# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

ALSON DAVID RODRIGUES DA SILVA

USO ALTERNATIVO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL, BAGAÇO DE CANA, NA SÍNTESE DE CATALISADORES PRÉ-DIMENSIONADOS PARA OBTENÇÃO DE CARBONO E HIDROGÊNIO VIA DECOMPOSIÇÃO DO METANO

### ALSON DAVID RODRIGUES DA SILVA

# USO ALTERNATIVO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL, BAGAÇO DE CANA, NA SÍNTESE DE CATALISADORES PRÉ-DIMENSIONADOS PARA OBTENÇÃO DE CARBONO E HIDROGÊNIO VIA DECOMPOSIÇÃO DO METANO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais, da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências com ênfase em materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rusiene Monteiro de Almeida.

Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Rayssa Jossanea Brasileiro Motta

MACEIÓ – AL 2024

# Catalogação na Fonte Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto - CRB-4 - 1767

Silva, Alson David Rodrigues da. Uso alternativo de resíduo agroindustrial, bagaço de cana, na síntese de catalisadores pré-dimensionados para obtenção de carbono e hidrogênio via decomposição do metano / Alson David Rodrigues da Silva. – 2024. 97 f. : il.
Orientadora: Rusiene Monteiro de Almeida. Co-orientadora: Rayssa Jossanea Brasileiro Motta. Tese (doutorado em Materiais) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Materiais. Maceió, 2024. Bibliografia: f. 72-97.
1. Bagaço de cana. 2. Método da réplica - Catalisadores. 3. Catalisadores de Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 4. Decomposição catalítica do metano. I. Título.

# Alson David Rodrigues da Silva

# Uso alternativo de resíduo agroindustrial, bagaço de cana, na síntese de catalisadores pré-dimensionados para obtenção de carbono e hidrogênio via decomposição do metano

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 29 de julho de 2024.

# BANCA EXAMINADORA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rusiene Monteiro de Almeida (Orientadora - PPGMateriais/UFAL)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rayssa Jossanea Brasileiro Motta (Coorientadora - UFAL)

Prof. Dr. Alexandro Mangueira Lima de Assis (PPGMateriais/UFAL)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Camila Braga Dornelas (PPGMateriais/UFAL)

Prof. Dr. Antoninho Valentini (UFC)

Prof. Dr. Humberto Vieira Fajardo (UFO)

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos concedidas, por sua graça em minha vida e por ter me dado força, sabedoria e determinação para ultrapassar os obstáculos mais difíceis.

A minha mãe, Joanice Rodrigues, por toda paciência, incentivo, amor e apoio constante em minha vida. Você é o meu rochedo, a minha força e o meu exemplo.

Aos meus irmãos, Francisco e Jedeny, pelos momentos de descontração e alegria depois de dias exaustivos, pelo companheirismo e amor.

As minhas orientadoras, Rusiene Monteiro de Almeida e Rayssa Josseana Brasileiro Motta, pela oportunidade concedida, pelos ensinamentos transmitidos, pela paciência e por estar sempre à disposição.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Materiais que contribuíram para minha formação acadêmica.

Aos amigos feitos ao longo do doutorado e em especial à Mayara, Lucas Melo, Bianca, Laura, Bruna Bernardes e Bruno Barro pela ajuda, carinho, apoio e torcida.

A Rayssa Motta, João Inácio Soletti e Kleber Jean que me acompanham desde o início, me aconselhando e me ajudando nas dificuldades.

Ao do Grupo de Catálise e Reatividade Química (GCar) da UFAL, onde foram desenvolvidas as análises.

Aos professores que aceitaram o convite para ser membro da banca da Qualificação: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Fabiane Caxico (UFAL), Prof. Dr Lucas Meili (UFAL), Prof. Dr Alexandro Mangueira Lima (UFAL).

Aos professores que aceitaram o convite para ser membro da banca de defesa de Tese, Prof. Dr. Antoninho Valentini (UFC), Prof. Dr. Humberto Vieira Fajardo (UFOP), Prof. Dr Alexandro Mangueira Lima (UFAL) e a Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Camila Braga Dornelas (UFAL) suas contribuições serão de extrema importância para o resultado final.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES, pelo financiamento

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desse trabalho, obrigado por ajudarem a tornar esse sonho realidade!

#### **RESUMO**

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, gerando até 0,28 toneladas de bagaço para cada tonelada processada. Esse bagaço é uma fonte promissora de biomassa lignocelulósica, com descarte estimado em 167,9 milhões de toneladas. Entretanto, estima-se que 10 % do bagaço descartado não é utilizado na geração de energia pelas usinas. Este trabalho visa valorizar esse resíduo, utilizando-o como matéria-prima para confecção de modelo prémoldado usado para a produção de cerâmica de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) biomórfica pelo método da réplica. Materiais pré-dimensionados cerâmicos foram sintetizados usando o bagaço de cana, seguido de impregnação úmida com 3 proporções mássicas de Ni: 5 % (5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>dp), 10 % (10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp) e 20 % (20Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp). Para comparação, catalisadores em pó com 5% de Ni (m/m), com e sem bagaco de cana, foram sintetizados em etapa única: 5Ni/DryBCA Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, respectivamente. A caracterização dos catalisadores foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDX), análise termogravimétrica (TGA), difratometria de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), fisissorção de N<sub>2</sub> a 77 K e temperatura programada de redução de H<sub>2</sub> (TPR-H<sub>2</sub>). Os catalisadores foram testados para produção de carbono ordenado e hidrogênio via decomposição catalítica do metano (DCM) a 500 °C por 30 minutos. O carbono formado foi caracterizado por TGA e microscopia eletrônica de transmissão (MET). Os resultados indicaram que a síntese in situ dos catalisadores em pó com 5 % resultou na formação de espécies de níquel de difícil redução (TPR). A ancoragem do NiO nos materiais prédimensionados possibilitou a fácil redução de espécies de níquel suportadas na alumina. Presença de mesoporosidade nos catalisadores em formato de pó foi confirmada por adsorção e dessorção de N<sub>2</sub> a 77 K. Os catalisadores pré-dimensionados apresentaram baixa área superficial decorrente da sinterização da cerâmica. Catalisadores pré-dimensionados e em pó apresentaram atividade catalítica quando reduzidos em temperaturas distintas: 600 °C e 800 °C, respectivamente. Entre os catalisadores estudados, o catalisador de 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp apresentou a maior atividade catalítica, 45 %, seguido de 20Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp com 44 %. Reduzidos à 800 °C, os catalisadores em pó sintetizados exibiram atividade catalítica com 25 % e 4 % de rendimento para os catalisadores 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, respectivamente. Os materiais carbonáceos obtidos para ambas as morfologias de catalisadores, pré-dimensionado e em pó, são do tipo nanotubos de carbono.

**Palavras-chaves:** bagaço de cana-de-açúcar; método da réplica; catalisadores; catalisadores de Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; decomposição catalítica do metano.

#### ABSTRACT

Brazil is the world's largest sugarcane producer, generating up to 0.28 tons of bagasse for each ton processed. This bagasse is a promising source of lignocellulosic biomass, with an estimated discard of 167.9 million tons. However, it is estimated that 10 % of the discarded bagasse is not used for energy generation by mills. This work aims to valorize this residue, using it as a raw material for the manufacture of a pre-molded model used for the production of biomorphic alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ceramics by the replica method. Pre-sized ceramic materials were synthesized using sugarcane bagasse, followed by wet impregnation with 3 mass ratios of Ni: 5 % (5Ni/DrySCB\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-pd), 10 % (10Ni/DrySCB\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-pd) and 20 % (20Ni/DrySCB\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>pd). For comparison, powdered catalysts with 5 % Ni (w/w), with and without sugarcane bagasse, were synthesized in a single step: 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p and 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, respectively. The catalysts were characterized by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry (EDX), thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), N<sub>2</sub> physisorption at 77 K and H<sub>2</sub> temperature-programmed reduction (TPR-H<sub>2</sub>). The catalysts were tested for the production of ordered carbon and hydrogen via methane catalytic decomposition (DCM) at 500 °C for 30 minutes. The formed carbon was characterized by TGA and transmission electron microscopy (TEM). The results indicated that the in situ synthesis of 5 % powdered catalysts resulted in the formation of difficult-to-reduce nickel species (TPR). The anchoring of NiO on the pre-sized materials allowed the easy reduction of nickel species supported on alumina. The presence of mesoporosity in the powdered catalysts was confirmed by N<sub>2</sub> adsorption and desorption at 77 K. The pre-sized catalysts showed a low surface area due to ceramic sintering. Pre-sized and powdered catalysts showed catalytic activity when reduced at different temperatures: 600 °C and 800 °C, respectively. Among the studied catalysts, the 10Ni/DrySCB\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-pd catalyst showed the highest catalytic activity, 45 %, followed by 20Ni/DrySCB\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-pd with 44 %. Reduced at 800 °C, the synthesized powdered catalysts exhibited catalytic activity with 25 % and 4 % yield for the 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p and 5Ni/DrySCB\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p catalysts, respectively. The carbonaceous materials obtained for both catalyst morphologies, pre-sized and powdered, are of the carbon nanotube type.

**Keywords:** sugarcane bagasse; replica method; catalysts; Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts; catalytic decomposition of methane.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processos de fabricação de cerâmicas porosas.14
Figura 2 - Etapas de fabricação de espuma cerâmica utilizando modelo polimérico16
Figura 3 - Pilhas de bagaço de cana-de-açúcar em usina do interior paulista23
Figura 4 - Oferta Interna de Energia Elétrica 2022 - (%)25
Figura 5 - Principais vias de produção de hidrogênio, seus balanços energéticos e quantidades
de produtos
Figura 6 - Mecanismo de decomposição do metano
Figura 7 - Fluxograma do processo de síntese do suporte catalítico DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp e dos
catalisadores xNi/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp40
Figura 8 - Fluxograma do processo de síntese dos catalisadores na forma de pó41
Figura 9 - Linha reacional para decomposição catalítica do metano45
Figura 10 - (a) BCA <i>template</i> e (b) DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp47
Figura 11 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras (a) Dry-BCA, (b)
$DryBCA_Al_2O_3-dp$ , (c) $xNi/DryBCA_Al_2O_3-dp$ , (d) $Al_2O_3-p$ , (e) $5Ni/Al_2O_3-p$ e (f)
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p49
Figura 12 - Curvas TGA e DTG da amostra Dry-BCA51
Figura 13 - Curvas TGAs das amostras Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p, 5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p e 5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p52
Figura 14 - Difratograma de raios X das amostras com dimensões predeterminadas:
DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp, obtida à 1500 °C, e catalisadores xNi/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp obtidos após
ancoragem da fase ativa à 550 °C no suporte DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp
Figura 15 - Difratograma de raios X das amostras em pó Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p, 5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p e
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p, obtidas a 550 °C57
Figura 16 - (a) Isotermas de adsorção/dessorção de $N_2$ a 77 K e (b) Distribuição do diâmetro
dos poros das amostras Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p, 5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p e 5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p59
<b>Figura 17 -</b> TPR-H <sub>2</sub> do suporte catalítico DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp e dos catalisadores sintetizados.
61
Figura 18 - Consumo de hidrogênio na faixa de temperatura usada no TPR das amostras dos
catalisadores
Figura 19 - Curvas TGAs e DTGs dos catalisadores com dimensões predeterminadas reduzidos
a 600 °C após DCM a 500 °C por 0,5h64

Figura 20 - Curvas TGAs e DTGs dos catalisadores em pó reduzidos à 800 °C após	DCM à
500 °C por 0,5h	65
Figura 21 - Atividade catalítica dos catalisadores reduzidos a 600 e 800 °C e testados	na DCM
a 500 °C por 0,5h	66
Figura 22 - Imagens de microscopia eletrônica de transmissão dos catalisadores após	DCM a
500 °C: (a) e (b) 10Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp, (c) e (d) 5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	68

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Óxidos presentes nas amostras (%).	53
Tabela 2 - Tamanho médio de cristalitos dos materiais catalíticos.	57
Tabela 3 - Área superficial dos catalisadores sintetizados, do suporte DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -d	p e da
amostra Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	60
Tabela 4 - Produção de hidrogênio (%) dos catalisadores após a DCM a 500 °C	67

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	.10
2	OBJETIVOS	.12
2.1.	Objetivos Gerais	. 12
2.2.	Objetivos específicos	.12
3	REVISÃO DE LITERATURA	.13
3.1.	Cerâmicas Porosas	13
3.1.1.	Sinterização parcial de pó cerâmico	.14
3.1.2.	Modelo Sacrificial	.14
3.1.3.	Espuma direta	.15
3.1.4.	Método da réplica	.15
3.2.	Matérias-primas para produção de cerâmicas celulares	.18
3.3.	Fibras Vegetais	.19
3.3.1.	Sisal	.20
3.3.2.	Algodão	.20
3.3.3.	Cânhamo	.21
3.3.4.	Luffa cylindrica (L. cylindrica)	.22
3.3.5.	Bagaço de cana-de-açúcar - BCA	.22
3.3.5.1	1 Aplicações do BCA	.24
4	USOS DE MATERIAIS CATALÍTICOS COM DIMENSÕ	ES
PRED	DETERMINADAS	.30
4.1.	Oxidação de compostos orgânicos voláteis (COVs)	31
4.2.	Hidrogenólise do glicerol	32
4.3.	Hidrodessulfurização	.33
4.4.	Desidrogenação	33
4.5.	Decomposição catalítica do metano	34

5	MATERIAL E MÉTODOS
5.1.	Tratamento prévio do bagaço de cana-de-açúcar
5.2.	Síntese dos materiais catalíticos com dimensões predeterminadas38
5.3.	Síntese dos catalisadores em pó40
5.4.	Caracterização do bagaço da cana-de-açúcar e dos materiais catalíticos41
5.4.1.	Microscopia Eletrônica de Varredura42
5.4.2.	Resistência à Compressão42
5.4.3.	Análise Termogravimétrica42
5.4.4.	Espectrometria de raios X por dispersão de energia43
5.4.5.	Difração de raios X43
5.4.6.	Isotermas de Adsorção e Dessorção em nitrogênio líquido a 77 K43
5.4.7.	Redução à temperatura programada44
5.5.	Testes catalíticos de decomposição do metano – produção de carbono ordenado e
H <sub>2</sub> liv	re de CO <sub>x</sub> 44
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO47
6.1.	Caracterização das Amostras47
6.2.	Testes catalíticos: decomposição do metano63
7	CONCLUSÕES69
PERS	PECTIVAS70
PROI	DUÇÃO CIENTÍFICA71
REFE	CRÊNCIAS72

### 1 INTRODUÇÃO

A agroindústria é um dos setores econômicos que mais produzem resíduos, seja no campo, como folhagens, restos de podas, excretas de animais, etc., ou como resultado do processamento das diversas matérias-primas vegetais e animais na transformação em produtos. Assim, inúmeras atividades do setor, visando à economia de recursos com a redução de resíduos e a redução/eliminação dos combustíveis fósseis, têm buscado empregar biomassa residual em outros processos (COSTA et al., 2021).

O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) é o principal resíduo sólido obtido do processamento da cana-de-açúcar nas usinas de produção de açúcar e álcool. Estima-se que sejam gerados até 0,28 t de BCA para cada tonelada de cana (ALCARDE, 2020; HAGHDAN; RENNECKAR; SMITH, 2016). No Brasil, esse resíduo apresenta grande importância, uma vez que é gerado em grandes quantidades na cadeia da indústria sucroalcooleira, sendo majoritariamente destinado à queima para geração de energia. No ano de 2022, forneceu ao setor energético a produção total de 32.262 GWh de energia elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023; TYAGI et al., 2019). No entanto, devido à grande quantidade produzida, algumas usinas ainda vendem parte do BCA excedente para outras empresas que o utilizam em seus processos produtivos.

A utilização de biomassa residual vem sendo objeto de estudos promissores e é fundamental no cenário atual, que visa ao desenvolvimento de processos sustentáveis e ecologicamente corretos. Materiais como BCA, palhas, cascas, grãos, entre outros obtidos da agroindústria, que eram comumente descartados no passado por serem considerados resíduos, atualmente podem ser considerados matérias-primas valiosas devido ao seu grande potencial para utilização como fonte renovável de carbono, sílica e também para obtenção de materiais catalíticos à base de alumina e silício em forma de pó (ANTUNES et al., 2021; DELE-AFOLABI et al., 2018; MARTINS et al., 2019).

Em relação ao desenvolvimento de novos materiais, a catálise desempenha um papel de destaque, visto que mais de 80 % dos produtos químicos industriais a utilizam. Ela é essencial no desenvolvimento de processos que atendam às demandas de sustentabilidade (BERNARDO-GUSMÃO; PERGHER; SANTOS, 2017). Devido a essa projeção e extensão de uso, o mercado global de catalisadores atingiu a marca de 22,7 bilhões de dólares em 2022, com uma projeção de crescimento anual de 4,2 % entre 2023 e 2028 (IMARC GROUP, 2023).

A seleção adequada do catalisador é crucial para o progresso do processo, pois pode influenciar diretamente sua viabilidade. Catalisadores podem ser homogêneos, heterogêneos ou

enzimáticos. Entre esses, os catalisadores heterogêneos se destacam devido às suas propriedades distintas, como a facilidade de separar os produtos da reação, a capacidade de obter produtos com elevado grau de pureza, bem como a oportunidade de regeneração e reutilização (COSTA, 2021).

Entre as distintas rotas de síntese de materiais catalíticos à base de óxidos com dimensões predeterminadas, destaca-se o método da réplica, que possui uma abordagem relativamente simples. Esse método utiliza modelos de corpo de prova orgânicos e inorgânicos para a fabricação de materiais com a morfologia do material a ser replicado (CHEN et al., 2018; OHJI; FUKUSHIMA, 2012; PROCÓPIO et al., 2020; SHUMILOV et al., 2022; SOUSA et al., 2005). O processo consiste na impregnação de suspensão cerâmica ou solução precursora de óxidos em estruturas porosas ou celulares, seguida de tratamento térmico. Durante esse tratamento, as substâncias orgânicas são decompostas e os óxidos metálicos sofrem sinterização, resultando em um material com as mesmas dimensões e/ou formas das estruturas porosas e/ou celulares (SILVEIRA et al., 2007; MORENO et al., 2010; OHJI; FUKUSHIMA, 2012; STUDART et al., 2006).

Dentre as biomassas utilizadas para a obtenção de óxidos metálicos pelo método da réplica, destacam-se o algodão (DELBRÜCKE et al., 2013; KOOL et al., 2017), o sisal (ANDRADE et al., 2007; BENÍTEZ-GUERRERO et al., 2014), o cânhamo e a lã (MOCANU et al., 2021) e as espumas de huminas (FILICIOTTO et al., 2022).

Considerando o exposto e baseando-se em estudos que utilizam biomassa para a síntese de materiais catalíticos, a implementação do uso desse resíduo, especialmente no Brasil, apresenta viabilidade econômica e facilidade de adoção. Isso se deve à existência de uma cadeia de fornecedores já estabelecida e à possibilidade de produção de tais materiais a baixo custo. Além disso, essa prática contribui para as boas práticas ambientais atualmente vigentes na indústria, transformando um resíduo anteriormente descartado em um insumo valioso para outro processo produtivo e reduzindo a dependência de materiais sintéticos tradicionalmente utilizados para esse fim.

Portanto, este trabalho propôs a utilização do BCA no método da réplica para a obtenção de material catalítico à base de alumina, com dimensões predeterminadas, para serem testados na decomposição catalítica do metano, visando à produção de carbono ordenado e hidrogênio livre de COx.

## **2 OBJETIVOS**

#### 2.1. Objetivos Gerais

Investigar o uso alternativo do resíduo agroindustrial, bagaço da cana-de-açúcar, na síntese de materiais catalíticos pré-dimensionados para obtenção de carbono ordenado e hidrogênio via decomposição do metano.

# 2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar o bagaço de cana-de-açúcar através das técnicas de análise termogravimétrica (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Utilizar o bagaço como *template* no método da réplica com precursor de alumínio visando a obtenção de alumina pré-dimensionada;
- Utilizar alumina pré-dimensionada na síntese de catalisadores à base de níquel (Ni), via impregnação úmida;
- Sintetizar catalisadores de alumina em pó com 5 % de Ni com e sem bagaço de cana;
- Caracterizar as propriedades físico-químicas dos catalisadores;
- Estudar a performance catalítica a partir da conversão de metano dos catalisadores quando submetidos à reação de decomposição do metano a 500 °C;
- Caracterizar o carbono formado após a reação de decomposição de metano.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### 3.1. Cerâmicas Porosas

Os materiais cerâmicos são compostos por elementos metálicos e não-metálicos, geralmente caracterizados por ligações iônicas, covalentes ou ambas. Nesta categoria estão incluídos óxidos, nitretos e carbetos. Exemplos comuns desse tipo de material incluem materiais refratários, cimento, vidro e porcelana. Devido à natureza de suas ligações químicas, esses materiais são tipicamente isolantes térmicos e elétricos, além de serem duros, frágeis e capazes de suportar altas temperaturas (ALIAS et al., 2023; FARID, 2019; RICHERSON; LEE, 2018; SUDHA et al., 2018).

Devido às suas características, os materiais cerâmicos são altamente desejados por seu desempenho superior em relação a materiais metálicos ou poliméricos, especialmente em condições adversas como altas temperaturas ou ambientes corrosivos. No entanto, sua fragilidade limita sua resistência a danos mecânicos, o que restringe suas aplicações. Uma solução para esse problema é a introdução de poros na estrutura da cerâmica, ampliando suas funcionalidades e oferecendo propriedades únicas (CHEN et al., 2021).

A introdução de poros nas cerâmicas fornece propriedades e características especiais que normalmente não podem ser alcançadas por suas contrapartes densas convencionais. Isso se deve à combinação das propriedades intrínsecas das próprias cerâmicas e às vantagens de dispersar poros nelas. As vantagens encontradas nas cerâmicas porosas incluem baixa densidade, grande área superficial específica, alta tenacidade, forte resistência ao choque térmico, boa capacidade de isolamento térmico e baixa constante dielétrica (CHEN et al., 2021; OHJI, 2013). Devido a essas características, esses materiais têm ampla área de aplicação, podendo ser empregados como filtros de temperatura elevada, separadores térmicos de gases, componentes estruturais leves, suporte para catálise, isolamento, implantes ósseos, distribuidores de gás, etc. (GOPINATH et al., 2018; STUDART et al., 2006).

Para atender aos diversos requisitos exigidos nas mais variadas aplicações, são utilizados diversos métodos de fabricação de cerâmicas macroporosas, sendo os principais: (a) sinterização parcial, (b) modelos sacrificiais, (c) formação de espuma direta e (d) replicação de modelos (GOPI; PIUS; THOMAS, 2018). A Figura 1, mostra os métodos mais comuns para fabricação de cerâmicas com dimensões predeterminadas.



Figura 1 - Processos de fabricação de cerâmicas porosas.

Fonte: Adaptado de (GOPI; PIUS; THOMAS, 2018).

#### 3.1.1. Sinterização parcial de pó cerâmico

Este método de fabricação de cerâmicas porosas envolve a compactação de pós cerâmicos em uma forma desejada, seguida de calcinação a uma temperatura abaixo do ponto de fusão do material. Essa temperatura, embora inferior ao ponto de fusão, é suficientemente alta para promover a fusão parcial das partículas de pó, resultando em uma estrutura sólida com porosidade controlada (CHEN et al., 2021; OHJI, 2013).

