

SÍNTESE DE ZEÓLITA TIPO NaA A PARTIR DE CINZAS LEVES DE CARVÃO MINERAL EMPREGANDO ALUMINATO DE SÓDIO E RESÍDUO DE ALUMÍNIO.

Andriele da Silva Rodrigues¹

Thiago Fernandes de Aquino²

Resumo: O carvão mineral é hoje o maior produtor de energia termoelétrica e sua combustão gera grandes quantidades de cinzas. A busca por soluções sustentáveis torna persistente o estudo de novas aplicações a este resíduo. As zeólitas são aluminossilicatos de estrutura porosa que podem ser aplicadas na produção de catalisadores, no tratamento de água e na captura de CO₂. A indústria de alumínio, gera aproximadamente uma tonelada de resíduo de alumínio para cada tonelada de material anodizado produzido. O resíduo de anodização de alumínio apresenta grande potencial como uma fonte complementar de alumínio para a síntese de zeólitas NaA. Neste trabalho foram sintetizadas zeólitas do tipo NaA em diferentes relações SiO₂/Al₂O₃ e Na₂O/SiO₂ a partir de cinzas leves de carvão mineral pelo método de fusão alcalina seguido de reação hidrotermal aplicando aluminato de sódio e resíduo de alumínio. O produto sintetizado foi caracterizado quando a composição química – FRX e mineralógica – DRX, que apontaram a formação de zeólitas tipo A para todas as sínteses com aluminato de sódio. As sínteses AFF1035, AFF1535 e AFF2035 apresentaram os melhores resultados em termos de definição de picos pelo DRX e portanto, foram reproduzidas substituindo o aluminato de sódio por resíduo de alumínio bruto e resíduo de alumínio calcinado, submetidos a tratamento com NaOH. As zeólitas sintetizadas com resíduo de alumínio bruto AFFRT1035 e AFFRT1535 apresentaram resultados tão satisfatórios quanto as melhores sínteses de referência, com aluminato de sódio. Os resultados quanto a mineralogia dos produtos das sínteses empregando resíduo calcinado indicaram baixa formação de zeólitas tipo A. Analisou-se a estrutura de poros – BET e capacidade de adsorção de CO₂ – TGA das melhores zeólitas sintetizadas, que apresentaram área superficial e diâmetro de poros típicos de zeólitas A e capacidade de CO₂ similares a zeólita NaA comercial.

Palavras-chave: Zeólitas. Resíduo de Alumínio. Cinza Leves. Adsorção de CO₂.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Mundial do Carvão, 37% da energia elétrica mundial é proveniente da queima do carvão mineral. A Agência Internacional de Energia (AIE) prevê que em 2040, o carvão continuará sendo o maior produtor de energia elétrica, sendo responsável por 22% da geração mundial (WCA, 2023).

¹ Graduando em Engenharia Química, 2023. E-mail: Andriele.rodrig@gmail.com

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: thiago.aquino@satc.edu.br



Diante do cenário atual de pós pandemia da COVID-19 e de guerra entre Rússia e Ucrânia, para garantir o fornecimento de energia, a Europa e a União Europeia retomaram as atividades de algumas usinas a carvão que estavam fechadas. A Índia e a China, países citados entre os maiores consumidores de carvão mineral para produção de energia, atingiram novos recordes de consumo deste combustível em 2022 (LILIENKAMP; ZINKE; ALVAREZ, 2022).

Apesar de ser uma fonte segura para a geração de energia, a utilização do carvão está associada a produção de cinzas em grandes quantidades. O armazenamento e descarte de cinzas requer um rigoroso gerenciamento, devido ao seu impacto no meio ambiente, podendo contaminar o solo, a água e ar. Atualmente as cinzas leves vêm sendo bem empregadas no setor de construção civil. No entanto, diante da busca atual por propostas sustentáveis, é pertinente a valorização deste resíduo por meio de novas aplicações (GOLLAKOTA et all, 2019).

As zeólitas são aluminossilicatos considerados como materiais porosos que apresentam consideráveis aplicações na indústria como na produção de catalisadores, no tratamento de água e na captura de CO₂. Na literatura encontram-se diferentes métodos para sintetizar zeólitas, sendo o de fusão seguido de reação hidrotermal um método eficiente para obter zeólitas de boa qualidade. O uso de cinzas leves como fonte de silício e alumínio seguido da adição de aluminato de sódio como fonte complementar de alumínio é uma rota de síntese de zeólitas bastante estabelecida (AQUINO,2018; IZIDORO,2013)

A indústria de alumínio encontra-se em forte crescimento. Segundo o Instituto Internacional de Alumínio, em 2022 foram produzidas 68.461 mil toneladas de alumínio primário, proveniente da extração da bauxita, em todo o mundo. A contar a produção secundária, que consiste na reciclagem da sucata de alumínio, que corresponde a 1/3 deste valor. De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (2005) pode-se considerar que para cada tonelada de material anodizado produzido, gera-se uma tonelada de resíduo de alumínio (IAI, 2023; MYMRIN et al., 2019).

O acúmulo deste resíduo representa um desperdício de recursos naturais. Devido a sua alcalinidade, o resíduo de anodização de alumínio é considerado prejudicial ao meio ambiente. Com o crescimento da indústria de alumínio no mundo, é importante que novas aplicações para este resíduo sejam consideradas. O resíduo de alumínio pode ser uma fonte complementar de alumínio para síntese de zeólitas,



porém pouco se tem explorado, especialmente na síntese de zeólitas NaA (AQUINO,2018; ROZHKOVSAYA et al., 2021; WU et al., 2022).

Deste modo, o objetivo deste estudo é sintetizar zeólitas do tipo NaA pelo método de fusão seguido de reação hidrotermal, a partir de cinzas leves de carvão mineral empregando aluminato de sódio bem como a sua substituição por resíduo de alumínio bruto e resíduo de alumínio calcinado, para comparação. Desta forma, serão determinadas as melhores relações de síntese $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$. As zeólitas sintetizadas serão caracterizadas quanto à composição química, mineralógica, estruturas de poros e em relação a sua capacidade de adsorção de CO_2 .

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção abordará os conceitos fundamentais para a compreensão deste trabalho, e a revisão da literatura que o embasará.

2.1 CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é um material rochoso sedimentar heterogêneo, composto por materiais orgânicos, predominantemente formado por carbono, hidrogênio e oxigênio, além de enxofre e nitrogênio. Seu conteúdo inorgânico é constituído por diversas substâncias responsáveis pela formação de cinzas, que variam em concentração. Sua formação ocorre pelo acúmulo de vegetações ao longo do tempo que sofrem transformações químicas e físicas, como decomposição e compactação, formando camadas rochosas. Os diferentes tipos de carvão se formam devido aos diversos tipos de vegetais que os originaram, o mesmo ocorre com impurezas presentes, que determinam a qualidade do carvão (MILLER, 2004).

2.1.1 Carvão e Energia

Em escala global, as usinas termelétricas são, em sua maioria, movidas a carvão. Elas geram eletricidade e calor através da combustão do carvão, resultando em subprodutos como cinzas leves, cinzas pesadas, escória e gesso de dessulfuração. Os percentuais desses subprodutos variam dependendo da qualidade do carvão (TIRUTA-BARNA; BARNA, 2012; JAHANGIRI et al., 2023).



A produção de energia na China é responsável por um terço do consumo de carvão no mundo. Outros países como Índia, Estados Unidos e Japão também estão na lista de maiores consumidores (LILIENKAMP; ZINKE; ALVAREZ, 2022; KAR, 2021).

O Brasil, no ano de 2021, produziu internamente 714,144 TJ de energia a partir do carvão mineral, de acordo com o relatório do Ministério de Minas e Energia. A combustão deste mineral, principalmente nas usinas termoeletricas localizadas no sul do país tem produzido grandes quantidades de cinzas leves e pesadas. Apenas o Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda gerou no ano de 2019 mais de 300 mil toneladas de cinzas leves (MME, 2022; VIOLA, 2022).

