (SiO_2)

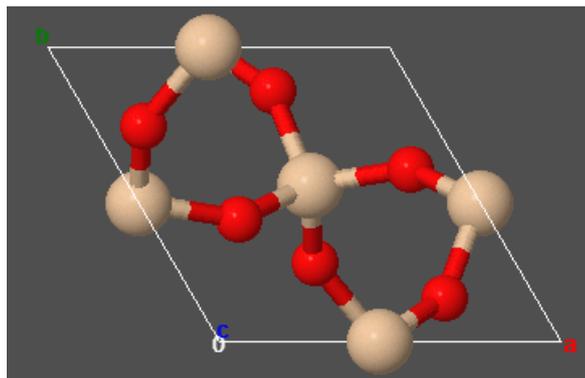
A estrutura básica do quartzo é formada por átomos de silício ligados a dois átomos de oxigênio que formam um tetraedro. O quartzo é um dos minerais primários que podem ser encontrados nos solos [41] e corresponde a um importante condicionante físico da porosidade do solo [42]. A Figura 4 corresponde ao tetraedro do quartzo.

Figura 4 – Tetraedro do quartzo [40]



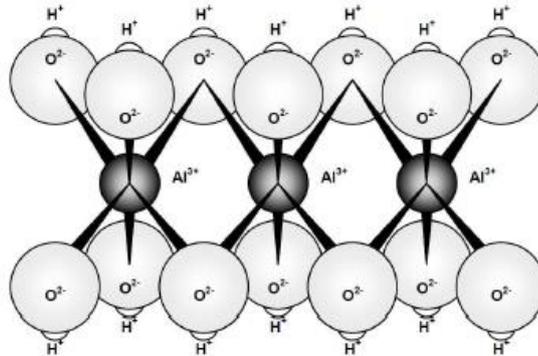
A estrutura cristalina do quartzo, assim como a estrutura cristalina da hematita, também é romboédrica. Isto significa que o quartzo e a hematita apresentam comportamento isomorfo, ou seja, possuem a mesma estrutura cristalina, porém com composições químicas diferentes. A Figura 5 representa a estrutura cristalina do quartzo.

Figura 5 – Estrutura cristalina do quartzo [39]

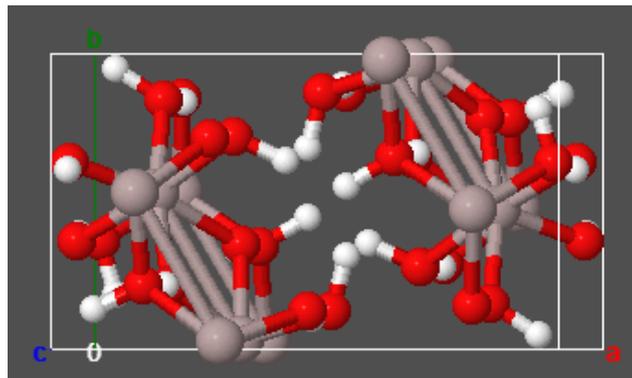


3.12.3 Cristalografia do gibbsita ($Al(OH)_3$)

A estrutura básica da gibbsita é formada por átomos de alumínio, oxigênio e hidrogênio. A gibbsita é uma das formas minerais do hidróxido de alumínio comum em latossolos e alguns argissolos. A Figura 6 corresponde à estrutura básica da gibbsita.

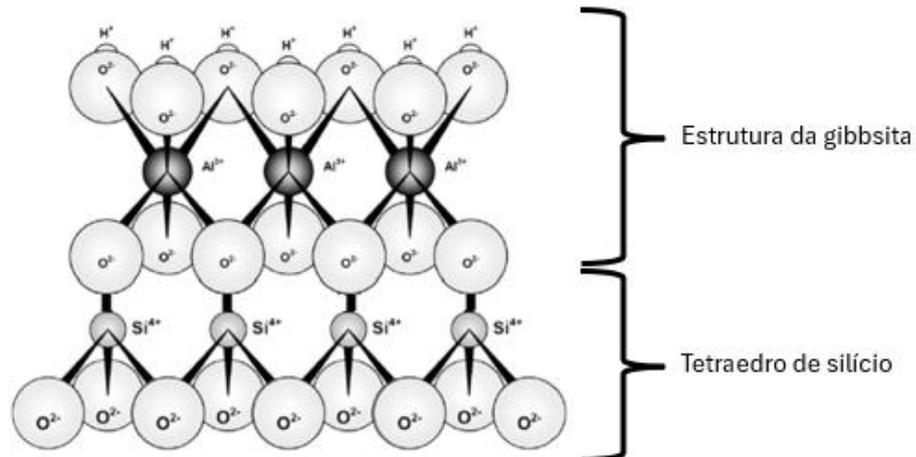
Figura 6 – Estrutura Básica da gibbsita [40]

A estrutura cristalina da gibbsita é monoclinica, caracteriza por possuir três eixos cristalográficos de comprimentos diferentes, ângulos α e γ de 90° e ângulo β com um valor diferente. A Figura 7 representa a estrutura cristalina da gibbsita.

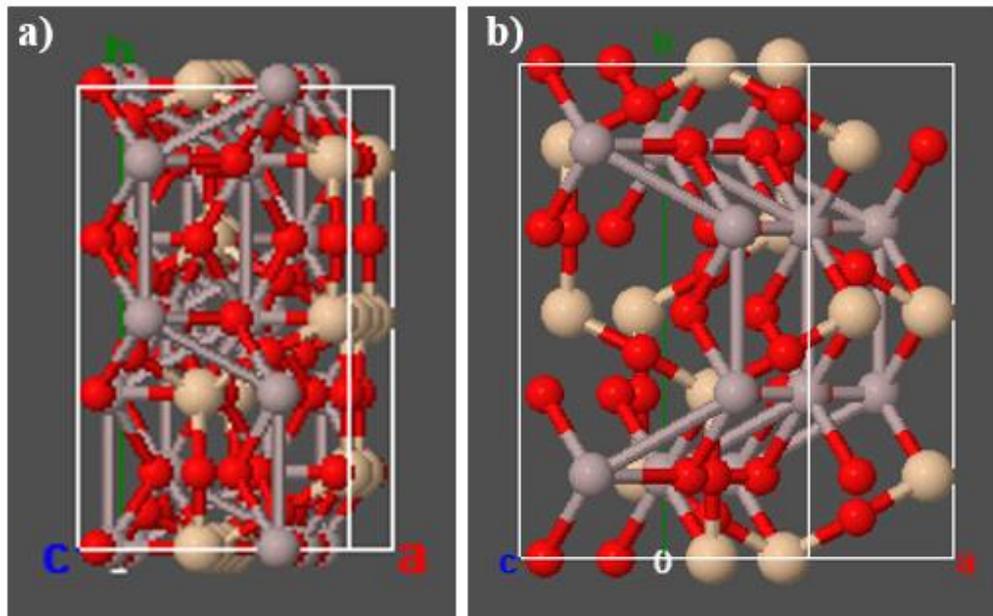
Figura 7 – Estrutura cristalina da gibbsita [39]

3.12.4 Cristalografia da caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)

A caulinita é um argilomineral comumente encontrado em solos tropicais e subtropicais [43]. A estrutura básica da caulinita é formada pela estrutura básica da gibbsita ligada a tetraedros de silício conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura Básica da caulinita [40]

A caulinita possui a mesma composição química da nacrite. Os dois minerais possuem os mesmos elementos químicos, porém apresentam estruturas cristalinas diferentes, ou seja, a única diferenciação entre a caulinita e a nacrite são suas estruturas cristalinas, sendo a nacrite uma estrutura monoclinica e a caulinita triclinica. Este fenômeno é chamado de polimorfismo, em que a composição química é igual, mas a estrutura cristalina é diferente. A Figura 9 apresenta a estrutura cristalina da nacrite.

Figura 9 – Estrutura cristalina da nacrite e da caulinita [39]

4. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

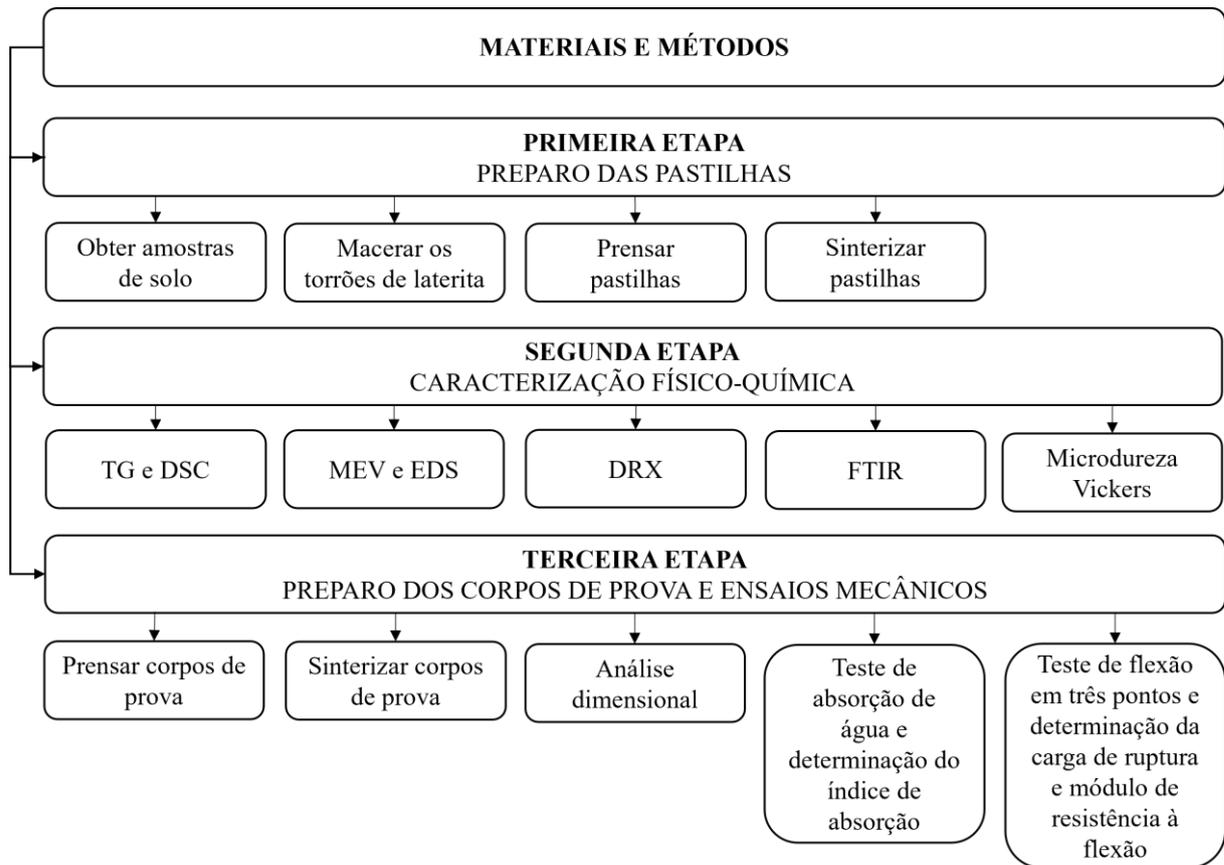
Este trabalho foi dividido em três etapas, sendo a primeira etapa a obtenção e o processamento das amostras de laterita, extraídas da região de Maracaju-MS, para as análises físico-químicas, a segunda etapa as caracterizações térmicas e a terceira etapa a confecção dos corpos de prova e os ensaios mecânicos.

Na primeira etapa foi realizado o processamento da amostra como recebida. Nesta etapa as amostras do solo de laterita em forma de torrões foram maceradas e prensadas em pastilhas, que foram sinterizadas em diferentes temperaturas.

Na segunda etapa foram realizadas as análises de caracterização físico-químicas, aplicando as técnicas auxiliares de TG, DSC, MEV, EDS, DRX e FTIR.

Na terceira etapa os corpos de prova foram obtidos utilizando uma prensa isostática, a uma pressão manométrica de 140 Kg/cm², em seguida foram submetidos aos processos de sinterização e aos ensaios mecânicos. Após o preparo, os corpos de prova foram submetidos a análise dimensional antes e depois da sinterização, teste de absorção de água e teste de flexão em três pontos. A partir dos resultados dos testes, obteve-se a caracterização dos parâmetros mecânicos dos corpos de prova de laterita. A Figura 10 apresenta um fluxograma das etapas dos materiais e métodos utilizados neste trabalho.

Figura 10 – Fluxograma das etapas dos materiais e métodos



4.1 Primeira etapa - Preparo do material para as análises físico-químicas

4.1.1 Obtenção das amostras de solo

Foram obtidas amostras de solo de laterita da região de Maracaju - MS. Estas amostras foram obtidas em forma de torrões do solo laterítico. Os torrões apresentavam coloração alaranjada e alta porosidade, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Torrões de laterita



4.1.2 Maceração dos torrões de laterita

Os torrões de laterita foram macerados até a granulometria de 45 Mesh. Para isso, foi utilizada uma marreta de ferro para reduzir os torrões em porções menores, e posteriormente um almofariz de cerâmica para reduzir os torrões até um pó de granulometria 45 Mesh. O resultado final da maceração dos torrões de laterita está representado na Figura 12. Estes procedimentos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC da UFMS.

Figura 12 – Pó de laterita



4.1.3 Prensagem das pastilhas

Com o pó de laterita, foram confeccionadas 14 pastilhas. Cada pastilha era composta por 1,5 g do material e foi submetida a uma carga de 1,5 ton/cm² durante 20 s em uma prensa hidráulica modelo MARCON-MPH-15 no Laboratório de Nanomateriais e Nanotecnologia Aplicada (LNNA), do Instituto de Física da UFMS. A Figura 13 corresponde a prensa hidráulica, o pastilhador e as pastilhas de laterita.

Figura 13 – (a) Prensa Hidráulica para 15 toneladas - MARCON-MPH-15, (b) pastilhador e (c) pastilhas de laterita



4.1.4 Sinterização das pastilhas

Foram feitos dois grupos de pastilhas de laterita, sendo um grupo de pastilhas para realizar os ensaios de MEV e EDS e outro grupo de pastilhas para realizar os ensaios de DRX, FTIR e microdureza Vickers. Estes dois grupos de pastilhas foram feitos para que a deposição

de ouro realizada no ensaio de MEV não interfira nos resultados dos demais ensaios. A Figura 14 é uma representação esquemática da sinterização das pastilhas de laterita.

Figura 14 – Representação esquemática da sinterização das pastilhas de laterita

Grupo 1	Verde	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Grupo 2	Verde	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C

As pastilhas de laterita foram sinterizadas em duplas nas temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, com rampa de aquecimento de 10 °C/min e mantendo patamar de 1 h, com fluxo de gás inerte e resfriamento natural em um forno mufla modelo EDG 1800 apresentada na Figura 15. Assim como o pastilhamento, a sinterização foi realizada no Laboratório de Nanomateriais e Nanotecnologia Aplicada (LNNA), do Instituto de Física da UFMS.

Figura 15 – Forno mufla EDG 1800 com as pastilhas de laterita



4.2 Segunda etapa – Caracterização físico-química

4.2.1 Análise de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise de TG é uma técnica termoanalítica que mede a variação da massa de uma amostra em função da temperatura. Esta técnica é utilizada para analisar as mudanças na composição, estabilidade térmica e comportamento térmico de um material.

O ensaio é realizado em um aparelho composto por uma microbalança que registra a massa da amostra enquanto é submetida a uma mudança de temperatura. A variação da temperatura é realizada por meio de um programa específico, sendo normalmente um aquecimento a uma taxa constante.

Com o aumento da temperatura pode ocorrer a perda de umidade, a decomposição térmica, reações químicas, mudanças de fase, oxidação e redução do material analisado [32]. Todos estes efeitos têm como consequência a variação da massa do material. Ao analisar os resultados de uma análise termogravimétrica é possível saber em qual temperatura cada efeito ocorre devido a alteração da massa do material.

O ensaio de DSC é uma análise térmica que permite estudar as propriedades térmicas dos materiais. Este ensaio mede a diferença de calor absorvido ou liberado por uma amostra em relação a uma amostra de referência enquanto a temperatura é controlada de forma programada. Durante esta análise são medidas as diferenças em energia que é absorvida ou liberada em função da temperatura.

O ensaio de DSC possibilita observar as transições de fase e o comportamento de polímeros, determinar o ponto de fusão, a estabilidade térmica e estudar as reações químicas de um material. Este ensaio disponibiliza informações detalhadas sobre o comportamento térmico, sendo fundamental para a caracterização e desenvolvimento de materiais.