#### 3.1.2. Modelo Sacrificial

Esta técnica envolve a mistura de um formador de poros ou material sacrificial que atua como um espaço reservado dentro do pó ou pasta cerâmica. O material cerâmico é então moldado ao redor deste molde temporário. Após essa etapa, o conjunto é calcinado para sinterizar a cerâmica, solidificando-a e formando poros no lugar onde o molde temporário estava localizado. Esse método é frequentemente utilizado para criar cerâmicas porosas com

formas e tamanhos complexos, adequadas para diversas aplicações industriais e biomédicas. (GOPI; PIUS; THOMAS, 2018).

#### 3.1.3. Espuma direta

Os métodos diretos de formação de espuma criam cerâmicas porosas ao incorporar ar em uma suspensão líquida, mantendo a estrutura das bolhas de ar. As espumas consolidadas são então sinterizadas a altas temperaturas para obter cerâmicas porosas de alta resistência. A porosidade total depende da quantidade de gás na suspensão, enquanto o tamanho dos poros é determinado pela estabilidade da espuma antes da solidificação (STUDART et al., 2006).

#### 3.1.4. Método da réplica

O método da réplica é uma técnica que busca mimetizar características de modelos biológicos e orgânicos/inorgânicos, visando alcançar a mesma eficiência em relação à área superficial, densidade e estrutura interna dos poros do objeto em estudo. Também conhecida como método da espuma polimérica, essa técnica consiste na impregnação de uma estrutura porosa ou celular, com células predominantemente abertas, por uma suspensão cerâmica ou solução precursora de óxidos (MORENO et al., 2010; OHJI; FUKUSHIMA, 2012; SOUSA et al., 2005). Após a impregnação, remove-se o excesso e realiza-se um tratamento térmico para decomposição do molde e sinterização dos óxidos, resultando em uma cerâmica celular (réplica) com a mesma morfologia do modelo de sacrifício, como mostrado na Figura 2 (STUDART et al., 2006).

Há inúmeros materiais cerâmicos porosos que servem como meio de suporte para catalisadores, reunindo características como estabilidade térmica, resistência mecânica, boa distribuição da fase ativa, elevada área superficial, estrutura dos poros bem controlada (forma, morfologia e orientação), boa distribuição do tamanho dos poros, baixa densidade e permeabilidade controlada (BAI; COLOMBO, 2017; FALK et al., 2014; GÓMEZ et al., 2012; LANDI et al., 2013). A síntese desses materiais deve levar em conta critérios ambientais e econômicos, visando à redução dos custos do processo e objetivando sua adoção em larga escala. Para alcançar esses objetivos, pesquisadores vêm desenvolvendo técnicas de síntese de materiais que reaproveitem resíduos, utilizando-os na fabricação de novos materiais (PAPA et al., 2016).



Figura 2 - Etapas de fabricação de espuma cerâmica utilizando modelo polimérico.

Fonte: Adaptado de (SHUMILOV et al., 2020).

Bastante popular, simples e versátil em sua aplicabilidade, o método da réplica permite a fabricação de espumas feitas de metal (alumínio, aço, titânio), cerâmica (alumina, carboneto de silício, etc.) e materiais à base de carbono, utilizando diferentes modelos sacrificiais que podem ser tanto de origem natural quanto sintética (PROCÓPIO et al., 2020). Essas estruturas 3D podem ser fabricadas com grande porosidade (75-95 %), apresentando uma estrutura de redes tridimensionais de baixa densidade e abertura, o que favorece a permeabilidade e diminui a queda de pressão, resultando em propriedades geométricas sob medida (CHEN et al., 2018; SHUMILOV et al., 2020; STOCHERO; PEDRO; OLIVEIRA, 2017; VOLTOLINA et al., 2017).

Um exemplo de uso da técnica são as espumas de alumínio de célula aberta, como Duocel® e m.pore®, que são fabricadas utilizando espumas de poliuretano (PU) como modelo. Ambas as espumas metálicas são réplicas perfeitas do modelo da espuma de PU (ASHBY et al., 2007; TAN; REID; HARRIGAN, 2005; VESENJAK; VEYHL; FIEDLER, 2012).

As propriedades da cerâmica porosa produzida pelo método da réplica podem ser ajustadas escolhendo modelos com características desejadas (densidade, tamanho de poros, forma e distribuição) e otimizando a viscosidade da suspensão cerâmica a ser impregnada na amostra. No entanto, a qualidade do revestimento cerâmico que recobrirá o modelo é fortemente dependente da densidade do modelo e da viscosidade da dispersão cerâmica à qual ele será exposto (NOR; HONG; AHMAD; AKIL, 2008).

Em engenharia química, substratos estruturados por espumas são bastante populares em processos catalíticos que envolvem reações em fase gasosa e/ou líquida (GROSSE et al., 2009). Devido à sua estrutura caracterizada pela presença de poros interconectados, o uso de espumas ou de estruturas naturais com poros interconectados torna a utilização desses materiais atraente para processos catalíticos onde haja fluxo contínuo de massa e momento na fase líquida, com

queda de pressão bem definida ao longo do material (KOVÁŘÍK et al., 2017; SABER; PHAM-HUU; EDOUARD, 2012).

#### Suspensão Cerâmica

A suspensão cerâmica, também conhecida como barbotina, consiste em uma solução onde partículas de pó cerâmico, aditivos e solvente são utilizados para recobrir o molde (ZHU; JIANG; TAN, 2001). Em geral, a fração ideal de cerâmica na suspensão está entre 50 % e 70 % em massa (GUTIÉRREZ; MORENO, 2000). O controle desse parâmetro é necessário, pois a reologia da barbotina influencia o método: um aumento na viscosidade diminui a percolação da barbotina dentro dos poros do modelo, dificultando sua impregnação. Por outro lado, uma barbotina com baixa viscosidade impede o recobrimento homogêneo da peça, impactando diretamente na resistência mecânica da réplica a ser obtida (GÓMEZ et al., 2012).

Diversas composições de barbotinas podem ser encontradas no método da réplica. São elas que permitem a alteração das características finais das cerâmicas porosas a serem obtidas (ZHU; JIANG; TAN, 2002). O preparo da barbotina pode ser feito tanto em meio aquoso quanto com a utilização de solventes orgânicos, sendo a escolha do solvente dependente da dissolução dos aditivos e da viscosidade desejada entre as partículas cerâmicas.

Os aditivos desempenham diferentes papéis na barbotina. Os ligantes têm a função de modificar a viscosidade da suspensão, dar coesão à estrutura cerâmica, evitando que ela desmorone após a secagem, e prevenir o colapso durante o processo de volatilização do modelo e adesão das partículas ao corpo. Já os dispersantes auxiliam as partículas cerâmicas a se manterem em suspensão estável pelo maior tempo possível durante a impregnação do modelo (OLIVEIRA et al., 2001; RICHERSON; LEE, 2018).

#### <u>Impregnação</u>

Dependendo do modelo a ser utilizado, são necessárias algumas etapas de preparação para que a barbotina seja impregnada. Nos modelos de espumas poliméricas, os mais comuns, é necessário expulsar o ar em seu interior antes de imergi-los repetidamente na barbotina até que atinjam a densidade desejada. Após cada imersão, parte da barbotina é retirada do modelo, sendo a prensagem com uso de rolos e o escoamento natural os métodos mais utilizados para esse fim. Ao final do processo, o modelo com a cerâmica impregnada é posto para secar antes da queima, que remove o molde e sinteriza a cerâmica.

#### <u>Secagem</u>

A secagem é uma das etapas mais importantes do método da réplica. É nessa fase que o solvente é evaporado e as partículas cerâmicas passam a aderir aos filamentos do molde. A secagem pode ser realizada de maneira lenta ao ar, processo que dura entre 8 e 24 horas, em forno convencional, com duração de 15 minutos a 6 horas, ou com auxílio de micro-ondas, com duração de 5 a 15 minutos (INNOCENTINI; PANDOLFELLI, 2001).

#### <u>Queima</u>

O processo de queima ocorre inicialmente com a decomposição térmica da parte orgânica (molde e aditivos presentes na barbotina). Esse ponto é crucial, pois, se a decomposição térmica dos agentes orgânicos for feita rapidamente, haverá o colapso do pó cerâmico a ser sinterizado, impedindo a formação da réplica cerâmica em uma forma 3D. Portanto, nessa primeira etapa, a queima ocorre de forma lenta, entre 1 e 3 °C/min, e a temperatura de queima depende da temperatura de decomposição do modelo, que pode ser obtida através da análise termogravimétrica. Após a queima completa do modelo, ocorre o aumento de temperatura, com taxas de aquecimento mais elevadas, com a finalidade de sinterizar o pó cerâmico (LIU; CHEN, 2014; ZHAO, 2010).

### 3.2. Matérias-primas para produção de cerâmicas celulares

Dois grandes grupos de materiais são utilizados na fabricação de cerâmicas porosas pelo método da réplica: os materiais de origem biológica, como ossos, carvão, cascas de alimentos, sementes, fibras e diversos resíduos agroindustriais, e os materiais orgânicos de origem sintética. O primeiro grupo é caracterizado pela alta heterogeneidade química, mineralógica e pela complexa morfologia interna, enquanto o segundo é caracterizado pela homogeneidade química e pelo controle de suas formas (BARBIERI et al., 2013).

As espumas poliméricas são as mais utilizadas para a produção de cerâmicas porosas devido à grande disponibilidade de modelos com características padronizadas encontrados no mercado e ao controle rigoroso do processo de fabricação, visando obter atributos como densidade, volume, formato e tamanho de poros sob medida (DROBNY, 2007; XU; HUANG, 2016). Concomitantemente, a facilidade de conformação das peças produzidas na fábrica ou por terceiros posteriormente, sem a utilização de instrumentação complexa, é apontada como

um dos pontos positivos no manejo dessa matéria-prima (DEB, 2010; SUDHAKAR et al., 2016).

As espumas mais utilizadas pela indústria e em pesquisas para a produção de cerâmicas avançadas são as de poliuretano, (CHEN et al., 2018, 2019; HUANCA; NUNES, 2016; SEDYONO et al., 2021; SHUMILOV et al., 2020) e poliestireno (GUO et al., 2012). No entanto, o grande inconveniente da utilização dessas espumas é que boa parte da matéria-prima destinada à sua produção é proveniente de combustíveis fósseis. Quando queimadas, essas espumas liberam fumaça tóxica, o que impacta o meio ambiente e onera o processo de produção devido à necessidade de tratamento dos gases tóxicos.

Cada vez mais pesquisas vêm dando maior atenção à utilização de materiais de origem natural para aumentar a porosidade em cerâmicas ou mesmo servir-lhes como modelo. Alguns desses materiais se destacam por serem subprodutos de operações industriais, tais como lodo de estações de tratamento de água (MOURATIB et al., 2020), lama da indústria de papel (BOU-ISSA; LOIOLA; HOLANDA, 2020) ou, em muitos casos, resíduos agroindustriais diversos (SALLEH et al., 2021).

No caso dos resíduos agroindustriais, a capacidade que certos materiais naturais têm de formar uma intrincada e complexa rede de tubos, canais e poros em sua estrutura interna leva os pesquisadores a querer mimetizar essas características, transferindo-as para as cerâmicas. Outro fator que impulsiona as pesquisas nessa área é a necessidade de tornar o processo de produção de cerâmicas mais ambientalmente amigável, utilizando resíduos da agroindústria e outros materiais orgânicos de origem natural, procurando assim reduzir os custos ambientais e de produção.

Abordagens em que o método da réplica faz uso de modelos naturais como réplica positiva têm sido estudadas para a fabricação de estruturas porosas abertas, altamente orientadas e com ampla faixa de porosidade (OHJI; FUKUSHIMA, 2012).

## 3.3. Fibras Vegetais

As fibras vegetais são materiais lignocelulósicos que, morfologicamente, são células esclerenquimatosas, resistentes e flexíveis, formando o principal componente das fibras vegetais. As fibras esclerenquimáticas possuem forma tipicamente prosenquimatosa, ou seja, seu comprimento é muitas vezes maior que a largura (MEDINA, 1959). O aproveitamento de fibras como matérias-primas advém de suas propriedades, como disponibilidade, densidade,

baixo custo, capacidade de alongamento e moldagem, resistência mecânica, entre outras (TROTMAN, 1991).

#### 3.3.1. Sisal

Planta de origem mexicana, o sisal pertence à família Agavaceae e tem como maiores produtores mundiais o Brasil (150,6 mil toneladas), a Tanzânia (34,9 mil toneladas) e o Quênia (28,0 mil toneladas). A produção somada desses três países corresponde a 79,1 % de toda a produção mundial (PERRY, 2021).

Um conjunto de fibrilas é responsável pela formação da fibra do sisal. Essas estruturas apresentam diâmetro variável de 4 a 30  $\mu$ m. As fibras possuem composição básica variando de 65-85 % em massa de celulose, de 6-13 % em massa de hemicelulose e de 7-12 % em massa de lignina, sendo o restante, 0,5-2 %, referente a pectina, umidade, ácidos graxos e substâncias solúveis em água (MARTIN, 2009). Seu amplo uso se deve às suas excelentes propriedades mecânicas, módulos de elasticidade e boa resistência à água salgada (MARTIN, 2009; MWAIKAMBO; ANSELL, 2002).

Sua aplicabilidade como modelo no método da réplica foi investigada por Li et al., (2007), que utilizaram TiCl como precursor metálico visando obter fibras ocas de TiO para fotocatálise. Os autores relataram que os produtos obtidos apresentaram características fiéis às fibras e atividade fotocatalítica na degradação do corante cônico rodamina B. Andrade et al., (2007), usaram as fibras de sisal como modelo para produção de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> biomórficas, relatando que as características inerentes às fibras de sisal foram bem reproduzidas até a escala micrométrica. Benítez-Guerrero et al., (2014), produziram fibras mesoporosas de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com área superficial de 200 m<sup>2</sup> utilizando sisal.

#### 3.3.2. Algodão

O principal produto do algodão é a fibra, constituída de uma única célula que contém mais de 95 % de celulose. Quando madura, a fibra apresenta 25 camadas de celulose (cristalina, fibrilar e amorfa) situadas na sua parede secundária. Além disso, é formada por 1,3 % de proteínas, que são de elevada importância, pois atuam como mordentes da fibra e recebem o corante no processo de tingimento (BELTRÃO, 2006). As fibras são pelos unicelulares que crescem a partir da epiderme externa da semente. Aproximadamente 30 % das células da epiderme externa diferenciam-se em fibra. As fibras de maior comprimento (ou lint), em *G*.

*hirsutum*, medem entre 25 e 32 mm, enquanto as fibras menores (linter) estão presentes apenas em determinadas espécies ou variedades, formando uma penugem que recobre total ou parcialmente os caroços (BACHELIER; GOURLOT, 2018).

Kool et al., (2017) citam a utilização de fibras de algodão como modelo sacrificial e precursores de aluminossilicatos monofásicos para a produção de nanocristais de mullite. A estrutura hierárquica da celulose permitiu a criação de um novo procedimento eficiente e econômico na síntese de mullite com precisão de nanômetros. Delbrücke et al., (2013) sintetizaram fibras de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para aplicações refratárias com excelentes resultados. Zhou et al., (2014) sintetizaram anodos de SnO<sub>2</sub> mesoporoso hierarquizado para baterias de lítio. Xie et al., (2011) relataram o processo de fabricação de microtubos de NiO, que foram empregados na atividade fotocatalítica para degradação do laranja de metileno.

#### 3.3.3. Cânhamo

O cânhamo industrial (*Cannabis sativa* L.) é uma planta extremamente versátil, com aplicações que vão desde a produção de tecidos e cosméticos até a fabricação de plásticos, papéis, biocombustíveis e materiais de construção. Sua fibra é amplamente utilizada em diversos setores industriais (SAIR et al., 2017).

A fibra do cânhamo se localiza no caule da planta e contém 70,2-74,4 % de celulose, 3,7-5,7 % de lignina, 17,9-22,4 % de hemicelulose, 0,9 % de pectina e 0,8 % de cera (MOHANTY; MISRA; HINRICHSEN, 2000). Devido ao menor teor de pectina, cera e lignina, as fibras de cânhamo têm um índice de cristalinidade mais elevado em comparação com as fibras de sisal, característica que torna a fibra menos hidrofóbica (HAJIHA; SAIN; MEI, 2014).

A literatura relata a utilização de cânhamo na fabricação de estruturas 3D à base de fosfato de cálcio para implantes ósseos (MOCANU et al., 2021). Os autores citam que a origem vegetal da fibra, aliada ao tratamento térmico, permitiu que sua utilização fosse citocompatível, permitindo a proliferação celular no enxerto ósseo. Outra utilização relatada é a fabricação de tecido biomórfico cerâmico de SiC, com baixa densidade (1,02 g/cm<sup>3</sup>) e alta porosidade (63,7%) (JIANG et al., 2017a). Jiang et al., (2017b) também utilizaram o tecido de cânhamo como modelo para a produção de cerâmicas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com a estrutura oca e celular das fibras de cânhamo.

#### 3.3.4. *Luffa cylindrica* (L. *cylindrica*)

Vegetal único, originário de uma planta trepadeira da família Cucurbitáceas, a *Luffa cylindrica*, também conhecida como esponja vegetal ou cabaça, é uma planta subtropical vastamente cultivada no Brasil, EUA, Ásia, África e Índia (ADEYANJU et al., 2021; OBOH; ALUYOR, 2009; SANTOS; KOZLOWSKI JUNIOR, 2019). É um vegetal usado na alimentação, mas também pode ser utilizado na confecção de forros, tapetes, embalagens, esponjas de banho, esponjas de limpeza, etc. (DEMIR et al., 2008; LAIDANI; HANINI; HENINI, 2011; OBOH; ALUYOR, 2009).

Tanto as fibras quanto o fruto seco (esponja) inteiro da *Luffa cylindrica* são usados como modelos macroscópicos altamente complexos, sendo um recurso barato e amplamente disponível para utilização (SUTHARSHANA, 2013). Mazali e Alvez, (2005) descreveram o uso do fruto para a confecção de réplicas inorgânicas de hidroxiapatita de rede fibrosa. A combinação de argila, feldspato K e areia foi usada para a produção de cerâmica reticulada com morfologia idêntica à da esponja vegetal utilizada como molde (SILVA et al., 2009). Santos et al., (2014) replicaram a esponja para produzirem dissilicato de ítrio poroso no método da réplica. Outros estudos envolvendo a esponja demonstram a versatilidade do modelo para obtenção de réplicas complexas (PORSANI et al., 2019; SANTOS et al., 2016).

#### 3.3.5. Bagaço de cana-de-açúcar - BCA

A cana-de-açúcar é o nome genérico dado a um grupo de plantas da Família das Poaceae, tribo Andropogoneae, membros da subtribo Saccharinae. Em 1753, Linnaeus foi o primeiro a descrever no livro *Species Plantarum* o gênero *Saccharum* sendo este dividido por morfologia de sua inflorescência e atualmente, é citado na literatura seis espécies de *Saccharum*: *Saccharum spontaneum* L., *Saccharum robustum* B., *Saccharum barberi* J., *Saccharum edule* H., *Saccharum officinarum* L. e *Saccharum sinense* R. (MOORE; PATERSON; TEW, 2013).

A cana-de-açúcar é uma gramínea originária do Sudeste Asiático, sendo uma espécie perene que se desenvolve em forma de touceira, podendo produzir por 5 a 7 anos com implantação e manejo relativamente fáceis (SILVA et al., 2017). Sua parte aérea é constituída por folhas, colmo e inflorescência (MARAFON, 2012).

Sendo uma planta típica de climas tropicais e subtropicais, a cana-de-açúcar prosperou, tornando-se uma das culturas mais cultivadas no mundo. Os principais países produtores são China, Índia, Tailândia, Paquistão, México e Brasil, sendo este último o maior produtor, com plantios em todas as regiões do país, e a principal matéria-prima do setor sucroalcooleiro brasileiro. Do processamento da cana nas usinas, os principais resíduos sólidos gerados são o bagaço e a torta de filtro (CHINGONO et al., 2018; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ et al., 2017).

O bagaço de cana-de-açúcar (BCA), Figura 3, é um resíduo lignocelulósico fibroso resultante do esmagamento dos colmos (caule) da cana-de-açúcar nas moendas para extração do caldo e posterior produção de açúcar e álcool (MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ et al., 2017). A composição do BCA varia pouco e, dentre outros fatores, depende da variedade da cana a ser processada, podendo apresentar de 44,5-48 % de fibras lignocelulósicas, de 45-50 % de teor de umidade e de 2-2,5 % de sólidos solúveis em água (ALCARDE, 2020; JOHN; THOMAS, 2008). O teor de SiO<sub>2</sub> na cana-de-açúcar vem principalmente do solo, sendo o ácido ortosilicato armazenado nos caules e folhas (QADRI et al., 2013). Seus constituintes macromoleculares estruturais são representados por 32-48 % de celulose, 19-24 % de hemiceluloses e 23-32 % de lignina (COSTA et al., 2021a). Essa fibra vegetal, de acordo com Amaral e Tavares (2013), possui cerca de 95 % de parede celular, constituindo assim uma biomassa residual importante para indústria sucroalcooleira devido a extensão dos cultivos da cana-de-açúcar e de sua produtividade no Brasil.



Figura 3 - Pilhas de bagaço de cana-de-açúcar em usina do interior paulista.

Fonte: (PIVETTA, 2023).

Segundo levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), na safra de 2022/2023 foram destinados 8.288,7 mil hectares para o plantio de cana-de-açúcar, com uma produtividade de 73.609 kg.ha<sup>-1</sup>, resultando na colheita de 610,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Esse aumento na área colhida, juntamente com a alta produtividade por hectare, impacta diretamente na produção de bagaço de cana-de-açúcar (BCA) no Brasil.

Considerando que cada tonelada de cana processada gera entre 0,25 e 0,28 tonelada de BCA, estima-se que o setor sucroalcooleiro brasileiro tenha alcançado a marca de 152,52 a 170,83 milhões de toneladas de BCA apenas na safra 2022/2023 (ALBUQUERQUE et al., 2019; ALCARDE, 2020; BAÊTA et al., 2016; BONASSA et al., 2015; CONAB, 2023; ROCHA et al., 2015).

#### 3.3.5.1 Aplicações do BCA

O bagaço de cana (BCA), antes considerado um resíduo a ser descartado, tornou-se um recurso de grande valor para a indústria sucroalcooleira. Seus múltiplos usos o transformaram em um subproduto estratégico. A geração de energia térmica e elétrica nas usinas é a aplicação mais evidente, mas o BCA também serve como matéria-prima para diversas outras áreas, como a produção de biocombustíveis, papel, cosméticos e materiais de construção. Essa versatilidade demonstra o potencial do BCA em reduzir o impacto ambiental e gerar renda para o setor (ALCARDE, 2020; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ et al., 2017).

#### <u>Cerâmicas</u>

A utilização de resíduos agroindustriais para a produção de cerâmicas já é bem conhecida na literatura e tem como finalidade a formação de poros na produção de cerâmicas (SALLEH et al., 2021). O material cerâmico poroso é formado devido à eliminação do material orgânico, que deixa vazios na matriz cerâmica durante a etapa de calcinação (DELE-AFOLABI et al., 2018).

A presença de silício em sua forma de sílica (SiO<sub>2</sub>) nas cinzas do BCA é relatada na literatura (DELE-AFOLABI et al., 2017; GUO; LU; FENG, 2010; MOHANTA et al., 2014; SOUZA et al., 2011) como um agente formador de poros na produção de cerâmicas, devido à retenção da sílica dentro da matriz após o esgotamento dos materiais orgânicos, o que é benéfico para a produção de cerâmicas porosas. Estudos mostram a utilização do bagaço em forma de cinza para a produção de cerâmicas dos mais variados tipos (CARDOSO et al., 2015; DELE-AFOLABI et al., 2018; JAMALLUDIN et al., 2018; SILVA et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2014, 2008).