2.1.2 Cinzas Leves

As cinzas leves constituem-se um material particulado muito fino formado por minerais, sendo este coletado a partir de sistemas de tratamento dos gases de combustão. As cinzas leves são classificadas quimicamente em classe F e classe C, a primeira apresenta maior teor de silício e alumínio e baixo teor de CaO, já a segunda é caracterizada por um teor de CaO maior que 20%, que configura propriedades pozolânicas a cinza. Outros elementos como magnésio, óxidos de ferro, arsênio, metais pesados, compostos orgânicos não queimados e dioxinas estão presentes em alguma proporção nas cinzas leves (TIRUTA-BARNA; BARNA, 2012; CAHOON, 2015).

No Brasil, devido a utilização de carvão mineral de baixo poder calorífico, são geradas grandes quantidades de cinzas. O Complexo Termoeletrico Jorge Lacerda, uma das maiores termoeletricas do país, gera 40% em peso de cinzas no processo de combustão do carvão, sendo 80% cinzas leves. Estas cinzas leves são destinadas à indústria do cimento (OLIVEIRA, 2013).

2.2 ANODIZAÇÃO DO ALUMÍNIO

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre e é largamente utilizado em diversos segmentos, como na construção civil, na produção de eletroeletrônicos, no transporte e em aplicações aeroespaciais. A anodização é o tratamento realizado na produção do alumínio para conferir proteção superficial ao material, dureza e resistência a corrosão por meio de um processo eletrolítico de



oxidação. A anodização do alumínio gera uma quantidade de efluentes líquidos ácidos e básicos. A neutralização deste efluente forma o resíduo de anodização de alumínio que contém elementos potencialmente valiosos (VILLARREAL et al., 2021).

Alguns resíduos gerados na produção de alumínio primário, como a lama vermelha e a escórias já vêm sendo reutilizados, principalmente na construção civil e rodoviária. A aplicação do resíduo de anodização de alumínio ainda é pouco explorada. Este resíduo é rico em alumínio, podendo ser empregado como matéria-prima na produção de outros produtos. Algumas aplicações já estão sendo atribuídas ao resíduo de alumínio como adsorventes e coagulantes, pigmentos e na produção de materiais refratários (JAYASHREE; STRAFFELINI, 2022).

2.3 ZEÓLITAS

As zeólitas foram identificadas por Axel Cronsted em 1756, durante seus estudos de mineralogia. O nome é composto pelos termos *zeo* e *lithos*, do grego, pedra que ferve. A estrutura da zeólita é uma rede cristalina tridimensional composta de tetraedros do tipo TO_4 , na qual o oxigênio é responsável pela união dos vértices e T é sobretudo átomos de silício e alumínio. A geometria $[AlO_4]^{-1}$ de carga negativa demandando íons de compensação como Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , H_2O ou sais que se encontram em canais e cavidades interseccionados pela estrutura (LUZ, 1995).

A existência destes espaços intracristalinos ocasiona à estrutura da zeólita uma grande área superficial interna em relação a sua área externa. Essa característica possibilita a transferência de matéria pelos canais estruturais da zeólita, de acordo com o seu diâmetro. Cada zeólita apresenta um diâmetro de poros diferente (RIGO; PERGHER, 2008).

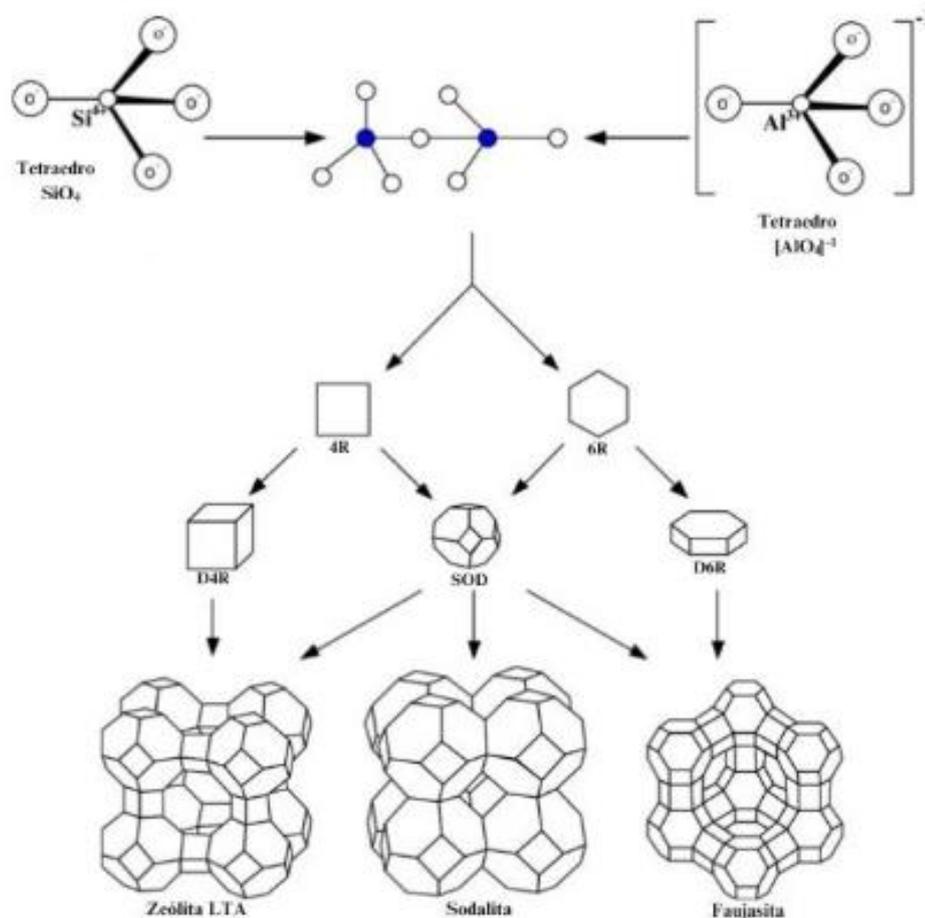
As zeólitas naturais são formadas pela ação da água em materiais vulcânicos sob a condição de temperatura e pressão elevadas ao longo de milhares de anos. As zeólitas começaram a ser sintetizadas industrialmente na década de 1950, por Milton e Breck na Union Carbide. As zeólitas mais utilizadas industrialmente são as dos tipos LTA, X e Y, com destaque para a LTA (KOOHSARYAN et al., 2020) (CRUZ, 2020).

A fórmula química por cela unitária das zeólitas é descrita pela Equação 1 em que M representa o cátion de valência n; m é o número de moléculas de água; e $x + y$ é o número de tetraedros (TO_4) por cela unitária (BRECK, 1974).



A Figura 1 apresenta as unidades de construção básicas e secundárias das zeólitas e suas possíveis combinações.

Figura 1: Estruturas de Zeólitas.



Fonte: Adaptada de Masoudian *et al.* (2013).

2.3.2 Zeólita A

A zeólita A ou LTA (*Linde Type A*) é formada por poliedros cúbico simples com união de dois anéis de quatro tetraedros e estrutura de D4R (α) e por uma cavidade sodalita (β). A Tabela 1 apresenta algumas características da zeólita A sódica (AQUINO, 2018).

Tabela 1: Características da Zeólita A sódica.

Composição Química		
Fórmula	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$	
Cela unitária	$\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$	
Variações	Si/Al: 0,7 a 1,2 ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$: 1 a 2,5 Na/Si: 0,4 a 2 ou $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$: 0,8 a 3	
Propriedades Estruturais		
Aberturas	Hidratada	α : 4,2 Å e β : 2,2 Å
	Desidratada	4,2 Å

Fonte: Adaptado de Aquino (2018).

2.3.3 Aplicações

A utilização de materiais zeolíticos na indústria é bastante ampla, processos de refino, petroquímicos e de química fina utilizam catalisadores à base de zeólitas. A capacidade catalítica da zeólita se dá por sua disponibilidade de superfície de contato, tamanho de poros e seletividade. A capacidade de adsorção e a ocorrência de centros ácidos fazem com que as zeólitas sejam utilizadas também como trocadores iônicos, peneiras moleculares e adsorventes (RIGO; PERGHER, 2008).