As análises TG e DSC foram realizadas no pó de laterita com granulometria na ordem de 45 Mesh. O material foi submetido a uma rampa de aquecimento de 10 °C/min até 900 °C com fluxo de atmosfera de N. As Análises TG e DSC foram realizadas no Laboratório de Nanomateriais e Nanotecnologia Aplicada (LNNA), do Instituto de Física da UFMS em um analisador térmico simultâneo STA 449 F3 Jupiter representado na Figura 16.

Figura 16 – Analisador térmico simultâneo STA 449 F3 Jupiter



4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

O ensaio de MEV é uma avançada técnica de microscopia, que obtém imagens de alta resolução da superfície de amostras por meio de feixes de elétrons. É utilizada para desenvolver pesquisas científicas e também em aplicações industriais, pois permite visualizar estruturas microscópicas em escala nanométrica.

A partir de um ensaio de MEV, é possível analisar a morfologia, a porosidade e a compactação de uma amostra. A espessura dos contornos de grão, o espaçamento entre falhas e o diâmetro de grãos. Estas informações são essenciais para a caracterização de um material, pois permite obter uma compreensão mais aprofundada das características micro estruturais de um material e entender melhor seu comportamento.

O ensaio de EDS é uma técnica de análise semi-quantitativa. Este ensaio é realizado por um equipamento que pode ser acoplado ao microscópio de varredura eletrônica. Este equipamento se chama analisador de raios x, e é capaz de analisar as frequências de radiação liberada no espectro do raio x. Como cada elemento libera fótons com frequências específicas, é gerado um espectro de energia versus intensidade relativa dos picos. Isto permite identificar e quantificar os elementos presentes em uma amostra.

Os ensaios de MEV e EDS foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Análises de Materiais (MULTILAM), do Instituto de Física da UFMS. Primeiramente foi realizada a análise de EDS e depois de MEV. Os ensaios foram realizados nesta ordem, pois o preparo das amostras para o MEV iria interferir nos resultados de EDS devido à deposição de ouro na amostra.

No preparo das amostras para a MEV as pastilhas de laterita foram submetidas ao processo de purga. Este processo envolve a aplicação de gás argônio e vácuo para remover os outros gases presentes na pastilha. Por ser uma pastilha grande e muito porosa haviam muitos gases presentes e isto estava impossibilitando que o MEV realizasse o vácuo necessário para a execução do ensaio. Além disso, foi realizada a deposição de ouro para melhorar a condutividade da amostra e foi aplicada tinta de prata para fixar as pastilhas no porta amostras do MEV.

A preparação das amostras foi realizada no equipamento Bench Coater para Microscopia Eletrônica e Preparação de Amostras Denton Vacuum Desk III, apresentado na Figura 17. A Figura 18 corresponde ao microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JSM6380-LV em que os ensaios de MEV e EDS foram realizados.

Figura 17 – Bench Coater para Microscopia Eletrônica e Preparação de Amostras Denton Vacuum Desk III



Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM6380-LV



4.2.3 Difração de raios-X (DRX)

O ensaio de DRX é uma técnica não destrutiva que permite estudar a estrutura cristalina dos materiais [44]. A técnica consiste na incidência de radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados. Isto permite identificar as fases cristalinas, determinar os parâmetros de rede, e quantificar as fases de uma amostra.

Os difratogramas foram obtidos utilizando step de 0,02 de velocidade de $2^\circ/\text{min}$ no intervalo de 3° a 70° . O ensaio de DRX foi realizado nos Laboratórios de Recursos Renováveis da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul na cidade de Dourados, Mato Grosso do Sul. Os espectros foram analisados por meio do software Crystallographica Search-Match e do banco de dados minerais contidos no programa. A Figura 19 representa o difratômetro de raios x Rigaku MiniFlex

Figura 19 – Difratorômetro de raios x Rigaku MiniFlex



4.2.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

O ensaio de FTIR é uma técnica analítica aplicada no estudo da composição química e da estrutura molecular de materiais. Este ensaio é realizado utilizando-se uma fonte de luz infravermelha capaz de emitir um amplo espectro de comprimentos de onda infravermelhos. O feixe de luz infravermelho é dividido em dois, sendo um que atinge diretamente a amostra e o outro que passa por um espelho móvel. Os dois feixes de luz são recombinados, resultando em uma interferência entre as duas ondas de luz. É realizado um deslocamento do espelho móvel para alterar o comprimento do caminho óptico. Isto gera um interferograma, que é a representação da interferência entre os dois feixes de luz em função do tempo.

É aplicada a Transformada de Fourier no interferograma para converter o tempo em frequência, resultando em um espectro de absorção infravermelha da intensidade da absorção em relação ao número de onda (frequência inversa). Este espectro apresenta picos de absorção em frequências específicas, que correspondem às vibrações moleculares das ligações químicas presentes na amostra analisada. A partir da análise dos picos é possível identificar os grupos funcionais e também determinar a composição da amostra.

O ensaio de FTIR foi utilizada para determinar os grupos funcionais nos minerais presentes no solo, com a medição das bandas de absorção em comprimentos de onda característicos das ligações, para obter informações sobre as estruturas do solo laterita.

O ensaio de FTIR foi realizado no laboratório de recursos renováveis da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul na cidade de Dourados, Mato Grosso do Sul. O número de

onda (cm^{-1}) utilizado foi de 700 a 1100. A Figura 20 representa o espectrofotômetro com transformada de Fourier Thermo Nicolet Nexus.

Figura 20 – Espectrofotômetro com transformada de Fourier Thermo Nicolet Nexus



4.2.5 Microdureza Vickers

Em materiais cerâmicos, a medição precisa da dureza é de difícil realização, pois materiais cerâmicos são frágeis e altamente suscetíveis ao trincamento. No momento em que penetradores são forçados contra a superfície de um material cerâmico, ocorre a formação de trincas que resultam em leituras imprecisas [34].

Os penetradores esféricos Rockwell e Brinell não são recomendados para materiais cerâmicos devido ao severo trincamento que produzem. Neste caso, as técnicas Vickers e Knoop são mais recomendadas pois que empregam penetradores piramidais. A Figura 21 representa a forma da impressão no ensaio de microdureza Vickers.

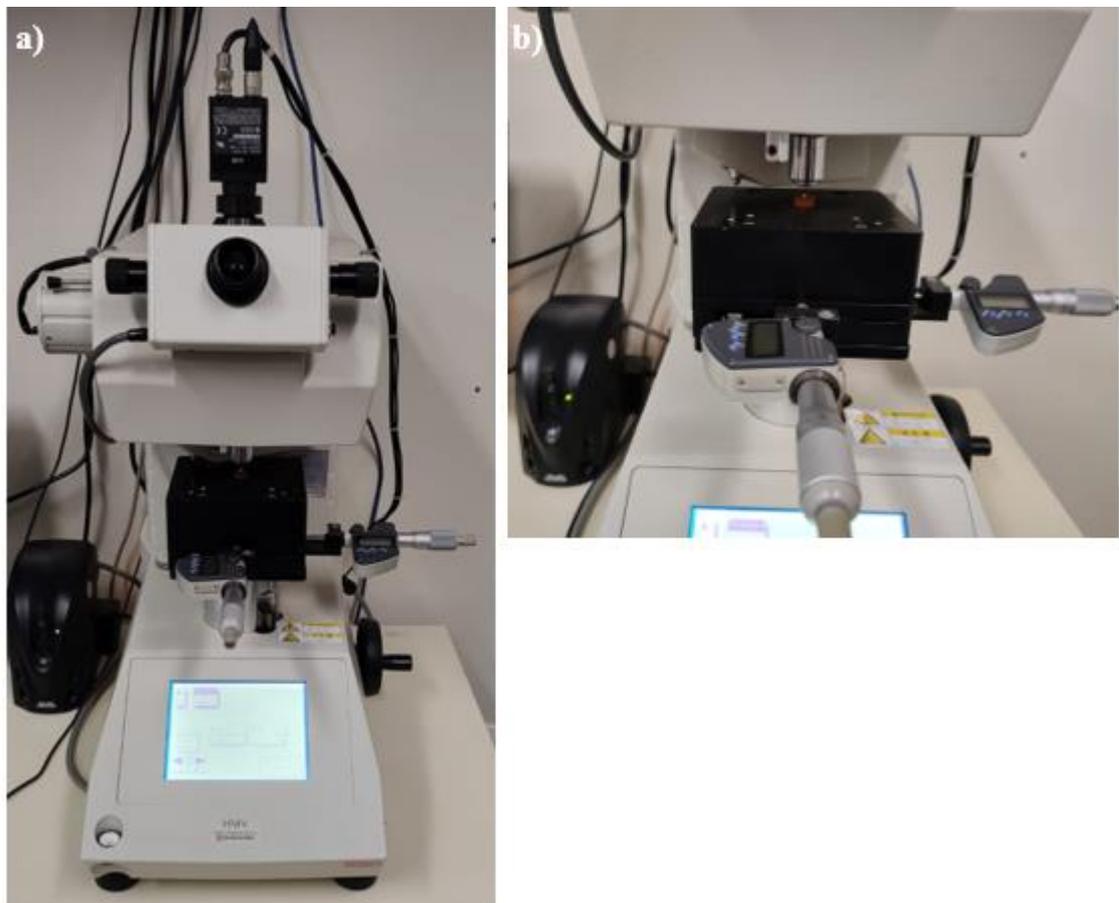
Figura 21 – Forma da impressão no ensaio de microdureza Vickers [34], (a) vista lateral do penetrador
(b) vista superior da impressão



No ensaio de microdureza Vickers um pequeno penetrador de diamante de formato piramidal é pressionado contra a superfície do corpo de prova. A área da impressão resultante é observada e medida com um microscópio. A razão entre a força de carga aplicada e a área da impressão resultante equivale ao valor de dureza Vickers HV.

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E, no Laboratório Multiusuário de Análises de Materiais (MULTILAM), do Instituto de Física da UFMS. A Figura 22 representa o microdurômetro Vickers Shimadzu modelo HMV-2T E.

Figura 22 – Microdurômetro Vickers Shimadzu modelo HMV-2T E, (a) Microdurômetro Vickers (b) Microdurômetro Vickers com a pastilha de laterita

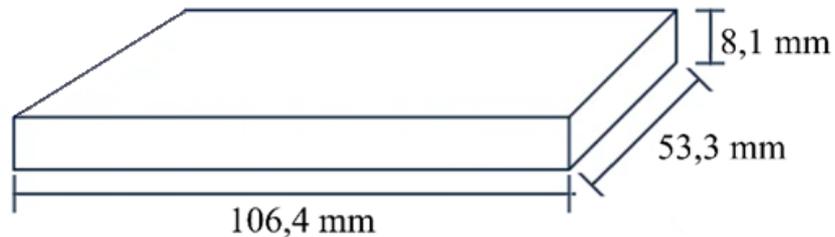


4.3 Terceira etapa - Preparo dos corpos de prova e ensaios mecânicos

4.3.1 Prensagem dos corpos de prova

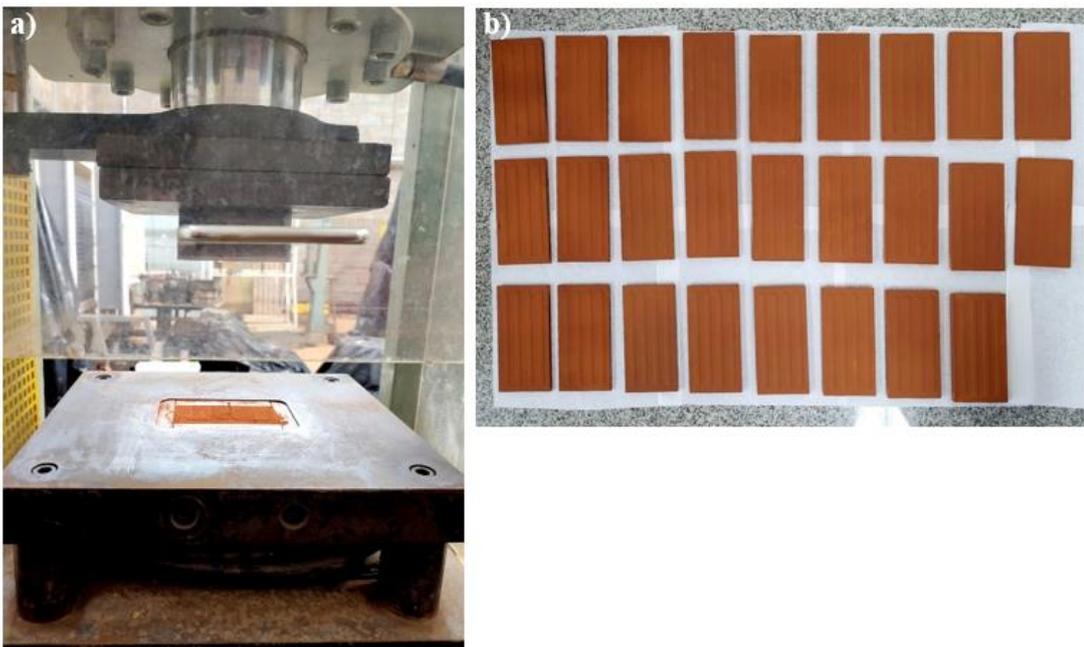
A partir do mesmo pó de laterita utilizado para confeccionadas as 14 pastilhas, foram feitos 26 corpos de prova. Cada corpo de prova possui em média 100 gr do material, 106,4 mm de comprimento, 53,3 mm de largura e 8,1 mm de altura. A Figura 23 apresenta uma representação esquemática das medidas do corpo de prova antes de sinterizar.

Figura 23 – Representação esquemática das medidas do corpo de prova antes de sinterizar



Os corpos de prova foram submetidos a uma pressão manométrica de 140 Kg/cm² em uma prensa modelo Gabrielli L4 no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Engenharia Civil da UFMS. A Figura 24 representa a prensa e os corpos de prova de laterita.

Figura 24 – (a) Prensa para corpos de prova, (b) Corpos de prova de laterita



4.3.2 Sinterização dos corpos de prova

Foram preparados três grupos de corpos de prova de laterita, sendo um grupo de corpos de prova para o teste de absorção de água e dois grupos para o ensaio de flexão em três pontos, para que a exposição à umidade do teste de absorção de água não interferisse no resultado de resistência à flexão. A Figura 25 é uma representação esquemática da sinterização dos corpos de prova de laterita.

Figura 25 – Representação esquemática da sinterização dos corpos de prova de laterita

Grupo 1	Verde	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Grupo 2	Verde	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Grupo 3	Verde	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C

Os corpos de prova de laterita foram sinterizadas em trios nas temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, com rampa de aquecimento de 10 °C/min e mantendo patamar de 1 h, com fluxo de gás inerte e resfriamento natural em um forno mufla modelo EDG 1800, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Forno mufla EDG 1800 com os corpos de prova de laterita



4.3.3 Análise dimensional dos corpos de prova

O ensaio de análise dimensional foi realizado conforme a norma ABNT NBR 8492/2012 [45], utilizando paquímetro com resolução de 0,1 mm. Para cada dimensão foram coletadas três medidas em pontos distintos de cada face do corpo de prova e calculado uma média simples.

Com os valores da análise dimensional e os valores de massa dos corpos de prova antes e depois de sinterizar, foi obtida a massa específica aparente inicial MEA (1), a massa específica aparente final MEA (2) e o percentual de perda de massa final dos corpos de prova.