Jamalludin et al., (2019) estudaram o desenvolvimento de membranas cerâmicas de alumina derivada de resíduo de bagaço de cana-de-açúcar para atuar como separador-sorvente de óleo híbrido em misturas reais de óleo e água. Andrade et al., (2019) estudaram o desenvolvimento de membranas cerâmicas de baixo custo para microfiltração que utilizavam cinzas de bagaço como agente formador de poros. Por sua vez, Basu et al., (2014), confeccionaram membranas cerâmicas com resíduos de BCA para tratamento de águas residuais ricas em nitrato mostrando a grande versatilidade do bagaço para a produção de cerâmicas.

#### <u>Geração de energia</u>

O setor sucroalcooleiro não se ocupa apenas da produção de açúcar e álcool. Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2022, a capacidade instalada para geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) foi de 11.862 MW, resultando em uma geração de 32.262 GWh, o que corresponde a 4,5 % da oferta total de energia produzida no Brasil em 2022, Figura 4 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023).



Figura 4 - Oferta Interna de Energia Elétrica 2022 - (%).

Fonte: Adaptado de (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023).

Tamanha produção só é possível, entre outros fatores, porque uma parte significativa desse resíduo agroindustrial, cerca de 90 %, é utilizada como combustível nas caldeiras para geração de energia. Isso atende às necessidades energéticas do setor sucroalcooleiro, e o excedente energético é vendido para concessionárias de energia ou outros setores (ASSAD, 2017; CONAB, 2011). O restante da produção de bagaço de cana-de-açúcar (BCA) é vendido em formato de pellets ou fardos para outros atores que o utilizam em seus processos.

#### Produção de etanol de segunda geração

Um exemplo de uso do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) além da produção de energia térmica e elétrica é sua modesta utilização na produção de etanol. Segundo Costa et al., (2021) iniciativas que visam à utilização dos resíduos da cana, palha e BCA para produção de etanol de segunda geração já estão em curso. Focando na produção e desenvolvimento de tecnologias avançadas para processamento e produção de etanol oriundo de matéria-prima lignocelulósica, Brasil e Europa se uniram em 2013 para criar o projeto PROETHANOL2G. No caso brasileiro, o projeto se baseia na integração das tecnologias 2G à tecnologia 1G já existente e no conceito de biorrefinaria, que utilizará a palha da cana e o BCA para produção de açúcar, etanol e eletricidade (PROETHANOL2G, 2015).

A conversão do BCA para etanol normalmente consiste em quatro etapas: prétratamento, hidrólise enzimática, fermentação e destilação (SABIHA-HANIM; ASYIKIN ABD HALIM, 2019). É na fase da hidrólise que seus constituintes mais valiosos (pentoses e hexoses) são extraídos e passam por um processo de fermentação até a obtenção do etanol (CHANDEL et al., 2019). No entanto, o processo ainda é oneroso para a indústria devido às tecnologias envolvidas não estarem suficientemente maduras, o que eleva os custos de produção e pode inviabilizar as plantas industriais (COSTA et al., 2021). Um exemplo disso é a existência de apenas duas plantas industriais produzindo etanol de segunda geração no Brasil: GranBio, localizada em Alagoas, e Raízen, localizada em São Paulo, ambas utilizando resíduos da cana para produção de etanol 2G (NETO; GUIMARÃES; FREIRE, 2018).

#### Produção de papel

No Brasil e no mundo, o setor de papel e celulose é fortemente dependente de matériasprimas provenientes de recursos florestais (PEGO; BIANCHI; VEIGA, 2019). Devido ao grande crescimento do mercado consumidor e à limitação das fontes de recursos florestais, pesquisadores passaram a considerar fontes alternativas de recursos não lenhosos, especialmente subprodutos agrícolas como o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), para extração de celulose (EUGENIA EUGENIO et al., 2019). Em países como Índia e China, a utilização de gramíneas como o BCA compõe cerca de 70 % das matérias-primas utilizadas na produção de celulose e papel (ASHORI, 2007; LIU; WANG; HUI, 2018). Mamaye et al., (2019) relataram que as dimensões das fibras, juntamente com o alto teor de celulose, tornam o BCA apropriado para uso na indústria de papel, sendo possível produzir 0,3 toneladas de papel a partir de uma tonelada de bagaço (AMIN, 2011). Embrulhos de boa qualidade e papel para revistas podem ser produzidos com uma alta porcentagem de BCA como matéria-prima (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 1986).

#### Cosméticos

A indústria de cosméticos também se beneficia do uso do bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Um estudo conduzido por Ratanasumarn e Chitprasert (2020) sugere que a extração de lignina proveniente do BCA tem grande potencial como ingrediente bioativo em formulações, oferecendo propriedades antienvelhecimento, proteção solar e clareamento da pele. Silva et al., (2011) avaliaram a extração e o comportamento da carboximetilcelulose obtida do BCA e concluíram que o composto apresentou propriedades satisfatórias para uso na indústria cosmética.

#### Construção Civil

Na construção civil, a versatilidade do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) torna-o um candidato para substituir retardantes químicos no concreto quando adicionado na sua forma *in natura*, aumentando o tempo de pega. Além disso, a adição das fibras *in natura* de BCA proporciona um aumento significativo na resistência do concreto nos quesitos tração e compressão, quando comparado ao concreto sem a adição das fibras, além de diminuir o peso. (RIBEIRO; YAMASHIKI; YAMAMOTO, 2020; SHEIKH KHALID; HERMAN; AZMI, 2017; YAHYA et al., 2015).

Até mesmo a cinza resultante da combustão de BCA nas caldeiras das usinas é utilizada na área da construção civil. Em geral, a cinza de BCA é um material rico em sílica (SiO<sub>2</sub>) sendo, portanto, uma fonte alternativa para extração de sílica (CHINDAPRASIRT; RATTANASAK, 2020). Sua adição ao concreto visa aumentar a resistência a tração e compressão deste, reduzir a permeabilidade à água, substituir a areia e dar destinação adequada ao volume de cinza gerado visto pois, que uma tonelada de bagaço gera 3 % de cinza que normalmente é descartada em aterros sanitários ou utilizada como fertilizante (AMIN, 2011; (RIBEIRO; YAMASHIKI; YAMAMOTO, 2020; SALES; LIMA, 2010).

#### Compósitos poliméricos

Diversos estudos investigaram a utilização de BCA tanto na sua forma *in natura* (BRUGNAGO et al., 2011; HUANG et al., 2011; MONTEIRO et al., 1998; MOTHÉ et al., 2002; RIYAJAN; INTHARIT, 2011; STAEL; TAVARES, 2001) quanto a utilização apenas de suas fibras (CERQUEIRA; BAPTISTA; MULINARI, 2011; GOMES DE PAULA et al., 2014; LU et al., 2006; LUZ; CALDEIRA-PIRES; FERRÃO, 2010; MARTINS et al., 2014; MOUBARIK; GRIMI; BOUSSETTA, 2013; VERMA et al., 2012; VILAY et al., 2008) em matrizes poliméricas baseadas em resinas termofixas e termoplásticos como PE (AGUNSOYE; AIGBODION, 2013), PU (FIORELLI; BUENO; CABRAL, 2019), PLA (LIU et al., 2019a), PP (FERREIRA et al., 2019; LUZ et al., 2008) e PVC (SANJAY et al., 2018) visando obter reforço estrutural. Tamanha busca por aplicações se deve a sua produção massiva e global, baixo custo, a resistência mecânica substancial de suas fibras e sua baixa densidade tornando- o candidato ideal para aplicações que envolvam reforço de compósitos poliméricos (DÍAZ-RAMÍREZ; MARADEI; VARGAS-LINARES, 2019).

Verma et al., (2012), citam que o BCA, o linho, a juta e a fibra do coco são as fibras mais importantes para a indústria devido a sua versatilidade de aplicação de design, eficácia de custo, ausência de riscos à saúde e possibilidade de reciclagem sendo bastante usado no setor automotivo na manufatura de peças (AKHSHIK et al., 2019).

#### Síntese de materiais catalíticos

Há uma grande variedade de usos para o bagaço de cana-de-açúcar (BCA) em distintas rotas de síntese. Um estudo conduzido por Bingre et al., (2019) buscou averiguar a flexibilidade de usos do BCA na síntese de zeólitas ZSM-5, por meio do hidrolisado obtido do BCA, e na síntese de hidróxidos lamelares (HDLs) através da adição de BCA durante a etapa de co-precipitação. O trabalho dos autores mostrou resultados positivos quanto à utilização dessa biomassa para a produção dos materiais citados.

Ocampo et al., (2010) cultivaram nanocristais de zeólita ZSM-5 na superfície de resíduos de cana-de-açúcar, utilizando-os como modelos sacrificiais para a formação adequada de cristais de zeólita por meio de interações supramoleculares. Foram preparados nanocristais retangulares de ZSM-5, com tamanhos entre 50 e 100 nm, utilizando o bagaço de cana-de-açúcar como *template*.

Ainda no campo das zeólitas, Gomes et al., (2018), prepararam zeólitos ZSM-5 utilizando BCA com a estratégia de modelo secundário de origem biologica, através da técnica de hidrólise alcalina da biomassa de BCA, resultando em catalisadores ZSM-5 com alta área especifica e vários sítios ácidos de Brønsted, e o catalisador foi capaz de converter metanol em olifinas leves. Outros estudos indicam grande sucesso na síntese de zeólitas utilizando o BCA como modelo (GOMES et al., 2017; LOUIS et al., 2016), ou utilizando suas cinzas (RILYANTI et al., 2021).

Estudos mostram a viabilidade de BCA na síntese de suportes para aplicações em fotocatalise (CHANNEI; NAKARUK; PHANICHPHANT, 2017; JANIPOOR; MOHAGHEGHIAN; SHIRZAD-SIBONI, 2022). Tseng et al., (2022) produziu catalisadores de nitreo de carbono grafítico (gCN) para aplicação fotocatalítica. Em estudo, El-Salamony et al., (2017), demonstraram a utilização de BCA como suporte de nano partículas de TiO<sub>2</sub> na produção de fotocatalisadores usados na adsorção e fotodegradação simultânea de azul de metileno sob radiação UV e luz visível.

Já é relatado na literatura a utilização de BCA para produção de  $\gamma$ -alumina altamente porosa com elevada área específica através da hidrólise prévia do BCA (CARDOSO et al., 2015); na síntese de catalisadores de carbono funcionalisados com SO<sub>3</sub>H para reações de acetalização, alquilação e alcoólise com excelente estabilidade (RAVI; BIRADAR, 2022); como hidrocarvão para ancorar partículas de níquel para reforma a seco de metano com dióxido de carbono (ZHAO et al., 2021) e como complexo trifuncional contendo háfnio, BCA e ácido metanossulfônico onde o BCA tem papel de ligante natural no catalisador utilizado para hidrogenação de transferência catalítica de ácido levulínico para  $\gamma$ -valerolactona (HUANG et al., 2021).

Outros estudos mostram a versatilidade do uso de BCA *in natura* ou de seus constituintes como material catalitico para aplicações: de síntese de anéis heterocíclicos (KAZEMINAVA; TAVAKOLI, 2022), na oxidação aeróbica seletiva de álcoois e síntese oxidativa em tandem de quinazolinonas (RASHIDI VAHID et al., 2022), na produção de ésteres metílicos de óleo de semente de pinhão-manso (BASUMATARY et al., 2021), em processos de transesterificação (ABDUL MUTALIB et al., 2020; NAZIR et al., 2021; NIJU et al., 2019),

na esterificação de ácidos graxos (AKINFALABI et al., 2020; EZEBOR et al., 2014; GO et al., 2022; VARÃO et al., 2022), na esterificação em fase líquida de ácido acético com n-amil, benzil, e n-álcoois butílicos (GODA; SAID; EL-AAL, 2022), de síntese de derivados de 1,4dihidropirano[2,3c]pirazol (PANDEY; KUMAR; SHRIVASTAVA, 2021), na síntese de Fischer-Tropsch (BAI et al., 2021), na síntese de catalisadores de nanofolhas de carborno dopadas com Ni@N para na aminação redutiva de nitroarenos com aldeídos bioderivados através da síntese (RAVI et al., 2020), na carboxilação catalítica de vários epóxidos e aziridinas com CO<sub>2</sub> (CHEN et al., 2015), na oxidação de n-hexano e n-heptano (BALZER et al., 2017), na reforma a seco de CO<sub>2</sub> (LIANG et al., 2019) e na reforma a seco do metano e dioxido de carbono (HAN et al., 2019).

# 4 USOS DE MATERIAIS CATALÍTICOS COM DIMENSÕES PREDETERMINADAS

O uso de catalisadores visa melhorar a eficiência dos processos, reduzindo a energia necessária para a ocorrência de uma reação química. Além disso, eles aumentam a velocidade dessa reação e direcionam a produção de produtos químicos desejados, sendo amplamente estudados e utilizados pela indústria química. Até mesmo rotas de síntese estabelecidas, como a síntese de Fischer-Tropsch, continuam sendo estudadas com o objetivo de otimizar os processos (MOHANTY et al., 2014).

Na indústria química que faz uso da catálise heterogênea, os catalisadores comumente encontrados nessa área são metais com alta área específica, metais suportados em sólidos de alta área específica, óxidos metálicos, zeólitas, argilas, haletos metálicos, resinas aniônicas, etc (BERNARDO-GUSMÃO; PERGHER; SANTOS, 2017).

Os catalisadores sólidos que são suportados por sólidos menos ativos e desenvolvidos por processos específicos, atuam como a fase ativa e são distribuídos sob a superfície desses sólidos, normalmente óxidos, para permitir a união entre a eficiência e eficácia do conjunto onde várias pesquisas com foco nesse tipo de sistema catalítico vem sendo desenvolvidas visando a sua aplicação em diferentes áreas (HUANG et al., 2019; ZHANG et al., 2020; YU et al., 2020; ZHAO et al., 2020; WANG et al., 2020; XIAO et al., 2020; LIU et al., 2019b).

As vantagens do uso de catalisadores sólidos referem-se à facilidade de separação e purificação dos produtos de interesse, recuperação do catalisador usado com possibilidade de utilização deste em novas reações, regeneração do leito catalítico e rápida troca dos suportes usados (ZOPPAS et al., 2018). As desvantagens ficam por conta da desativação do catalisador

devido à deposição de impurezas sobres os sítios ativos, sinterização da fase ativa metálica (AHMED; AWADALLAH; ABOUL-ENEIN, 2016) e limitações de transferência de massa de produtos e reagentes (OCAMPO et al., 2010).

Quando o catalisador tem suas dimensões predeterminadas, tipo pellets, podem contribuir no processo de catalise devido alta área superficial específica, baixa queda de pressão (PAPETTI et al., 2018) e propriedades ajustáveis de transferência de calor (BUSSE; FREUND; SCHWIEGER, 2018). Além disso, as redes de células abertas são caracterizadas por caminhos tortuosos que aumentam as interações gás-parede e contribuem para uma menor inércia térmica resultando em conversão mais elevadas (PAPETTI et al., 2018). Outra característica é a possibilidade de assumir diferentes formatos e com diferentes composições químicas que otimizem seu uso nos mais variados processos sendo amplamente utilizados em aplicações catalíticas ambientais onde catalisadores estruturados baseados em espumas metálicas de células abertas oferecem uma alternativa viável aos reatores de leito compactado (BALZAROTTI et al., 2021; JAWORSKI et al., 2019).

Por apresentar características como resistência ao desgaste, alta inércia química, bom comportamento à altas temperaturas, baixo custo e grande disponibilidade, materiais à base de alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, são bastante utilizados na área de catálise como suporte catalítico (EDLMAYR et al., 2010; KELLER; MATSUMURA; SHARMA, 2020; MILAK et al., 2015; MO et al., 2015; MOHANTY; GANGOPADHYAY; THAKUR, 2016; SAID; MIKHAIL; RIAD, 2019; SZCZYGIEŁ; KOŁODZIEJ, 2005). O campo de aplicações envolvendo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é de grande interesse por parte de desenvolvedores de catalisadores industriais, visto que sua empregabilidade tanto como catalisadores para algumas reações, como principalmente, suporte de catalisadores é bastante vantajosa. A seguir, são listadas algumas aplicações que fazem uso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em seus processos.

#### 4.1. Oxidação de compostos orgânicos voláteis (COVs)

As emissões gasosas de compostos orgânicos voláteis (COVs) são causa de problemas ambientais devido a sua alta toxicidade e sua alta persistência no ambiente (JI et al., 2017; KAMAL; RAZZAK; HOSSAIN, 2016; LIOTTA, 2010). Além disso, a exposição contínua de seres humanos a esses compostos pode levar a causa de doenças graves com consequente degradação da qualidade de vida, ao passo que pressiona os sistemas de saúde localizados nas regiões das emissões (HE et al., 2015; VILLANUEVA et al., 2015).

A oxidação catalítica tem sido proposta como uma das formas mais eficazes na redução de COVs devido ao seu baixo custo energético e operacional, alta eficiência de destruição dos compostos e baixas emissões de NOx (CHEN et al., 2017; KAMAL; RAZZAK; HOSSAIN, 2016). Para tanto, pesquisas indicam que a utilização de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como suporte para reações catalíticas visando à oxidação desses compostos mostram bons resultados. Por exemplo, KIM et al., (2009), descobriram que os catalisadores bimetálicos de Pt-Au suportados em ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produziram uma maior atividade para a oxidação completa do tolueno em comparação com os catalisadores monometálicos de Pt ou Au. YANG et al., (2016), fabricaram (Ag, Au, Pd, Pt)/3DOM CeO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para oxidação de tolueno por meio de um roteamento de modelos duplos que possuem maior atividade catalítica para oxidação do tolueno. Outras pesquisas também dão conta da utilização de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na catalise oxidativa de COVs (ZHANG et al., 2017; LIU et al., 2018; KANG et al., 2019; CHEN; MAO; ZHOU, 2019; EINAGA; FUTAMURA, 2004; PITKÄAHO et al., 2013; ŽUMBAR et al., 2021).

### 4.2. Hidrogenólise do glicerol

O glicerol gerado como subproduto da produção de biodiesel tem baixo valor comercial sendo parte da produção descartada como resíduo que pode representar risco ao meio ambiente. Esse glicerol bruto contém grande quantidade de contaminantes como álcoois residuais, ácidos graxos, sólidos suspensos e sabonetes contribuindo para uma alta demanda biológica de oxigênio (DBO) e alto teor de demanda química de oxigênio impactando negativamente o meio ambiente (XIE et al., 2012). É também um subproduto inevitável da produção de biodiesel equivalendo a 10 % em massa com esse excedente superando a demanda atual do mercado, levando a uma queda constante no preço (NUMPILAI et al., 2021).

Atualmente um dos métodos de valorização do glicerol é a hidrogenólise para produção seletiva de 1,3-propanediol. Estudos recentes mostram que a utilização de espécies metálicas suportadas em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são bastante utilizadas para obtenção do 1,3-propanediol a partir do glicerol (AIHARA et al., 2017; AIHARA; MIURA; SHISHIDO, 2020; GARCÍA-FERNÁNDEZ et al., 2017; LEI et al., 2020; LELO et al., 2021; NUMPILAI et al., 2021; SERETIS; TSIAKARAS, 2016; WANG; YANG; WANG, 2020; ZHU et al., 2015).

#### 4.3. Hidrodessulfurização

O petróleo em seu estado bruto contém em sua composição enxofre e, segundo as especificações hoje vigente em diversos países, teores cada vez menores de enxofre estão sendo exigidos (JAVADLI; KLERK, 2012). A hidrodessulfurização (HDS) é o método mais comum utilizado na indústria do petróleo para reduzir o teor de enxofre do petróleo bruto. Na maioria dos casos, a HDS é realizada por meio da alimentação conjunta de óleo e H<sub>2</sub> a um reator de leito fixo embalado com um catalisador HDS apropriado. Os catalisadores HDS padrão são NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mas existem muitos outros tipos disponíveis. Durante a HDS, o enxofre nos compostos organossulfurados é convertido em H<sub>2</sub>S (JAVADLI; KLERK, 2012).

Liu et al., (2021) utilizaram a técnica HDS em dibenzotiofeno com maior conversão de HDS do dibenzothiofene (97,7 %) com uma seletividade de bifenil dominante (96,7 %) foram adquiridas para os catalisadores Pt/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incorporados com Fe. Já Wang et al., (2021) usaram a mesma técnica com catalisadores de sílica-alumina (SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ordenados em camadas (LOMM) mudando a morfologia dos suportes para que parecessem bandejas de ovos e obtiveram um desempenho de 27 % na HDS do dibenzotiofeno. Outros autores (AL-DALAMA; STANISLAUS, 2006; DÍAZ DE LEÓN et al., 2020; KAZAKOVA et al., 2021; LIU; LI; YAN, 2012; ZHANG et al., 2019) reportaram resultados promissores com a utilização de suportes de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no processo de HDS.

#### 4.4. Desidrogenação

É o processo de eliminação de hidrogênio de compostos químicos sendo a desidrogenação catalítica uma das rotas utilizadas para obtenção de hidrocarbonetos aromáticos. O processo industrial atual é dependente de catalisadores de óxidos de platina ou cromo (OTROSHCHENKO et al., 2021; SATTLER et al., 2014), possuindo como desvantagem os custos elevados e a sensibilidade a várias impurezas (CHENG; NOTESTEIN, 2021).

A desidrogenação tem importante papel na valoração de alcanos leves transformados em matérias-primas para a indústria química. A desidrogenação e desativação do isobutano com catalisadores de MoO<sub>x</sub>/K-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi investigada em recente estudo (CHENG; NOTESTEIN, 2021). He et al., (2009) investigaram o efeito do suporte de alumina no desempenho dos catalisadores de Pt-Sn-K/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para desidrogenação n-octadecano visando sua aplicação industrial. Em recentes estudos (RIMAZ et al., 2021; SHAN et al., 2021), foi investigado a seletividade aprimorada de catalisadores de Pt-Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e das fases da alumina
de catalisadores Vo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para desidrogenação do propano para obtenção de propileno. Processos catalítico de desidrogenação usando Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como suporte foram também investigados para eteno (BATCHU et al., 2021), butano (SAXENA; DE, 2021) e mistura eutética à base de bifenil (KWAK et al., 2021).

#### 4.5. Decomposição catalítica do metano

O hidrogênio  $(H_{2(g)})$  é um produto químico valioso, amplamente utilizado em diversos processos como gás industrial e matéria-prima com usos extensivos na indústria sendo usado na produção de metanol, de amônia, em células combustível, etc. Ele é um transportador de energia tanto para fornecer quanto para armazenar a energia disponível, podendo ser rapidamente transformado em energia ao ser usado células de combustível ou usado diretamente em veículos (VEDYAGIN et al., 2021).

O metano (CH<sub>4</sub>) é a principal fonte para a produção de H<sub>2</sub>. Atualmente, cerca de 90 % da produção mundial de hidrogênio é derivada do CH<sub>4</sub>. A reforma a vapor do metano é o método mais popular, atendendo aproximadamente 50 % da demanda global de hidrogênio, com o restante sendo produzido por meio da oxidação parcial do petróleo, da gaseificação do carvão e da eletrólise da água (FAN et al., 2021; HAMEED; COMINI, 2024). No entanto, o metano é uma molécula estável que, devido à sua estrutura tetraédrica simétrica e ligações sigma, requer temperaturas extremamente altas (acima de 1200 °C ) para se decompor na ausência de catalisadores (GAMAL et al., 2021).