A utilização comercial mais conhecida das zeólitas do tipo A é na indústria de detergentes, por sua eficiência no sequestro de magnésio, um dos elementos responsáveis pela dureza da água. Esta aplicação foi iniciada por Henkel, em 1974, que substituiu fosfatos por zeólitas A na formulação de detergentes (KOOHSARYAN *et al.*, 2020).

As zeólitas podem ser também empregadas na captura de CO_2 de gases de combustão. A zeólita A apresenta alta seletividade ao CO_2 , isso faz com que as moléculas de CO_2 fiquem retidas em sua estrutura, separando-as do N_2 presente no gás de combustão. A capacidade de adsorção de CO_2 é atribuída pela força básica do cátion de compensação que é inversamente proporcional a razão Si/Al da zeólita. A zeólita NaA pertence ao grupo de zeólitas de baixa relação Si/Al e portanto apresenta maior basicidade, conferindo-a boa capacidade de captura de CO_2 , assim como as zeólitas NaX e NaY (INDIRA; ABHITHA, 2022).

2.4 SÍNTESE DE ZEÓLITAS

As cinzas leves de carvão mineral apresentam em sua composição alto teor de óxidos de silício e alumínio. Possui propriedades favoráveis à construção de canais e preenchimento de estruturas, além de elevado conteúdo de fases reativas. Estes aspectos, aliado a alta disponibilidade do material torna oportuno o uso das cinzas leves para a síntese de zeólitas (AQUINO, 2018).

Dentre os diferentes métodos de conversão de cinzas de carvão mineral em zeólitas propostos na literatura, encontra-se o método de fusão seguida de reação hidrotermal. Neste método a cinza é fundida com uma fonte alcalina, comumente hidróxido de sódio, na finalidade de decompor suas fases cristalinas de silício e alumínio e formar silicatos e aluminatos de sódio altamente reativos. Os produtos obtidos na fusão, são solubilizados em meio aquoso onde na presença de temperatura reagem e formam zeólitas. Diferentes tipos de zeólitas podem ser obtidas por este método, a depender dos parâmetros de ativação empregados na etapa de reação hidrotermal (IZIDORO, 2013).

A relação Si/Al é um fator determinante ao tipo de zeólita a ser sintetizada. O aluminato de sódio é comumente utilizado como fonte de alumínio para o ajuste desta relação, além de dispor de sódio em sua fórmula, favorecendo a sua solubilidade. Todavia, seu alto valor comercial pode tornar seu uso insustentável. Por outro lado, o resíduo de anodização de alumínio é um material abundante e sua concentração elevada de alumínio o qualifica como uma alternativa como fonte do elemento para a síntese de zeólitas (AQUINO, 2018).

O tempo de envelhecimento da solução antes da reação é apontada em diversos estudos para que haja uma breve formação de núcleos, que serão ativados com temperatura, na etapa de reação. A temperatura da reação deve ser mantida abaixo de 100 °C, para evitar a evaporação da água durante o processo de síntese (GONTHIER; THOMPSON, 1994; BRECK, 1974).

O tratamento químico do resíduo de alumínio com hidróxido de sódio é empregado para melhorar suas propriedades. Neste processo ocorre a formação de aluminato de sódio, o qual fornecerá íons de alumínio à reação de síntese. O resíduo de alumínio bruto tende a apresentar alto teor de perda ao fogo devido a presença de impurezas e hidróxido de alumínio, $\text{Al}(\text{OH})_3$. A calcinação do resíduo de alumínio bruto pode ser aplicada a fim de remover certas impurezas e decompor o hidróxido de



alumínio em óxido de alumínio. No entanto, o emprego da calcinação acarreta custos ao processo de síntese da zeólita. Deste modo, sua necessidade deve ser avaliada (GOULART, 2021; AQUINO, 2018; COSTA, 2013).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção abordará o procedimento experimental a ser seguido para a síntese e caracterização das zeólitas a partir de cinzas leves de carvão mineral empregando aluminado de sódio e resíduo de alumínio. Todo o experimento foi realizado nos laboratórios do Centro Tecnológico da SATC (CT-SATC). As matérias-primas a serem utilizadas foram cedidas pelo Núcleo de Energia e Síntese de Produtos do CT-SATC.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A cinza leve e os resíduos de alumínio bruto e calcinado foram caracterizados quanto as suas composições mineralógicas através da técnica de difração de raios X (DRX), executada em um equipamento modelo LabX XRD-6100 da marca Shimadzu, empregando o *software* Match!3. Do mesmo modo, as composições químicas dos materiais foram identificadas através da técnica de fluorescência de raios X (FRX) realizada em um equipamento modelo EDX 7000 da marca Shimadzu, utilizando o *software* PCEDX – Pro. Ambas as análises realizadas pela equipe técnica do CT-SATC. A caracterização química e mineralógica dos materiais permitirá quantificar as concentrações dos elementos desejados (silício, alumínio e sódio) e identificar as suas fases cristalinas possibilitando o conhecimento de suas propriedades e o cálculo da massa necessária de cada material de acordo com relações de síntese pré-estabelecidas.

3.2 SÍNTESE

A primeira etapa consistiu na realização de sínteses de zeólitas NaA aplicando cinzas leves e aluminato de sódio empregando as relações molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ apresentadas na Tabela 1, resultando em nove ensaios.

A identificação dos ensaios é realizada pelas sigla AFF: zeólita do tipo **A**, sintetizada pelo método de Fusão a partir de *Fly ash* (cinzas leves). Os dois primeiros números indicam a relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e os seguintes a relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$. Ambos multiplicados por 10 para remoção da casa decimal.

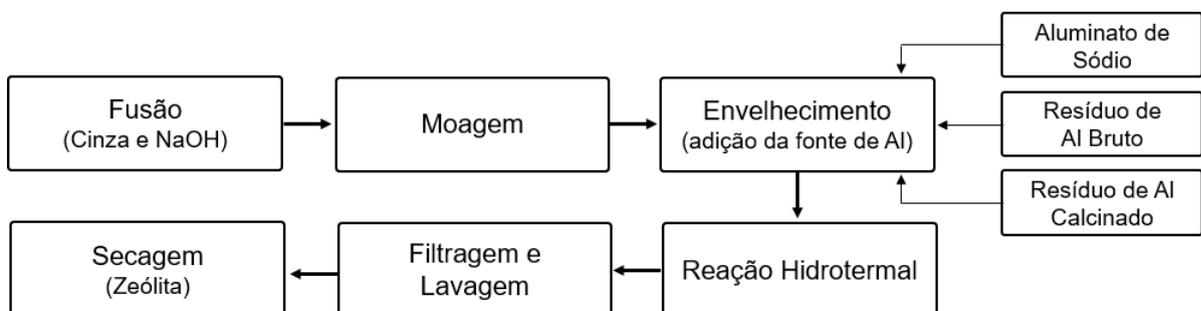
Tabela 2: Planejamento da etapa 1.

Ensaio	Identificação	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$
1	AFF1025	1,0	2,5
2	AFF1030	1,0	3,0
3	AFF1035	1,0	3,5
4	AFF1525	1,5	2,5
5	AFF1530	1,5	3,0
6	AFF1535	1,5	3,5
7	AFF2025	2,0	2,5
8	AFF2030	2,0	3,0
9	AFF2035	2,0	3,5

Fonte: Do autor (2023).

A segunda etapa trata da identificação das melhores relações empregadas nas sínteses, sendo realizada a comparação dos produtos quanto a composição mineralógica (difração de raios x) e química (fluorescência de raios X). Desta forma, os ensaios selecionados foram reproduzidos substituindo a fonte complementar de alumínio por resíduo de alumínio bruto e resíduo de alumínio calcinado, ambos sob tratamento. O fluxograma da Figura 2 apresenta as principais etapas da síntese.

Figura 2: Fluxograma de síntese.



Fonte: Do autor (2023).



A etapa de fusão foi realizada conforme estudos de Aquino (2018), empregando uma relação cinza/NaOH de 1,2. As quantidades de cinzas leves foram calculadas de acordo com a relações molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de cada síntese juntamente com a fonte de alumínio.