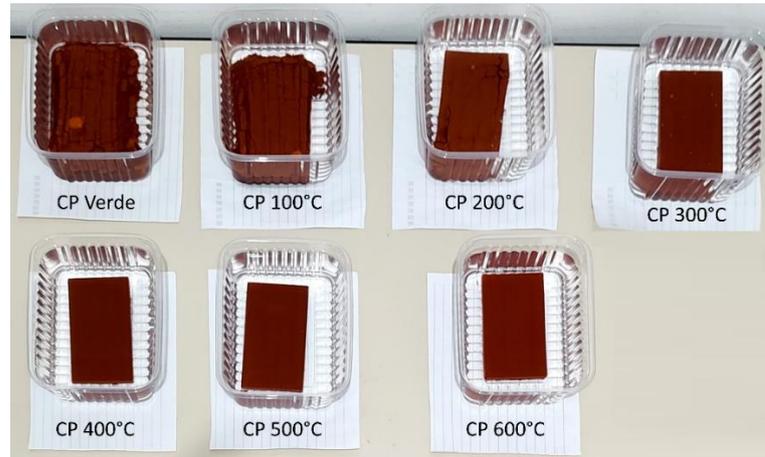
4.3.4 Teste de absorção de água

O teste de absorção de água é realizado medindo-se a massa de corpos de prova já moldados, antes e depois da imersão em um recipiente com água. Primeiramente os corpos de prova são pesados em uma balança, esta é a massa m_1 . Após a pesagem de todos os corpos de prova, eles são submersos por completo em um recipiente com água. O tempo de imersão é de 24 horas, de acordo com a norma ABNT NBR 8492/2012 [45]. Após o tempo total de imersão, os corpos de prova devem ser retirados da água, e enxugados de forma superficial com um pano levemente umedecido. Os corpos de prova são novamente pesados, obtendo-se assim a massa do corpo de prova m_2 . O percentual da diferença de massa, antes e após a imersão é dado pela expressão [45]:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

Este ensaio é útil para o desenvolvimento de novos produtos, controle de qualidade e para verificar se um produto atende às normas vigentes. A determinação do índice de absorção de água de um material é útil para selecionar as cerâmicas conforme suas finalidades. O índice de absorção de água de uma cerâmica é diretamente relacionado com a porosidade, resistência mecânica, resistência ao impacto, entre outras propriedades da peça cerâmica. A Figura 27 apresenta os corpos de prova de laterita submersos durante o teste de absorção de água.

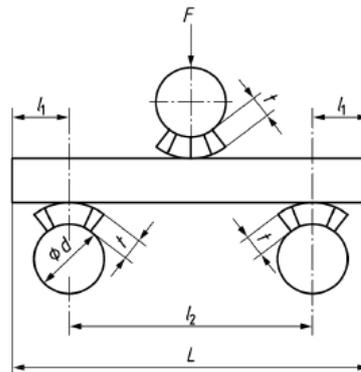
Figura 27 – Corpos de prova de laterita submersos durante o teste de absorção de água



4.3.5 Teste de flexão em três pontos

O teste de flexão em três pontos é realizado ao aplicar carga em três pontos de apoio em um corpo de prova, sendo dois pontos localizados na região de suporte e um ponto no centro do corpo de prova. Este ensaio permite obter a força de ruptura, a carga de ruptura e o módulo de resistência à flexão. A Figura 28 é uma representação esquemática da aplicação da carga no corpo de prova.

Figura 28 – Representação esquemática da aplicação da carga no corpo de prova [46]



Sendo:

d o diâmetro do apoio;

L o lado maior da placa;

l_1 a sobreposição da placa ao longo da aresta de apoio;

l_2 a distância entre as barras de apoio;

t a espessura da borracha.

A carga de ruptura, S em newtons, é calculada pela seguinte equação:

$$S = \frac{Fl_2}{B}$$

Onde:

F é a força de ruptura, em newtons (N);

l_2 é a distância entre as barras de apoio, em milímetros (mm);

B é o lado menor do corpo de prova, em milímetros (mm).

O módulo de resistência à flexão, R , em newtons por milímetro quadrado, é calculado pela equação:

$$R = \frac{3Fl_2}{2Bh^2} = \frac{3S}{2h^2}$$

Em que:

F é a carga de ruptura, em newtons (N);

l_2 é a distância entre as barras de apoio, em milímetros (mm);

B é o lado menor do corpo de prova, em milímetros (mm);

h é a espessura mínima do corpo de prova ensaiado, medida após o ensaio, ao longo da borda de fratura, em milímetros (mm).

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de flexão em três pontos em um flexômetro modelo Gabbrielli CRAB 424 no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Engenharia Civil da UFMS. A Figura 29 corresponde ao flexômetro com um corpo de prova de laterita.

Figura 29 – Flexômetro modelo Gabbrielli CRAB 424 com um corpo de prova de laterita

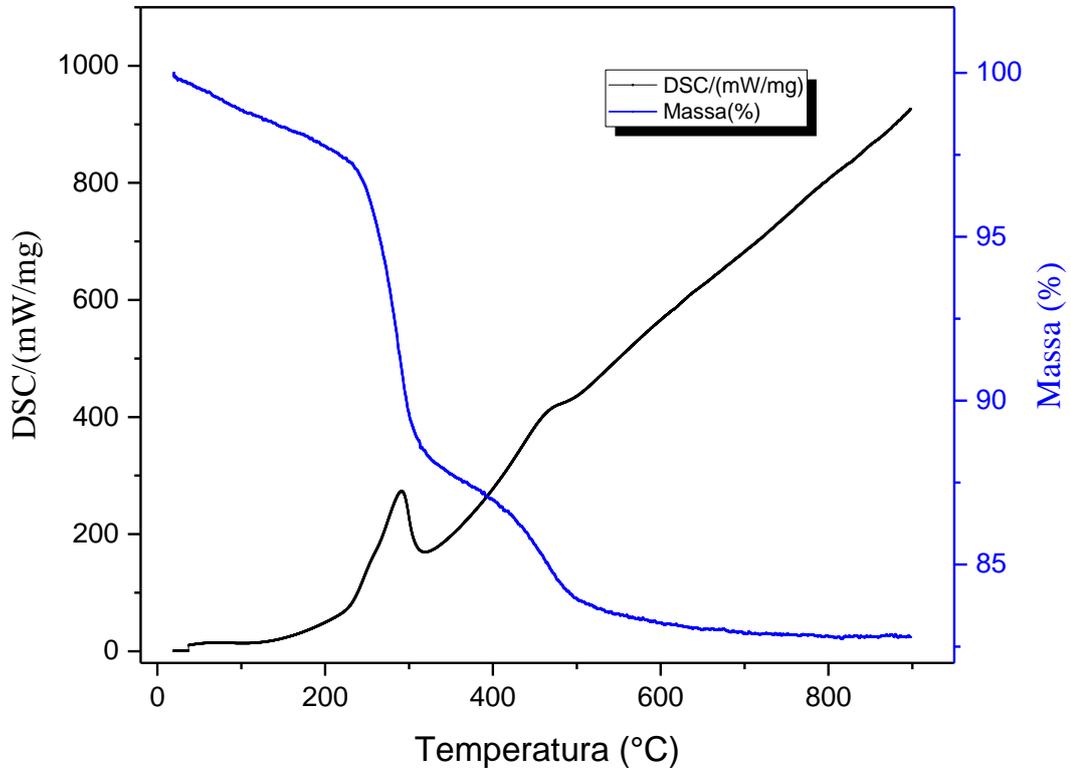


5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As análises térmicas foram realizadas nas amostras precursoras de laterita como recebidas. O Gráfico 1 representa as análises simultâneas de TG e DSC. No gráfico TG, podemos observar no eixo TG que houve perda de massa da temperatura ambiente até 100 °C, atribuída à evaporação de água superficial da amostra. De 100 °C à 270 °C, a perda de massa observada ocorreu devido ao processo físico de evaporação de água intersticial e também ao processo químico de degradação da matéria, como por exemplo, compostos orgânicos presentes na amostra. Em 270 °C houve uma perda de massa mais acentuada que está atribuída ao pico endotérmico apresentado pelo DSC, referente à uma transição de fase. De 300 °C à 470 °C houve perda de massa a qual pode ser atribuída à degradação térmica da matéria orgânica e de alguns elementos de baixo ponto de fusão. Em 470 °C houve novamente uma perda de massa mais acentuada, relacionada a outro pico endotérmico apresentado pelo DSC, referente à outra transição de fase. A partir de 500 °C a amostra inicia o processo de estabilidade térmica até 900 °C.

A análise do DSC, conforme representado no Gráfico 1 no eixo DSC, podemos observar dois picos endotérmicos coerentes com o comportamento da perda de massa da amostra, sendo que o primeiro pico em 273,3 °C corresponde à transição das fases da gibbsite e da nacrite para formar fase da caulinita. O segundo pico em 471,2 °C temos uma segunda transição de fase, ou seja, a desidroxilação da caulinita [32] na sua forma cristalina para formar a fase metacaulinita não cristalina [47, 48]. Os resultados mostram que a laterita tem um comportamento polimórfico, podendo apresentar mudanças de fase e consequentemente mudança de estrutura cristalina em função da temperatura, caracterizando como um material alotrópico.

Gráfico 1 – Resultado da Análise Térmica

5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

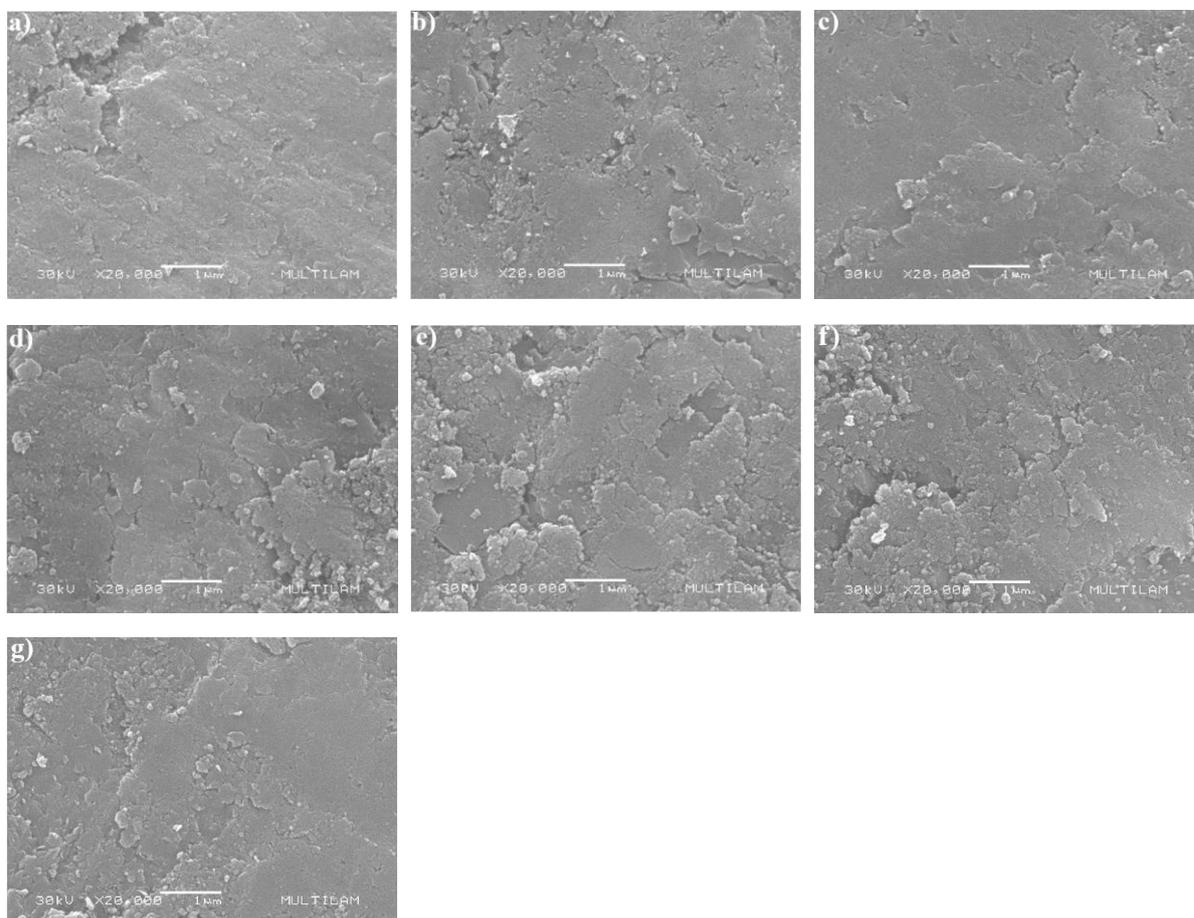
A Figura 30 representa as imagens das análises do MEV, as quais podemos observar a morfologia das pastilhas prensadas e submetidas a diferentes temperaturas de sinterização. A Figura 30 (a) representa a amostra verde sem o processo de sinterização, (b) representa a amostra sinterizada a 100 °C, (c) representa a amostra sinterizada a 200 °C, (d) representa a amostra sinterizada a 300 °C, (e) representa a amostra sinterizada a 400 °C, (f) representa a amostra sinterizada a 500 °C e por fim, (g) representa a amostra sinterizada a 600 °C.

Observa-se que em todas as amostras o grau de porosidade e a compactação estão semelhantes, não sendo possível estabelecer correlação entre a temperatura de sinterização de cada pastilha e o grau de porosidade ou a compactação de cada amostra, considerando que a carga de compactação em cada amostra foi a mesma. No entanto, as imagens apresentam uma boa homogeneidade do material e de acordo com a literatura, sabemos que a temperatura influencia diretamente na minimização do grau de porosidade e conseqüentemente no aumento

da densidade, isto significa que o material pode atingir densidade suficiente para apresentar bons índices de estabilidade ao solo, sendo um bom material para pavimentação, propriedades que propicia sua aplicação na construção civil. A alta densidade de um material também pode estar relacionada a um elevado índice de dureza, contribuindo de forma favorável para a confecção de blocos estruturais, pois podem suportar maiores cargas. Um elevado índice também é apropriado para a confecção de revestimentos, pois uma dureza maior significa maior resistência ao desgaste.

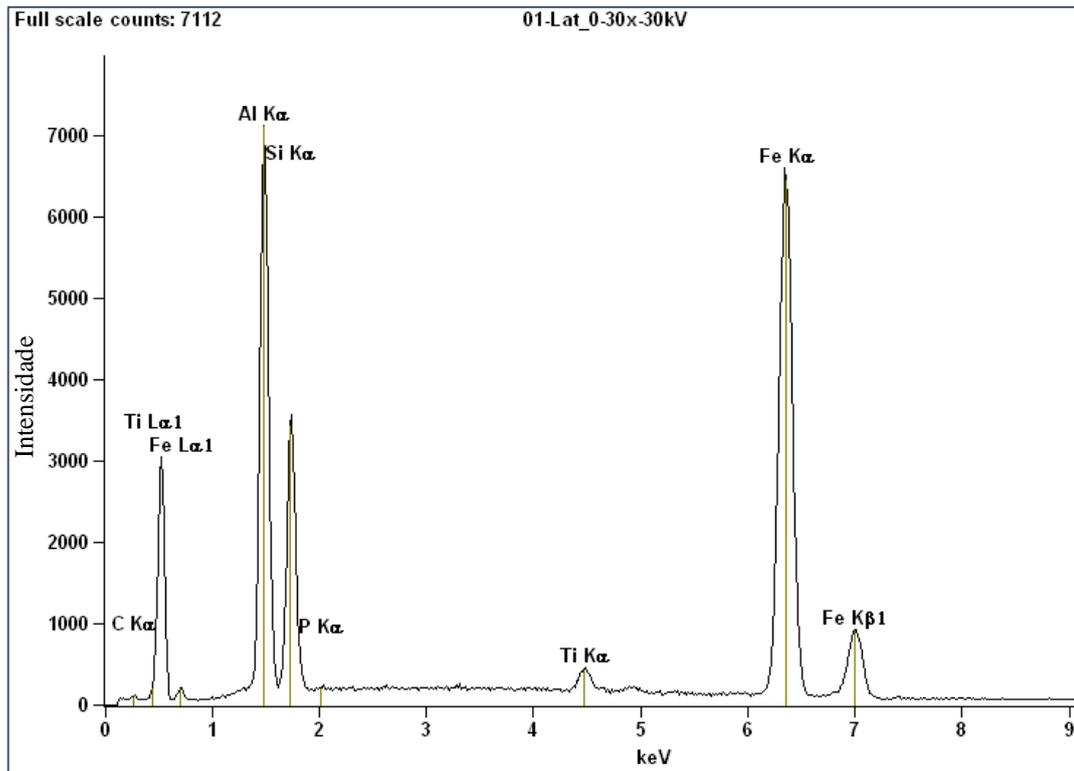
Analisando a morfologia e a homogeneidade das amostras de lateritas compactadas e sinterizadas, é possível observar que houve uma boa dissipação de energia em função da temperatura. As amostras apresentam camadas sobrepostas o que deve responder às tensões de cisalhamento aplicadas no processo de compactação e conseqüentemente sob influência direta da homogeneidade das partículas precursoras.

Figura 30 – Imagens do MEV das pastilhas de laterita com ampliação de 20.000x, (a) microscopia da pastilha verde, (b) microscopia da pastilha sinterizada a 100 °C, (c) microscopia da pastilha sinterizada a 200 °C, (d) microscopia da pastilha sinterizada a 300 °C, (e) microscopia da pastilha sinterizada a 400 °C, (f) microscopia da pastilha sinterizada a 500 °C e (g) microscopia da pastilha sinterizada a 600 °C.