Um dos métodos mais eficientes para a produção de hidrogênio puro e livre de COx é a decomposição catalítica do metano (DCM). A demanda total de energia e calor requerida pela reação de DCM é muito menor do que a necessária para outros processos, como a reforma a seco, a reforma a vapor do metano e a eletrólise da água, Figura 5. Isso é de grande importância para reduzir a temperatura operacional e os custos operacionais do equipamento (FAN et al., 2021).

**Figura 5** - Principais vias de produção de hidrogênio, seus balanços energéticos e quantidades de produtos.



<sup>(a)</sup>WGS – Water Gas Shift, etapa que busca converter o CO em CO<sub>2</sub> ao reagi-lo com vapor de água. Fonte: Adaptado de: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022)

A reação de decomposição catalítica do metano (DCM) é endotérmica e baseia-se na decomposição do metano em gás hidrogênio e carbono sólido, conforme a equação:  $CH_{4(g)} \rightarrow 2H_{2(g)} + C_{(s)} + \Delta H_{298k}^0 = 74,52 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . O desenvolvimento do processo de DCM voltado para a indústria está focado na formação de carbono na superfície do catalisador e na sinterização do suporte do catalisador e da espécie ativa durante o processo (RASTEGARPANAH et al., 2018).

No processo de decomposição do metano, as principais etapas envolvem a adsorção do metano no sítio ativo, a nucleação de espécies carbonáceas e o crescimento de nanotubos ou nanofibras de carbono. O processo é iniciado quando o metano reagente é quimissorvido molecularmente no sítio ativo, X, e subsequentemente dissocia-se para formar espécies C-X e H-X. Na presença de partículas metálicas (catalisadores à base de metal), o átomo de carbono nas moléculas de metano liga-se aos átomos metálicos coordenativamente insaturados, resultando na formação de ligações  $\sigma$  M-C. A extensão dessa interação pode ser amplamente ajustada pelo tipo de óxidos de suporte. Posteriormente, as quatro ligações C-H fragmentadas da molécula de metano quimissorvida são progressivamente dissociadas, levando à formação

de H<sub>2</sub> e carbono sólido. O mecanismo de decomposição do metano é ilustrado na Figura 6 (PHAM et al., 2022).



Figura 6 - Mecanismo de decomposição do metano.

Fonte: Adaptado de (PHAM et al., 2022)

Para reduzir a energia de ativação da reação de decomposição catalítica do metano (DCM) e obter um rendimento considerável de hidrogênio, o uso de catalisadores é necessário. De acordo com estudos anteriores, a ordem das taxas de decomposição do metano em catalisadores metálicos segue a sequência: Ni, Co, Ru, Rh > Pt, Re, Ir > Pd, Cu, W, Fe, Mo (ASHIK; WAN DAUD; ABBAS, 2015; FAN et al., 2021).

Em relação aos catalisadores suportados entre esses metais, os catalisadores à base de Co, Ni e Fe são comumente usados para estudar a decomposição do metano devido ao seu custo relativamente baixo, alta disponibilidade e grande eficácia. No entanto, os catalisadores à base de Ni parecem ser mais ativos do que os catalisadores à base de Fe e Co em baixas temperaturas, de 500 a 700 °C, tornando o uso de catalisadores à base de Ni mais atrativo para a decomposição do metano (PHAM et al., 2022).

Por outro lado, catalisadores de Ni são rapidamente desativados devido a rápida agregação e encapsulamento da partícula metálica por carbono em temperaturas acima de 600 °C (YAN; KETELBOETER; CAI, 2022). Catalisadores de ferro e cobalto são mais estáveis a

elevada temperatura (> 650 °C) e produzem materiais carbonáceos de maior valor, no entanto, tem uma menor atividade catalítica (ALVES; PEREIRA; LAGARTEIRA, 2021).

A excelente atividade catalítica exibida pelos metais de transição, notadamente Ni, Co e Fe, deve-se aos seus orbitais *3d* parcialmente preenchidos, que podem promover a dissociação de moléculas de hidrocarbonetos ao aceitar parcialmente elétrons. A transferência de elétrons do catalisador para os orbitais antiligantes das moléculas adsorvidas altera a estrutura eletrônica do adsorvente, facilitando a dissociação (FAN et al., 2021).

Quando espécies metálicas são depositadas em diferentes suportes, o desempenho catalítico depende dos tipos de suportes, pois a interação entre eles altera a estrutura ou o estado eletrônico das espécies metálicas (TAKENAKA et al., 2001). A interação metal-suporte é um dos principais fatores que contribuem para a atividade catalítica, promovendo a dispersão da fase ativa e, portanto, a decomposição aprimorada do metano, menor sinterização e formação de coque (PHAM et al., 2022).

Amplos estudos vêm sendo conduzidos para melhorar a atividade catalítica e a estabilidade do processo de DCM sendo os catalisadores de Ni suportados em óxidos metálicos avaliados em condições de reação devido as suas propriedades únicas na clivagem de hidrocarbonetos e o seu baixo custo de aquisição (AWAD et al., 2020; AWADALLAH et al., 2016; BERROCAL et al., 2010; FAKEEHA et al., 2018; FAN et al., 2021; RASTEGARPANAH et al., 2018; TEZEL; FIGEN; BAYKARA, 2019; TURSUNOV et al., 2020; UPHAM et al., 2017; WANG et al., 2020a; XU et al., 2021).

Visando explorar o potencial uso do bagaço de cana-de-açúcar como *template* para produção de suporte catalítico com dimensões predeterminadas para catalisadores à base de Ni, este trabalho estudou a aplicação, do suporte de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em catalisadores à base de Ni e sua aplicação na DCM.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

A produção dos suportes catalíticos à base de alumina foi realizada nas dependências do Laboratório de Biocombustíveis e Energia (LABEN), onde também foram realizados os testes catalíticos. As caracterizações dos materiais sintetizados, tanto antes quanto após as reações catalíticas, foram conduzidas nas dependências do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), no Laboratório do Grupo de Catálise e Reatividade Química (GCar), ambos localizados no campus A. C. Simões da Universidade Federal de Alagoas.

## 5.1. Tratamento prévio do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar foi recolhido no início de agosto, logo após o descarte, na usina de açúcar e álcool Porto Rico, localizada na zona rural do município de Campo Alegre - AL. A usina cultiva diferentes variedades de cana-de-açúcar em sua lavoura, predominando as variedades RB 92579 e RB 951541. Portanto, o bagaço recolhido apresentou uma mistura das diversas variedades de cana encontradas na lavoura da usina. O material foi seco a 100 °C durante 24 horas para retirada do excesso de umidade, utilizando o método de estufa (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). O teor de umidade foi quantificado utilizando uma balança de secagem da marca Marconi®, modelo ID 50, ajustada a 100  $\pm$  1 °C, com 3 g de amostra de bagaço, até obtenção de massa constante. Após a secagem, o bagaço foi triturado em um moinho de martelo industrial (IRMÃOS LIPPEL & CIA. LTDA, modelo MM | 400), peneirado em peneira com abertura de malha de 2,5 mm (~8 mesh), e esse material tratado foi nomeado como dry-bagaço de cana-de-açúcar (Dry-BCA).

## 5.2. Síntese dos materiais catalíticos com dimensões predeterminadas

A alumina biomórfica com dimensões predeterminadas foi obtida utilizando o método da réplica, adaptando a metodologia descrita por Delbrücke et al., (2013). A cerâmica resultante, utilizada como suporte catalítico, recebeu óxido de níquel via impregnação úmida. Inicialmente, uma solução aquosa de Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O com concentração de 7,85 mol.L<sup>-1</sup> foi preparada sob agitação a 40 °C. Em seguida, 0,5 g de Dry-BCA foram imersos em 2 mL dessa solução. Após 5 minutos de homogeneização manual, o material foi moldado em formato cilíndrico em uma prensa de empelotamento IKA – Werke (GmbH & Co KG, modelo C 21) a 11,5 kgf.cm<sup>-2</sup>, com o excesso de solução sendo removido das fibras. O material moldado foi

seco a 75 °C em estufa por 24 horas ao ar; esta amostra foi denominada BCA *template*, com dimensões médias de 1,7 cm de comprimento e 0,7 cm de diâmetro. Em seguida, o BCA *template* foi submetido a tratamento térmico sob atmosfera de ar a 450 °C por 30 minutos com taxa de aquecimento de 1 °C·min<sup>-1</sup>, 700 °C por 10 minutos com taxa de aquecimento de 5 °C·min<sup>-1</sup>, 900 °C por 180 minutos a 5 °C·min<sup>-1</sup> e 1500 °C por 60 minutos com taxa de aquecimento de 5 °C·min<sup>-1</sup> (SILVEIRA et al., 2007). A Equação 1 mostra a estequiometria da reação de decomposição térmica do nitrato de alumínio nonahidratado em etapa única (VETEC Química Fina, 98 %) para obtenção de alumina por este método (OSMAN et al., 2017). O material obtido foi denominado DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, onde "dp" significa dimensões predeterminadas.

$$2A1 (NO_3)_3.9H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 6HNO_3 + 15H_2O$$
 Equação 1

As amostras DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp foram submetidas a refluxo por 2 horas com 60 mL de água destilada e diferentes proporções mássicas de Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (Oakwood Chemical, 95 %) seguido de secagem e calcinação a 550 °C por 4 h ao ar, com taxa de aquecimento de 5 °C·min<sup>-1</sup>. Estas amostras foram denominadas de xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, onde x é referente a porcentagem em massa de Ni (5 %, 10 % e 20 %) em relação a DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp. O processo de síntese dos materiais catalíticos está ilustrado a seguir, Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do processo de síntese do suporte catalítico  $DryBCA_Al_2O_3$ -dp e dos catalisadores xNi/DryBCA\_Al\_2O\_3-dp.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

## 5.3. Síntese dos catalisadores em pó

Catalisadores de Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em pó, com e sem a presença de BCA, foram sintetizados com o objetivo de estabelecer um parâmetro de comparação para avaliar a influência da presença do BCA e da morfologia do catalisador na eficiência da reação de decomposição catalítica do metano (DCM). Para as amostras sintetizadas com o BCA, foram misturados 35 mL de água destilada com Dry-BCA, nitrato de níquel e nitrato de alumínio nonahidratado, correspondendo às proporções mássicas de 0,05:1:1 de Ni:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Dry-BCA (CARDOSO et al., 2015; OCAMPO et al., 2010). Essa mistura foi mantida sob agitação e aquecimento a 150 °C até a formação de uma pasta, que foi então seca e calcinada a 550 °C por 4 horas ao ar. O material obtido foi denominado 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p. Para a amostra sintetizada sem BCA, utilizou-se a mesma metodologia da amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, resultando na amostra 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, onde 5 corresponde à porcentagem em massa de Ni e "p" indica que o material está na forma de pó. Os processos de síntese dos catalisadores em pó estão ilustrados na Figura 8.



Figura 8 - Fluxograma do processo de síntese dos catalisadores na forma de pó.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

## 5.4. Caracterização do bagaço da cana-de-açúcar e dos materiais catalíticos

As técnicas utilizadas para caracterizar a amostra Dry-BCA foram: análise termogravimétrica (TGA) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a caracterização dos materiais catalíticos, foram empregadas as seguintes técnicas: análise termogravimétrica (TGA), adsorção e dessorção de nitrogênio líquido a 77 K, difração de raios X (DRX), redução a temperatura programada de  $H_2$  (TPR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDX), conforme descrito abaixo.

#### 5.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

A morfologia da fibra do bagaço da cana-de-açúcar e das demais amostra sintetizadas nesse trabalho foi investigada utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização e Microscopia de Materiais, da Universidade Federal de Alagoas em um microscópio eletrônico da Shimadzu, modelo SSX-550 Superscan. As amostras foram metalizadas com metalizador Sanyu Electron, modelo Quick Coater SC-701, durante 6 minutos com alvo de ouro com corrente de 10 mA.

### 5.4.2. Resistência à Compressão

A resistência à compressão uniaxial foi medida utilizando a amostra DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>dp, em uma prensa de ensaios universal (SHIMADZU AG-X plus 100 kN) à temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de carregamento de 0,1 mm.min<sup>-1</sup> e demais condições de teste conforme a norma ASTM C496/C496M – 17. As superfícies das amostras, ortogonais à aplicação da carga de compressão, foram cobertas com borracha semirígida para eliminar os efeitos do carregamento localizado, devido às variações na topografia das amostras. A área da seção transversal e a carga mecânica máxima foram usadas para calcular a resistência à compressão das amostras usando à fórmula:  $\sigma_c = 4Q/\pi d^2$ , onde  $\sigma_c$  é a resistência à compressão simples (em Mega Pascal), Q é a carga máxima alcançada (em Newtons) e d é o diâmetro da amostra (em milímetros). A densidade aparente da amostra DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp foi determinada calculando a razão entre a massa seca do material e seu volume.

### 5.4.3. Análise Termogravimétrica

As curvas termogravimétricas foram obtidas em equipamento da fabricante TA Instruments, modelo Discovery SDT 650 com taxa de aquecimento de 10 °C.min<sup>-1</sup>, vazão de ar sintético de 50 mL.min<sup>-1</sup>, faixa de temperatura da temperatura ambiente até 1000 °C com amostras moídas (granulometria inferior a 0,18 mm – 80 mesh).

#### 5.4.4. Espectrometria de raios X por dispersão de energia

As amostras foram secas em estufa a 100 °C durante 2 horas para retirada do excesso de umidade. Logo em seguida esse material foi analisado por um espectrômetro de fluorescência de raios X dispersivo de energia SHIMADZU EDX- 720, com os parâmetros de operação: atmosfera em vácuo, 15 kV (Na-Sc) e 50 kV (Ti-U), corrente de tubo de 1000  $\mu$ A e 335  $\mu$ A, respectivamente, e colimador de 10 mm.

#### 5.4.5. Difração de raios X

A análise de difração de raios X foi realizada em difratômetro Shimadzu XRD 7000 seguindo a seguinte metodologia: radiação monocromática de Cu-K $\alpha$ , varredura no intervalo de 2 $\theta$  entre 3 e 90°, com passo de 0,02° e velocidade de 2°.min<sup>-1</sup>, voltagem de 30 kV. Os difratogramas foram tratados com o auxílio do software HighScore Plus V3.0. As fases cristalinas foram identificadas comparando os picos de difração com as fichas JCPDS (Joint Committe on Powder Diffraction Standards). A cristalinidade relativa foi determinada a partir da razão entre as áreas integradas dos picos referentes às fases cristalinas da  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a área referente à fração amorfa e o tamanho de cristalito foi calculado utilizando a equação de Scherrer (ALEXANDER; KLUG, 1950). Para o tamanho de cristalito da alumina, foram selecionados os picos de difração em 2 $\theta$  = 43,3°, 35,1° e 57,5°. No caso do NiO, devido à sobreposição de picos com a alumina, foi utilizado o pico em 2 $\theta$  = 37,3°.

#### 5.4.6. Isotermas de Adsorção e Dessorção em nitrogênio líquido a 77 K

Para obtenção das isotermas de adsorção/dessorção de N<sub>2</sub> a 77 K, foi utilizado o equipamento NOVA 2200e de fisissorção da Quantachrome Instruments e as amostras foram mantidas a 200 °C sob vácuo durante 12 horas e submetidas a dessorção para livrar a superfície do catalisador do conteúdo de umidade e gases adsorvidos. Os valores da área superficial específica foram calculados conforme o método descrito por Brunauer-Emmett-Teller, enquanto a distribuição e o volume do diâmetro dos poros foram calculados com base em isotermas de dessorção empregando o método de Barrett-Joyner-Halenda (BJH) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2010).

#### 5.4.7. Redução à temperatura programada

As análises TPR foram realizadas no equipamento CHEMBET-3000 da Quantachrome Instruments. Foi utilizado 50 mg de amostra previamente tratada sob fluxo de N<sub>2</sub> a temperatura de 200 °C por 1 hora. Em seguida foi baixada a temperatura e a amostra foi submetida ao fluxo de gás de uma mistura de 5 % de H<sub>2</sub>/95 % de N<sub>2</sub> a 20 mL.min<sup>-1</sup> e realizado o aumento da temperatura até 960 °C com taxa de aquecimento de 20 °C.min<sup>-1</sup>. Um detector de condutividade térmica (TCD) foi empregado para monitorar o consumo de hidrogênio.

# 5.5. Testes catalíticos de decomposição do metano – produção de carbono ordenado e H<sub>2</sub> livre de CO<sub>x</sub>

As reações catalíticas para a decomposição do metano foram realizadas em um reator tubular vertical de quartzo, equipado com leito fixo e inserido em um forno tubular, com temperatura controlada, Figura 9. Foram utilizados 148 mg de massa de catalisador, que foi reduzida sob fluxo de H<sub>2</sub> a 600 °C, para as amostras xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e a 800 °C para amostras em pó, durante 1 hora. As temperaturas de redução das amostras foram determinadas usando os dados obtidos na análise de TPR. Após essa etapa, o sistema foi purgado com N<sub>2</sub> até o resfriamento a 500 °C. Nesse ponto, iniciou-se a passagem da mistura reacional de N<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> (6:1 v/v), com um fluxo de 35 mL·min<sup>-1</sup>, por 0,5 hora, resultando em aproximadamente 28 mg de carbono passando pelo leito catalítico. Após os testes, os catalisadores foram analisados por TGA para determinar o tipo e a quantidade de carbono depositado. Os rendimentos em hidrogênio foram calculados conforme Motta et al., (2023), com adaptações, considerando que a decomposição do metano resulta apenas em carbono sólido e hidrogênio gasoso.



Figura 9 - Linha reacional para decomposição catalítica do metano.



A partir dos dados de TGA foi estimada a produção quantitativa de material carbonáceo e H<sub>2</sub> levando em consideração a estequiometria da reação de decomposição de metano, Equação 1.

$$CH_4 \to C_{(S)} + 2H_{2(g)}, \qquad \Delta H_{298K}^{\circ} = 74,8 \ kJ. \ mol^{-1}$$
 Equação 1

Assim, os cálculos são baseados na quantidade de carbono depositado no catalisador. A massa de carbono fornecida durante a reação é calculada de acordo com a Equação 2.

$$M_{CReact} = \frac{P \times V \times MM_{CH_4}}{R \times T} \times 1000$$
 Equação 2

Onde:

$M_{CReact}$	<ul> <li>Massa do carbono fornecida na reação por meio do CH<sub>4</sub>, em mg;</li> </ul>	
Р	– Pressão do sistema, 0,9886923 atm;	
V	– Volume de gás CH <sub>4</sub> utilizado durante a reação: 0,15 L (0,005 L.min <sup>-1</sup>	
de CH <sub>4</sub> $\times$ 30 min);		
$MM_{CH_4}$	– Massa molar do metano, 16,0419 g.mol <sup>-1</sup> ;	
R	– Constante dos gases ideais, 0,08205746 atm.L.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ;	
Т	– Temperatura de reação, 773,15 K (500 °C).	

Por sua vez a massa de carbono adsorvido durante a reação catalítica é obtida a partir da Equação 3.

$$X = \frac{(M_{Cat} - Z) \times M_C}{M_{Res}}$$
 Equação 3

Onde:

X	– Massa do carbono adsorvido no catalisador, em mg;
<i>M</i> <sub>Cat</sub>	– Massa inicial do catalisador utilizada na reação, em mg;
Ζ	– Massa do oxigênio no NiO perdida na redução do Ni, em mg
$M_C$	– Percentual de massa de carbono na amostra;
M <sub>Res</sub>	<ul> <li>Percentual de massa de resíduo na amostra após reação.</li> </ul>

Mesclando as equações 2 e 3, a conversão do metano é dada por:

Rendimento em materiais carbonáceos (%) = 
$$\frac{X}{M_{CReact.}} \times 100$$
 Equação 4

De maneira análoga, usando os dados de TGA e os cálculos feitos para obtenção do rendimento de materiais carbonáceos, foi estimada a produção quantitativa do hidrogênio. A produção de hidrogênio foi estimada a partir da Equação 5.

$$H_2(mg) = \frac{4 \times MM_H \times massa \ de \ carbono \ adsorvido \ (mg)}{MM_C}$$
Equação 5

Onde:

$MM_H$	<ul> <li>Massa molar do hidrogênio, 1,0078 g.mol<sup>-1</sup>;</li> </ul>
MM <sub>C</sub>	– Massa molar do carbono, 12,0107 g.mol <sup>-1</sup> .

## 6 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 6.1. Caracterização das Amostras

A secagem do bagaço é uma etapa crucial no processo de produção dos *templates* prémoldados de bagaço, pois a presença de umidade compromete a adesão do material precursor de alumínio às fibras do bagaço. Além disso, a retirada da água é essencial para garantir a qualidade do bagaço durante o armazenamento e transporte, evitando a proliferação de microrganismos e reduzindo os custos logísticos. A análise termogravimétrica indicou um teor de umidade de 48 % na amostra de bagaço valor próximo ao relatado em outros trabalhos ( SANTOS et al., 2011; SILVA; LIMA, 2020).

A Figura 10 exibe a amostra (a) BCA *template*, obtida após impregnação com solução precursora de alumínio, prensagem e posterior secagem, e a amostra (b) DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, obtida após o processo de calcinação, onde houve completa eliminação do BCA. Observou-se que a amostra DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp manteve-se coesa, não havendo desintegração do monolito obtido, com características macro morfológicas (formato cilíndrico) inalteradas e com massa de 0,24 g, em média.





Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Nas imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície da amostra Dry-BCA, Figura 11(a), foi observada a morfologia heterogênea e fibrosa da estrutura vascular do sistema vegetal. Também é possível identificar uma camada externa semelhante a placas, com presença de poros em sua superfície e nas paredes internas dos dutos vasculares das fibras (ATHIRA; BAHURUDEEN; APPARI, 2021). Na imagem da superfície da amostra DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, Figura 11(b), foi observada a replicação da morfologia fibrosa da amostra Dry-BCA, com presença de canais que foram abertos devido à decomposição térmica das cadeias lignocelulósicas do BCA. A amostra xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, Figura 11(c), exibe morfologia semelhante a encontrada na Figura 11(b) onde fibras cerâmicas são visíveis e canais são observados no detalhe. Assim, os materiais catalíticos sintetizados mantiveram a forma dos BCA *templates* e replicaram as estruturas fibrosas do BCA.

A Figura 11(d), exibe a amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p caracterizada por material particulado com predominância de partículas em formato de placas irregulares de tamanhos variados. A micrografia da amostra 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, Figura 11(e), evidencia a presença de aglomerados de partículas menores depositadas sobre essas placas maiores. Por fim, a amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, Figura 11(f), exibe uma mistura de placas irregulares e fragmentos de réplicas cerâmicas da fibra de BCA, indicando que parte da morfologia do BCA é preservada na síntese *in situ* desse material.

**Figura 11** - Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras (a) Dry-BCA, (b) DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, (c) xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, (d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, (e) 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e (f) 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A resistência média à compressão para a amostra DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp foi de 0,013 MPa para uma densidade aparente média de 0,42 g.cm<sup>-3</sup>, valor de resistência menor ao encontrado

por Kovářík et al., (2017) ao trabalharem com espumas de geopolímeros. A menor resistência possuída das amostras DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp pode ser atribuída à presença de fibras cerâmicas ocas com arquitetura de poros e canais muitos próximos e abertos, Figura 11(b), que resultou em uma capacidade de suportar carga reduzida já que a resistência mecânica diminui com o aumento da porosidade (KOVÁŘÍK et al., 2017; SOUSA; ORTEGA; PANDOLFELLI, 2009). Especula-se que a presença de uma extensa rede de poros e canais aliada a pontos de contato entre as fibras, facilite o surgimento de trincas e fissuras sob carga, comprometendo a integridade estrutural da amostra.