A cinza seca e o NaOH moído, marca Sodabel 99, pureza de 96-98%, foram misturados em um cadinho e fundidos a seco em uma mufla por 1 h a 550 °C. O material fundido foi resfriado em temperatura ambiente e moído com o auxílio de almofariz e pistilo. Em seguida o material empregado como fonte complementar de alumínio foi diluído na água junto ao material fundido, em um béquer sob agitação magnética, onde o hidrogel formado permaneceu em agitação constante por um tempo padrão de 16 h em temperatura ambiente. Conforme Breck (1974) a quantidade de água foi determinada para obter uma relação $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 80$.

Após o envelhecimento, a solução foi transferida para um reator de teflon de 0,5 L. O reator foi colocado em uma estufa, onde a reação ocorreu em condições de temperatura e tempo padrão de 90 a 95 °C por 6 h. A temperatura do meio reacional foi aferida por um termopar acoplado ao reator e lida pelo software Logchart.

Ao final da reação hidrotérmica, a solução foi filtrada a vácuo utilizando papel filtro faixa branca e lavada com água até atingir $\text{pH} \leq 10$, conforme João et al. (2018). O material filtrado foi seco em estufa a 100°C por cerca de 12 h. Após a secagem, foi realizada a desagregação do material com o auxílio de almofariz e pistilo.

3.3.1 Fonte de Alumínio

Na primeira sequência de testes utilizou-se o aluminato de sódio, NaAlO_2 , sólido, marca Sigma-Aldrich, pureza de 55% como fonte complementar de alumínio. Na segunda etapa foram reproduzidas as sínteses com as melhores relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ identificadas, substituindo a fonte de alumínio por resíduo de alumínio tratado e da mesma forma por resíduo de alumínio tratado e calcinado. O resíduo foi calcinado a 550 °C por 1 h e o seu tratamento foi realizado com hidróxido de sódio, em meio aquoso, considerando uma relação mássica $\text{NaOH}/\text{Resíduo} = 0,72$ e o volume de água de aproximadamente 10 vezes maior que a do volume sólido, a 90 °C, sob agitação por cerca de 30 min, conforme Aquino (2018). As quantidades



dos materiais utilizados nas respectivas sínteses foram calculadas de acordo as relações estabelecidas.

3.4 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISES DAS ZEÓLITAS SINTETIZADAS

A composição mineralógica e química das zeólitas sintetizadas foram identificadas através das técnicas de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). Para determinar a área superficial BET (Brunauer-Emmelt-Teller), volume de poros e diâmetro de poros das zeólitas sintetizadas, foi utilizado o técnica de adsorção de nitrogênio (N₂) no equipamento QUADRASORB evo.

A determinação da capacidade de adsorção de CO₂ das zeólitas foi realizada por meio da análise termogravimétrica (TGA) utilizando um equipamento modelo Discovery SDT 650, da marca TA Instruments, analisadas em atmosfera seca de N₂ com 7% de CO₂ a fim de simular a composição de gases de exaustão de combustão de carvão mineral. Conforme Viola (2022) as amostras foram pré-tratadas em atmosfera de N₂, vazão de 100 mL/min, a 105 °C por 2 h. Em seguida, foi realizada a substituição da atmosfera de N₂ por uma mistura de 7% CO₂/N₂, vazão de 100 ml/min, durante 3 h a 30°C, para a adsorção de CO₂. Por fim, retornou-se à atmosfera de N₂, vazão de 100 ml/min, por 1 h para a dessorção de CO₂ por oscilação de temperatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Conforme a Tabela 3, a alta concentração de óxido de silício presente na análise química das cinzas leves, bem como a presença de óxido de alumínio indicam que ela pode ser utilizada como fonte destes elementos para a síntese de zeólita.

O resíduo de alumínio, o qual apresenta alta concentração de óxido de alumínio, deve fornecer este elemento à síntese a fim de ajustar as relações SiO₂/Al₂O₃ necessárias para a produção de zeólita tipo A.

O resíduo de alumínio bruto apresenta um maior teor de perda ao fogo, devido às impurezas presentes evaporadas pela calcinação e a desidroxilação do

hidróxido de alumínio, $\text{Al}(\text{OH})_3$, ao formar óxido de alumínio, Al_2O_3 , de acordo com a literatura, ocasionando a perda de massa. Em seguida, a análise química do resíduo de alumínio calcinado apresenta teor ainda maior de alumínio disponível em forma de óxido (SARTOR, 2009).

Tabela 3: Composição química em base de óxido das matérias-primas.

Compostos	Cinzas Leves de Carvão Mineral	Resíduo de Alumínio Bruto	Resíduo de Alumínio Calcinado
SiO_2	59,77	4,21	6,13
Al_2O_3	24,24	53,03	77,28
Fe_2O_3	6,62	0,70	1,01
K_2O	3,88	<0,001	<0,001
CaO	1,74	2,78	4,05
TiO_2	1,43	0,05	0,07
MgO	0,61	2,61	3,81
SO_3	0,19	3,68	5,36
ZrO_2	0,08	0,03	0,04
MnO	0,05	0,06	0,08
ZnO	0,04	0,08	0,12
Perda ao Fogo	1,26	31,39	-

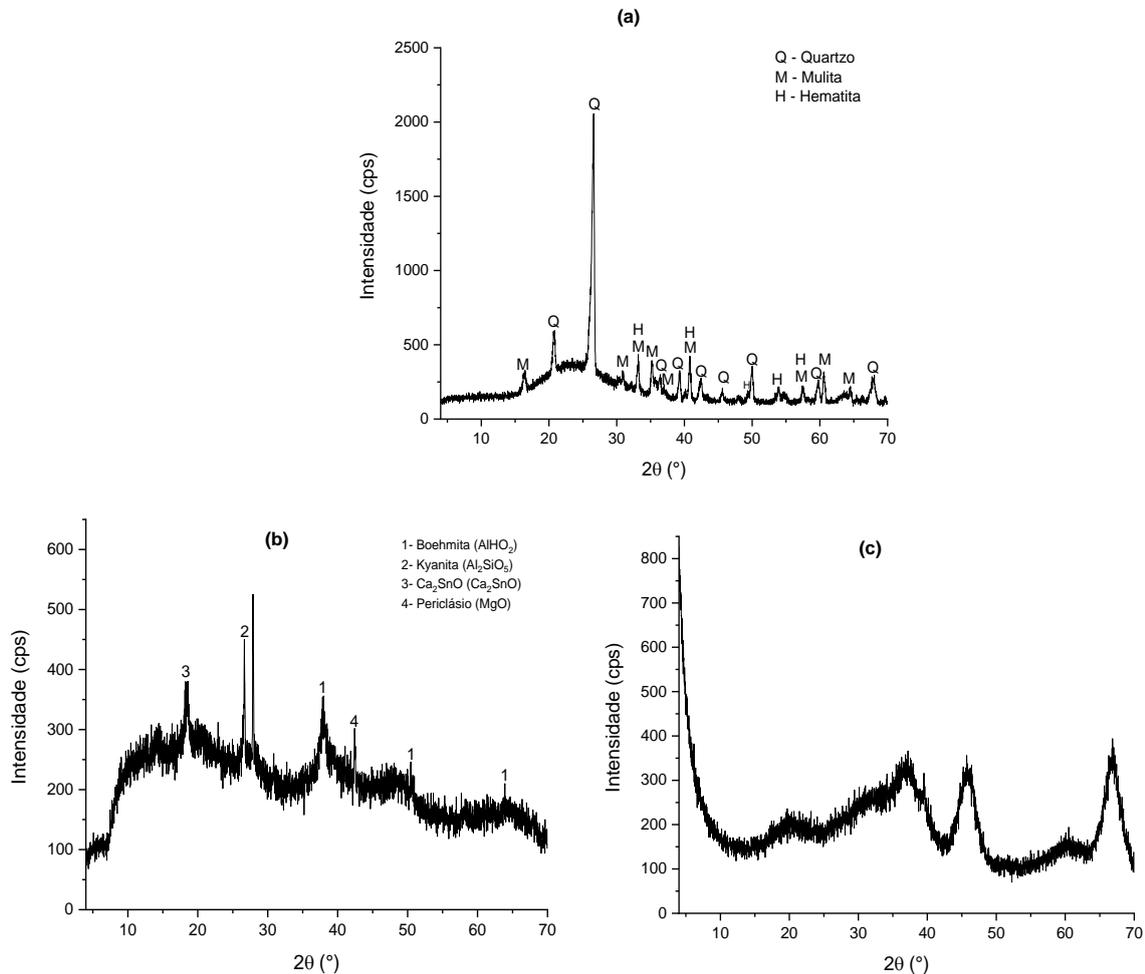
Fonte: Do autor (2023).