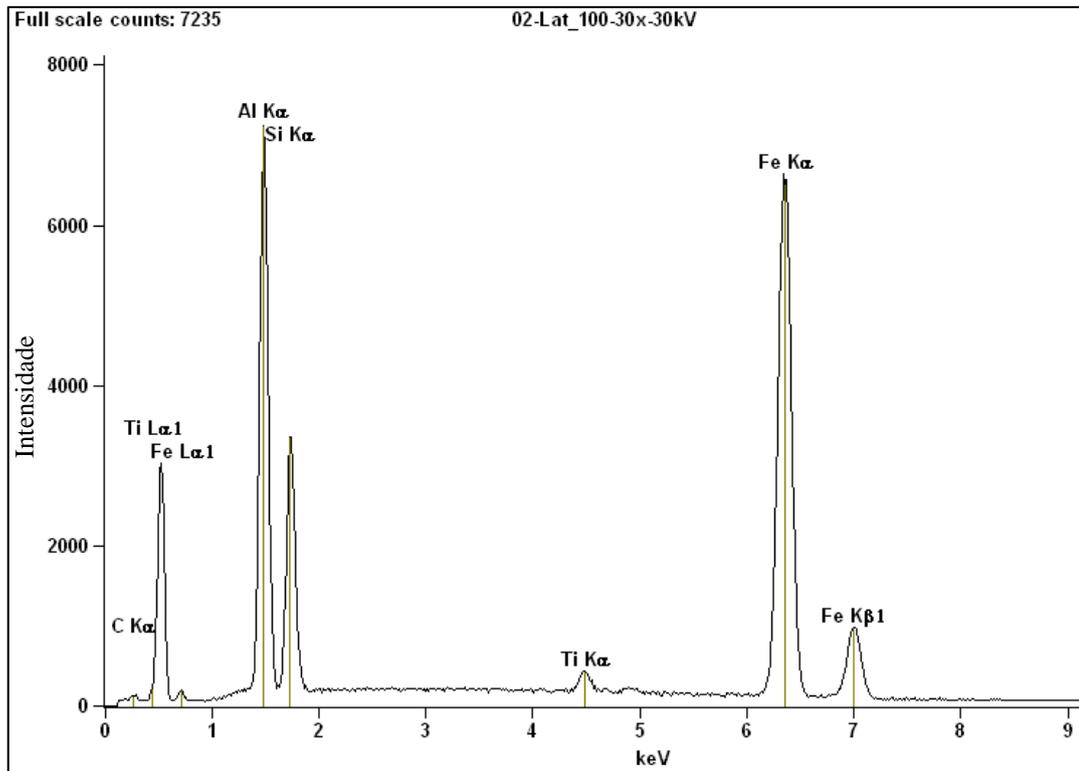
5.3 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

A Figura 31 representa o espectro da amostra verde, onde podemos observar qualitativamente os picos característicos de energia padrão dos elementos presentes nas amostras de acordo com as reflexões das camadas de valência de cada átomo. Na Tabela 1 temos a representação quantitativa da concentração de cada elemento presente de acordo com o espectro, onde podemos observar uma concentração de Fe (48,11%) e Al (31,60%), valor superior às concentrações dos elementos Si (18,46%), Ti (1,62%) e P (0,21%), uma característica desse mineral, sendo que esses valores podem ser alterados de acordo com a região e o intemperismo do solo.

Figura 31 – Espectro da amostra verde**Tabela 1** - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra verde

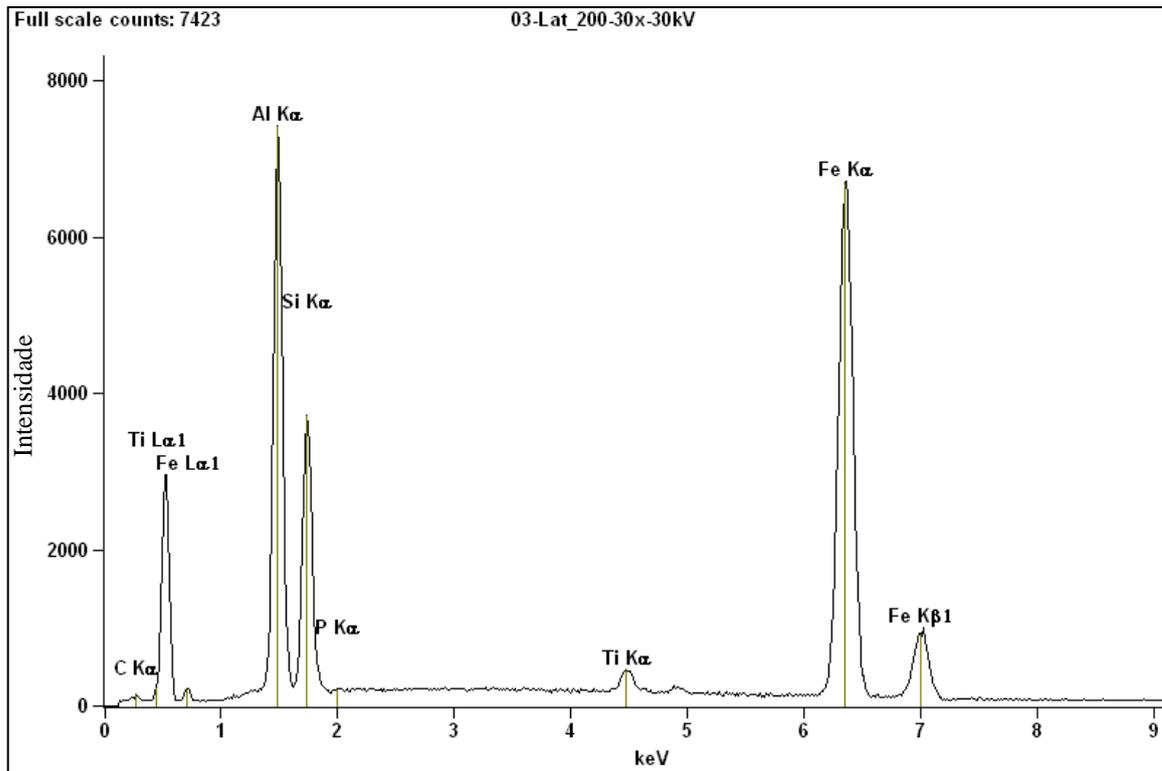
Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
Fe K	48.11	+/- 0.24	31.55	+/- 0.16
Al K	31.60	+/- 0.20	42.89	+/- 0.27
Si K	18.46	+/- 0.19	24.08	+/- 0.25
Ti K	1.62	+/- 0.08	1.24	+/- 0.06
P K	0.21	+/- 0.06	0.25	+/- 0.07
Total	100.00		100.00	

A Figura 32 apresenta o espectro da amostra sinterizada a 100 °C e a Tabela 2 representa o resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada em 100 °C. Os elementos e as concentrações identificados foram Fe (48,82%), Al (32,19%), Si (17,68%), Ti (1,30%). O pico característico do fósforo (P) está presente na espectroscopia por energia dispersiva, mas a concentração deste elemento não foi identificada nesta amostra, o que podemos atribuir a baixa concentração nesse ponto, estando dentro da escala de erro do equipamento, considerando que o ponto analisado é próximo da ordem de nanômetros.

Figura 32 - Espectro da amostra sinterizada a 100 °C**Tabela 2** - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 100 °C

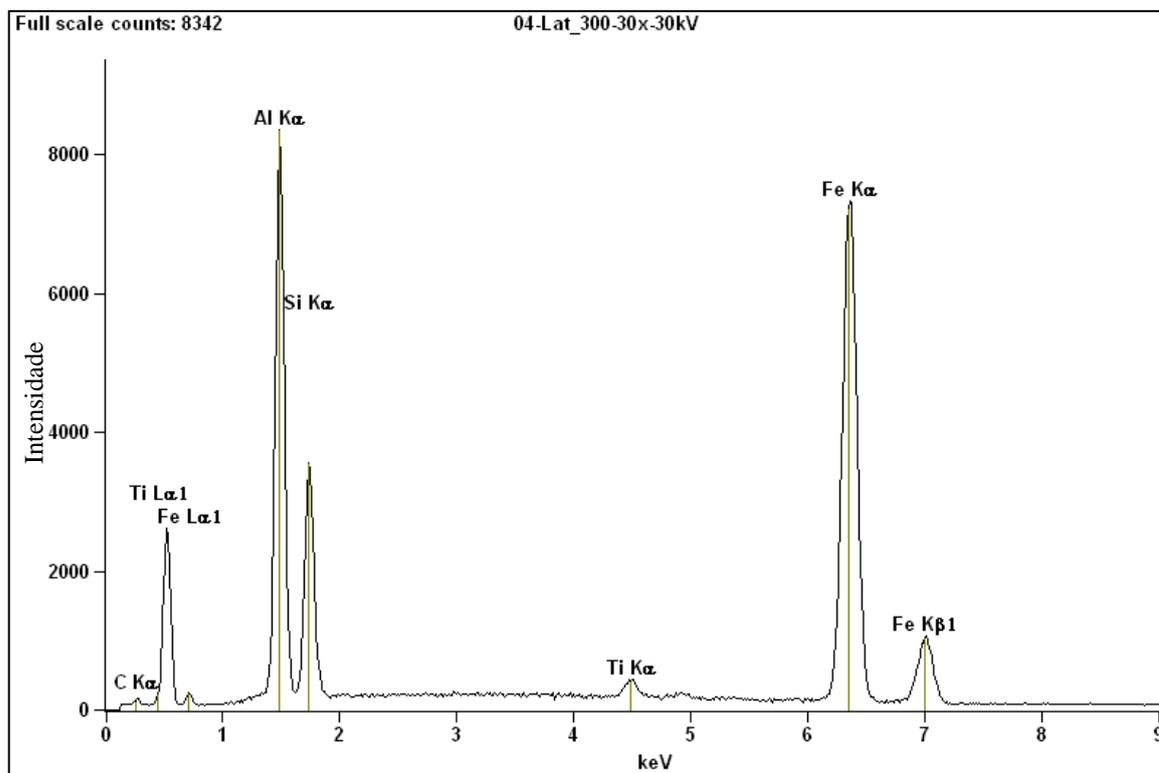
Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
Fe K	48.82	+/- 0.24	32.09	+/- 0.16
Al K	32.19	+/- 0.20	43.80	+/- 0.27
Si K	17.68	+/- 0.19	23.11	+/- 0.25
Ti K	1.30	+/- 0.08	1.00	+/- 0.06
Total	100.00		100.00	

A Figura 33 apresenta o espectro da amostra sinterizada a 200 °C e a Tabela 3 representa o resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada em 200 °C. Os elementos e as concentrações identificados foram Fe (48,11%), Al (31,72%), Si (18,93%), Ti (1,59%) e P (0,06%).

Figura 33 - Espectro da amostra sinterizada a 200 °C**Tabela 3** - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 200 °C

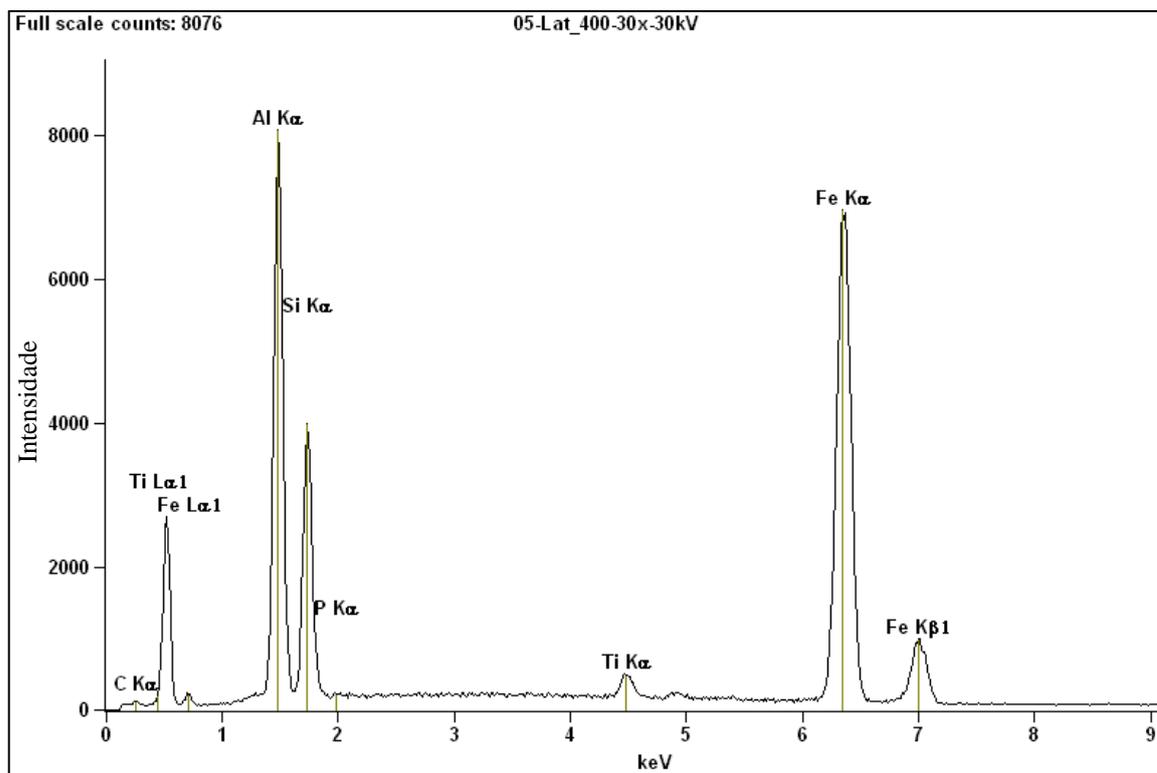
Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
Fe K	47.70	+/- 0.24	31.18	+/- 0.16
Al K	31.72	+/- 0.20	42.92	+/- 0.26
Si K	18.93	+/- 0.19	24.61	+/- 0.25
Ti K	1.59	+/- 0.08	1.21	+/- 0.06
P K	0.06	+/- 0.06	0.07	+/- 0.07
Total	100.00		100.00	

A Figura 34 apresenta o espectro da amostra sinterizada a 300 °C e a Tabela 4 representa o resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada em 300 °C. Os elementos e as concentrações identificados foram Fe (48,62%), Al (33,28%), Si (16,85%), Ti (1,25%). Assim como na amostra sinterizada a 100 °C, o pico característico do fósforo (P) está presente na espectroscopia por energia dispersiva, mas a concentração deste elemento não foi identificada nesta amostra.