O TGA e a DTG da amostra Dry-BCA são apresentadas na Figura 12. Foi observado três eventos térmicos: o primeiro em cerca de 100 °C com 5 % de perda de massa associada à água adsorvida, o segundo evento entre 200–300 °C com 55 % de perda de massa associada à degradação das hemiceluloses e celuloses, e o terceiro evento, 350–500 °C, com 33 % de perda de massa associada à celulose e lignina (SHADANGI; MOHANTY, 2014; SHEN; GU; BRIDGWATER, 2010; YANG et al., 2007). Após 500 °C não foram observadas perdas de massa, indicando que todo o material orgânico foi decomposto. O resíduo, cerca de 7 %, pode ser atribuído a presença de óxidos remanescentes da composição química da amostra Dry-BCA, sendo reportados na literatura óxidos de alumínio, silício e ferro (GOPINATH et al., 2018; NAKASHIMA et al., 2017; PARAMESWARAN, 2009).



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

As amostras DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e 20Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, após a etapa de calcinação, não apresentaram perda de massa na faixa de temperatura analisada (30–1000 °C), indicando que todo o carbono orgânico e elementar do BCA sofreu oxidação nas etapas de calcinação anteriores, em faixas de temperatura entre 250-500 °C (PROTIĆ et al., 2021).

O processo de calcinação do precursor de nitrato de alumínio à temperatura de 550 °C resulta na formação de  $\gamma$ -AlOOH mesoporoso (MYRONYUK et al., 2016). A Figura 13 exibe os resultados de TGA das amostras Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, onde se constatou uma perda de massa de 5 % para as amostras Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, e 2 %, para a amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, na faixa de temperatura entre 30 e 230 °C, que corresponde à remoção de moléculas de água fisicamente ligadas (CLAR; SCIAN; AGLIETTI, 2003). A segunda perda de massa, ocorrendo na faixa de temperatura entre 230 e 885 °C, é devida à transformação do hidróxido de alumínio em óxido  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 8 % para 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 6 % para 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p (LUO et al., 2016; MYRONYUK et al., 2016).

Nas amostras 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, onde há presença de óxido de níquel em sua estrutura, foi observada menor perda relacionada água estrutural indicando que o óxido de níquel está ligado a essas hidroxilas estruturais, estabilizando a decomposição térmica desses grupos facilitando a formação de novas ligações mais estáveis com as partículas de óxido de níquel (MOTTA; DORNELAS; ALMEIDA, 2023).



Figura 13 - Curvas TGAs das amostras Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

De acordo com a análise de espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) das amostras sintetizadas, após o processo de calcinação (Tabela 1), observou-se majoritariamente a presença de alumina. Os catalisadores sintetizados na presença do BCA também apresentaram baixas concentrações de óxidos de Fe, Ca e K provenientes da cana-de-açúcar (BASUMATARY et al., 2021). Para as amostras com níquel, as concentrações de óxido de níquel foram próximas aos valores teóricos utilizados no preparo das amostras.

Amostro	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K2O	CaO
Amostra	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	91,8	0,0	5,0	1,2	1,0	1,0
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	83,4	3,3	9,8	0,9	1,3	1,3
10Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	81,5	9,0	7,0	1,1	0,4	1,0
20Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	78,0	17,6	2,9	0,7	0	0,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	99,8	0	0,1	0,1	0	0
5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	94,4	5,0	0,3	0,1	0	0,2
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	90,7	6,1	1,8	0,3	0,7	0,4

Tabala 1 Órid (01)

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Segundo Dinardo-Miranda et al., (2008) a cana-de-açúcar é capaz de incorporar em sua estrutura os macronutrientes P, K, Ca, Mg e S, além dos micronutrientes B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn. Essa planta possui uma grande capacidade de remoção de Si do solo, onde esse elemento faz parte de um componente funcional da planta, não exercendo o papel de nutriente. Além disso, o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil ocorre, em sua maioria, em latossolos, que são solos ricos em ferro e alumínio, permitindo a incorporação desses elementos pela planta (PALMA et al., 2021; SANTOS et al., 2018).

A presença do elemento Al na composição química do bagaço e, consequentemente, das amostras sintetizadas, atua como um agente formador de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> durante o processo de calcinação. Diferentes estudos mostram que o teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente nas cinzas do bagaço da cana-de-açúcar varia de 2 % a 30 %, o que possibilita a formação de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concomitantemente ao processo de formação da cerâmica através da degradação térmica do precursor Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (ABBAS et al., 2019; KHAN; SAYYED; ALI, 2020; MELLO et al., 2020; LOGANAYAGAN; MOHAN; DHIVYABHARATHI, 2021; MANGI et al., 2017; RAJASEKAR et al., 2018; RÍOS-PARADA et al., 2017; RODIER et al., 2019; ZAREEI; AMERI; BAHRAMI, 2018).

Além disso, estudos mostram que o teor de SiO2 encontrado nas cinzas do bagaço pode chegar até 90 % (MORETTI et al., 2016; SALES; LIMA, 2010). O teor de SiO<sub>2</sub> na cana-deaçúcar vem principalmente do solo e está armazenado nos caules e folhas da planta na forma de ácido ortossilícico (QADRI et al., 2013). A sílica presente na biomassa pode reagir com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> durante o processo de sinterização, gerando mulita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), conforme descrito na Equação 6 (MENEZES et al., 2008; RIBEIRO et al., 2019; WANG; ZHAO, 2017), o que contribui para as propriedades mecânicas e térmicas da cerâmica (GUO; LU; FENG, 2010; MOHANTA et al., 2014).

$$3Al_2O_3 + 2SiO_2 \xrightarrow{\geq 1300 \ \circ C} 3Al_2O_3.2SiO_2$$
 Equação 6

As análises de EDX de todas as amostras apresentaram a presença de óxidos de silício e ferro, ambos relatados na literatura como agentes formadores de poros na produção de cerâmicas, devido à sua retenção na matriz cerâmica após o esgotamento dos materiais orgânicos (DELE-AFOLABI et al., 2017b; GUO; LU; FENG, 2010; MOHANTA et al., 2014). Zhao et al., (2020a) relataram que, a uma temperatura de sinterização de 1400 °C, o aluminato de cálcio em quantidade considerável se difunde na matriz de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com uma maior difusão do aluminato de cálcio do lado de maior concentração de CaO para o lado onde há maior concentração de alumina. A 1500 °C, ocorre a formação de hexaluminato de cálcio, que, como poderá ser visto, não foi identificado na análise de DRX das amostras. Por sua vez, o potássio na forma de óxido é relatado em outros estudos como elemento presente nas cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (ABBAS et al., 2019; KHAN; SAYYED; ALI, 2020; PALMA et al., 2021).

Na Figura 14 são mostrados os padrões de difração de raios X do suporte catalítico DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e dos catalisadores xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp. Nessas amostras estão presentes picos característicos da  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com sistema cristalino romboédrico do grupo espacial R-3C (JCPDS 10-0173), apresentando 71,2 % de cristalinidade e com tamanho médio de cristalito de aproximadamente 55 nm. Mohamad et al., (2019) mostraram que em uma faixa de temperatura de 1100–1200 °C, o pó de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sintetizado pela equipe apresentou tamanho de cristalito de cerca de 49 nm em média valor próximo ao encontrado no presente trabalho. A alta cristalinidade presente na amostra DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp é atribuída à temperatura de calcinação de 1500 °C, que permitiu a transição para a fase cristalina  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e exerceu influência no crescimento do cristalito das amostras (AHMADABADI et al., 2020; BHOI; SINGH; PRATAP, 2020; KIM; KANG, 2013; MAZIVIERO et al., 2021; MOKHNACHUK; SOLOVIEV; KAPRAN, 2007).

**Figura 14 -** Difratograma de raios X das amostras com dimensões predeterminadas: DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>dp, obtida à 1500 °C, e catalisadores xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp obtidos após ancoragem da fase ativa à 550 °C no suporte DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Além dos picos característicos da fase α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, as amostras DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e xNi/ DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp exibem picos indicativos de quartzo alfa (JCPDS 46-1045 e 01-083-054) com sistema cristalino hexagonal e grupo espacial P3121 e P3221. A presença de SiO<sub>2</sub> com baixa intensidade relativa nos difratogramas sugere que a matriz do suporte incorporou o SiO<sub>2</sub> presente nas cinzas em sua estrutura sem que, no entanto, a energia fornecida pela calcinação promovesse mudanças em outras estruturas cristalinas presentes através das incorporações dos átomos de Si, sendo uma das transformações mais relatadas a geração de mulita (RIBEIRO et al., 2019).

Quanto a presença dos óxidos de Fe, K e Ca, os resultados indicam a possibilidade de os picos estarem sobrepostos aos picos da alumina, apresentar caráter amorfo ou estar abaixo do limite de detecção do equipamento.

Nas amostras xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp foram identificados picos de NiO, em  $2\theta = 37.3^{\circ}$ , 43,3°, 62,8°, 75,5° e 79,4° (JCPDS 01-071-1179) com sistema cristalino cúbico do grupo espacial Fm-3m e tamanho médio dos cristalitos de 23 nm, calculados pela equação de Scherrer. É observar nos difratogramas das possível amostras 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e 20Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp que a fase cristalográfica do suporte foi mantida, no entanto, houve uma pequena diminuição na intensidade dos picos referentes a alfa alumina, após a impregnação de níquel. Os picos referentes ao óxido de níquel impregnado na amostra aumentaram de intensidade indicando maior quantidade desse óxido com a amostra 20Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp apresentando picos mais intensos e definidos em comparação àqueles encontrados nas amostras 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp.

As amostras em pó, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, Figura 15, apresentaram difratogramas característicos de amostras amorfas e os picos de difração são referentes a pseudoboemita ou  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (MAZIVIERO et al., 2021; WEN et al., 2019). Os picos em 37,3°, 43,3° e 62,8° foram atribuídos à estrutura cúbica do NiO e o pico observado em 37,3° pode indicar a formação da estrutura cúbica do NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (JPCDS 10-0339). Os tamanhos de cristalito para 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p foram de 28 e 25 nm respectivamente.



**Figura 15 -** Difratograma de raios X das amostras em pó Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, obtidas a 550 °C.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A Tabela 2 exibe os tamanhos médios de cristalitos para  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o NiO para as amostras com dimensões predeterminadas, DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, e para as amostras em pó, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.

Tabela 2 - Tamanho médio de cristalitos dos materiais catalíticos.				
	Tamanho médio do cristalito (nm)			
Cristalito	Amostras com dimensões	Amostras		
	predeterminadas	em pó		
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55	-		
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-		
NiO	23	26		

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A síntese dos catalisadores 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p em etapa única pode ter permitido que interações e/ou ligações entre os íons Al<sup>3+</sup> e Ni<sup>2+</sup> ocorressem, favorecendo a formação do NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (RICHARDSON '; TWIGG, 1998). Entretanto, a diminuição dos picos de difração referentes às espécies de Ni, observados no difratograma da amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, foi devida à presença da BCA, que pode ter favorecido melhor dispersão das partículas de níquel na rede cristalina da alumina, levando à formação de aluminato de níquel (SUN et al., 2011; YANG; FENG; CHU, 2016). Transformações metaestáveis da alumina de uma fase a outra e o processo de transformação pseudomórfico que está envolvido na transformação do precursor usado podem ser afetados pela presença de moléculas orgânicas, como no caso da amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p (CARDOSO et al., 2015).

A Figura 16(a) mostra as isotermas de adsorção e dessorção de N<sub>2</sub> a 77 K para as amostras Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, com perfil isotérmico do tipo IV, característico de materiais mesoporosos (THOMMES et al., 2015; YU et al., 2019). O loop de histerese da amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p é do tipo H2 que é caracterizado por estrutura de poros mais complexas, enquanto que para as amostras 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p é do tipo H4, o que sugere que os poros dos materiais não são cilíndricos e uniformes, mas apresentam uma geometria mais irregular, que pode ser no formato de fendas ou de garrafas. A amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p apresentou distribuição de diâmetro de poros bimodal em 3-5 nm e 4-23 nm, com concentração de poros em 3,6 nm e 6,6 nm, enquanto que as amostras 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p apresentaram apenas distribuição de poros entre 3-4,5 nm, evidenciando que a adição de espécies de níquel nas amostras obstruiu os poros, Figura 16(b), (KOMEILI et al., 2016). Comparativamente, a faixa de distribuição de poros das amostras 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p não sofreu influência com o uso do BCA na síntese do material.

**Figura 16 -** (a) Isotermas de adsorção/dessorção de N<sub>2</sub> a 77 K e (b) Distribuição do diâmetro dos poros das amostras Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Na Tabela 3, são mostrados os valores das áreas superficiais e do volume de poros das amostras Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p. As amostras com dimensões predeterminadas apresentaram valores de área superficial inferior a 5 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, devido ao processo de sinterização da alumina, que resulta em uma diminuição da área superficial devido à ligação dos grãos por meio de alongamentos conhecidos como "pescoços", eliminando a rugosidade superficial das partículas. Além disso, a redução da área superficial do material cerâmico também se deve à diminuição das fronteiras dos grãos, que passam por um processo de crescimento associado à transferência de massa (GERMAN, 1996). Castro et al., (2006) demonstram que há uma drástica diminuição da área superficial da  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (estrutura do corindo) devido a energia de superfície e de massa presente na  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

A amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p apresentou a maior área superficial e o maior volume total de poros entre as amostras analisadas. A formação do óxido de níquel (NiO) e aluminato de níquel (NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nas amostras 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p promoveu diminuição da área de superfície (JIMÉNEZ-GONZÁLES et al., 2014; KOMEILI et al., 2016), indicando que as espécies de níquel podem estar bloqueando os poros da alumina.

Amostra	$S_{BET}^{a}$ (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	$V_t^b$ (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )
DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	5	-
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	5	-
10Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	5	-
20Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	5	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	65	0,078
5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	55	0,042
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	20	0,015

**Tabela 3 -** Área superficial dos catalisadores sintetizados, do suporte DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e da amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.

<sup>a</sup>BET – Área especifica da superfície, <sup>b</sup>Volume total de poros.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A redutibilidade das espécies de Ni em um determinado intervalo de temperatura e sua interação com os suportes foi investigada por meio da análise de TPR. Os perfis de TPR das amostras com dimensões predeterminadas e em pó são mostrados na Figura 17. De acordo com a literatura, algumas pesquisas classificam as espécies de níquel em três categorias, conforme as diferentes temperaturas de redução: NiO livre, "NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> de superfície" e espinélio cristalino NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (JIMÉNEZ-GONZÁLEZ et al., 2014). Em contraste, outros estudos propõem uma classificação em quatro categorias: NiO livre, com temperatura de redução abaixo de 350 °C; NiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com temperatura de redução entre 350-600 °C, caracterizado como NiO suportado em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> a granel, com redutibilidade em temperaturas moderadas (600-750 °C), identificado como íons Ni<sup>2+</sup> parcialmente integrados ao espinélio; e espinélio NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, com temperatura de redução acima de 750 °C, correspondente ao NiO incorporado na estrutura do espinélio (YU et al., 2019).

Na Figura 17, os perfis TPR dos materiais catalíticos com dimensões predeterminadas mostraram consumo de hidrogênio entre 370-650 °C. Os picos de redução na faixa de 450-550 °C foram associados ao NiO suportado em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pois nos DRX dessas amostras não foi observada a presença de aluminato de níquel, espécies que sofrem redução em temperaturas mais elevadas (JIMÉNEZ-GONZÁLEZ et al., 2014; SALHI et al., 2011; YU et al., 2019). Isso sugere a presença de NiO na amostra devido à etapa de ancoragem do óxido de Ni ocorrer em temperaturas amenas, 550 °C, não formando uma solução sólida com o suporte, uma vez que este já se encontrava formado e apresentando fase estável de alumina. Além disso, o menor

tamanho dos cristalitos de NiO observados no DRX pode indicar uma alta dispersão sobre o suporte de DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp (AHMED et al., 2015).

Nas amostras em pó, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, foram observados picos de consumo de hidrogênio a partir de 400 °C que se estenderam além de 900 °C. O catalisador 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p mostrou dois picos de redução bem definidos: o primeiro a 470 °C, atribuído ao NiO suportado em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (NiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com temperatura de redução entre 420-600 °C, e o segundo pico a 800 °C, atribuído ao NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> indicado no DRX da amostra, onde pode haver íons Ni<sup>2+</sup> que não estão completamente integrados ao espinélio e têm temperatura de redução entre 600-750 °C, e as espécies de espinélio NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> que possuem NiO em sua estrutura e apresentam temperatura de redução acima de 750 °C (YU et al., 2019). A amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p apresentou pico de redução em temperaturas superiores a 500 °C, que se estenderam para temperaturas acima de 900 °C, possivelmente devido ao espinélio do NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, que possui comportamento redutível conforme relatado anteriormente (SALHI et al., 2011; SHOKROLLAHI YANCHESHMEH et al., 2020).



Figura 17 - TPR-H<sub>2</sub> do suporte catalítico DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e dos catalisadores sintetizados.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Portanto, a escolha de temperatura de redução das amostras com dimensões predeterminadas e em pó seguiu o critério de redutibilidade de cada amostra, sendo esses dados utilizados no teste catalítico.

Ao analisar os valores absolutos das áreas integradas de consumo de hidrogênio nos TPR das amostras 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, Figura 18, foi observado que a amostra sintetizada sem o BCA apresentou aproximadamente o dobro de consumo de hidrogênio, 56,9 µmol<sub>H2</sub>.g<sub>cat</sub>-<sup>1</sup>, enquanto a amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p consumiu aproximadamente metade desse valor na faixa de temperatura de trabalho. Considerando os valores de nitrato de níquel utilizado na síntese de ambas as amostras (serem iguais) e dados do EDX, especula-se que o uso da BCA na síntese do catalisador em pó tenha favorecido não só a presença do aluminato de níquel como também a formação de espécies de níquel não reduzíveis na faixa de temperatura utilizada na análise de TPR. Conjeturando que algumas espécies de níquel foram inseridas na estrutura cristalina da alumina ou mesmo certa fração de NiO possa ter sido recoberta pelo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o que poderia afetar o acesso do H<sub>2</sub> a essa fração de NiO.

Figura 18 - Consumo de hidrogênio na faixa de temperatura usada no TPR das amostras dos catalisadores.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

#### 6.2. Testes catalíticos: decomposição do metano

Na reação de decomposição catalítica do metano (DCM), o metano é diretamente dissociado em hidrogênio gasoso e carbono sólido, conforme Equação 1 (ASHIK; WAN DAUD; ABBAS, 2015; GAMAL et al., 2021; SILVA et al., 2021). Para avaliar o tipo e a quantidade de carbono depositado no leito catalítico, foi realizada a análise termogravimétrica dos catalisadores após as DCM.

Nos TGAs dos catalisadores com dimensões predeterminadas após a DCM a 500 °C, utilizando 600 °C para a redução dos catalisadores, Figura 19, apenas as amostras com dimensões predeterminadas apresentaram perda de massa na faixa de temperatura estudada. As amostras 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e 20Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp apresentaram perdas de massa de 2 %, 10 % e 8 %, respectivamente, em torno de 600 °C. Considerando que todo o metano que passou pelo reator em contato com o catalisador foi decomposto em C(s) e H<sub>2</sub>(g), e que o carbono foi depositado na superfície do catalisador, essa perda em 600 °C, observada no TGA, foi associada à decomposição térmica de carbono ordenado, tipo nanotubos de carbono (AWADALLAH et al., 2017; AWADALLAH; ABOUL-ENEIN; ABOUL-GHEIT, 2014; MOTTA; DORNELAS; DE ALMEIDA, 2023).

Os dados da TGA e DTG para os catalisadores 10Ni/DryBCA\_A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e 20Ni/DryBCA\_A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp indicam que as amostras apresentam estabilidade semelhante de oxidação dos materiais carbonáceos depositados, Figura 19, enquanto que a amostra 5Ni/DryBCA\_A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp é um pouco menor. A perda de massa máxima (identificada como um pico de inflexão de oxidação na DTG em função da temperatura), das amostras 5Ni/DryBCA\_A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, 10Ni/DryBCA\_A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp e 20Ni/DryBCA\_A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp é característica da decomposição térmica do carbono ordenado que assume a forma de nanotubos de carbono de paredes múltiplas e possuíam maior qualidade e maior grau de grafitização (AWADALLAH et al., 2015).

É citado que a decomposição catalítica do metano pode ocorrer com a formação de carbono amorfo, que devido a seu acumulo sobre o catalisador, promove a perda de atividade catalítica. No entanto, isso não foi observado na DTG de nenhuma das amostras, devido à ausência de perda de massa entre 300-400 °C, indicando a inexistência ou baixa quantidade de carbono amorfo (ESMIZADEH et al., 2015; IBRAHIMOV et al., 2021; PARMAR; PANT; ROY, 2021).

**Figura 19 -** Curvas TGAs e DTGs dos catalisadores com dimensões predeterminadas reduzidos a 600 °C após DCM a 500 °C por 0,5h.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Os catalisadores em pó, 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, não apresentaram perda de massa referente ao carbono, quando reduzidos a 600 °C sugerindo a ausência de atividade catalítica na temperatura de reação à 500 °C da DCM. A baixa conversão de óxidos de níquel na temperatura de redução observadas no TPR, Figura 17, limita a formação de sítios ativos suficientes para catalisar a reação de decomposição do metano. Assim, a temperatura de redução dos catalisadores 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p foi alterada para 800 °C e os mesmos foram testados na reação de decomposição do metano (DCM) a 500 °C. A Figura 20 mostra que as perdas de massa, atribuídas à deposição de carbono, foram de 5 % e 1 % para os catalisadores 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, respectivamente. Esses resultados indicam que o aumento da temperatura de redução promoveu um aumento na atividade catalítica, especialmente para o catalisador 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.

A perda de massa máxima identificada na DTG da 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p ocorreu a 572,3 °C, sendo associada ao carbono ordenado, do tipo nanotubos de carbono de paredes múltiplas. A

amostra 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p apresentou um suave ombro em sua DTG, em torno de 510 °C, indicativo também de carbono ordenado (NODA et al., 2007).

**Figura 20 -** Curvas TGAs e DTGs dos catalisadores em pó reduzidos à 800 °C após DCM à 500 °C por 0,5h.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

A partir dos dados de massa de carbono obtidos nos TGAs, foram calculadas as atividades catalíticas dos materiais em rendimentos de carbono e hidrogênio, conforme Figura 21. Os catalisadores dimensões predeterminadas, mostrado na com xNi/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, reduzidos a 600 °C, apresentaram maiores rendimentos em carbono, aproximadamente 45 %, uma vez que a rota de síntese proporcionou menor temperatura de redução dos óxidos de níquel e uma maior disponibilidade partículas ativas para promover a decomposição do metano. O catalisador 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p destacou-se com o melhor desempenho catalítico dentre as amostras de catalisadores em pó reduzidos a 800 °C, o que está associado à maior quantidade de níquel reduzido.

A diferença no desempenho catalítico entre 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p e 5Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p pode ser atribuída à composição do catalisador. A presença do BCA favoreceu a dispersão das

espécies de níquel, conforme observado na análise de DRX, dificultando a redução dessas espécies, como discutido no TPR.

**Figura 21 -** Atividade catalítica dos catalisadores reduzidos a 600 e 800 °C e testados na DCM a 500 °C por 0,5h.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Os resultados obtidos com os catalisadores com dimensões predeterminadas sintetizados neste trabalho mostraram dados de conversão do metano semelhantes aos relatados na literatura, embora estes tenham sido testados em reações de reforma a vapor do metano. Noh et al., (2019) alcançaram 57 % de conversão do metano na reforma, utilizando catalisadores de Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pré-dimensionados. Por outro lado, catalisadores comerciais apresentaram apenas 10 % de conversão na decomposição catalítica do metano com adição de H<sub>2</sub>(g), utilizando Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em pó comercial (WANG et al., 2020a).