Conforme pode ser observado nos difratogramas da Figura 3, os materiais apresentam elevado grau de conteúdo amorfo, conferindo maior reatividade, o que contribui para a síntese de zeólitas.

O difratograma da cinza leve apresenta fases de quartzo, material presente no próprio carvão, de alta estabilidade cristalina, portanto resiste ao processo de combustão e as fases secundárias mulita e hematita, resultantes das reações de queima do carvão. Estas fases devem ser desestabilizadas no processo de fusão na presença de NaOH .

O lodo bruto apresenta alumínio na forma de hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$ representada pela fase cristalina Boehmita e outras fases cristalinas que são desestruturadas pela calcinação. Em seguida o difratograma do resíduo calcinado apresenta um background característico de estruturas amorfas (BAGATINI et al., 2007; CRUZ, 2020).

Figura 3: Difratoograma de Raio X das matérias-primas: (a) cinza leve de carvão mineral, (b) resíduo de alumínio bruto e (c) resíduo de alumínio calcinado.



Fonte: Do autor (2023).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ZEÓLITAS DA ETAPA 1

Conforme as análises químicas da Tabela 4, todas as sínteses obtiveram a relação silício-alumínio correspondente a zeólitas NaA ao apresentarem um teor médio de 34,6% de SiO₂ e 27,07% de Al₂O₃, estabelecendo uma relação SiO₂/Al₂O₃ média de 2,18. A literatura determina a faixa desta relação de 1 a 2,5. Os valores de perda ao fogo também são típicos de zeólitas bem estruturadas (AQUINO, 2018).

Tabela 4: Composição química em base de óxido das sínteses com NaAlO₂.

%	AFF1025	AFF1030	AFF1035	AFF1525	AFF1530	AFF1535	AFF2025	AFF2030	AFF2035
SiO ₂	32,872	36,609	36,078	36,939	36,589	33,183	33,178	32,893	33,049
Al ₂ O ₃	27,010	29,011	28,656	28,059	28,380	26,864	24,198	24,037	27,156
Na ₂ O	15,105	7,161	7,246	7,035	7,407	12,826	15,193	14,395	11,883
Fe ₂ O ₃	2,564	3,132	3,230	3,492	3,412	2,972	2,983	3,318	2,929
CaO	1,172	1,368	1,385	1,505	1,374	1,246	1,394	1,434	1,211
K ₂ O	0,854	0,778	0,644	0,952	0,846	0,468	0,937	0,684	0,628
TiO ₂	0,692	0,788	0,817	0,913	0,579	0,718	0,810	0,845	0,737
MgO	0,288	0,292	0,275	0,281	0,243	0,154	0,425	0,430	0,215
SO ₃	0,048	0,071	0,016	0,074	0,077	0,057	0,051	0,052	0,010
ZrO ₂	0,042	0,046	0,050	0,055	0,055	0,042	0,055	0,052	0,044
MnO	0,027	0,031	0,031	0,034	0,031	0,028	0,029	0,031	0,027
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	0,037	0,025
ZnO	0,021	0,019	0,019	0,023	0,020	0,015	0,021	0,021	0,016
Perda ao Fogo	19,292	20,680	21,537	20,622	20,972	21,415	20,699	21,741	22,046
SiO₂/Al₂O₃*	2,07	2,14	2,14	2,23	2,19	2,10	2,33	2,32	2,07

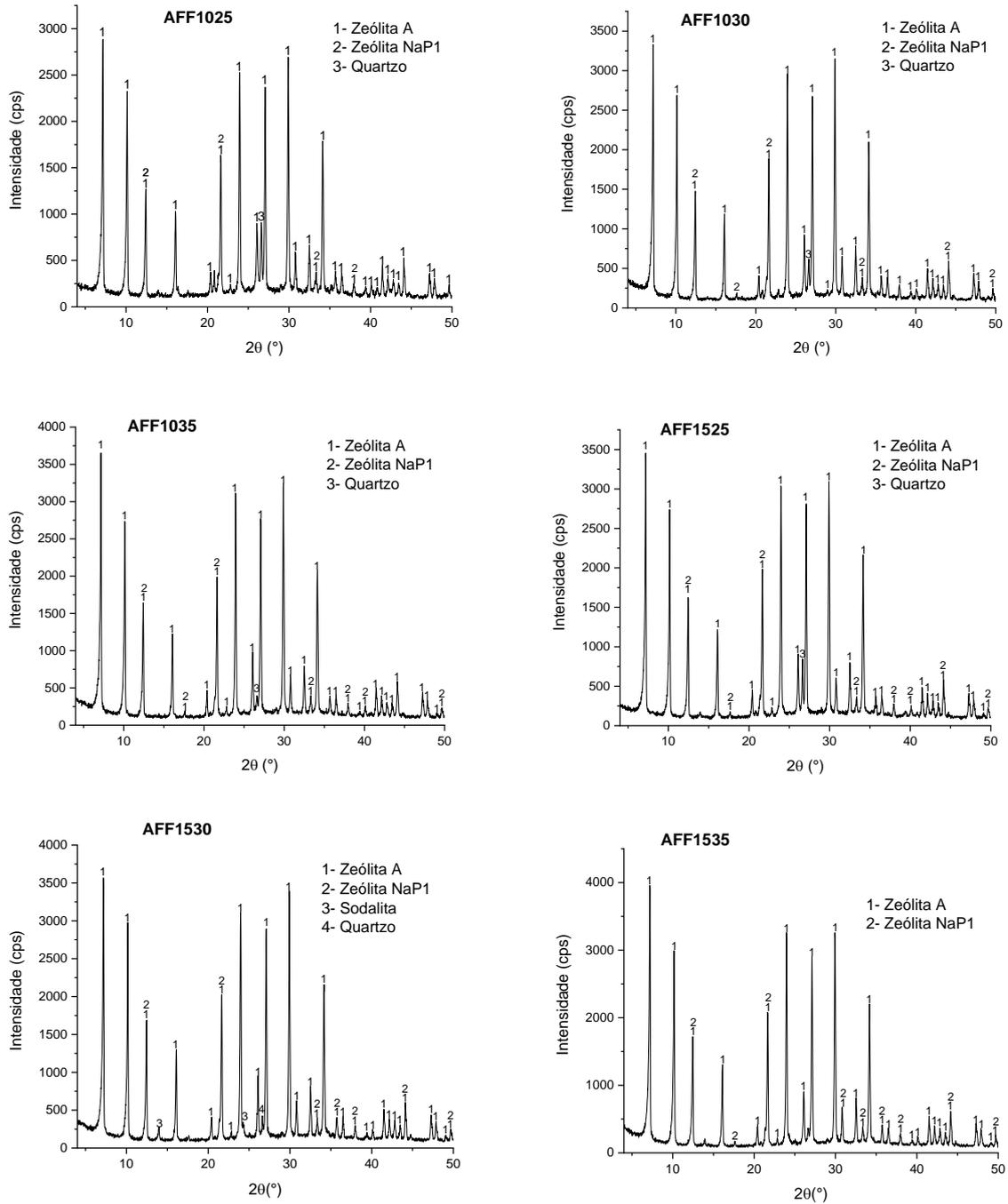
* mol/mol

Fonte: Do autor (2023).

Os difratogramas das Figuras 4 e 5, comprovam a formação de zeólitas tipo A a partir da utilização de aluminato de sódio, com impurezas como quartzo ainda remanescente das cinzas e zeólitas do tipo NaP1. Os baixos backgrounds presentes dos difratogramas salientam a boa formação dos produtos. Destaque as amostras com relação SiO₂/Al₂O₃ igual a 1,5 e relação Na₂O/SiO₂ igual a 3,0 e 3,5.