Figura 34 - Espectro da amostra sinterizada a 300 °C**Tabela 4** - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 300 °C

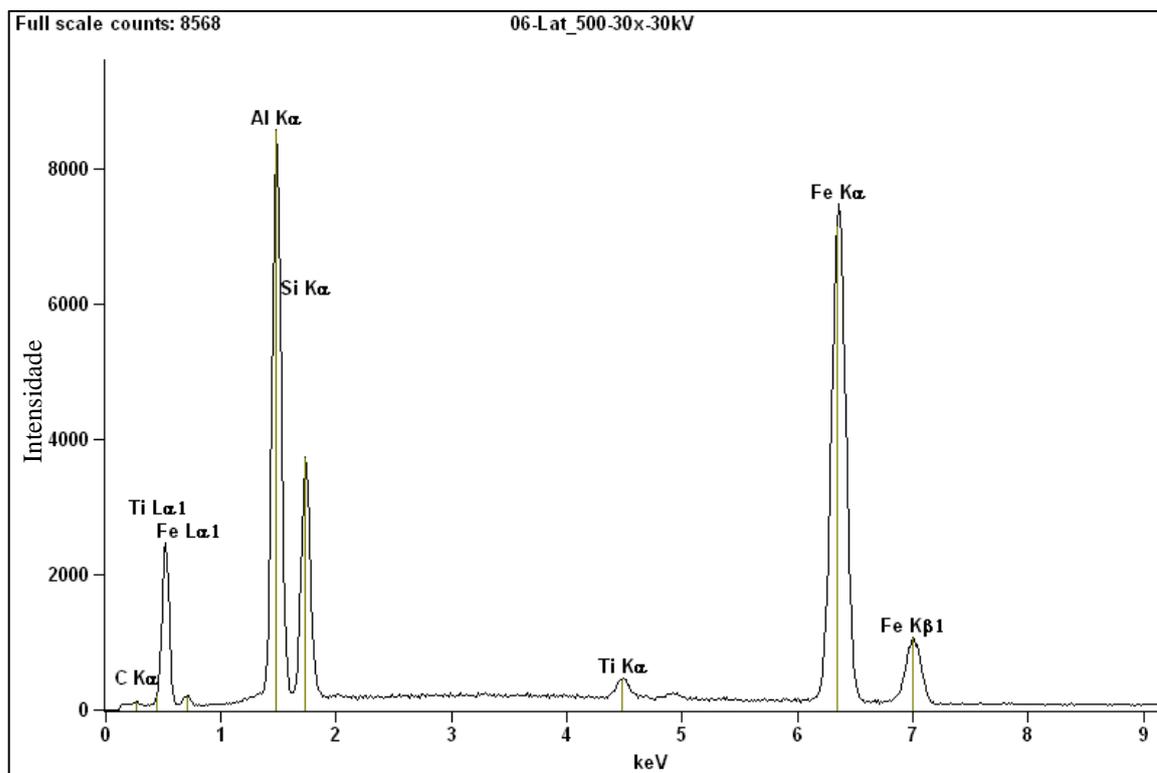
Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
Fe K	48.62	+/- 0.23	31.89	+/- 0.15
Al K	33.28	+/- 0.19	45.19	+/- 0.26
Si K	16.85	+/- 0.18	21.97	+/- 0.24
Ti K	1.25	+/- 0.07	0.96	+/- 0.05
Total	100.00		100.00	

A Figura 35 apresenta o espectro da amostra sinterizada a 400 °C e a Tabela 5 representa o resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada em 400 °C. Os elementos e as concentrações identificados foram Fe (47,37%), Al (32,19%), Si (18,63%), Ti (1,67%) e P (0,15%).

Figura 35 - Espectro da amostra sinterizada a 400 °C**Tabela 5** - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 400 °C

Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
Fe K	47.37	+/- 0.23	30.91	+/- 0.15
Al K	32.19	+/- 0.19	43.48	+/- 0.26
Si K	18.63	+/- 0.18	24.17	+/- 0.24
Ti K	1.67	+/- 0.07	1.27	+/- 0.06
P K	0.15	+/- 0.05	0.17	+/- 0.06
Total	100.00		100.00	

A Figura 36 apresenta o espectro da amostra sinterizada a 500 °C e a Tabela 6 representa o resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada em 500 °C. Os elementos e as concentrações identificados foram Fe (48,22%), Al (33,34%), Si (16,97%), Ti (1,46%). Assim como na amostra sinterizada a 100 °C e na amostra sinterizada a 300 °C, o pico característico do fósforo (P) está presente na espectroscopia por energia dispersiva, mas a concentração deste elemento não foi identificada nesta amostra.

Figura 36 - Espectro da amostra sinterizada a 500 °C**Tabela 6** - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 500 °C

Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
Fe K	48.22	+/- 0.23	31.58	+/- 0.15
Al K	33.34	+/- 0.19	45.20	+/- 0.25
Si K	16.97	+/- 0.18	22.10	+/- 0.23
Ti K	1.46	+/- 0.07	1.11	+/- 0.05
Total	100.00		100.00	

A Figura 37 apresenta o espectro da amostra sinterizada a 600 °C e a Tabela 7 representa o resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada em 600 °C. Os elementos e as concentrações identificados foram Fe (46,07%), Al (33,34%), Si (18,80%), Ti (1,61%) e P (0,18%).

Figura 37 - Espectro da amostra sinterizada a 600 °C

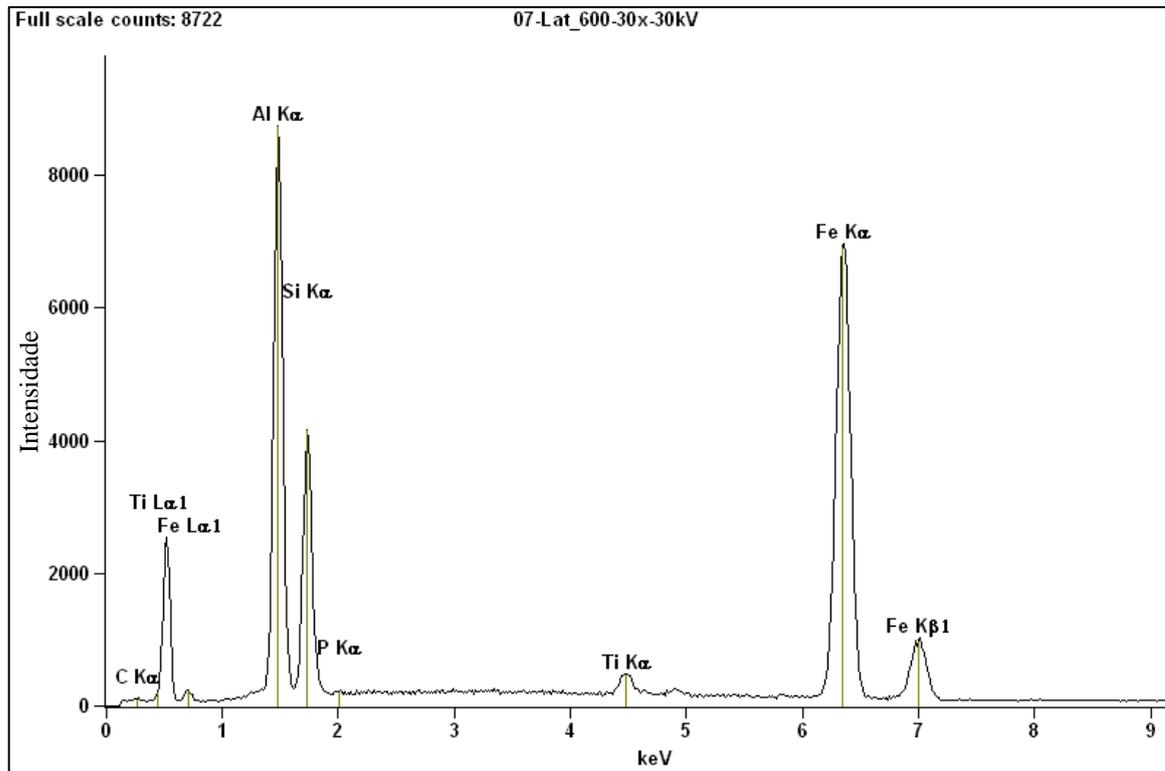


Tabela 7 - Resultado quantitativo da espectroscopia por energia dispersiva da amostra sinterizada a 600 °C

Elemento	Massa %	Massa % Erro	Átomo %	Átomo % Erro
<i>Fe K</i>	46.07	+/- 0.22	29.79	+/- 0.15
<i>Al K</i>	33.34	+/- 0.19	44.62	+/- 0.25
<i>Si K</i>	18.80	+/- 0.18	24.17	+/- 0.23
<i>Ti K</i>	1.61	+/- 0.07	1.21	+/- 0.06
<i>P K</i>	0.18	+/- 0.05	0.22	+/- 0.06
Total	100.00		100.00	

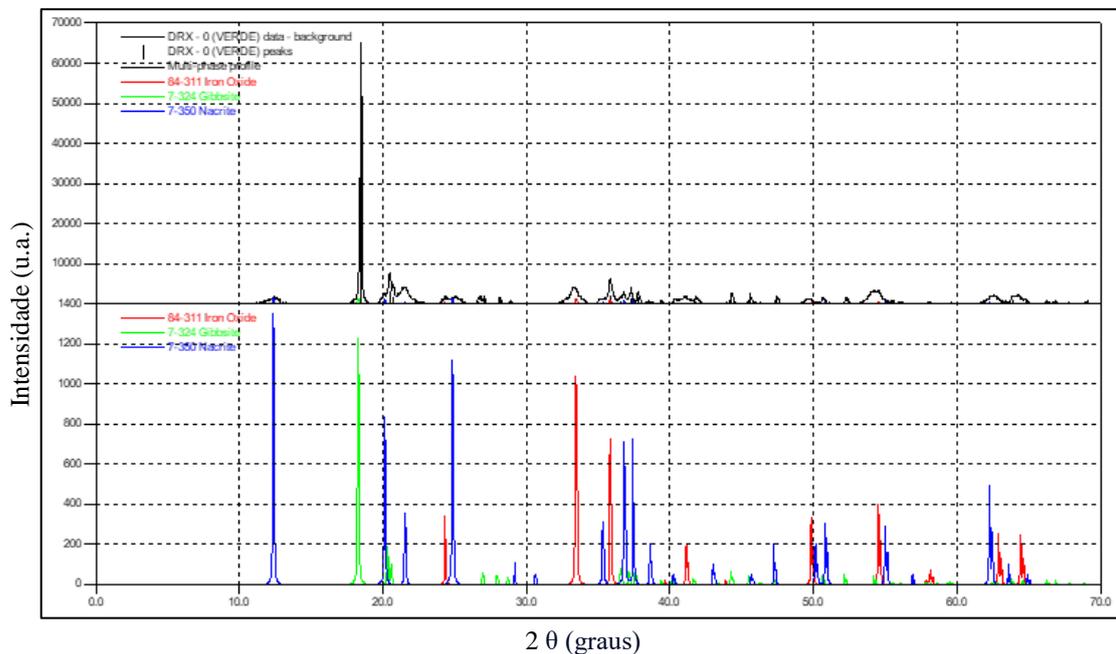
5.4 Difração de raios-X (DRX)

A Figura 38 representa o difratograma da amostra verde, onde podemos observar os padrões de difração característicos de diferentes minerais. Observamos a primeira fase formada pelo óxido de ferro (Fe_2O_3), a segunda fase formada pela gibbsita ($Al(OH)_3$) e a terceira fase formada pela nacrite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), essas fases são características do solo onde foram retiradas as amostras, que podem ser atribuídas ao processo de degradação do solo como resultado do intemperismo ao longo dos anos. Todas essas fases de minerais são encontradas

durante a agregação de microelementos durante a formação estrutural do solo, por um longo período e diferentes situações climáticas.

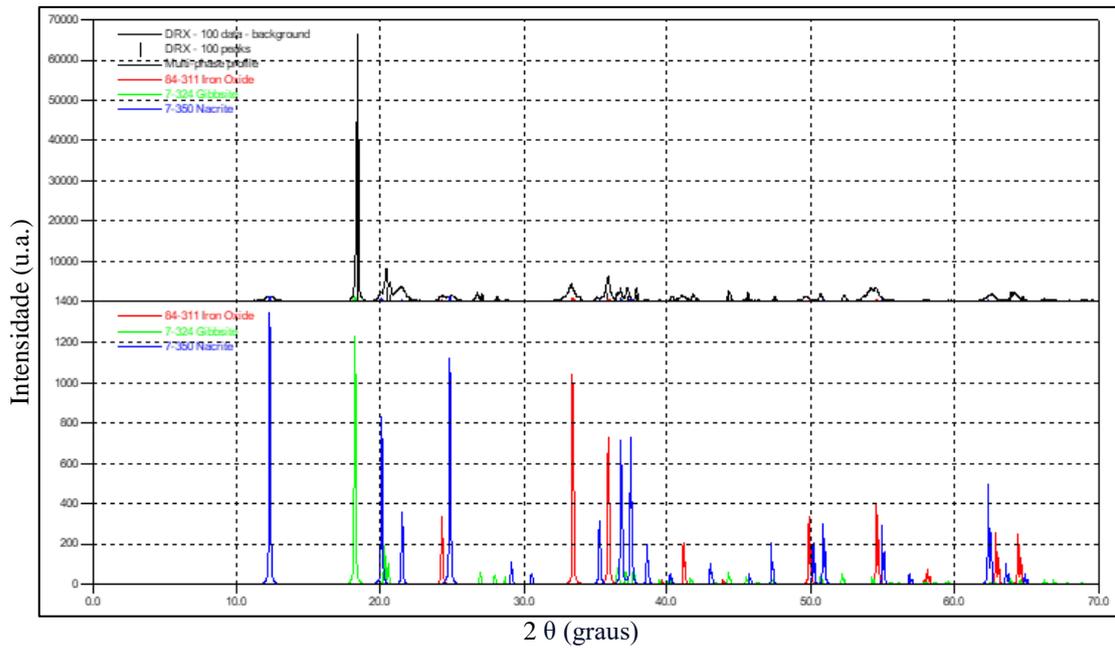
Durante o processo de caracterização térmica, foi observado que as amostras sob temperatura ambiente até o intervalo de temperatura de 200 °C, apresentaram três diferentes tipos de minerais. Sendo o primeiro representado pelo óxido de ferro ($Fe_2 O_3$) conhecido como mineral hematita, considerando sua propriedade alotrópica nesse intervalo de temperatura, o mesmo pode apresentar o fenômeno de polimorfismo, logo quando submetido em baixa temperatura a estrutura cristalina formada é romboédrica na fase alfa; o segundo mineral é a gibbsita ($Al(OH)_3$), predominantemente característica de solos lateríticos, a qual apresenta comportamento alotrópico, a gibbsita é formada por camadas sobrepostas de octaedros ligados por hidróxidos de alumínio, e que nesse intervalo de temperatura forma a estrutura cristalina monoclínica e o terceiro mineral nesse intervalo de temperatura é a nacrite ($Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$), pertencente ao grupo das caulinitas e que também apresenta o comportamento polimórfico, formando a estrutura cristalina monoclínica.

Figura 38 – Difratoograma da amostra verde



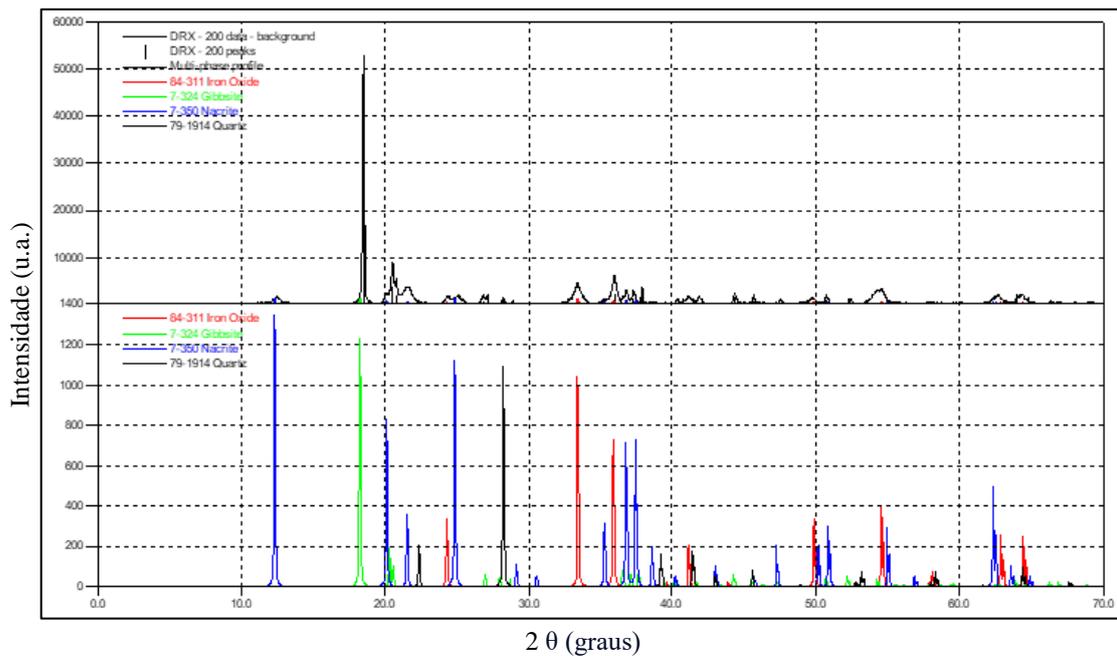
A Figura 39 representa o difratograma da amostra sinterizada a 100 °C. Nesta amostra, assim como na amostra verde, foram identificados o óxido de ferro ($Fe_2 O_3$), a gibbsita ($Al(OH)_3$) e a nacrite ($Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$). Isto significa que não houveram mudanças de fase entre a amostra verde e a amostra sinterizada em 100 °C.