Catalisadores Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> têm demonstrado uma ampla variedade de valores de conversão. Takenaka et al., 2001, relataram uma conversão de metano de cerca de 1 % para um catalisador Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com 5 % de Ni (em peso) na decomposição catalítica do metano a 500 °C. Ahmed et al., 2015, observaram que, ao investigar as propriedades texturais do suporte de alumina em catalisadores com 60 % de Ni (em peso) a 700 °C, os rendimentos variaram de 23 % a 90 %. Cui et al., 2007, estudaram a cinética da reforma catalítica de CH<sub>4</sub> com CO<sub>2</sub> e encontraram uma conversão de CH<sub>4</sub> de 13 % a 550 °C com 8 % de Ni (em peso). Wang et al., (2020a) relataram conversão de aproximadamente 30 % na decomposição catalítica do metano ao utilizarem catalisadores comerciais com carregamento de 21,5 % de Ni (em peso) em temperatura de reação de 600 °C. É possível afirmar que os valores de conversão encontrados nesse trabalho estão em linha com aqueles encontrados em outros estudos sobre o tema.

O rendimento de hidrogênio (%) obtido foi igual ao rendimento de material carbonáceo (%), uma vez que o metano se decompõe em apenas duas substâncias simples, carbono (C) e hidrogênio (H), e em quantidades proporcionais entre si, logo, as razões  $C_{saída}/C_{entrada}$  e  $H_{saída}/H_{entrada}$  se equivalem. Na Tabela 4 são apresentados a produção quantitativa de hidrogênio dos catalisadores para as reações DCM a 500 °C.

Tabela 4 - Produção de hidrogênio (%) dos catalisadores após a DCM a 500 °C				
	Produção de H <sub>2</sub> (%),	Produção de H <sub>2</sub> (%),		
Amostras	temperatura	temperatura		
	de redução a 600 °C	de redução a 800 °C		
DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	-	-		
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	10	-		
10Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	45	-		
20Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -dp	44	-		
5Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	0	25		
5Ni/DryBCA_Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -p	0	4		

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Dada a similaridade nos perfis de redução e nas temperaturas de perda de massa relacionadas ao carbono, foram realizadas análises por microscopia eletrônica de transmissão em dois catalisadores: o 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, reduzido a 600 °C (Figura 22(a) e (b)), e o 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, reduzido a 800 °C (Figura 22(c) e (d)). As imagens obtidas confirmaram a formação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Observou-se que esses nanotubos apresentavam diâmetros externos variados, com algumas extremidades contendo níquel e outras não. Para o catalisador 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, os nanotubos tinham diâmetros entre 10-60 nm, enquanto para o 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p, os diâmetros variavam de 10-50 nm. A pequena variação na dispersão dos diâmetros observada no catalisador 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp pode ser atribuída

à maior concentração de partículas de níquel, que atuam como sítios de nucleação. Além disso, a síntese dos catalisadores pode ter contribuído para a pequena heterogeneidade nos diâmetros, especialmente no caso do 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, que teve sua fase ativa integrada ao suporte de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> já existente.

**Figura 22 -** Imagens de microscopia eletrônica de transmissão dos catalisadores após DCM a 500 °C: (a) e (b) 10Ni/DryBCA\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dp, (c) e (d) 5Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

# 7 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a utilização do bagaço de cana-de-açúcar para síntese do suporte catalítico à base de alumina com dimensões predeterminadas foi eficaz ao manter a morfologia réplica. O material obtido apresentou resistência mecânica relativamente baixa, no entanto, sua estrutura predeterminada permite uma distribuição uniforme do material ativo, com suas dimensões predeterminadas facilitando o manuseio e a aplicação em processos industriais, permitindo uma fácil integração em sistemas de reação existentes.

A utilização do bagaço da cana-de-açúcar na síntese dos materiais em forma de pó, promoveu a formação de espécies de níquel com fortíssima interação com a alumina, dificultando a atividade catalítica dos catalisadores. Por sua vez os catalisadores com dimensões predeterminadas exibiram espécies de níquel facilmente redutíveis e mais ativos na reação de DCM gerando um maior rendimento em material carbonáceo, mostrando assim que o método proposto nesta tese apresenta resultados economicamente promissores.
### PERSPECTIVAS

Com base nos resultados obtidos, podemos estabelecer os seguintes tópicos como metas para a continuação deste trabalho:

- Estudar diferentes proporções de metano: nitrogênio;
- Avaliar a performance catalítica a partir da estabilidade, conversão do metano e produção quantitativa de material carbonáceo e hidrogênio;
- Purificação e aproveitamento dos nanotubos de carbono.

# PRODUÇÃO CIENTÍFICA

#### **Artigo Aceito**

SILVA, A. D. R., MOTTA, R. J. B.; TRICHÊS, E. S.; ALMEIDA, R. M. Sugarcane bagasse: alternative use of agro-industrial residue in pre-dimensioned catalytic synthesis to obtain ordered carbon and hydrogen via methane decomposition. JOURNAL OF MATERIAL CYCLES AND WASTE MANAGEMENT, 2024.

#### **Resumos em Congressos**

21º Congresso Brasileiro de Catálise Titulo do Trabalho: Utilização do bagaço da cana-de-açúcar como molde para obtenção de alumina pré-dimensionada. Tipo de Apresentação: oral Ano: 2021

28° Congresso Ibero-Americano de Catálise Titulo do Trabalho: Uso do bagaço da cana-de-açúcar como modelo para obtenção de alumina com dimensões predeterminadas Tipo de Apresentação: oral

XXI Brazilian Materials Research Society Meeting Titulo do Trabalho: Use of sugarcane bagasse to obtain structured alumina in the replica method for carbon and H<sub>2</sub> production. Tipo de Apresentação: pôster

XXI Brazilian Materials Research Society Meeting Titulo do Trabalho: Effect of porosity parameters and physicochemical properties of different microporous and hierarchical zeolites on the CO<sub>2</sub> adsorption process. Tipo de Apresentação: pôster

# REFERÊNCIAS

ABBAS, Safeer et al. Prospective of sugarcane bagasse ash for controlling the alkali-silica reaction in concrete incorporating reactive aggregates. **Structural Concrete**, [*s. l.*], v. 21, n. 2, p. 781–793, 2019.

ABDUL MUTALIB, Aunie Afifah et al. SiO<sub>2</sub>-Rich Sugar Cane Bagasse Ash Catalyst for Transesterification of Palm Oil. **BioEnergy Research**, [*s. l.*], v. 13, n. 3, p. 986–997, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12155-020-10119-6.

ADEYANJU, Comfort Abidemi et al. A review on Luffa fibres and their polymer composites. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 56, n. 4, p. 2797–2813, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10853-020-05432-6.

AGUNSOYE, J. O.; AIGBODION, V. S. Bagasse filled recycled polyethylene biocomposites: Morphological and mechanical properties study. **Results in Physics**, [s. l.], v. 3, p. 187–194, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2013.09.003.

AHMADABADI, Mohsen Nasiri et al. The relation between particle size and transformation temperature of gibbsite to αLPHA-alumina. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy**, [*s. l.*], v. 0, n. 0, p. 1–11, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1080/25726641.2020.1815504.

AHMED, W. et al. Effect of textural properties of alumina support on the catalytic performance of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for hydrogen production via methane decomposition. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 25, p. 359–366, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2015.05.015.

AHMED, W.; AWADALLAH, Ahmed E.; ABOUL-ENEIN, Ateyya A. Ni/CeO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for methane thermo-catalytic decomposition to COx-free H<sub>2</sub> production. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 41, n. 41, p. 18484–18493, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.177.

AIHARA, Takeshi et al. Effect of WO<sub>3</sub> Loading on the Activity of Pt/WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts in Selective Hydrogenolysis of Glycerol to 1, 3-Propanediol. **Chemistry Letters**, [*s. l.*], v. 46, n. 10, p. 1497–1500, 2017.

AIHARA, Takeshi; MIURA, Hiroki; SHISHIDO, Tetsuya. Investigation of the mechanism of the selective hydrogenolysis of C[sbnd]O bonds over a Pt/WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. **Catalysis Today**, [*s. l.*], v. 352, n. September 2019, p. 73–79, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.10.008.

AKHSHIK, Masoud et al. The effect of lightweighting on greenhouse gas emissions and life cycle energy for automotive composite parts. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [*s*. *l*.], v. 21, n. 3, p. 625–636, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10098-018-01662-0.

AKINFALABI, Shehu Ibrahim et al. Synthesis of reusable biobased nano-catalyst from waste sugarcane bagasse for biodiesel production. **Environmental Technology and Innovation**, [*s*. *l*.], v. 18, p. 100788, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100788.

AL-DALAMA, Khalida; STANISLAUS, Antony. A Comparative Study of the Influence of Chelating Agents on the Hydrodesulfurization (HDS) Activity of Alumina and Silica–Alumina-Supported CoMo Catalysts. **Energy & Fuels**, [*s. l.*], v. 20, n. 5, p. 1777–1783, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1021/ef060125a.

ALBUQUERQUE, MARIA ÉVILYN PAIVA et al. Produção de resinas ligno-fenol-

**formaldeído a partir do bagaço da cana-de-açúcarComunicado Técnico - EMBRAPA**. [S. l.: s. n.], 2019.

ALCARDE, André Ricardo. Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar. [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\_108\_22122006154841.html. Acesso em: 29 maio 2021.

ALEXANDER, Leroy; KLUG, Harold P. Determination of crystallite size with the x-ray spectrometer. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 137–142, 1950.

ALIAS, Rodianah et al. 1 - Characterization methods and characterization of the coatings. *In*: GUPTA, Ram K et al. (org.). **Elsevier Series in Advanced Ceramic Materials**. [*S. l.*]: Elsevier, 2023. p. 1–25. Disponível em: https://www.spiencedirect.com/spience/article/pii/R0780323006504000176

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323996594000176.

ALVES, Luís; PEREIRA, Vítor; LAGARTEIRA, Tiago. Catalytic methane decomposition to boost the energy transition : Scientific and technological advancements Nomenclature :. [s. l.], v. 137, n. September 2020, 2021.

AMARAL, FERNANDO CEZAR SARAI DO; TAVARES, SILVIO ROBERTO LUCENA. Diferença do Teor de Fibra da Cana-de-Açúcar para Fins Energéticos Motivada pelo Bioma. **EMBRAPA - SOLO**, [*s. l.*], n. 159, p. 25, 2013.

AMIN, Noor-ul. Use of Bagasse Ash in Concrete and Its Impact on the Strength and Chloride Resistivity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 717–720, 2011.

ANDRADE, Tarcisio E. et al. Hollow biomorphic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers produced from sisal. **Journal** of Materials Science, [s. l.], v. 42, n. 14, p. 5426–5430, 2007.

ANDRADE, R. M. et al. Preparation of low-cost ceramic membranes for microfiltration using sugarcane bagasse ash as a pore-forming agent. **Ceramica**, [s. l.], v. 65, n. 376, p. 620–625, 2019.

ANTUNES, Felipe A.F. et al. Multi-scale study of the integrated use of the carbohydrate fractions of sugarcane bagasse for ethanol and xylitol production. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 163, p. 1343–1355, 2021.

ASHBY, M F et al. (org.). Metal Foams A Design Guide. *In*: **Metal Foams A Design Guide**. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007. p. 1–5. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750672191500039.

ASHIK, U. P.M.; WAN DAUD, W. M.A.; ABBAS, Hazzim F. Production of greenhouse gas free hydrogen by thermocatalytic decomposition of methane - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 44, p. 221–256, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.025.

ASHORI, Alireza. Nonwood Fibers—A Potential Source of Raw Material in Papermaking. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, [*s*. *l*.], v. 45, n. 10, p. 1133–1136, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1080/03602550600728976.

ASSAD, Leonor. Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores. **Ciência e Cultura**, [*s*. *l*.], v. 69, n. 4, p. 13–16, 2017. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0009-67252017000400005&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 29 maio 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **ASTM International**, [s. 1.], p. 334-334–3, 2017.

ATHIRA, G.; BAHURUDEEN, A.; APPARI, Srinivas. Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse: Composition, Reaction Kinetics, and Characterisation of By-Products. **Sugar Tech**, [*s. l.*], v. 23, n. 2, p. 433–452, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-020-00865-4.

AWAD, Ali et al. Synthesis, Characterisation, and Performance Evaluation of Promoted Ni-Based Catalysts for Thermocatalytic Decomposition of Methane. **ChemistrySelect**, [*s. l.*], v. 5, n. 37, p. 11471–11482, 2020.

AWADALLAH, Ahmed E. et al. Catalytic Decomposition of Natural Gas to CO/CO<sub>2</sub>-Free Hydrogen Production and Carbon Nanomaterials Using MgO-Supported Monometallic Iron Family Catalysts. **Chemical Engineering Communications**, [*s. l.*], v. 202, n. 2, p. 163–174, 2015.

AWADALLAH, Ahmed E. et al. Effect of crystalline structure and pore geometry of silica based supported materials on the catalytic behavior of metallic nickel particles during methane decomposition to COx-free hydrogen and carbon nanomaterials. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 41, n. 38, p. 16890–16902, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.081.

AWADALLAH, Ahmed E. et al. Facile and large-scale synthesis of high quality few-layered graphene nano-platelets via methane decomposition over unsupported iron family catalysts. **Materials Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 191, p. 75–85, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.01.007.

AWADALLAH, Ahmed E.; ABOUL-ENEIN, Ateyya A.; ABOUL-GHEIT, Ahmed K. Effect of progressive Co loading on commercial Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for natural gas decomposition to COx-free hydrogen production and carbon nanotubes. **Energy Conversion and Management**, [*s. l.*], v. 77, p. 143–151, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.017.

BACHELIER, BRUNO; GOURLOT, JEAN-PAUL. A fibra de algodão: origem, estrutura, composição e caracterização. **Manual de qualidade da fibra**, Cuiabá - MT, n. 2, p. 28–153, 2018.

BAÊTA, Bruno Eduardo Lôbo et al. Optimization of sugarcane bagasse autohydrolysis for methane production from hemicellulose hydrolyzates in a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, [*s. l.*], v. 200, p. 137–146, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.003.

BAI, Jingyang et al. Biosugarcane-based carbon support for high-performance iron-based Fischer-Tropsch synthesis. **iScience**, [*s. l.*], v. 24, n. 7, p. 102715, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102715.

BAI, Chengying; COLOMBO, Paolo. High-porosity geopolymer membrane supports by peroxide route with the addition of egg white as surfactant. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 43, n. 2, p. 2267–2273, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.205.

BALZAROTTI, Riccardo et al. Periodic open cellular structures (POCS) as enhanced catalyst supports: Optimization of the coating procedure and analysis of mass transport. **Applied Catalysis B: Environmental**, [*s. l.*], v. 283, 2021.

BALZER, Rosana et al. New use for succinylated sugarcane bagasse containing adsorbed  $Cu^{2+}$  and  $Ni^{2+}$ : Efficient catalysts for gas-phase n-hexane and n-heptane oxidation reactions. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 97, p. 649–652, 2017. Disponível em:

http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.006.

BARBIERI, Luisa et al. Management of agricultural biomass wastes : Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks. **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 2307–2315, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.014.

BASU, Subhankar et al. Treatment of nitrate-rich water in a baffled membrane bioreactor (BMBR) employing waste derived materials. **Journal of Environmental Management**, [*s. l*.], v. 146, p. 16–21, 2014.

BASUMATARY, Bidangshri et al. Synthesis and characterization of heterogeneous catalyst from sugarcane bagasse: Production of jatropha seed oil methyl esters. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, [*s. l.*], v. 4, n. March, p. 100082, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100082.

BATCHU, Sai Praneet et al. Ethane Dehydrogenation on Single and Dual Centers of Gamodified  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **ACS Catalysis**, [*s. l.*], v. 11, n. 3, p. 1380–1391, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acscatal.0c03536.

BELTRÃO, Napoleão Esberard de Macêdo. **Fisiologia da Produção do AlgodoeiroCircular Técnica**. CAMPINA GRANDE - PB: [*s. n.*], 2006.

BENÍTEZ-GUERRERO, Mónica et al. Characterization of thermally stable gamma alumina fibres biomimicking sisal. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 185, p. 167–178, 2014.

BERNARDO-GUSMÃO, Katia; PERGHER, Sibele B.C.; SANTOS, Eduardo N. Um panorama da Catálise no Brasil nos últimos 40 anos. **Quimica Nova**, [*s. l.*], v. 40, n. 6, p. 650–655, 2017.

BERROCAL, Guillermo Paternina et al. Novel supports for nickel-based catalysts for the partial oxidation of methane. **Catalysis Today**, [*s. l.*], v. 149, n. 3–4, p. 240–247, 2010.

BHOI, Neeraj Kumar; SINGH, Harpreet; PRATAP, Saurabh. Synthesis and Characterization of Alumina Nanoparticles: A Case Study. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, [*s. l.*], v. 101, n. 2, p. 407–413, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40032-019-00542-w.

BINGRE, Rogeria et al. Recent progress in the biomass-mediated synthesis of porous materials. **Inorganica Chimica Acta**, [*s. l.*], v. 487, n. October 2018, p. 379–386, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ica.2018.12.045.

BONASSA, Gabriela et al. Subprodutos Gerados na Produção de Bioetanol: Bagaço, Torta de Filtro, água de Lavagem e Palhagem. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [*s. l.*], v. 4, n. 3, p. 144–166, 2015. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/44075. Acesso em: 29 maio 2021.

BOU-ISSA, R. A.; LOIOLA, R. L.; HOLANDA, J. N. F. Reuso de resíduo de lama de papel na produção de suporte cerâmico poroso de baixo custo. **Cerâmica**, [*s. l.*], v. 66, n. 378, p. 106–113, 2020.

BRUGNAGO, Ricardo José et al. The effect of steam explosion on the production of sugarcane bagasse/polyester composites. **Composites Part A**, [*s. l.*], v. 42, p. 364–370, 2011.

BUSSE, Corinna; FREUND, Hannsjörg; SCHWIEGER, Wilhelm. Intensification of heat transfer in catalytic reactors by additively manufactured periodic open cellular structures (POCS). **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [*s. l.*], v. 124, n. January, p. 199–214, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.01.023.

CARDOSO, Cristiane S. et al. Improving textural properties of  $\gamma$ -alumina by using second generation biomass in conventional hydrothermal method. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 207, p. 134–141, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.01.015.

CASTRO, Ricardo H.R. et al. Surface energy and thermodynamic stability of  $\gamma$ -alumina: Effect of dopants and water. **Chemistry of Materials**, [s. l.], v. 18, n. 7, p. 1867–1872, 2006.

CERQUEIRA, E. F.; BAPTISTA, C. A.R.P.; MULINARI, D. R. Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. *In*: , 2011. **Procedia Engineering**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2011. p. 2046–2051.

CHANDEL, Anuj K. et al. Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [*s. l.*], v. 13, n. 4, p. 994–1014, 2019.

CHANNEI, Duangdao; NAKARUK, Auppatham; PHANICHPHANT, Sukon. Photocatalytic degradation of dye using CeO<sub>2</sub>/SCB composite catalysts. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [*s. l.*], v. 183, p. 218–224, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2017.04.063.

CHEN, Wei et al. Chemical fixation of carbon dioxide using a green and efficient catalytic system based on sugarcane bagasse-an agricultural waste. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 147–152, 2015.

CHEN, Jin et al. Hydrolysis driving redox reaction to synthesize Mn-Fe binary oxides as highly active catalysts for the removal of toluene. **Chemical Engineering Journal**, [*s*. *l*.], v. 330, n. June, p. 281–293, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.147.

CHEN, Ruoyu et al. Optimization of the microstructure and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> reticulated porous ceramics via in-situ synthesis of mullite whiskers and flowing-liquid phase. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 243, p. 66–68, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X19302320.

CHEN, Yu et al. Porous ceramics: Light in weight but heavy in energy and environment technologies. **Materials Science and Engineering R: Reports**, [s. l.], v. 143, n. August 2020, p. 100589, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100589.

CHEN, Ruoyu et al. Toward excellent performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> reticulated porous ceramics: New insights based on residual stress. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 44, n. 17, p. 21478–21485, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.209.

CHEN, Ziyu; MAO, Jianxin; ZHOU, Renxian. Preparation of size-controlled Pt supported on Al2O3 nanocatalysts for deep catalytic oxidation of benzene at lower temperature. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 465, p. 15–22, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433218325534.

CHENG, Emily; NOTESTEIN, Justin. Catalytic dehydrogenation of isobutane over supported MoOx/K-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Journal of Catalysis**, [s. l.], v. 397, p. 212–222, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021951721001366.

CHINDAPRASIRT, Prinya; RATTANASAK, Ubolluk. Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 10, n. 1, p. 1–8, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-66885-y.

CHINGONO, Kudakwashe Engels et al. Adsorption of sugarcane vinasse effluent on bagasse fly ash: A parametric and kinetic study. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 224, p. 182–190, 2018. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718307941.

CLAR, C.; SCIAN, A. N.; AGLIETTI, E. F. Synthesis and characterization of aluminum carboxylate gels. **Thermochimica Acta**, [*s*. *l*.], v. 407, n. 1–2, p. 33–40, 2003.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil - Análise do Desempenho da Safra 2009-2010. **CONAB - Informativo Técnico**, [*s. l.*], n. 3, p. 1–160, 2011.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – Safra 2022/23. Brasilía - DF, v. 10, n. 4, p. 1–49, 2023. Disponível em: http://www.conab.gov.br.

COSTA, Bruna Ezequielle Bernardes et al. Comparison between chemical and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for bioethanol production: A review. **Revista Virtual de Quimica**, [*s. l.*], v. 13, n. 1, p. 242–259, 2021a.

COSTA, Bruna Ezequielle Bernardes et al. Comparison between chemical and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for bioethanol production: A review. **Revista Virtual de Quimica**, [*s. l.*], v. 13, n. 1, p. 242–259, 2021b.

COSTA, Bruna Ezequielle Bernardes. **Síntese e caracterização de estanossilicatos mesoporosos para aplicação em esterificação do ácido levulínico**. 2021. 85 f. -Universidade Federal de Alagoas, [*s. l.*], 2021.

CUI, Yuehua et al. Kinetic study of the catalytic reforming of CH4 with CO2 to syngas over Ni/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst: The effect of temperature on the reforming mechanism. **Applied Catalysis A: General**, [*s. l.*], v. 318, p. 79–88, 2007.

SILVEIRA, Cristian Berto et al. Decomposição Térmica de espumas de poliuretano para fabricação de vitrocerâmica celular de Li<sub>2</sub>O-ZrO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (LZSA). **Quimica Nova**, [*s. l.*], v. 30, n. 5, p. 1104–1107, 2007.

DEB, A. Crashworthiness design issues for lightweight vehicles. *In*: MATERIALS, DESIGN AND MANUFACTURING FOR LIGHTWEIGHT VEHICLES. [*S. l.*]: Woodhead Publishing Limited, 2010. p. 332–356. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1533/9781845697822.2.332.

DELBRÜCKE, Tiago et al. Sintering of porous alumina obtained by biotemplate fibers for low thermal conductivity applications. **Journal of the European Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 33, n. 6, p. 1087–1092, 2013.

DELE-AFOLABI, T T et al. Investigating the effect of porosity level and pore former type on the mechanical and corrosion resistance properties of agro-waste shaped porous alumina ceramics. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 43, p. 8743–8754, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.210. Acesso em: 19 jun. 2021.

DELE-AFOLABI, T. T. et al. Research trend in the development of macroporous ceramic components by pore forming additives from natural organic matters: A short review. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 43, n. 2, p. 1633–1649, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.177.