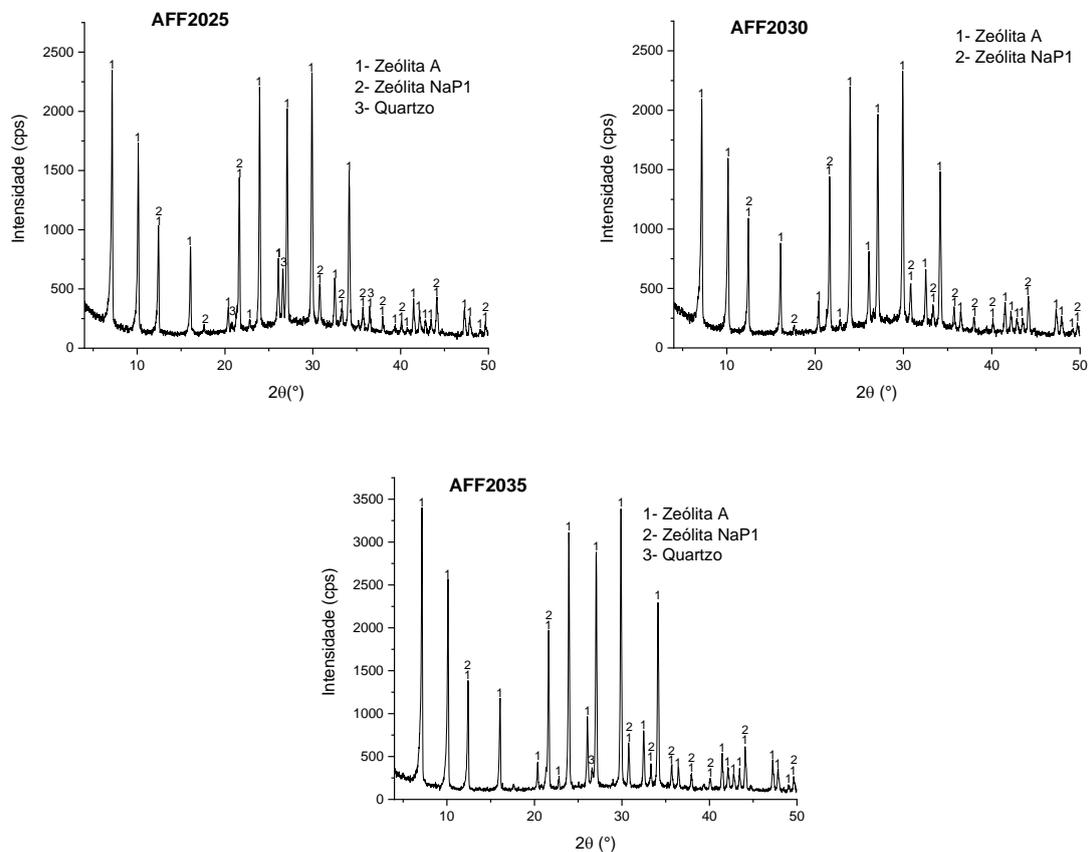
As análises apresentaram também fases de quartzo, proveniente do carvão o qual pode ser totalmente ou parcialmente removido pelo processo de fusão alcalina, e zeólita Na-P1, material microporoso com diâmetros de poros menores que a zeólita tipo A, um subproduto já reconhecido neste tipo de síntese pela dissociação e recristalização de núcleos da zeólita A que formam fases de maior estabilidade como a zeólita Na-P1 (AQUINO, 2018; FLORIANO, 2014).

Figura 4: Difratoograma de Raio X das sínteses da etapa 1.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 5: Difratograma de Raio X das sínteses da etapa 1 – continuação.



Fonte: Do autor (2023).

Identificadas as sínteses AFF1035, AFF1535 e AFF2035 com picos de maiores intensidades e background reduzidos, estas devem ser reproduzidas na Etapa 2. Sendo dentre elas, a AFF1535 a síntese de melhor resultado.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ZEÓLITAS DA ETAPA 2

As sínteses reproduzidas substituindo o aluminato de sódio por resíduo de alumínio bruto seguido de tratamento químico receberam em sua denominação a adição das letras RT: **R**esíduo de alumínio **T**radado, deste modo foram denominadas AFFRT1035, AFFRT1535 e AFFRT2035. Enquanto as que empregam resíduo de alumínio calcinado seguido de tratamento químico receberam as letras RTC: **R**esíduo de alumínio **T**ratado e **C**alcinado, as identificações AFFRTC1035, AFFRTC1535 e AFFRTC2035.

Conforme a Tabela 5, as sínteses empregando resíduo tratado, AFFRT1035, AFFRT1535 e AFFRT2035, apresentaram relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ típicas de zeólita tipo A. Os difratogramas da Figura 6 mostram a formação de zeólita A para as três sínteses com resíduo de alumínio bruto tratado, que apresentaram picos ligeiramente menores que as sínteses utilizando aluminado de sódio comercial. As sínteses também apresentaram fases de quartzo e zeólita Na-P1 como as sínteses da primeira etapa. No entanto, as sínteses AFFRT1035 e AFFRT1535 formaram picos de maiores intensidades, confirmando a melhor formação de zeólita A destas em relação a AFFRT2035 (AQUINO,2018).

Tabela 5: Composição química em base de óxido das sínteses com resíduo de Al.

%	AFFRT 1035	AFFRT 1535	AFFRT 2035	AFFRTC 1035	AFFRTC 1535	AFFRTC 2035
SiO_2	33,779	36,799	37,787	36,708	35,271	32,055
Al_2O_3	27,192	27,116	25,531	31,000	27,645	29,491
Na_2O	12,030	6,757	8,128	8,948	15,684	14,964
Fe_2O_3	3,209	4,250	4,483	3,132	2,953	3,360
CaO	1,471	1,739	1,603	1,288	1,184	1,326
K_2O	0,838	0,777	1,009	0,762	0,660	0,747
TiO_2	0,746	0,923	0,944	0,669	0,654	0,762
SO_3	0,019	-	0,069	0,706	1,062	0,448
ZrO_2	0,044	0,055	0,057	0,040	0,038	0,045
MnO	0,030	0,039	0,036	-	-	-
ZnO	0,015	0,020	0,021	0,013	0,012	0,020
Perda ao Fogo	20,599	21,496	20,307	16,612	14,763	16,711
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ *	2,11	2,30	2,51	2,01	2,17	1,84