Figura 39 - Difratoograma da amostra sinterizada a 100 °C



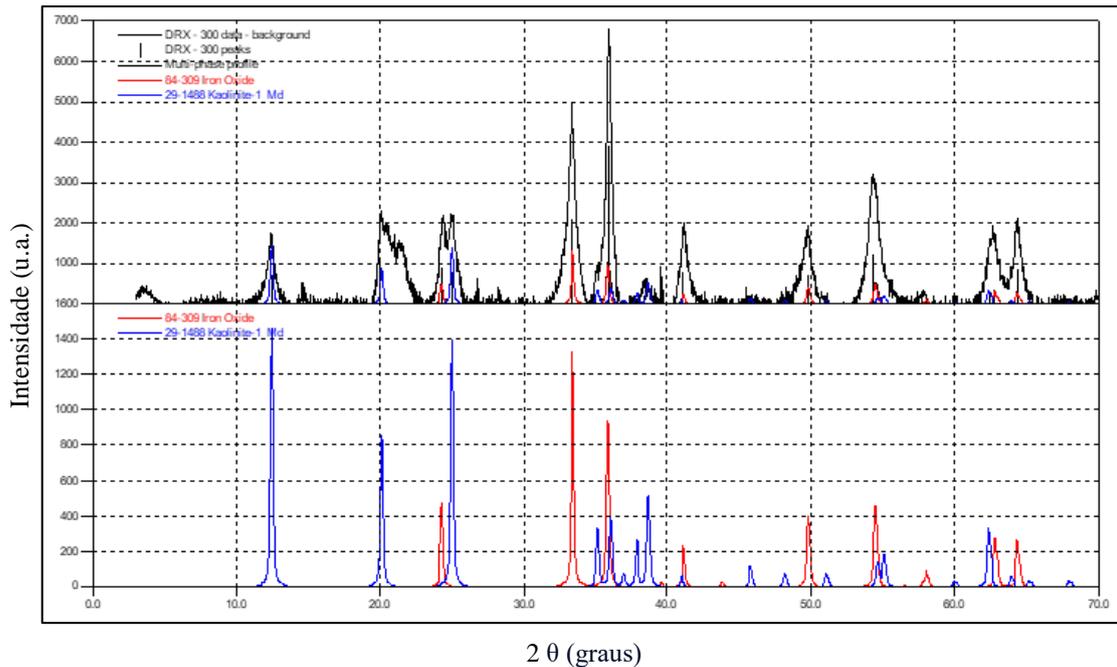
A Figura 40 representa o difratograma da amostra sinterizada a 200 °C. Nesta amostra, assim como na amostra verde e na amostra sinterizada a 200 °C, foram identificados o óxido de ferro (Fe_2O_3), a gibbsita ($Al(OH)_3$) e a nacrite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Porém, diferentemente das outras duas amostras, nesta foi identificado o quartzo (SiO_2).

Figura 40 - Difratoograma da amostra sinterizada a 200 °C



A Figura 41 representa o difratograma da amostra sinterizada a 300 °C. Na amostra de 300 °C foi encontrado óxido de ferro ($Fe_2 O_3$) e a caulinita ($Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$). A caulinita apresenta a mesma composição da nacrite, mas com microestruturas diferentes devido ao deslocamento de suas camadas, sendo que a nacrite apresenta estrutura cristalina monoclínica e a caulinita apresenta estrutura cristalina triclínica.

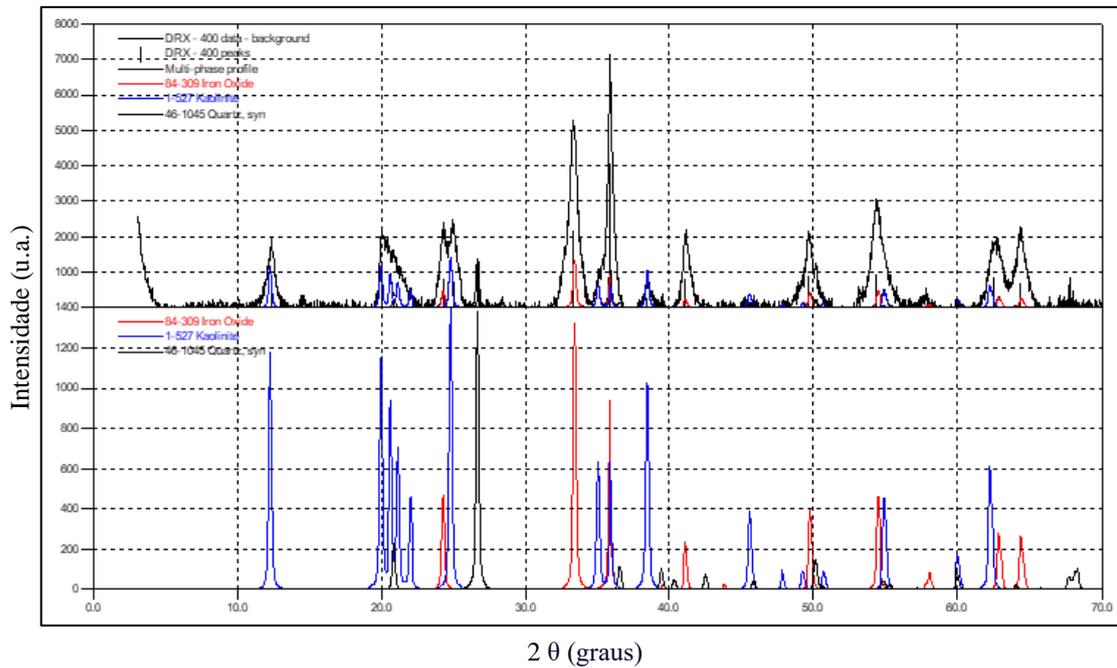
Figura 41 - Difratograma da amostra sinterizada a 300 °C



A Figura 42 representa o difratograma da amostra sinterizada a 400 °C. Na amostra de 400 °C assim como na amostra de 300 °C foi encontrado óxido de ferro ($Fe_2 O_3$) e caulinita ($Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$). Porém, diferentemente da amostra de 300 °C, nesta foi identificado o quartzo ($Si O_2$).

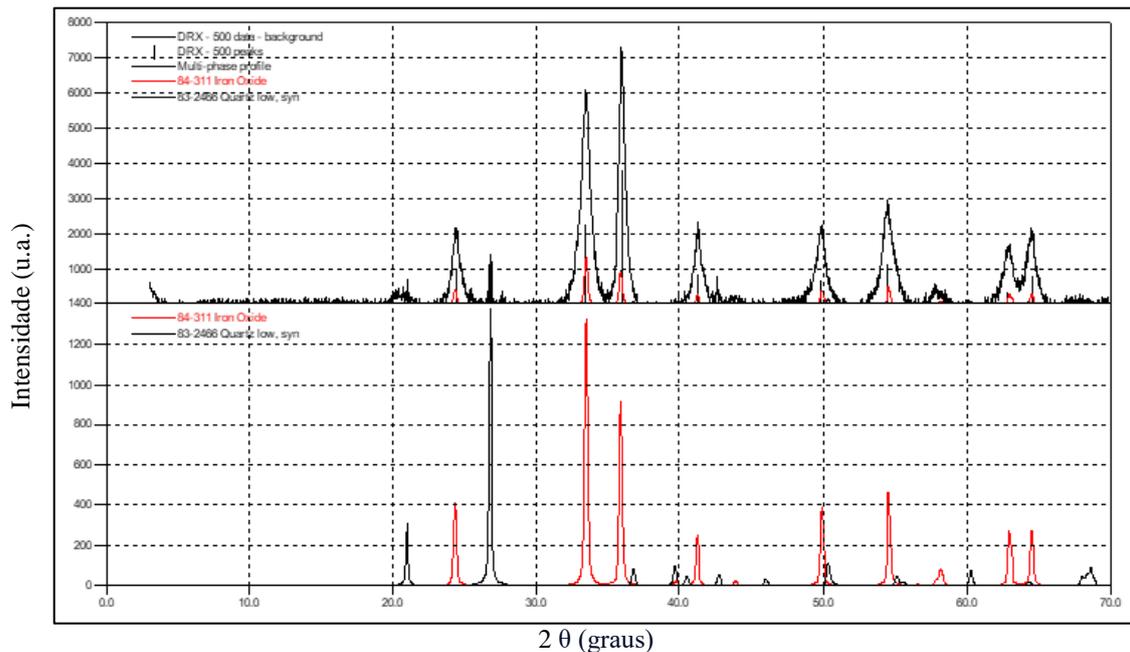
Nos processos de sinterização nas temperaturas de 300 °C e 400 °C, as amostras apresentam o fenômeno de polimorfismo, transformando as duas fases gibbsita e nacrite na fase caulinita ($Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$), devido ao processo endotérmico de absorção de energia durante o aquecimento das amostras, coerente com os resultados de análises térmica. A caulinita é um mineral predominante em solos brasileiros, apresenta alta estabilidade em relação ao intemperismo, apresentando uma estrutura cristalina triclínica; a fase de ($Fe_2 O_3$) mantém a estabilidade térmica nesse intervalo de temperatura.

Figura 42 - Difratograma da amostra sinterizada a 400 °C



A Figura 43 representa o difratograma da amostra sinterizada a 500 °C. Na amostra de 500 °C foi encontrado óxido de ferro (Fe_2O_3) e quartzo baixo (SiO_2). A caulinita não foi identificada na amostra de 500 °C, pois conforme apontado pela análise de termogravimétrica, a desidroxilação da caulinita ocorreu no intervalo entre 400 °C e 500 °C. A caulinita em sua forma cristalina formou a fase metacaulinita não cristalina.

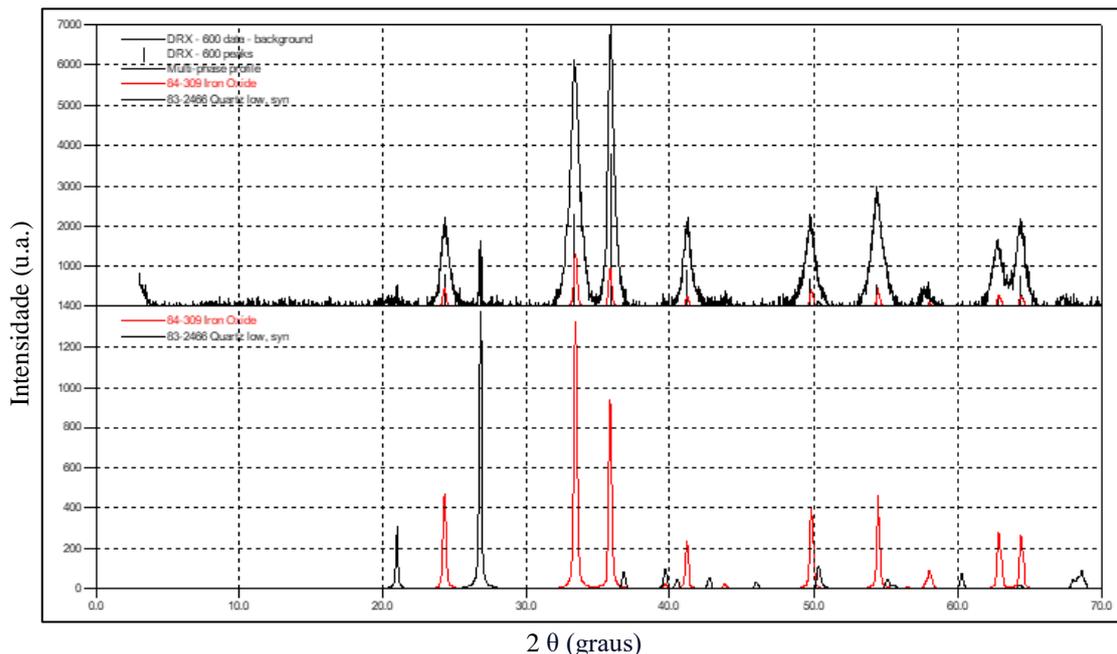
Figura 43 - Difratograma da amostra sinterizada a 500 °C



A Figura 44 representa o difratograma da amostra sinterizada a 600 °C. Na amostra de 600 °C, assim como na amostra de 500 °C foi encontrado óxido de ferro ($Fe_2 O_3$) e o quartzo baixo ($Si O_2$). Isto significa que não houveram mudanças de fase entre a amostra de 500 °C e a amostra sinterizada em 600 °C.

Nos processos de sinterização nas temperaturas de 500 °C e 600 °C, as amostras apresentam o comportamento polimórfico de deslocamento, transformando a caulinita em quartzo ($Si O_2$) que apresenta uma estrutura cristalina hexagonal, composta por estrutura cristalina trigonal com ligações tetraédricas de ($Si O_2$), o quartzo nesse intervalo de temperatura poderá formar a fase quartzo α em torno de 500 °C e a fase de quartzo β próximo de 600 °C; O mineral ($Fe_2 O_3$) mantém sua estabilidade térmica, representando uma fase predominante nas amostras submetidas às diferentes temperaturas de sinterização, o que poderá contribuir com melhores propriedades de resistência mecânica do material em função da temperatura, nas aplicações dos corpos de provas.

Figura 44 - Difratograma da amostra sinterizada a 600 °C



5.5 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O espectro no infravermelho por transformada de Fourier mostrou que as bandas associadas às regiões de 902, 825, 740 e 721 são atribuídas às vibrações da caulinita, gibbsita, gibbsita e quartzo, respectivamente [49, 50]. Estas bandas foram identificadas na amostra sem

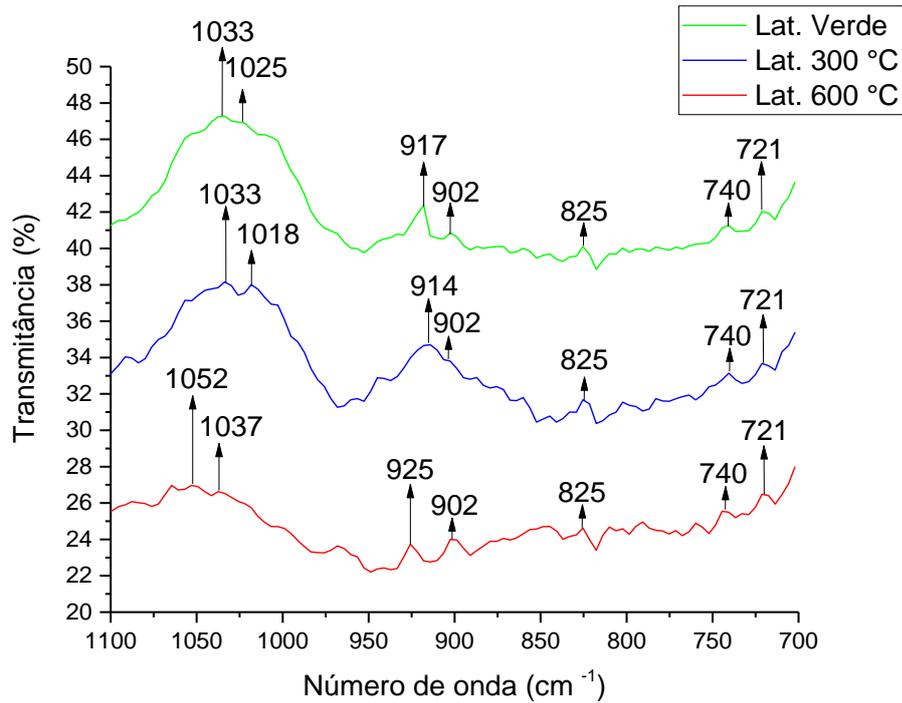
sinterizar e também nas amostras sinterizadas à 300 °C e 600 °C, isto significa que os grupos funcionais dos minerais caulinita, gibbsita e quartzo, se mantiveram estáveis mesmo após os processos de sinterização.

As bandas associadas às regiões de 917, 914 e 925 são atribuídas às vibrações da caulinita [49] e foram identificadas na amostra verde e nas amostras sinterizadas à 300 °C e 600 °C, respectivamente. Observa-se que a banda associada à região de 1033 (cm^{-1}) foi identificada na amostra sem sinterizar e na amostra sinterizada à 300 °C, na amostra sinterizada à 600 houve o deslocamento para comprimento de onda maior, sendo 1037 (cm^{-1}). A banda associada à região 1033 é atribuída à vibração da caulinita [51].

A banda associada à região de 1025 (cm^{-1}) foi identificada na amostra sem sinterizar, no entanto, na amostra sinterizada à 300 houve o deslocamento para comprimento de onda menor, sendo 1018 (cm^{-1}) e na amostra sinterizada à 600 °C não foi identificado nenhum pico correspondente. A banda associada à região de 1052 (cm^{-1}) foi identificada apenas na amostra sinterizada à 600 °C, não foi identificado nenhum pico correspondente nas amostras sem sinterizar ou sinterizada à 300 °C.