DELE-AFOLABI, T. T. et al. Significant effect of rice husk and sugarcane bagasse pore formers on the microstructure and mechanical properties of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni composites. **Journal of Alloys and Compounds**, [*s. l.*], v. 743, p. 323–331, 2018.

DELE-AFOLABI, TT et al. Significant effect of rice husk and sugarcane bagasse pore formers on the microstructure and mechanical properties of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /Ni composites. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 743, p. 323–331, 2018. Disponível em:

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.230. Acesso em: 19 jun. 2021.

DEMIR, H. et al. Dye adsorption behavior of Luffa cylindrica fibers. **Journal of Hazardous Materials**, [*s*. *l*.], v. 153, n. 1–2, p. 389–394, 2008.

DÍAZ-RAMÍREZ, German; MARADEI, Fernanda; VARGAS-LINARES, German. Bagasse sugarcane fibers as reinforcement agents for natural composites: description and polymer composite applications. **Revista UIS Ingenierías**, [*s. l.*], v. 18, n. 4, p. 117–130, 2019.

DÍAZ DE LEÓN, J N et al. Selective removal of sulfur from 3-methyl thiophene under mild conditions over NiW/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> modified by surfactants. **Catalysis Today**, [*s. l.*], 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586120304582.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. Cana-de-Açúcar. Concessão: 2008.

SANTOS, M.L. et al. Study of the storage conditions of the sugarcane bagasse through thermal analysis. **Quimica Nova**, [*s. l.*], v. 34, n. 3, p. 507–511, 2011.

DROBNY, Jiri George. Processing Methods Applicable to Thermoplastic Elastomers. *In*: HANDBOOK OF THERMOPLASTIC ELASTOMERS. [*S. l.: s. n.*], 2007. p. 29–160.

EDLMAYR, V et al. Thermal stability of sputtered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings. **Surface and Coatings Technology**, [*s*. *l*.], v. 204, n. 9, p. 1576–1581, 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897209008019.

EINAGA, Hisahiro; FUTAMURA, Shigeru. Comparative study on the catalytic activities of alumina-supported metal oxides for oxidation of benzene and cyclohexane with ozone. **Reaction Kinetics and Catalysis Letters**, [*s*. *l*.], v. 81, n. 1, p. 121–128, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1023/B:REAC.0000016525.91158.c5.

EL-SALAMONY, R. A. et al. Titania modified activated carbon prepared from sugarcane bagasse: adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue under visible light irradiation. **Environmental technology**, [*s. l.*], v. 38, n. 24, p. 3122–3136, 2017. Disponível em: https://www-

tandfonline.ez9.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1080/21622515.2017.1290148. Acesso em: 6 dez. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2023**. [*S. l.*], 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf. .

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio Turquesa: Produção a partir da pirólise do gás natural**. Brasília, DF.: [s. n.], 2022. Disponível em:

https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-663/Nota Tecnica Hidrogenio Turquesa\_12.04.22.pdf. .

ESMIZADEH, Elnaz et al. Drastic increase in catalyst productivity of nanoclay-supported CVD-grown carbon nanotubes by organo-modification. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 118, p. 248–257, 2015.

EUGENIA EUGENIO, María et al. Alternative Raw Materials for Pulp and Paper Production in the Concept of a Lignocellulosic Biorefinery. *In*: CELLULOSE. [*S. l.: s. n.*], 2019. p. 6–26.

EZEBOR, Francis et al. Oil palm trunk and sugarcane bagasse derived solid acid catalysts for rapid esterification of fatty acids and moisture-assisted transesterification of oils under pseudo-infinite methanol. **Bioresource Technology**, [*s*. *l*.], v. 157, p. 254–262, 2014.

Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.110.

FAKEEHA, Anis H. et al. Bi-metallic catalysts of mesoporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported on Fe, Ni and Mn for methane decomposition: Effect of activation temperature. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, [*s*. *l*.], v. 26, n. 9, p. 1904–1911, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.02.032.

FALK, G. S. et al. Impregnação de catalisadores em suporte de espuma cerâmica de alumina. **Ceramica**, [*s. l.*], v. 60, n. 353, p. 102–107, 2014.

FAN, Zeyu et al. Catalytic decomposition of methane to produce hydrogen: A review. **Journal of Energy Chemistry**, [*s*. *l*.], v. 58, p. 415–430, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.049.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Sugarcane as feed**. [*S. l.*], 1986. Disponível em: http://www.fao.org/3/s8850e/S8850E03.htm. Acesso em: 3 maio 2021.

FARID, Saad B.H. Overview. [S. l.: s. n.], 2019.

FERREIRA, Filipe et al. Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers and Nanocellulose in the Automotive Industry: A Short Review. **Journal of Composites Science**, [*s. l.*], v. 3, n. 2, p. 51, 2019.

FILICIOTTO, Layla et al. Humins as bio-based template for the synthesis of alumina foams. **Molecular Catalysis**, [*s. l.*], v. 526, n. February, p. 112363, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mcat.2022.112363.

FIORELLI, Juliano; BUENO, Stephen Bonilla; CABRAL, Matheus Roberto. Assessment of multilayer particleboards produced with green coconut and sugarcane bagasse fibers. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 205, p. 1–9, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.024.

GAMAL, Ahmed et al. Catalytic methane decomposition to carbon nanostructures and coxfree hydrogen: A mini-review. **Nanomaterials**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 10–17, 2021.

GARCÍA-FERNÁNDEZ, Sara et al. The role of tungsten oxide in the selective hydrogenolysis of glycerol to 1,3-propanediol over Pt/WOx/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Applied Catalysis B: Environmental**, [*s. l.*], v. 204, p. 260–272, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337316308748.

GERMAN, Randall M. Sintering Theory and Practice. *In*: JOHN WILEY & SONS (org.). **Sintering Theory and Practice**. New York: [*s. n.*], 1996. p. 67–137. Disponível em: https://www.wiley.com/en-us/9780471057864. Acesso em: 4 out. 2021.

GO, Alchris Woo et al. An innovative approach in the synthesis of solid acid catalyst from sugarcane bagasse for the esterification of oleic acid and methanol. **Biomass and Bioenergy**, [*s. l.*], v. 157, n. January, p. 106351, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106351.

GODA, Mohamed Nady; SAID, Abd El Aziz Ahmed; EL-AAL, Mohamed Abd. Mineral acid-activated sugarcane bagasse ash as solid acid catalyst for the liquid phase esterification of acetic acid with n-amyl, benzyl, and n-butyl alcohols. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s*. *l*.], v. 10, n. 2, p. 107355, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107355.

GOMES, Elisa S. et al. Strategy to design zeolite catalysts in the presence of biomass. **Microporous and Mesoporous Materials**, [*s. l.*], v. 254, p. 28–36, 2017.

GOMES, Elisa S. et al. ZSM-5 synthesis by the assistance of biomass and biomass-derivate

compounds. **Microporous and Mesoporous Materials**, [*s. l.*], v. 263, n. December 2017, p. 251–256, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.12.022.

GOMES DE PAULA, Paula et al. Formulation and characterization of polypropylene composites alkali treated bagasse fiber. *In*: , 2014. **Materials Science Forum**. [*S. l.*]: Trans Tech Publications Ltd, 2014. p. 319–324.

GÓMEZ, S. Y. et al. Relationship between rheological behaviour and final structure of Al 2O3 and YSZ foams produced by replica. Advances in Materials Science and Engineering, [*s*. *l*.], v. 2012, 2012.

GOPI, S; PIUS, A; THOMAS, S. 11 - Synthesis, microstructure, and properties of highstrength porous ceramics. *In*: THOMAS, Sabu; BALAKRISHNAN, Preetha; SREEKALA, M S B T - Fundamental Biomaterials: Ceramics (org.). **Woodhead Publishing Series in Biomaterials**. [*S. l.*]: Woodhead Publishing, 2018. p. 265–271. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022030000111.

GOPINATH, Athira et al. A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 203, p. 89–108, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252.

GROSSE, Julia et al. Morphological characterization of ceramic sponges for applications in chemical engineering. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 48, n. 23, p. 10395–10401, 2009.

GUO, Xinshuang et al. A novel method for preparation of interconnected pore-gradient ceramic foams by gelcasting. **Journal of Porous Materials**, [*s*. *l*.], v. 19, n. 5, p. 853–858, 2012.

GUO, Wei; LU, Hongbin; FENG, Chunxia. Influence of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on preparation and performance of porous cordierite from rice husk. **Journal of Rare Earths**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 614–617, 2010. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002072109601654.

GUTIÉRREZ, C. A.; MORENO, R. Preventing ageing on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> casting slips dispersed with polyelectrolytes. **Journal of Materials Science**, [*s. l.*], v. 35, n. 23, p. 5867–5872, 2000.

HAGHDAN, Shayesteh; RENNECKAR, Scott; SMITH, Gregory D. 1 - Sources of Lignin. *In*: FARUK, Omar; SAIN, Mohini B T - Lignin in Polymer Composites (org.). [*S. l.*]: William Andrew Publishing, 2016. p. 1–11. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323355650000011.

HAJIHA, Hamideh; SAIN, Mohini; MEI, Lucia H. Modification and Characterization of Hemp and Sisal Fibers. **Journal of Natural Fibers**, [*s*. *l*.], v. 11, n. 2, p. 144–168, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2013.861779.

HAMEED, Safia; COMINI, Elisabetta. Methane conversion for hydrogen production: technologies for a sustainable future. **Sustainable Energy and Fuels**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 670–683, 2024.

HAN, Jun et al. Ni@HC Core–Shell Structured Catalysts for Dry Reforming of Methane and Carbon Dioxide. **Catalysis Letters**, [*s*. *l*.], v. 149, n. 11, p. 3224–3237, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10562-019-02889-2.

HE, Songbo et al. Dehydrogenation of long chain paraffins over supported Pt-Sn-K/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts: A study of the alumina support effect. **Applied Catalysis A: General**, [*s. l.*], v. 356, n. 1, p. 88–98, 2009. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X08007862.

HE, Zhigui et al. Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops. **Environment International**, [*s. l.*], v. 77, p. 85–94, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2015.01.004.

HUANCA, K. Z.; NUNES, A. B.De A. Obtenção de espumas cerâmicas a partir de resíduo da terra diatomácea e ignimbrita pelo método de réplica. **Ceramica**, [*s*. *l*.], v. 62, n. 362, p. 110–114, 2016.

HUANG, Rulu et al. Catalytic transfer hydrogenation of levulinic acid to  $\gamma$ -valerolactone over an acids-base trifunctional Hf-bagasse coordination complex derived catalyst. **Fuel**, [*s. l.*], v. 305, n. July, p. 121557, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121557.

HUANG, Zuqiang et al. Effect of mechanical activation pretreatment on the properties of sugarcane bagasse/poly(vinyl chloride) composites. [s. l.], 2011.

HUANG, Gang et al. ScienceDirect Bimetallic nickel molybdate supported Pt catalyst for efficient removal of formaldehyde at low temperature. **Journal of Environmental Sciences**, [*s*. *l*.], v. 87, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.06.005.

IBRAHIMOV, Hikmet et al. Ni-γ-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for obtaining nanocarbon by decomposition of natural gas. **Applied Petrochemical Research**, [*s. l.*], v. 11, n. 1, p. 123–128, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13203-021-00264-0.

IMARC GROUP. Industrial Catalyst Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://www.marknteladvisors.com/research-library/catalyst-market.html. .

INNOCENTINI, Murilo D.M.; PANDOLFELLI, Victor C. Permeability of Porous Ceramics Considering the Klinkenberg and Inertial Effects. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s*. *l*.], v. 84, n. 5, p. 941–944, 2001.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físicos-quimicos para análise de Alimentos**. 4. ed. São Paulo: [*s. n.*], 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method (ISO 9277:2010(E))Reference number ISO**. [*S. l.: s. n.*], 2010. Disponível em: www.iso.org. .

JAMALLUDIN, Mohd Riduan et al. Morphology and property study of green ceramic hollow fiber membrane derived from waste sugarcane bagasse ash (WSBA). **Ceramics International**, [*s*. *l*.], v. 44, n. 15, p. 18450–18461, 2018.

JAMALLUDIN, Mohd Riduan et al. Novel superhydrophobic and superoleophilic sugarcane green ceramic hollow fibre membrane as hybrid oil sorbent-separator of real oil and water mixture. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 240, p. 136–139, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.12.111.

JANIPOOR, Reihaneh; MOHAGHEGHIAN, Azita; SHIRZAD-SIBONI, Mehdi. Photocatalytic removal of AR14 from aqueous solutions under visible light irradiation by synthesising sugarcane bagasse magnetic graphene oxide. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, [*s. l.*], p. 1–19, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1080/03067319.2021.2009473.

JAVADLI, Rashad; KLERK, Arno De. Desulfurization of heavy oil. **Applied Petrochemical Research**, [*s*. *l*.], n. 1, p. 3–19, 2012.

JAWORSKI, María A. et al. Removal of nitrate from drinking water by using PdCu structured catalysts based on cordierite monoliths. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [*s. l.*], v. 36, n. 2, p. 705–715, 2019.

JI, Jian et al. Mesoporous TiO<sub>2</sub> under VUV irradiation: Enhanced photocatalytic oxidation for VOCs degradation at room temperature. **Chemical Engineering Journal**, [*s. l.*], v. 327, p. 490–499, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.130.

JIANG, Fengyang et al. Morph-genetic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> porous ceramic with fabric-structure by processed bio-template from ramie fibres. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 194, p. 242–245, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.069.

JIANG, Fengyang et al. Synthesis of biomorphic SiC fabric ceramic from pre-processed ramie fibres. Advances in Applied Ceramics, [s. l.], v. 116, n. 5, p. 242–247, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/17436753.2017.1280253.

JIMÉNEZ-GONZÁLES, Cristina et al. Behavior of Coprecipitated NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts for Low- Temperature Methane Steam Reforming. **Energy & Fuels**, [*s. l.*], v. 28, n. 11, p. 7109–7121, 2014.

JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, Cristina et al. Behavior of Coprecipitated NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts for Low-Temperature Methane Steam Reforming. **Energy & Fuels**, [*s. l.*], v. 28, n. 11, p. 7109–7121, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1021/ef501612y.

JOHN, Maya Jacob; THOMAS, Sabu. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, [*s. l.*], v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861707002974.

KAMAL, Muhammad Shahzad; RAZZAK, Shaikh A.; HOSSAIN, Mohammad M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs) - A review. **Atmospheric Environment**, [*s. l.*], v. 140, p. 117–134, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.031.

KANG, Shunyu et al. Significant enhancement in water resistance of Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for benzene oxidation by Na addition. **Chinese Chemical Letters**, [*s. l.*], v. 30, n. 7, p. 1450–1454, 2019. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001841719301184.

KAZAKOVA, Mariya A et al. Boosting hydrodesulfurization activity of CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst via selective graphitization of alumina surface. **Microporous and Mesoporous Materials**, [*s. l.*], v. 317, p. 111008, 2021. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181121001347.

KAZEMINAVA, Fahimeh; TAVAKOLI, Ziba. Sulfonated magnetic sugarcane bagasse as an efficient natural polymer-based catalyst for the synthesis of nitrogen-containing heterocyclic rings in water. **Molecular Diversity**, [*s. l.*], 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11030-021-10285-5.

KELLER, Martin; MATSUMURA, Akimitsu; SHARMA, Atul. Spray-dried Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a carbon carrier for COx-free hydrogen production via methane cracking in a fluidized bed process. **Chemical Engineering Journal**, [*s. l.*], v. 398, n. May, p. 125612, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125612.

KHAN, Mohammed Ikramullah; SAYYED, Mohd Abbas Abdy; ALI, Mohammed Meer Assad. Examination of cement concrete containing micro silica and sugarcane bagasse ash subjected to sulphate and chloride attack. **Materials Today: Proceedings**, [*s. l.*], v. 39, n. xxxx, p. 558–562, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.468.

KIM, Ki-Joong; BOO, Su-II; AHN, Ho-Geun. Preparation and characterization of the bimetallic Pt–Au/ZnO/Al2O3 catalysts: Influence of Pt–Au molar ratio on the catalytic activity for toluene oxidation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [*s. l.*], v. 15, n. 1, p. 92–97, 2009. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X09000185.

KIM, Hyun Soo; KANG, Misook. Rapid crystal phase transformation into hexagonally shaped  $\alpha$ -alumina using AlF3 seeds. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 110–120, 2013.

KOMEILI, Samane et al. The properties of nickel aluminate nanoparticles prepared by solgel and impregnation methods. **Research on Chemical Intermediates**, [*s. l.*], v. 42, n. 12, p. 7909–7921, 2016.

KOOL, Arpan et al. Synthesis of nanocrystalline photoluminescent mullite using sacrificial cotton wool and filter paper templates. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 100, n. 10, p. 4836–4847, 2017.

KOVÁŘÍK, Tomáš et al. Synthesis of open-cell ceramic foam derived from geopolymer precursor via replica technique. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 209, p. 497–500, 2017.

KWAK, Yeonsu et al. Effect of the support properties in dehydrogenation of biphenyl-based eutectic mixture as liquid organic hydrogen carrier (LOHC) over Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. **Fuel**, [*s. l.*], v. 284, p. 119285, 2021. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623612032281X.

LAIDANI, Ykhlef; HANINI, Salah; HENINI, Ghania. Use of fiber Luffa cylindrica for waters traitement charged in copper. Study of the possibility of its regeneration by desorption chemical. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 6, p. 381–388, 2011.

LANDI, Elena et al. Alkali-bonded ceramics with hierarchical tailored porosity. **Applied Clay Science**, [*s. l.*], v. 73, n. 1, p. 56–64, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.027.

LEI, Nian et al. Understanding the deactivation behavior of Pt/WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in the glycerol hydrogenolysis reaction. **Chinese Journal of Catalysis**, [*s. l.*], v. 41, n. 8, p. 1261–1267, 2020. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872206720635495.

LELO, Ricardo Velloso et al. Vanadium effect over  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-supported Ni catalysts for valorization of glycerol. **Fuel Processing Technology**, [*s*. *l*.], v. 216, p. 106773, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382021000527.

LI, Guangqin; LIU, Chunyan; LIU, Yun. Characteristics of hollow TiO<sub>2</sub> fibers via replication of sisal fiber. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s*. *l*.], v. 90, n. 4, p. 1283–1285, 2007.

LIANG, Yan et al. Synthesis of Ni-Mg@HC catalyst derived from sugarcane bagasse and its application for producing syngas via CO2 dry reforming. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [*s. l.*], p. 1–14, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1670290.

LIOTTA, L. F. Catalytic oxidation of volatile organic compounds on supported noble metals. **Applied Catalysis B: Environmental**, [*s. l.*], v. 100, n. 3–4, p. 403–412, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.08.023.

LIU, Juan et al. Effects of Fe species on promoting the dibenzothiophene hydrodesulfurization over the  $Pt/\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. **Catalysis Today**, [*s. l.*], v. 371, p. 247–

257, 2021. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586120305022.

LIU, Xin et al. One-pot synthesis of mesoporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-supported Pt-Pd catalysts for toluene combustion. **Catalysis Communications**, [*s*. *l*.], v. 115, p. 26–30, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566736718302401.

LIU, Hao et al. Three-dimensional printing of poly(lactic acid) bio-based composites with sugarcane bagasse fiber: Effect of printing orientation on tensile performance. **Polymers for Advanced Technologies**, [*s*. *l*.], v. 30, n. 4, p. 910–922, 2019.

LIU, Mingjuan et al. Upgrading of palmitic acid and hexadecanamide over Co-based catalysts: Effect of support (SiO<sub>2</sub>,  $\Gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and H-ZSM-22). **Catalysis Communications**, [*s. l.*], v. 129, 2019.

LIU, P S; CHEN, G F. Chapter One - General Introduction to Porous Materials. *In*: LIU, P S; CHEN, G F B T - Porous Materials (org.). Boston: Butterworth-Heinemann, 2014. p. 1–20. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124077881000010.

LIU, Xinmei; LI, Xiang; YAN, Zifeng. Facile route to prepare bimodal mesoporous  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as support for highly active CoMo-based hydrodesulfurization catalyst. **Applied Catalysis B: Environmental**, [*s. l.*], v. 121–122, p. 50–56, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337312001270.

LIU, Zhong; WANG, Huimei; HUI, Lanfeng. Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers. *In*: PULP AND PAPER PROCESSING. [*S. l.*]: InTech, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79017. Acesso em: 29 maio 2021.

LOGANAYAGAN, S.; MOHAN, N. Chandra; DHIVYABHARATHI, S. Sugarcane bagasse ash as alternate supplementary cementitious material in concrete. **Materials Today: Proceedings**, [*s. l.*], v. 45, n. xxxx, p. 1004–1007, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.060.

LOUIS, Benoît et al. Influence of biomass residues on the metastability of zeolite structures. **Nanoscience and Nanotechnology Letters**, [*s. l.*], v. 8, n. 11, p. 917–923, 2016.

LU, John Z. et al. The influences of fiber feature and polymer melt index on mechanical properties of sugarcane fiber/polymer composites. **Journal of Applied Polymer Science**, [*s. l.*], v. 102, n. 6, p. 5607–5619, 2006.

LUO, Lei et al. Facile synthesis of boehmite/PVA composite membrane with enhanced adsorption performance towards Cr(VI). **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 318, p. 452–459, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.019.

LUZ, S. M. et al. Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites: Effect of acetylation on mechanical and thermal properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [*s. l.*], v. 39, n. 9, p. 1362–1369, 2008.

LUZ, Sandra M.; CALDEIRA-PIRES, Armando; FERRÃO, Paulo M.C. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components. **Resources, Conservation and Recycling**, [*s*. *l*.], v. 54, n. 12, p. 1135–1144, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.009.

MAMAYE, Medhanit et al. Valorization of Ethiopian Sugarcane Bagasse to Assess its Suitability for Pulp and Paper Production. **Sugar Tech**, [*s*. *l*.], v. 21, n. 6, p. 995–1002, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12355-019-00724-x.

MANGI, Sajjad Ali et al. Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 271, n. 1, 2017.

MARAFON, ANDERSON CARLOS. Análise Quantitativa de Crescimento em Cana-de-Açúcar: uma Introdução ao Procedimento Prático. 1. ed. Aracaju - SE: [s. n.], 2012. (Documentos).

MARTIN, A R. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave Sisalana. **Polimeros: Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 19, p. 40–46, 2009.

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, E et al. Sugarcane Bagasse Valorization Strategies for Bioethanol and Energy Production. 2017. **Anais** [...]. [S. l.: s. n.], 2017.

MARTINS, Amanda Luiza Bezerra Sandes et al. Characterization of epoxy matrix composites incorporated with sugarcane bagasse fibers. 2014. **Materials Science Forum**. [*S. l.*]: Trans Tech Publications Ltd, 2014. p. 102–106.

MARTINS, Luiza Helena Da Silva et al. Potential feedstocks for second-generation ethanol production in Brazil. *In*: SUSTAINABLE BIOFUEL AND BIOMASS: ADVANCES AND IMPACTS. [*S. l.*]: CRC Press, 2019. p. 145–166.

MAZALI, Italo O.; ALVES, Oswaldo L. Morphosynthesis: High fidelity inorganic replica of the fibrous network of loofa sponge (Luffa cylindrical). Anais da Academia Brasileira de Ciencias, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 25–31, 2005.

MAZIVIERO, Fernando V. et al. Synthesis of alumina by microwave-assisted combustion method using low fuel content and its use as catalytic support for dry reforming of methane. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 264, n. August 2020, 2021.

MEDINA, J C. **Plantas Fibrosas da Flora Mundial**. Campinas - SP: Instituto Agronômico de Campinas, 1959.