* mol/mol

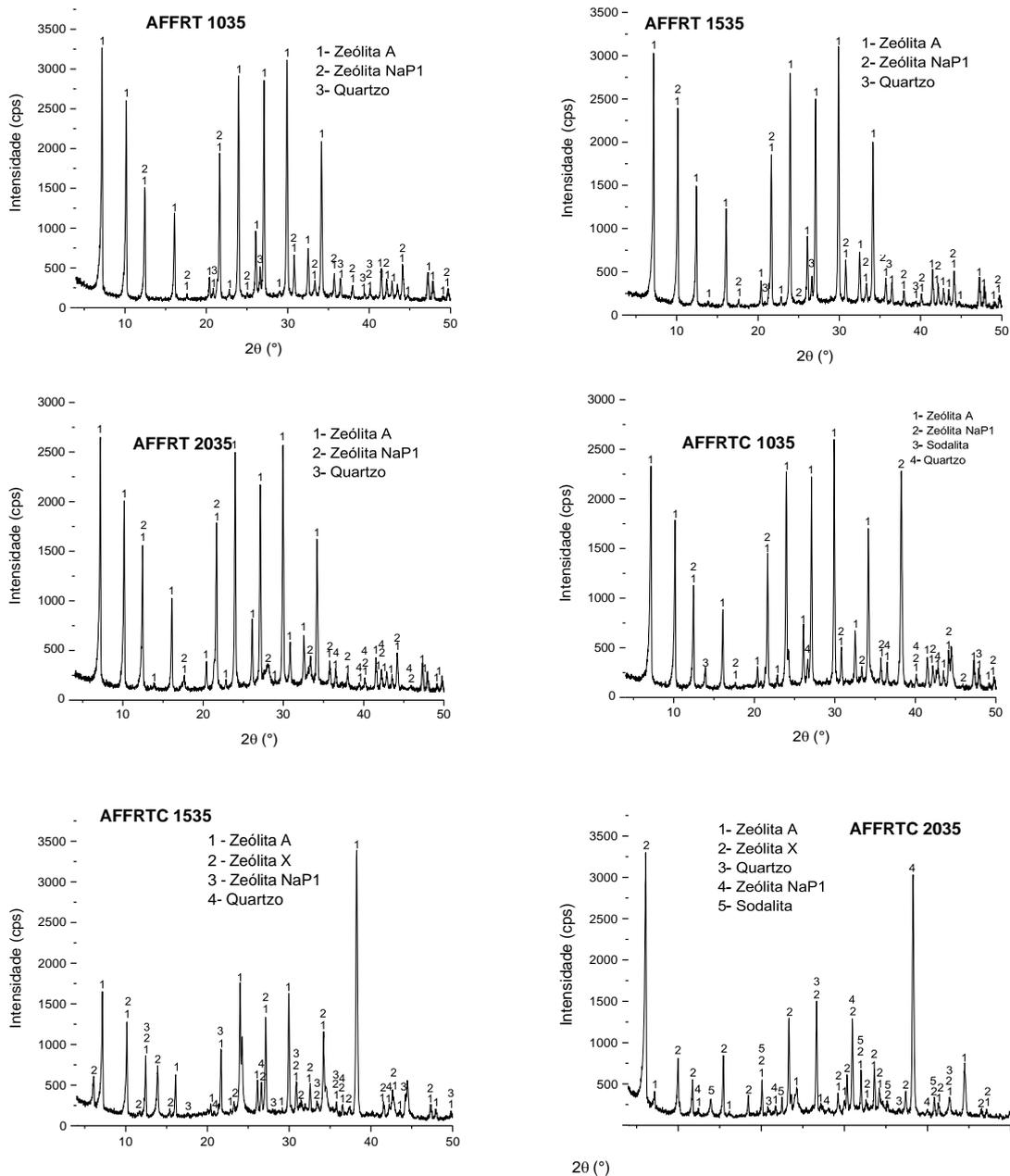
Fonte: Do autor (2023).

A análise química das sínteses AFFRTC1035, AFFRTC1535 e AFFRTC2035 empregando resíduo de alumínio calcinado apresentaram de acordo com a Tabela 5 relação silício/alumínio dentro da faixa esperada. Todavia, as fases mineralógicas destas sínteses, expressas na Figura 5, mostram a formação de picos de zeólita A de baixas intensidades, em especial na AFFRTC2035, onde os picos de zeólita A são inexpressivos. Ademais, foram identificadas a presença de outras impurezas em termos de novas fases cristalinas como sodalita e zeólita X, subprodutos típicos a produção de zeólitas tipo A.

As sínteses empregando resíduo calcinado não obtiveram resultados satisfatórios, portando entende-se que nestas relações o processo de calcinação não foi eficiente para a síntese de zeólitas NaA, visto a obtenção de bons resultados

nas sínteses anteriores empregando resíduo de alumínio bruto tratado (AQUINO et al., 2020).

Figura 6: Difratoograma de Raio X das sínteses da etapa 2.



Fonte: Do autor (2023).

4.3 ESTRUTURA DE POROS

As melhores amostras sintetizadas foram submetidas a análise de estrutura de poros e comparadas à zeólita comercial peletizada, conforme tabela 6. Zeólitas

tipo A já sintetizadas na literatura a partir de cinzas leves apresentaram áreas superficiais de 15.7 m²/g e 10.9 m²/g. Os valores obtidos de área superficial e diâmetro de poros são típicos de zeólitas do tipo A e estão de acordo com a literatura, comprovando a boa formação das zeólitas (IZIDORO *et al.*, 2013; AQUINO *et al.*, 2020).

Tabela 6: Estrutura de Poros

Síntese	Área superficial (m ² /g)	Volume dos poros (cm ³ /g)	Diâmetro médio dos poros (Å)
LTA literatura	27,560	0,1380	100,498
AFF1035	4,404	0,0205	93,004
AFF1535	11,543	0,0192	33,331
AFFRT1035	14,640	0,0237	32,444
AFFRT1535	17,111	0,0259	24,057

Fonte: Do autor (2023).

4.4 CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE CO₂

As amostras obtidas nas sínteses que apresentaram os melhores resultados de cada etapa foram analisadas quanto a capacidade de adsorção de CO₂, conforme a Tabela 7. As amostras AFF1035 e AFF1535 apresentaram capacidade ainda maior que a zeólita tipo A comercial peletizada, caracterizada na literatura com capacidade de 2,07 mmol/g. Ao considerar que as zeólitas sintetizadas foram analisadas sob forma de pó, espera-se que a capacidade seja ligeiramente diminuída quando o processo de peletização, o que resultará em uma capacidade muito semelhante ao do produto comercial.

Tabela 7: Capacidade de adsorção de CO₂.

Síntese	mmol/g
LTA literatura	2,07
AFF1035	2,33
AFF1535	2,20
AFF2035	1,94
AFFRT1035	1,82
AFFRT1535	1,76

Fonte: Do autor (2023).

A zeólita tipo X é comumente empregada na captura de CO₂. A literatura relata que uma zeólita X sintetizada a partir de cinzas leves apresentou capacidade de adsorção de CO₂ de 1,97 mmol/g. As amostras sintetizadas com resíduos apresentaram resultados bastantes satisfatórios, indicando que estes produtos podem ser empregados na captura de CO₂. (AQUINO et al., 2020).

5 CONCLUSÕES

As análises de caracterização das matérias primas apontaram que a cinza leve e o resíduo de alumínio de anodização apresentam concentrações significativas dos elementos requeridos a síntese da zeólita NaA – silício e alumínio, bem como elevado grau de conteúdo amorfo. A calcinação do resíduo de alumínio elevou a concentração de óxido de alumínio disponível, bem como a disponibilidade de conteúdo amorfo, no entanto as zeólitas sintetizadas empregando o resíduo calcinado não obtiveram resultados tão satisfatórios.

Fases de quartzo foram identificadas nas cinzas leves, que posteriormente foram identificadas nas zeólitas sintetizadas, além de outras impurezas características. De acordo com o FRX, todas as sínteses obtiveram relações de silício-alumínio características de zeólitas tipo A que tiveram sua formação confirmadas pelo DRX que indicou picos de zeólita A com boa definição. Dentre estas, a amostra AFF1535 obtiveram os melhores resultados em termo de intensidade de pico e background reduzido.

Das amostras replicadas com resíduo de alumínio anodizado as sínteses AFFRT1035 e AFFRT1535 apresentaram resultados muito semelhantes a sínteses com aluminado de sódio. As amostras reproduzidas com resíduo calcinado, no entanto não obtiveram resultados satisfatórios, as sínteses apresentaram picos de zeólita tipo A de baixas intensidades.

As zeólitas sintetizadas submetidas à análise textural apresentaram estruturas de poros características à zeólitas tipo A indicados na literatura, confirmando a boa formação deste material. Quanto a capacidade de adsorção de CO₂, as zeólitas com resíduo de alumínio AFFR1035 e AFFR1535 apresentaram capacidade superior à zeólita comercial, de 2,07 mmol/g.

As amostras empregando resíduo de alumínio tratado também apresentaram resultados satisfatórios, de 1,82 mmol/g para a AFFRT1035 e 1,76



mmol/g para a AFFRT1535, próximos à capacidade de adsorção do produto comercial e similar à zeólita tipo X sintetizada na literatura.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Thiago Fernandes de. **Síntese de zeólitas do tipo X a partir de cinzas volantes e de fundo de carvão mineral para a captura de CO₂**. 2018. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/198363>. Acesso em: 21 maio 2023.

AQUINO, Thiago F. de et al. **CO₂ adsorption capacity of zeolites synthesized from coal fly ashes**. *Fuel*, [S.L.], v. 276, p. 118143, set. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623612031139X?via%3Di> hub. Acesso em: 20 nov. 2023.