De modo geral, os espectros indicam que os grupos funcionais dos minerais identificados no material se mantiveram estáveis mesmo ao submeter a amostra às temperaturas de sinterização de 300 °C e 600 °C. A Figura 45 representa o espectro no infravermelho por transformada de Fourier nas amostras de laterita verde e sinterizadas à 300 °C e 600 °C.

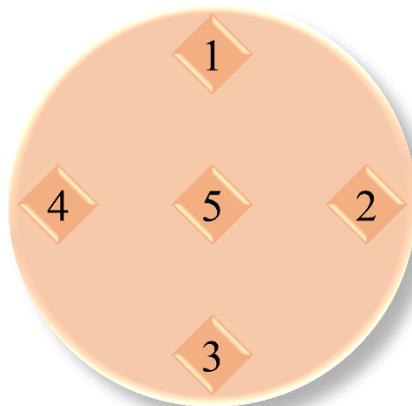
Figura 45 - Espectro no infravermelho por transformada de Fourier nas amostras de laterita verde e sinterizadas à 300 °C e 600 °C



5.6 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado ao aplicar cinco impressões em cada pastilha. O resultado do ensaio de microdureza Vickers foi calculado a partir da média simples do valor das cinco microdurezas apresentadas para cada pastilha de laterita. A Figura 46 é uma representação da localização das diagonais das impressões nas pastilhas.

Figura 46 – Representação da localização das diagonais das impressões nas pastilhas



As medidas de microdureza Vickers foram obtidas para cada uma das 7 amostras, sendo elas, a amostra verde (sem sinterizar) e as amostras sinterizadas em 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, respectivamente.

A amostra verde apresentou o valor médio de 16,68 HV. Este valor corresponde a microdureza da laterita compactada sem sinterizar. Para que uma argila possa apresentar características de cerâmicas, como a dureza e resistência, é necessário que a argila seja submetida ao processo de queima que altera a estrutura molecular e altera as propriedades do material.

A amostra sinterizada a 100 °C apresentou o menor valor médio de dureza Vickers, sendo 16,60 HV que está associado a falta de entalpia de reação, pois a temperatura à qual foi submetida é muito baixa para que seja possível fusão dos elementos químicos presentes.

A amostra sinterizada a 200 °C apresentou o valor médio de 23,12 HV. O aumento do valor médio de microdureza nesta amostra, em comparação com o valor médio de microdureza apresentado na amostra sinterizada a 100 °C pode ser atribuído processo físico de evaporação de água intersticial aumentando a densidade e conseqüentemente, elevando a dureza do material.

A amostra sinterizada a 300 °C apresentou o valor médio de 24,22 HV. Este foi o maior valor de microdureza apresentado. Como visto no DSC, houve um pico endotérmico, característico de transição de fase aos 270 °C, e conforme observado no DRX, na amostra sinterizada a 300 °C, a fase da gibsite e da nacrite se transformaram na fase da caulinita. O aumento da microdureza do material pode estar associado a transição de fase devido as alterações causadas na estrutura cristalina dos minerais presentes.

A amostra sinterizada a 400 °C apresentou o valor médio de 21,78 HV. O valor médio da microdureza desta amostra é inferior ao valor médio da microdureza apresentada na amostra sinterizada a 300 °C. A redução do valor médio de microdureza nesta amostra, pode ser atribuída a decomposição de alguns elementos orgânicos presentes na amostra assim como a degradação de alguns elementos de baixo ponto de fusão.

A amostra sinterizada a 500 °C apresentou o valor médio de 21,98 HV. Este valor é próximo ao valor médio da microdureza da amostra sinterizada a 400 °C. Conforme apresentado no TG, nesta temperatura a amostra começa a apresentar estabilidade térmica.

A amostra sinterizada a 600 °C apresentou o valor médio de 23,38 HV, valor superior ao das amostras sinterizadas em 400 °C e 500 °C, porém ainda inferior ao valor de microdureza

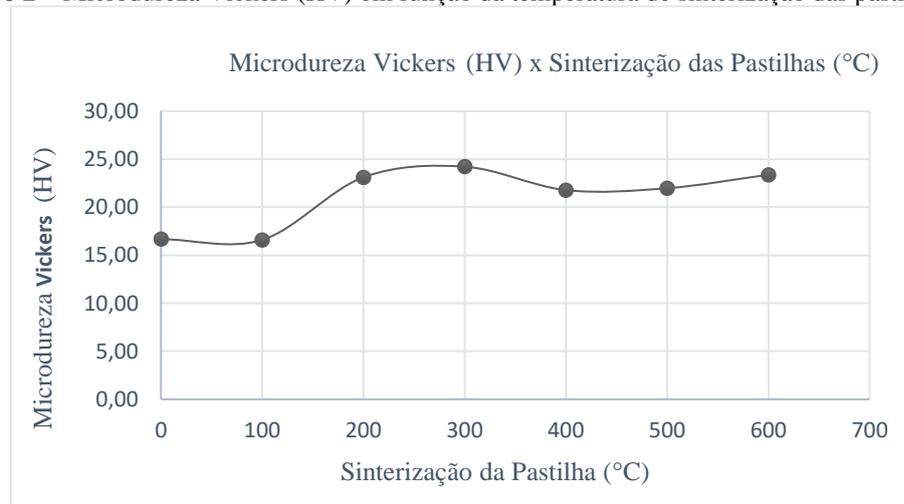
apresentado pela amostra sinterizada à 300 °C. Essa diferença na ordem de 3,4% pode ser atribuída ao comportamento alotrópico da amostra, conforme apresentado nos resultados do DRX em 300 °C, temos a ausência do óxido de silício (SiO_2), e a presença das duas fases, óxido de ferro (FeO_3) e a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), portanto, as diferentes das microdureza são respostas dos comportamentos polimórficos, característicos das mudanças das estruturas cristalinas. A Tabela 8 apresenta o resultado do ensaio de microdureza Vickers.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de microdureza Vickers

Amostra	Temperatura de Sinterização (°C)	Carga Aplicada (N)	Média do valor da dureza Vickers (HV)
Lat. Verde	0	9,807	16,68
Lat. 1	100	9,807	16,60
Lat. 2	200	9,807	23,12
Lat. 3	300	9,807	24,22
Lat. 4	400	9,807	21,78
Lat. 5	500	9,807	21,98
Lat. 6	600	9,807	23,38

O Gráfico 2 apresenta a microdureza Vickers (HV) em função da temperatura de sinterização das pastilhas (°C). No gráfico pode-se observar que o processo de sinterização contribuiu para o aumento da microdureza do material.

Gráfico 2 – Microdureza Vickers (HV) em função da temperatura de sinterização das pastilhas (°C)



5.7 Análise dimensional

Conforme descrito no item 4.3.2, foram confeccionados três grupos de corpos de prova de laterita, sendo um grupo de corpos de prova para o teste de absorção de água e dois grupos para o ensaio de flexão em três pontos. A Figura 47 apresenta uma fotografia dos três grupos de corpos de prova confeccionados, que inclui corpos de prova sem sinterizar e corpos de prova sinterizados nas temperaturas de 100 °C a 600 °C. Observa-se que houve o escurecimento gradativo dos corpos de prova conforme a temperatura de sinterização, que pode ser atribuído ao processo de oxidação. Observa-se também que os corpos de prova apresentaram homogeneidade morfológica e geométrica, característica favorável à aplicação na construção civil.

Figura 47 –Corpos de prova após a sinterização em diferentes temperaturas



A massa e as dimensões dos corpos de prova foram aferidas antes e depois do processo de sinterização. A Tabela 9 apresenta a temperatura de sinterização, massa inicial, massa final, massa específica aparente inicial MEA (1), massa específica aparente final MEA (2) e a perda de massa final para cada corpo de prova sinterizado. Observa-se que o percentual de perda final aumenta conforme a temperatura de sinterização, exceto o corpo de prova sinterizado à 500 °C, que apresentou uma perda de massa final levemente inferior à perda de massa final do corpo de prova sinterizado à 400 °C. Este resultado pode ser explicado por se tratar de um solo complexo

com a presença de diferentes minerais, mesmo que todos os corpos de prova tenham sido confeccionados com a mesma amostra de pó precursora, pode haver variação das concentrações de elementos entre um corpo de prova e outro.

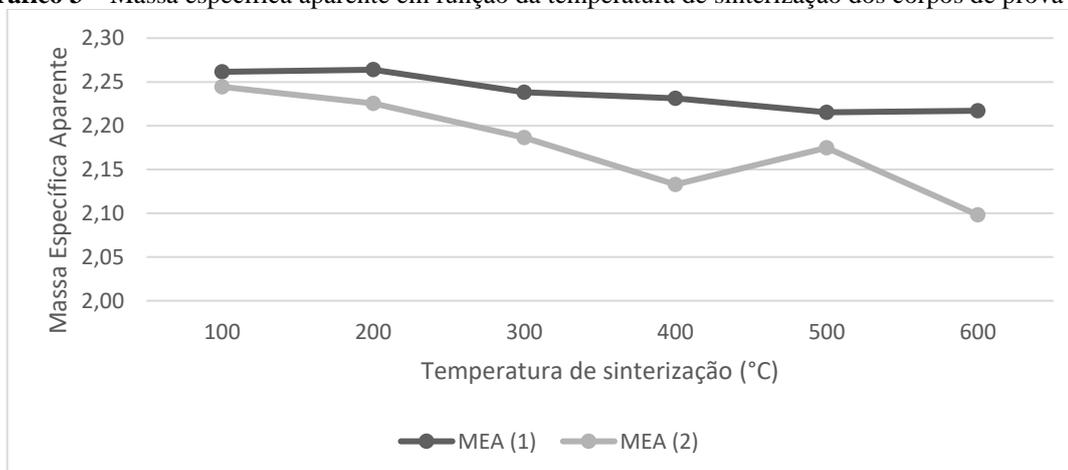
Tabela 9 – Identificação dos corpos de prova, temperatura de sinterização, massa inicial, massa final, massa específica aparente inicial MEA (1), massa específica aparente final MEA (2) e perda de massa final

Corpo de Prova	Temperatura (°C)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	MEA (1)	MEA (2)	PF (%)
CP 01	100	98,74	97,60	2,26	2,24	1,15%
CP 02	200	98,85	97,51	2,26	2,23	1,36%
CP 03	300	99,01	94,21	2,24	2,19	4,85%
CP 04	400	99,96	90,38	2,23	2,13	9,58%
CP 05	500	100,50	91,45	2,22	2,17	9,00%
CP 06	600	100,58	86,16	2,22	2,10	14,34%

O Gráfico 3 apresenta a massa específica aparente em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C), sendo MEA (1) a massa específica dos corpos de prova antes da sinterização e MEA (2) a massa específica dos corpos de prova depois da sinterização. Observa-se que a maior massa específica pertence ao corpo de prova sinterizado a 100 °C e a menor massa específica pertence ao corpo de prova sinterizado a 600 °C.

O crescente percentual de perda de massa em função da temperatura de sinterização está associado ao processo físico de evaporação de água intersticial e também ao processo químico de degradação da matéria, como por exemplo, a decomposição de alguns elementos orgânicos presentes na amostra e também a degradação de alguns elementos de baixo ponto de fusão.

Gráfico 3 – Massa específica aparente em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C)



5.8 Teste de absorção de água

O corpo de prova verde e os corpos de prova sinterizados a 100 °C e 200 °C dissolveram durante o teste de absorção de água. Conforme observado no ensaio de DSC, em 273,3 °C foi identificado um pico característico de transições de fase, que corresponde à transição das fases da gibbsita e da nacrite para formar fase da caulinita. Esta transição de fase foi confirmada pelos resultados de DRX nas amostras correspondentes.

Isto significa que os corpos de prova compostos pelas fases minerais da gibbsita e da nacrite não resistiram ao ensaio de absorção de água. Em contrapartida, nos corpos de prova sinterizados a temperaturas suficientes para a transição das fases da gibbsita e da nacrite para a caulinita, não só resistiram ao teste de absorção de água, como apresentaram índices de absorção compatíveis com as normas vigentes.

A melhoria na propriedade mecânica de resistência a absorção de água dos corpos sinterizados a temperaturas igual ou superior à 300 °C está associado ao fenômeno de polimorfismo entre a nacrite e a caulinita.

Os corpos de prova sinterizados a 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C apresentaram índice de absorção iguais a 12,50%, 15,05%, 14,13% e 19,54%, respectivamente. De acordo com a ABNT NBR 13006/2020 [52], placas cerâmicas com índice de absorção superiores a 10% pertencem ao Grupo III e são consideradas placas de alta absorção de água.

Os índices de absorção dos corpos de prova sinterizados à 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, são considerados bons pois um produto para revestimento cerâmico não deve apresentar índice de absorção abaixo da norma para que haja a adesão necessária ao substrato, o índice de absorção também não deve apresentar valores cima dos estabelecidos na norma, pois tornará o revestimento enfraquecido [53].

Devido à dissolução na água do corpo de prova verde e dos corpos de prova sinterizados à 100 °C e 200 °C, não são recomendados para aplicação na construção civil, pois apresentarão baixa durabilidade.

Os elevados índices de absorção de água dos corpos de prova, mesmo com o aumento da temperatura de sinterização são explicados, pois a temperatura de sinterização não foi suficiente para alcançar a vitrificação dos corpos de prova. A Tabela 10 apresenta o índice de absorção de água para cada corpo de prova.

Tabela 10 – Índice de absorção de água

Teste de Absorção de Água		
Corpo de Prova	Temperatura de sinterização (°C)	A.A. %
CP verde	-	-
CP 01	100	-
CP 02	200	-
CP 03	300	12,50%
CP 04	400	15,05%
CP 05	500	14,13%
CP 06	600	19,54%

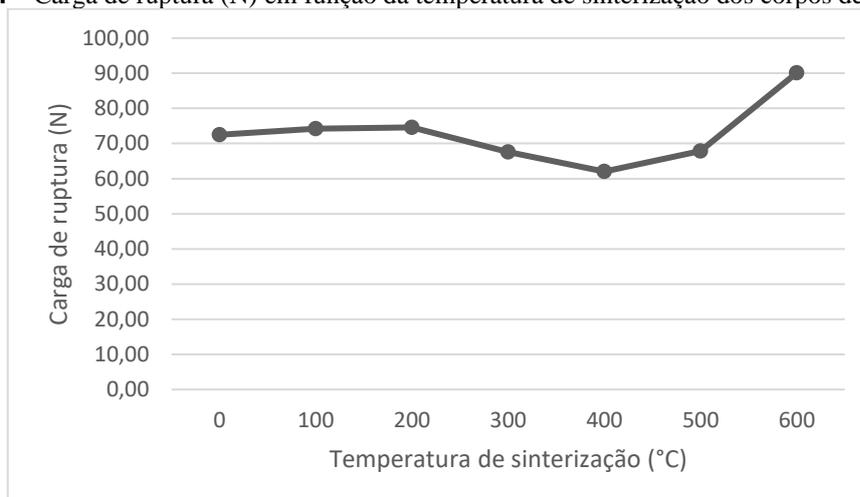
5.9 Teste de flexão em três pontos, determinação da carga de ruptura e do módulo de resistência à flexão

A carga de ruptura foi calculada ao multiplicar a força aplicada para causar a ruptura do corpo de prova pela razão da distância entre os apoios e a largura do corpo de prova. A Tabela 11 apresenta o corpo de prova, temperatura de sinterização (°C), largura do corpo de prova (mm), distância entre os apoios (mm), carga na fratura (N) e carga de ruptura (N).

Tabela 11 – Corpo de prova, temperatura de sinterização (°C), largura do corpo de prova (mm), distância entre os apoios (mm), carga na fratura (N) e carga de ruptura (N)

Corpo de Prova	Temperatura de sinterização (°C)	Largura do CP (mm)	distância entre os apoios (mm)	Carga na fratura (N)	Carga de ruptura (N)
CP verde	-	53,3	79,125	48,86	72,53
CP 01	100	53,1	79,125	49,79	74,19
CP 02	200	53,0	79,125	49,97	74,60
CP 03	300	52,9	79,125	45,17	67,56
CP 04	400	52,8	79,125	41,39	62,03
CP 05	500	52,6	79,125	45,10	67,84
CP 06	600	52,3	79,125	59,56	90,11

O Gráfico 4 apresenta a carga de ruptura em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C). Observa-se que o corpo de prova que foi fraturado com a menor carga foi o corpo de prova sinterizado em 400 °C e o corpo de prova que foi fraturado com a maior carga foi o corpo de prova sinterizado em 600 °C.

Gráfico 4 – Carga de ruptura (N) em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C)

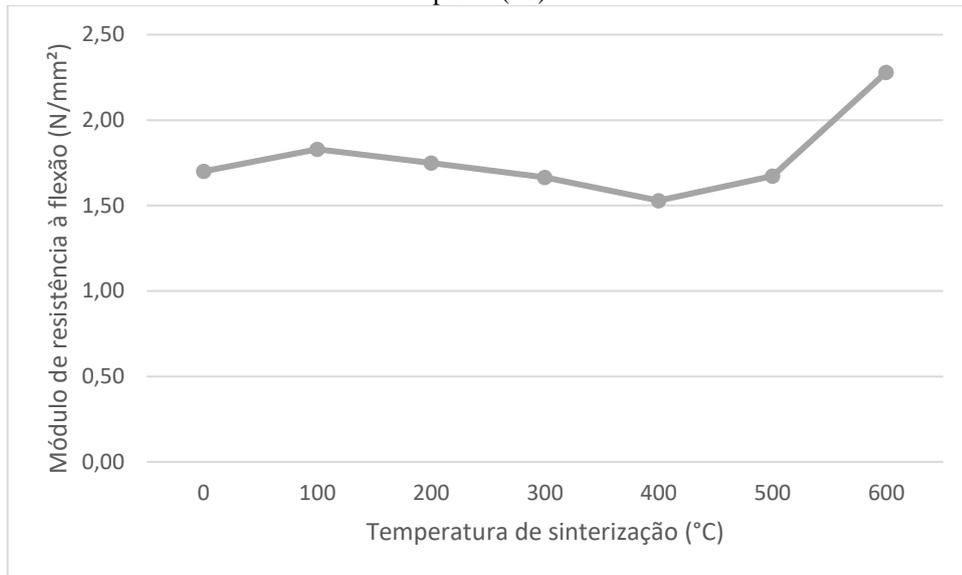
O módulo de resistência à flexão foi calculado ao dividir a carga de ruptura pelo quadrado da espessura mínima ao longo do lado fraturado. A Tabela 12 apresenta o corpo de prova, temperatura de sinterização (°C), altura do corpo de prova (mm), carga de ruptura (N) e o módulo de resistência à flexão (N/mm²).

Tabela 12 – Corpo de prova, temperatura de sinterização (°C), altura do corpo de prova (mm), carga de ruptura (N) e Módulo de resistência à flexão (N/mm²)

Corpo de Prova	Temperatura de sinterização (°C)	Altura do CP (mm)	Carga de ruptura (N)	Módulo de resistência à flexão (N/mm ²)
CP verde	-	8,0	72,53	1,70
CP 01	100	7,8	74,19	1,83
CP 02	200	8,0	74,60	1,75
CP 03	300	7,8	67,56	1,67
CP 04	400	7,8	62,03	1,53
CP 05	500	7,8	67,84	1,67
CP 06	600	7,7	90,11	2,28

O Gráfico 5 apresenta o módulo de resistência à flexão (N/mm²) em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C). Assim como o corpo de prova sinterizado em 400 °C foi fraturado com a menor carga, foi o que apresentou o menor módulo de resistência à flexão (N/mm²). E também, assim como o corpo de prova sinterizado em 600 °C foi fraturado com a maior carga, foi o que apresentou o maior módulo de resistência à flexão (N/mm²).

Gráfico 5 – Módulo de resistência à flexão (N/mm²) em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova (°C)



Os gráficos 4 e 5 apresentaram comportamentos parecidos, que podem ser atribuídos à padronização geométrica dos corpos de prova, conforme observado no item 5.7 da análise dimensional. A variação no comportamento do gráfico de microdureza Vickers em relação aos gráficos de carga de ruptura e módulo de resistência à flexão em função da temperatura de sinterização pode ser atribuído à diferença no gradiente de temperatura em que as pastilhas e os corpos de prova foram submetidos.

Mesmo que as pastilhas e os corpos de prova sejam compostos do mesmo material e que tenham sido sinterizados às mesmas temperaturas, com a mesma rampa de aquecimento e mesmo tempo de permanecimento no patamar, devido às diferenças na geometria da pastilha e do corpo de prova, as reações físico químicas ao processo de sinterização ocorreram de formas diferentes nas pastilhas e nos corpos de prova. Conforme a ABNT NBR 13006/2020 [52], para placas cerâmicas de alta absorção de água, pertencentes ao Grupo III prensadas a seco, não é especificado a carga mínima de ruptura, que a peça deve suportar.

6. CONCLUSÃO

É possível concluir que as placas cerâmicas de laterita sinterizadas nas temperaturas 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C estão de acordo com as normas vigentes de absorção de água, sendo classificadas como placas cerâmicas pertencentes ao Grupo III, de alta absorção de água e prensadas a seco. Desta forma, de acordo com os resultados obtidos as placas cerâmicas de laterita sinterizadas entre 300 °C e 600 °C podem ser aplicadas na construção civil. A sinterização destas placas cerâmicas é fundamental para o aumento da dureza e do módulo de resistência à flexão, sendo que a placa cerâmica sinterizada a 600 °C apresentou o maior módulo de resistência à flexão.

Os objetivos deste trabalho foram atingidos, pois por meio do processamento foi possível obter e sinterizar pastilhas às quais foram submetidas às análises físico-químicas e os resultados destas análises permitiram a realização da caracterização térmica da laterita. Além da caracterização térmica foi possível confeccionar corpos de prova que foram submetidos à análise dimensional, teste de absorção de água e teste de flexão para determinar os parâmetros mecânicos das placas cerâmicas de laterita para aplicação na construção civil.

Os estudos preliminares com o solo de laterita, mostraram diante das análises de caracterização térmica que os resultados do TG e DSC foram importantes para determinar os pré-parâmetros de sinterização das amostras. As análises de MEV e EDS mostraram que o processamento foi bem-sucedido considerando a homogeneidade das amostras e conseqüentemente as concentrações dos elementos presentes nas amostras precursoras. As propriedades alotrópicas das amostras foram coerentes com os fenômenos de polimorfismo ocorrido nas amostras durante os processos de sinterização de acordo com as análises de difração de raios x, onde os espectros mostraram as mudanças de fases e as estruturas cristalinas características de cada fase.

Com a análise dimensional foi observada a homogeneidade morfológica e geométrica dos corpos de prova, característica favorável à aplicação em construções. O teste de absorção de água apresentou índices de absorção dentro das normas para os corpos de prova sinterizados à 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C. Por meio do teste de absorção de água foi possível classificar os corpos de prova como placas cerâmicas pertencentes ao Grupo III, de alta absorção de água e prensadas a seco. O módulo de resistência à flexão dos corpos de prova variou entre 1,67

N/mm² e 2,28 N/mm², sendo que o corpo de prova sinterizado à 600 °C apresentou o maior valor de módulo de resistência à flexão.

Todos os ensaios e testes foram realizados apenas com o pó de laterita, sem a adição de produtos adesivos ou ligantes. Recomenda-se como trabalhos futuros a adição de novos materiais ao pó de laterita para obter produtos de construção civil à base de laterita com melhores propriedades e que atendam às normas vigentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MASUERO, Angela Borges. **Desafio da Construção Civil: crescimento com sustentabilidade ambiental**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, 2022.
2. KAZE, Cyriaque Rodrigues et al. **Caracterização e avaliação de desempenho de ligante geopolimérico à base de laterita curado em diferentes temperaturas**. Construção e Materiais de Construção, v. 270, pág. 121443, 2021.
3. AUGUSTIN, Cristina Rocha; LOPES, Marcel Rocha Soares; SILVA, Saul Moreira. **Lateritas: um conceito ainda em construção**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, n. 3, 2013.
4. AMARAL, Simonne da Costa. **Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimentos de pavimento**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
5. ALBUQUERQUE, Ana Christina Sagebin; SILVA, Aliomar Gabriel da. (Ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 2.
6. GIESE, Ellen Cristine. **Inovações tecnológicas na biomineração de minérios lateríticos de níquel e cobalto**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 16, n. 4, p. 558-566, 2020.
7. MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte et al. **Uso de agregado laterítico na produção do concreto: avaliação da resistência**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 26903-26913, 2021.
8. ABIKO, Alex Kenya; ALMEIDA, Marco Antonio Plácido de; BARREIROS, Mário António Ferreira. **Urbanismo: história e desenvolvimento**. São Paulo: EPUSP, p. 39-40, 1995.
9. GLANCEY, Jonathan. **História da arquitetura**. Edicoes Loyola, 2007.
10. TORRAL, Fernando Pacheco.; JALALI, Said. **Construção Sustentável: o caso dos materiais de construção**. 2007.
11. MOREIRA, Cíntia Mariza do Amaral. **Técnicas de Construção Vernácula**. LOCUS-Revista Interdisciplinar, v. 1, n. 1, 2020.
12. PONTES, Fabio Souza. **A revolução de 1930 e a industrialização na Era Vargas (1930-1939)**. 2015.

13. AMARAL, Fernanda G. et al. **Déficit habitacional: cálculo do coeficiente de concentração relativa para o Brasil entre 2007 a 2012**. Revista Espacios, Caracas, v. 41, n. 10, 2020.
14. STOOPS, Georges. **Laterite as construction material**. Archaeological Soil and Sediment Micromorphology, p. 111-112, 2017.
15. PEREIRA, Adriane Nunes et al. **Caracterização física, química e mineralógica dos solos em uma vertente do Parque Municipal das Mangabeiras-Quadrilátero Ferrífero (MG)**. 2014.
16. SCHELLMANN, W. **An Introduction in Laterite**. 2011. Disponível em <www.laterite.de>. Acesso em 20 de outubro de 2023.
17. ESPINDOLA, Carlos Roberto; DANIEL, Luiz Antonio. **Laterita e solos lateríticos no Brasil**. Boletim Técnico da FATEC-SP, BT/24, p. 21-24, 2008.
18. MOHAMMADREZA, Fatahi; MOHAMMAD, Noaparast; ZIAEDDIN, Shafaei Seyyed. **Extração de níquel de laterita de baixo teor por lixiviação por agitação à pressão atmosférica**. Revista Internacional de Ciência e Tecnologia Mineira, v. 4, pág. 543-548, 2014.
19. BORDA, Joana; TORRES, Robinson. **Efeito de pré-tratamentos para melhorar a lixiviação de níquel de lateritas em meio carboxílico: mecanismo e modelo cinético**. Jornal Sul-Africano de Engenharia Química, v. 21-12, 2023.
20. KUMAR, G. Santha et al. **Characterization of laterite soil and its use in construction applications: A review**. Resources, Conservation & Recycling Advances, p. 200120, 2022.
21. ABHILASH, HN et al. **Propriedades físicas, mecânicas e higrotérmicas de pedras de construção lateríticas (LBS) de Burkina Faso**. Construção e Materiais de Construção, v. 125, pág. 731-741, 2016.
22. NASCIMENTO, Louise Neves; GIESE, Ellen Cristine; SANTANA, Ana Carolina de Oliveira. **Seleção de uma cepa de penicillium simplicissimum para a biolixiviação de níquel e cobalto de lateritas brasileiras**. 2021.
23. MARTINEZ, Gioconda Santos et al. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. 2003.
24. AUGUSTIN, C. H. R. R.; DRUMOND, G. M. **Caracterização morfológica e física das lateritas da borda leste do Cráton São Francisco**. Sociedade & Natureza, [S. l.], v. 8, n. 15, 2021. DOI: 10.14393/SN-v8-1996-61809. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/61809>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

25. OSUJI, O. S. et al. **Physico-Chemical Properties of Lateritic Soils in Ado-Ekiti, South Western Nigeria**. Universal Journal of Environmental Research and Technology, v. 7, n. 1, p. 10-18, 2018.
26. LEMOUGNA, Patrick N. et al. **Produtos estabilizados à base de laterita para aplicações em construções sustentáveis em países tropicais: revisão e perspectivas para o caso dos Camarões**. Sustentabilidade, v. 3, n. 1, pág. 293-305, 2011.
27. REDDY, DV et al. **Uso de Laterita como material de construção sustentável em países em desenvolvimento**. Internacional J. Ciência da Terra. Eng., v. 4, pág. 1251-1258, 2014.
28. CAMPOS, N. Q.; TAPAJÓS, N. S. **Caracterização tecnológica e mineralógica da matéria-prima utilizada na fabricação de blocos cerâmicos**. Laboratório de Beneficiamento de Minérios, 2012.
29. OBIANYO, Ifeyinwa Ijeoma. **Caracterização e Estabilização de Laterita para Aplicações em Construção Sustentável**. Tese de Doutorado, 2017.
30. AGBEDE, Isaac Olufemi; MANASSEH, J. O. E. L. **Use of cement-sand admixture in laterite brick production for low cost housing**. Leonardo electronic journal of practices and technologies, v. 12, n. 1, p. 163-174, 2008.
31. CRUZ, Gabryelle Keith Avelino et al. **Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas**. 2018.
32. MARTO, Aminaton; LATIFI, Nima; EISAZADEH, Amin. **Effect of non-traditional additives on engineering and microstructural characteristics of laterite soil**. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 39, p. 6949-6958, 2014.
33. PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de engenharia**. São Paulo: Hemus, p. 349, 1997.
34. CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais**. 2016.
35. ZOLIN, Ivan. **Materiais de construção mecânica**. 2016.
36. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10545-1/2017: **Placas Cerâmicas. Parte 1: Amostragem e critérios para aceitação**. Rio de Janeiro, 2012.
37. ASKELAND, Donald R; FULAY, Pradeep P; BHATTACHARYA, D. K. **Ciência e engenharia dos materiais**. 2. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 1 recurso online. ISBN 9788522118014.
38. POURMADADI, Mehrab et al. **Role of iron oxide (Fe₂O₃) nanocomposites in advanced biomedical applications: a state-of-the-art review**. Nanomaterials, v. 12, n. 21, p. 3873, 2022.
39. WYCKOFF, R. W. G. **American Mineralogist Crystal Structure Database**. 1963.

40. CRESSER, Malcolm; KILLHAM, Ken; EDWARDS, Tony. **Química do solo e suas aplicações**. Imprensa da Universidade de Cambridge, 1993.
41. SAMPAIO, Elsa. **Mineralogia do solo**. 2011.
42. FERREIRA, Fabiana Souza. **Análise da influência das propriedades físicas do solo na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP)**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2013.
43. BORTOLUZZI, Edson Campanhola; PERNES, Miguel; TESSIER, Daniel. **Interestratificado caulinita-esmectita em um Argissolo desenvolvido a partir de rocha sedimentar do Sul do Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 1291-1300, 2007.
44. BLEICHER, Lucas; SASAKI, José Marcos. **Introdução à difração de raios-x em cristais**. Universidade Federal do Ceará, p. 1-20, 2000.
45. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8492/2012: **Tijolo de solo – cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
46. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10545-4/2020: **Placas cerâmicas Parte 4: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão**. Rio de Janeiro, 2020.
47. GARDOLINSKI, José Eduardo; MARTINS FILHO, Harley Paiva; WYPYCH, Fernando. **Comportamento térmico da caulinita hidratada**. Química Nova, v. 26, p. 30-35, 2003.
48. ALVES, Marcelo Eduardo; MASCARENHAS, Yvonne Primerano; VAZ, Carlos Manoel Pedro. **Comparação de procedimentos de quantificação de caulinita e gibbsita na fração argila desferrificada de Latossolos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 569-577, 2008.
49. MUKHERJEE, B. K. **Infrared Investigations of Laterite Profiles in Shevaroy and Kolli Hills, Salem District, Tamil Nadu**. Geological Society of India, v. 25, n. 9, p. 611-613, 1984.
50. DAS, Bhumika; KHAN, M. W. Y. **Petrographical and mineralogical characteristics of bauxite deposit of Darai-Daldali Plateau, Kabirdham district, Chhattisgarh**. Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol., v. 4, p. 1367-1374, 2018.
51. MURUGESAN, S. **Identification of minor minerals in river sediments through ftir study—a new approach**. Pollut. Res., v. 39, n. 1, p. 156-160, 2020.
52. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13006/2020: **Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação**. Rio de Janeiro, 2020.

53. SOUZA, Armando C., PEREIRA, Mayara F., MOSSIN, Luiz C. **Thermal and mechanical characterization of blindex glass powder residue® for the production of ecological coating.** journal of materials research and technology 2021 ; 1 2 : 1 7 9 4 e 1 8 0 3.