BAGATINI, Maurício Covcevich et al. **Estudo Da Fusibilidade Das Cinzas De Carvões Em Função Da Composição Química E Mineralógica**. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 52-58, 2007. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.00304009/pdf/1573492069-3-4-52.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BRECK, D. W. **Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use**. John Wiley & Sons, Inc. 771 p., 1974.

CAHOON, Lawrence B.. Coal Use as a Cause of Water Quality Impairment. **Food, Energy, And Water**, [S.L.], p. 261-275, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128002117000107>. Acesso em: 21 maio 2022.

CRUZ, Thiago Jackson Torres. **Síntese de Zeólita LTA Utilizando Resíduos de Cinzas Leves de Carvão**. 2020. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/30697/1/Sintesezezeolita_Cruz_2020.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.

FLORIANO, Fernando Joaquim. **Valorização Dos Resíduos Do Processo De Anodização De Alumínio E Cinza De Casca De Arroz Por Meio Da Obtenção De Zeólitas**. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/128873/330264.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 nov. 2023.

GOLLAKOTA, Anjani R.K. *et al.* Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. **Science Of The Total Environment**, Douliou, v. 672, p. 951-989, abr. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719313361?via%3Di> hub. Acesso em: 21 maio 2023.



GONTHIER, Sylvie; THOMPSON, Robert W.. Effects of Seeding on Zeolite Crystallisation, and the Growth Behavior of Seeds. **Advanced Zeolite Science And Applications**, [S.L.], p. 43-73, 1994. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-2991\(08\)60764-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-2991(08)60764-8).

INDIRA, V.; ABHITHA, K.. A review on recent developments in Zeolite A synthesis for improved carbon dioxide capture: implications for the water-energy nexus. **Energy Nexus**, [S.L.], v. 7, p. 100095, set. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427122000572>. Acesso em: 20 jun. 2023.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (IAI) (Londres). **Produção de Alumínio Primário**. 2023. Disponível em: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>. Acesso em: 22 maio 2023.

IZIDORO, Juliana de Carvalho. **Síntese e caracterização de Zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão**. 2013. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-03042013-092703/publico/2013IzidoroSintese.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.

IZIDORO, Juliana de C. et al. **Synthesis of zeolites X and A from fly ashes for cadmium and zinc removal from aqueous solutions in single and binary ion systems**. *Fuel*, [S.L.], v. 103, p. 827-834, jan. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236112006205>. Acesso em: 23 nov. 2023.

JAHANGIRI, Ali *et al.* District heating and cooling for building energy flexibility. In: MA, Zhenjun; ARĐCĐ, Müslüm; SHAHSAVAR, Amin (ed.). **Building Energy Flexibility and Demand Management**. [S.L.]: Academic Press, 2023. p. 173-190. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323995887000080>. Acesso em: 21 maio 2023.

JAYASHREE, Priyadarshini; STRAFFELINI, Giovanni. The influence of the addition of aluminum anodizing waste on the friction and emission behavior of different kinds of friction material formulations. **Tribology International**, [S.L.], v. 173, p. 107676, set. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X22002493>. Acesso em: 22 maio 2023.

JOÃO, Jair Juarez; SATIRO JÚNIOR, Walter; VIEIRA, José Luiz. Use of zeolite synthesized from coal ash from Santa Catarina for removal of iron, manganese and methylene blue dye in water. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 1, 5 jul. 2018. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/6y5vtRDx54jDLS3S5NHTSQc/?lang=en>. Acesso em: 09 dezembro 2023.



KAR, Kamal K.. **Handbook of Fly Ash**. [S.L.]: Butterworth-Heinemann, 2021. 868 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128176863/handbook-of-fly-ash?via=ihub=>. Acesso em: 21 maio 2023.

KOOHSARYAN, Esmat; ANBIA, Mansoor; MAGHSOODLU, Mohammad. Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: a review. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 104287, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343720306369>. Acesso em: 23 maio 2023.

LILIENKAMP, Arne; ZINKE, Jonas; ALVAREZ, Carlos Fernández. **Coal 2022**. France: Iea Publications, 2022. 135 p. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/91982b4e-26dc-41d5-88b1-4c47ea436882/Coal2022.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.

LUZ, Adão Benvindo; Zeólitas: propriedades e usos industriais. Série Tecnologia Mineral 68, CETEM/CNPq: Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/132/1/stm-68.pdf> >. Acesso em: 23 maio 2023.

MASOUDIAN, Seyed Kamal *et al.* Synthesis and Characterization of High Aluminum Zeolite X from Technical Grade Materials. **Bulletin Of Chemical Reaction Engineering And Catalysis**, Tehran, p. 54-60, jun. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/271303319_Synthesis_and_Characterization_of_High_Aluminum_Zeolite_X_from_Technical_Grade_Materials. Acesso em: 26 maio 2023.

MELO, C. R.; RIELLA, H. G. Síntese de zeólita tipo NaA a partir de caulim para obtenção de zeólita 5A através de troca iônica. **Cerâmica**, Florianópolis, v. 56, n. 1, p.340-346, 2010.

MILLER, Bruce. **Coal Energy Systems**. Amsterdam: Academic Press, 2004. 544 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha Energética Brasileira 2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas/resenha-energetica-2022.pdf/view>. Acesso em: 21 maio 2023.

MYMRIN, Vsevolod *et al.* Characterization of construction materials on the base of mortar waste, activated by aluminum anodization sludge and lime production waste. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 212, p. 202-209, jul. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819307755#b0030>. Acesso em: 22 maio 2023.

RIGO, Reus; PERGHER, Sibeles. Um Novo Procedimento de Síntese da Zeólita A Empregando Argilas Naturais. **Química Nova**, Porto Alegre, v. 32, n. 1, p. 21-25, 18 dez. 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/72875>. Acesso em: 21 maio 2023.



ROZHKOVSKAYA, Alexandra *et al.* Synthesis of LTA zeolite beads using alum sludge and silica rich wastes. **Advanced Powder Technology**, [S.L.], v. 32, n. 9, p. 3248-3258, set. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883121003368>. Acesso em: 24 maio 2023.

SARTOR, Morgana Nuernberg. **Caracterização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos**. 2006. 61 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88583/229191.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SILVA, Aryandson da. **Síntese de zeólitas LTA para captura de CO₂**. 2023. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/53021/1/SintesezeolitasLTA_Silva_2023.pdf. Acesso em: 20 nov. 2023.

SOUZA, Gabriel Soldi de. **Desenvolvimento de compósito zeólita Na-LTA/polidimetilsiloxano aplicado para separação CO₂/N₂ por adsorção**. 2021. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <file:///C:/Users/andri/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/LTA%20ufsc.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

TIRUTA-BARNA, L.; BARNA, R.. Potential hazards from waste based/recycled building materials. **Toxicity Of Building Materials**, [S.L.], p. 391-426, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857091222500140?via%3Dihub>. Acesso em: 21 maio 2023.

VILLARREAL, Fausto Peñafiel *et al.* Recovery of aluminium, silicon, and alkali and alkaline earth elements from aluminium-anodizing residue by formation of zeolites. **Cleaner Engineering And Technology**, [S.L.], v. 5, p. 100289, dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002494>. Acesso em: 24 maio 2023.

VIOLA, Vanessa Olivo. **Impregnação de Amina em Sílica Sintetizada a Partir de Cinzas Leves de Carvão Mineral para Aplicação em Captura de CO₂**. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/242581/PENQ0960-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 dez. 2023.

WORLD COAL ASSOCIATION. **Coal Facts**. Disponível em: <https://www.worldcoal.org/coal-facts/>. Acesso em: 21 maio 2023.

WU, Shaohua *et al.* Hydrometallurgical stepwise separation of alumina and recovery of aluminum fluoride from waste anode cover material of aluminum



electrolysis. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 186, p. 107740, ago. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687522003508>. Acesso em: 22 maio 2023.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Thiago Fernandes Aquino por todo incentivo, dedicação e conhecimento a transmitido. À equipe do CT-SATC pelo espaço cedido, fornecimento das matérias-primas e análises realizadas para o desenvolvimento deste estudo, em especial aos colaboradores Vanessa, Agda, Leonardo e Lucas e por todo o apoio.

À minha família e ao meu namorado por todo o suporte.