MELLO, Larissa C. de A. et al. Effect of high temperatures on self-compacting concrete with high levels of sugarcane bagasse ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 248, p. 118715, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118715.

MENEZES, R. R. et al. Obtenção de mulita porosa a partir da sílica da casca de arroz e do acetato de alumínio. **Cerâmica**, [*s. l.*], v. 54, n. 330, p. 245–252, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/j/ce/a/fk9JKYJ8ShKXVb8qNXppc5P/?lang=pt&format=html. Acesso em: 3 ago. 2021.

MILAK, P. C. et al. Wear performance of alumina-based ceramics - A review of the influence of microstructure on erosive wear. **Ceramica**, [s. l.], v. 61, n. 357, p. 88–103, 2015.

MO, Wenlong et al. Preparation of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by template method and its application in Ni-based catalyst for CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> reforming to produce syngas. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 40, n. 46, p. 16147–16158, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.149.

MOCANU, Aura-Catalina et al. Comprehensive analysis of compatible natural fibre as sacrificial porogen template for tailored ceramic 3D bioproducts destined for hard tissue reconstruction. **Ceramics International journal**, [*s. l.*], v. 47, n. September 2020, p. 5318–5334, 2021.

MOHAMAD, Siti Nur Syakirah et al. Synthesis of alumina nanoparticles by sol-gel method and their applications in the removal of copper ions  $(Cu^{2+})$  from the solution. **IOP** 

Conference Series: Materials Science and Engineering, [s. l.], v. 701, n. 1, 2019.

MOHANTA, Kalyani et al. ScienceDirect Processing and properties of low cost macroporous alumina ceramics with tailored porosity and pore size fabricated using rice husk and sucrose. [s. l.], 2014. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 19 jun. 2021.

MOHANTY, Pravakar et al. Synthesis of green fuels from biogenic waste through thermochemical route – The role of heterogeneous catalyst: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 38, p. 131–153, 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400327X.

MOHANTY, A; GANGOPADHYAY, S; THAKUR, A. On Applicability of Multilayer Coated Tool in Dry Machining of Aerospace Grade Stainless Steel. **Materials and Manufacturing Processes**, [*s*. *l*.], v. 31, n. 7, p. 869–879, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1070413.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, [s. l.], v. 276–277, p. 1–24, 2000.

MOKHNACHUK, O. V.; SOLOVIEV, S. O.; KAPRAN, A. Yu. Effect of rare-earth element oxides (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) on the structural and physico-chemical characteristics of Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> monolithic catalysts of nitrogen oxide reduction by methane. **Catalysis Today**, [*s. l.*], v. 119, n. 1–4, p. 145–151, 2007.

MONTEIRO, S. N. et al. Sugar cane bagasse waste as reinforcement in low cost composites. Advanced Performance Materials, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 183–191, 1998.

MOORE, Paul H.; PATERSON, Andrew H.; TEW, Thomas. Sugarcane: The Crop, the Plant, and Domestication. *In*: SUGARCANE: PHYSIOLOGY, BIOCHEMISTRY, AND FUNCTIONAL BIOLOGY. [*S. l.*]: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 1–17.

MORENO, Verônica et al. Produção e caracterização de espumas macrocelulares de alumina para aplicação em queimadores radiantes. **Exacta**, [*s. l.*], v. 7, n. 2, p. 205–214, 2010.

MORETTI, Juliana P. et al. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 113, p. 317–323, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062.

MOTHÉ, C. G. et al. Thermal decomposition kinetics of polyurethane-composites with bagasse of sugar cane. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 305–312, 2002.

MOTTA, Rayssa; DORNELAS, Camila; DE ALMEIDA, Rusiene. Nickel Nanoparticles Anchored on Bentonite Clay for Methane Decomposition with Ordered Carbon as a Product. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [*s*. *l*.], v. 00, n. 00, p. 1–11, 2023.

MOUBARIK, Amine; GRIMI, Nabil; BOUSSETTA, Nadia. Structural and thermal characterization of Moroccan sugar cane bagasse cellulose fibers and their applications as a reinforcing agent in low density polyethylene. **Composites Part B: Engineering**, [*s. l.*], v. 52, p. 233–238, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.040.

MOURATIB, Rajaa et al. Low-cost ceramic membrane made from alumina- and silica-rich water treatment sludge and its application to wastewater filtration. **Journal of the European Ceramic Society**, [*s*. *l*.], v. 40, n. 15, p. 5942–5950, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221920306051.

MUHAMAD NOR, Mohd Al Amin et al. Preparation and characterization of ceramic foam

produced via polymeric foam replication method. **Journal of Materials Processing Technology**, [*s. l.*], v. 207, n. 1–3, p. 235–239, 2008.

MWAIKAMBO, Leonard Y.; ANSELL, Martin P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 84, n. 12, p. 2222–2234, 2002.

MYRONYUK, Ivan F. et al. Structural and Morphological Features of Disperse Alumina Synthesized Using Aluminum Nitrate Nonahydrate. **Nanoscale Research Letters**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1186/s11671-016-1366-0.

NAKASHIMA, Gabriela Tami et al. Sugarcane trash for energy purposes: Storage time and particle size can improve the quality of biomass for fuel?. **Industrial Crops and Products**, [*s. l.*], v. 108, n. September 2016, p. 641–648, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.017.

NAZIR, Muhammad Hamza et al. Development of lignin based heterogeneous solid acid catalyst derived from sugarcane bagasse for microwave assisted-transesterification of waste cooking oil. **Biomass and Bioenergy**, [*s. l.*], v. 146, n. January, p. 105978, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105978.

NETO, Antonio Calil; GUIMARÃES, Maria José O.C.; FREIRE, Estevão. Business models for commercial scale second-generation bioethanol production. **Journal of Cleaner Production**, [*s*. *l*.], v. 184, p. 168–178, 2018.

NIJU, Subramaniapillai et al. Sugarcane bagasse derived biochar – a potential heterogeneous catalyst for transesterification process. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [*s. l.*], p. 1–12, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1680771.

NODA, LÚCIA K et al. Effect of Ni loading and reaction temperature on the formation of carbon nanotubes from methane catalytic decomposition over Ni/SiO<sub>2</sub>. **Journal of Materials Science**, [*s. l.*], v. 42, n. 2, p. 914–922, 2007.

NOH, Young Su; LEE, Kwan Young; MOON, Dong Ju. Hydrogen production by steam reforming of methane over nickel based structured catalysts supported on calcium aluminate modified SiC. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 44, n. 38, p. 21010–21019, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.287.

NUMPILAI, Thanapha et al. Sustainable utilization of waste glycerol for 1,3-propanediol production over Pt/WOx/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts: Effects of catalyst pore sizes and optimization of synthesis conditions. **Environmental Pollution**, [*s. l.*], v. 272, p. 116029, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912036718X.

OBOH, I. O.; ALUYOR, E. O. Luffa cylindrica - an emerging cash crop. African Journal of Agricultural Research, [s. l.], v. 4, n. 8, p. 684–688, 2009.

OCAMPO, F. et al. Synthesis of zeolite crystals with unusual morphology: Application in acid catalysis. **Applied Catalysis A: General**, [*s. l.*], v. 390, n. 1–2, p. 102–109, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2010.09.037.

OHJI, Tatsuki. Chapter 11.2.2 - Porous Ceramic Materials. *In*: SOMIYA, Shigeyuki B T -Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition) (org.). **Handbook of Advanced Ceramics**. Oxford: Academic Press, 2013. p. 1131–1148. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123854698000599.

OHJI, T.; FUKUSHIMA, M. Macro-porous ceramics: Processing and properties. **International Materials Reviews**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 115–131, 2012.

OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e Empacotamento de Partículas - Princípios e Aplicações emProcessamento Cerâmico**. [*S. l.*]: Associação Brasileira de Cerâmica, 2001-. ISSN 0366-6913. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0366-

69132001000100013&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 30 maio 2021.

OSMAN, Ahmed I. et al. A Facile Green Synthetic Route for the Preparation of Highly Active  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from Aluminum Foil Waste. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017.

OTROSHCHENKO, Tatiana et al. Current status and perspectives in oxidative, non-oxidative and CO<sub>2</sub>-mediated dehydrogenation of propane and isobutane over metal oxide catalysts. **Chemical Society Reviews**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 473–527, 2021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1039/D0CS01140A.

PALMA, Kelly Roberta de et al. The influence of the elemental and structural chemical composition on the ash fusibility of sugarcane bagasse and sugarcane straw. **Fuel**, [*s. l.*], v. 304, n. July, p. 121404, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121404.

PANDEY, A K; KUMAR, A; SHRIVASTAVA, S C. Sugarcane Bagasse Ash-Based Silica-Supported Boric Acid (SBA-SiO<sub>2</sub>-H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>): A Versatile and Reusable Catalyst for the Synthesis of 1,4Dihydropyrano[2,3c]pyrazole Derivatives. **Russian Journal of Organic Chemistry**, [*s. l.*], v. 57, n. 4, p. 653–660, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1134/S1070428021040229.

PAPA, E. et al. Porosity and insulating properties of silica-fume based foams. **Energy and Buildings**, [*s*. *l*.], v. 131, p. 223–232, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.031.

PAPETTI, V. et al. Additive Manufactured open cell polyhedral structures as substrates for automotive catalysts. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 126, p. 1035–1047, 2018.

PARAMESWARAN, Binod. Sugarcane Bagasse. *In*: SINGH NEE' NIGAM, P; PANDEY, A. (org.). **Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 239–252. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-9942-7\_12.

PARMAR, Kaushal R.; PANT, K. K.; ROY, Shantanu. Blue hydrogen and carbon nanotube production via direct catalytic decomposition of methane in fluidized bed reactor: Capture and extraction of carbon in the form of CNTs. **Energy Conversion and Management**, [*s. l.*], v. 232, n. February, p. 113893, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113893.

PEGO, Matheus Felipe Freire; BIANCHI, Maria Lúcia; VEIGA, Tais Regina Lima Abreu. Avaliação das propriedades do bagaço de cana e bambu para produção de celulose e papel. **Revista de Ciências Agrárias**, [*s. l.*], p. 1–11, 2019.

PERRY, Cynthia. **Os Principais Países Produtores De Sisal Do Mundo | 2021**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://pt.ripleybelieves.com/top-sisal-producing-countries-in-world-5213. Acesso em: 18 maio 2021.

PHAM, Cham Q. et al. Production of hydrogen and value-added carbon materials by catalytic methane decomposition: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [*s*. *l*.], v. 20, n. 4, p. 2339–2359, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10311-022-01449-2.

PITKÄAHO, Satu et al. Oxidation of dichloromethane over Pt, Pd, Rh, and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> catalysts

supported on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>. **Applied Catalysis B: Environmental**, [*s. l.*], v. 138–139, p. 33–42, 2013.

PIVETTA, Marcos. Compostos naturais podem aumentar produção de etanol de bagaço de cana. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, v. 325, p. 39–41, 2023. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/compostos-naturais-podem-aumentar-producao-de-etanol-de-bagaco-de-cana/.

PORSANI, N. K. et al.  $\beta$ -Tricalcium phosphate shaped by replica method. **Ceramica**, [s. l.], v. 65, n. 376, p. 523–530, 2019.

PROCÓPIO, Alley Michael Silva et al. CeO<sub>2</sub> thin film supported on TiO<sub>2</sub> porous ceramics. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 276, p. 2–5, 2020.

PROETHANOL2G. Final Report Summary - PROETHANOL2G (Integration of Biology and Engineering into an Economical and Energy-Efficient 2G Bioethanol Biorefinery) | Report Summary | PROETHANOL2G | FP7 | CORDIS | European Commission. [S. l.], 2015. Disponível em: https://cordis.europa.eu/project/id/251151/reporting. Acesso em: 29 maio 2021.

PROTIĆ, Milan et al. Application of thermogravimetry for determination of carbon content in biomass ash as an indicator of the efficiency of the combustion process. **Tehnicki Vjesnik**, [*s. l*.], v. 28, n. 5, p. 1762–1768, 2021.

QADRI, S. B. et al. Production of nanoscale particles and nanorods of SiC from sorghum leaves. **Industrial Crops and Products**, [*s. l.*], v. 51, p. 158–162, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.004.

RAJASEKAR, A. et al. Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 171, p. 350–356, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140.

RASHIDI VAHID, Adina et al. A bagasse-supported magnetic manganese dioxide nanoparticle: applications in the selective aerobic oxidation of alcohols and one-pot tandem oxidative synthesis of quinazolinones. **Journal of the Iranian Chemical Society**, [*s. l.*], 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13738-021-02483-7.

RASTEGARPANAH, Ali et al. Thermocatalytic decomposition of methane over mesoporous Ni/xMgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocatalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 43, n. 32, p. 15112–15123, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.057.

RATANASUMARN, Nitchanan; CHITPRASERT, Pakamon. Cosmetic potential of lignin extracts from alkaline-treated sugarcane bagasse: Optimization of extraction conditions using response surface methodology. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 153, p. 138–145, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.328.

RAVI, Krishnan et al. Sustainable route for the synthesis of flower-like Ni@N-doped carbon nanosheets from bagasse and its catalytic activity towards reductive amination of nitroarenes with bio-derived aldehydes. **New Journal of Chemistry**, [*s*. *l*.], v. 44, n. 43, p. 18714–18723, 2020.

RAVI, Krishnan; BIRADAR, Ankush V. Highly active and scalable SO<sub>3</sub>H functionalized carbon catalyst synthesized from bagasse for transformation of bio-based platform chemicals into fuel precursors and its in-depth characterization studies. **Fuel**, [*s. l.*], v. 321, n. March, p. 124008, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124008.

RIBEIRO, G. C. et al. Evaluation of mechanical properties of porous alumina ceramics obtained using rice husk as a porogenic agent. **Cerâmica**, [*s. l.*], v. 65, p. 70–74, 2019.

Disponível em: http://www.scielo.br/j/ce/a/VXmTqCtDhyhrB4nDwHvxWFp/?lang=en. Acesso em: 2 ago. 2021.

RIBEIRO, Bruno; YAMASHIKI, Yosuke; YAMAMOTO, Takashi. A study on mechanical properties of mortar with sugarcane bagasse fiber and bagasse ash. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [*s. l.*], v. 22, n. 6, p. 1844–1851, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10163-020-01071-w.

RICHARDSON ', James T; TWIGG, Martyn V. Reduction of impregnated NiO/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Association of A13+ ions with NiO. **Applied Catalysis A: General**, [*s. l.*], v. 167, p. 57–64, 1998.

RICHERSON, David W.; LEE, William E. **Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design**. 4. ed. [*S. l.*]: CRC Press, 2018. Disponível em: http://taylorandfrancis.com. Acesso em: 30 maio 2021.

RILYANTI, M. et al. Utilization of zeolite H-MOR based on bagasse ash silica as a catalyst for the hydrolysis reaction of cassava peel cellulose for glucose production. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1751, n. 1, 2021.

RIMAZ, Sajjad et al. Enhanced selectivity and stability of Pt-Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts by Ca promotion in propane dehydrogenation. **Chemical Engineering Journal**, [*s. l.*], v. 405, p. 126656, 2021. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720327844.

RÍOS-PARADA, Venustiano et al. Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 157, p. 83–95, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060.

RIYAJAN, S.; INTHARIT, I. Characterization of modified bagasse and investigation properties of its novel composite. **Journal of Elastomers and Plastics**, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 513–528, 2011. Disponível em:

https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0095244311413440. Acesso em: 11 maio 2021.

ROCHA, George Jackson de Moraes et al. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. **Industrial Crops and Products**, [*s*. *l*.], v. 64, p. 52–58, 2015.

RODIER, Loïc et al. Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, [*s*. *l*.], v. 231, p. 54–63, 2019.

SABER, Meryem; PHAM-HUU, Cuong; EDOUARD, David. Axial dispersion based on the residence time distribution curves in a millireactor filled with  $\beta$ -sic foam catalyst. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 51, n. 46, p. 15011–15017, 2012.

SABIHA-HANIM, Saleh; ASYIKIN ABD HALIM, Nurul. Sugarcane Bagasse Pretreatment Methods for Ethanol Production. *In*: FUEL ETHANOL PRODUCTION FROM SUGARCANE. [*S. l.*]: IntechOpen, 2019.

SAID, S.; MIKHAIL, S.; RIAD, M. Recent progress in preparations and applications of meso-porous alumina. **Materials Science for Energy Technologies**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 288–297, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.02.005.

SAIR, S. et al. Effect of surface modification on morphological, mechanical and thermal conductivity of hemp fiber: Characterization of the interface of hemp -Polyurethane composite. **Case Studies in Thermal Engineering**, [s. l.], v. 10, n. November, p. 550–559,

2017.

SALES, Almir; LIMA, Sofia Araújo. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 1114–1122, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.026.

SALHI, N. et al. Steam reforming of methane to syngas over NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel catalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 36, n. 17, p. 11433–11439, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.071.

SALLEH, Siti Zuliana et al. Recycling food, agricultural, and industrial wastes as poreforming agents for sustainable porous ceramic production: A review. **Journal of Cleaner Production**, [*s*. *l*.], v. 306, 2021.

SANJAY, M. R. et al. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, [*s*. *l*.], v. 172, p. 566–581, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101.

SANTOS, S. C. et al. Bio-prototyping and thermoluminescence response of cellular rare earth ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, [*s*. *l*.], v. 36, n. 3, p. 791–796, 2016.

SANTOS, S. C. et al. Yttrium disilicate micro-cellular architecture from biotemplating of Luffa Cylindrica. **Journal of Ceramic Science and Technology**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 203–208, 2014.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF.: Embrapa Solos, 2018.

SANTOS, Rafael Marques; KOZLOWSKI JUNIOR, Vitoldo Antônio. *Luffa cylindrica* – análise do desgaste e das substâncias presentes após sua utilização como escova dental alternativa. **Brazilian Journal of Development**, [*s. l.*], v. 5, n. 9, p. 15945–15956, 2019.

SATTLER, Jesper J.H.B. et al. Catalytic dehydrogenation of light alkanes on metals and metal oxides. **Chemical Reviews**, [*s*. *l*.], v. 114, n. 20, p. 10613–10653, 2014.

SAXENA, Rishabh; DE, Mahuya. Ni/Cu/Ag promoted Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts prepared by electroless co-deposition for enhanced butane dehydrogenation. **Materials Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 261, p. 124236, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058421000195.

SEDYONO, Joko et al. Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composition on the physical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foam prepared by foam replication method. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, [*s. l.*], v. 69, n. 1, p. 179–184, 2021.

SERETIS, Antonios; TSIAKARAS, Panagiotis. Crude bio-glycerol aqueous phase reforming and hydrogenolysis over commercial SiO2Al2O3 nickel catalyst. **Renewable Energy**, [*s. l.*], v. 97, p. 373–379, 2016. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116304955.

SHADANGI, Krushna Prasad; MOHANTY, Kaustubha. Kinetic study and thermal analysis of the pyrolysis of non-edible oilseed powders by thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis. **Renewable Energy**, [*s. l.*], n. 63, p. 337–344, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.039. Acesso em: 18 jun. 2021.

SHAN, Yu-Ling et al. Effects of alumina phases on the structure and performance of VOx/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts in non-oxidative propane dehydrogenation. **Molecular Catalysis**, [*s. l.*], v. 504, p. 111466, 2021. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468823121000833.

SHEIKH KHALID, Faisal; HERMAN, Herman Shah; AZMI, Nurul Bazilah. Properties of Sugarcane Fiber on the Strength of the Normal and Lightweight Concrete. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 103, 2017.

SHEN, D K; GU, S; BRIDGWATER, A V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicellulose. **Carbohydrate Polymers**, [*s. l.*], v. 82, p. 39–45, 2010.

SHOKROLLAHI YANCHESHMEH, Marziehossadat et al. A novel synthesis of NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel from a Ni-Al mixed-metal alkoxide as a highly efficient catalyst for hydrogen production by glycerol steam reforming. **Applied Catalysis B: Environmental**, [*s. l.*], v. 265, n. July 2019, p. 118535, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118535.

SHUMILOV, Vladimir et al. Preparation of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic foams as catalyst carriers via the replica technique. **Catalysis Today**, [*s. l.*], 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586120306611.

SHUMILOV, Vladimir et al. Preparation of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic foams as catalyst carriers via the replica technique. **Catalysis Today**, [*s. l.*], v. 383, n. June 2020, p. 64–73, 2022.

SILVA, Sergio Delmar dos Anjos e et al. **Alternativas para a Diversificação da Agricultura Familiar de Base Ecológica-2017**. 1. ed. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2017-. ISSN 1516-8840;443. Disponível em: www.embrapa.br/clima-temperado. Acesso em: 17 maio 2021.

SILVA, Larissa B. et al. Incorporating sugarcane bagasse ash into Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tapes. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 213–220, 2021.

SILVA, D. M. et al. Obtenção de derivado de celulose a partir do bagaço de cana-de-açúcar com potencial aplicação nas indústrias farmacêutica e cosmética. **Revista de Ciencias Farmaceuticas Basica e Aplicada**, [*s. l.*], v. 32, n. 1, p. 41–45, 2011.

SILVA, S. A. et al. Preparation of a reticulated ceramic using vegetal sponge as templating. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 35, n. 4, p. 1575–1579, 2009.

SILVA, Ramires Nogueiro; LIMA, Francisco Espedito. Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração. **Revista GEAMA**, [*s. l.*], v. 6, n. 2, p. 25–33, 2020.

SOUSA, E. et al. LZSA glass ceramic foams prepared by replication process. Advances in Applied Ceramics, [s. l.], v. 104, n. 1, p. 22–29, 2005.

SOUSA, E. de; ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C. Produção e caracterização de espumas de alumina pelo processo gelcasting sem controle atmosférico. **Cerâmica**, [s. l.], v. 55, n. 334, p. 151–156, 2009.

SOUZA, A. E. et al. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, [*s*. *l*.], v. 92, n. 10, p. 2774–2780, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020.

SOUZA, THIAGO FELIPE CALDEIRA DE. **Catalisadores a base de Ni e Fe ancorados em alumina e CeO2 para decomposição do metano: Produção de hidrogênio e nanotubos de carbono**. 2015. 154 f. - Universidade Federal de Alagoas, [*s. l.*], 2015. Disponível em: http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1897. Acesso em: 30 maio 2021.

STAEL, Giovanni Chaves; TAVARES, Maria Ins Bruno. Solid-state carbon-13 NMR study

of material composites based on sugarcane bagasse and thermoplastics polymers. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 82, n. 9, p. 2150–2154, 2001.

STOCHERO, Naiane Paiva; PEDRO, Antonio; OLIVEIRA, Novaes De. Cellular Ceramics Produced from Ceramic Shell : Processing and Characterization. **Material Research**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 549–554, 2017.

STUDART, André R. et al. Processing routes to macroporous ceramics: A review. Journal of the American Ceramic Society, [s. l.], v. 89, n. 6, p. 1771–1789, 2006.

SUDHA, P. N. et al. **Corrosion of ceramic materials**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd., 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102203-0.00009-3.

SUDHAKAR, K. et al. Aerogels and Foamed Nanostructured Polymer Blends. [*S. l.*]: Elsevier Inc., 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-39408-6.00005-4.

SUN, Nannan et al. Catalytic performance and characterization of Ni-CaO-ZrO<sub>2</sub> catalysts for dry reforming of methane. **Applied Surface Science**, [*s*. *l*.], v. 257, n. 21, p. 9169–9176, 2011.

SUTHARSHANA, V. Protective role of Luffa cylindrica. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, [s. l.], v. 5, n. 9, p. 184–186, 2013.

SZCZYGIEŁ, Bogdan; KOŁODZIEJ, Małgorzata. Composite Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings and their corrosion resistance. **Electrochimica Acta**, [*s. l.*], v. 50, n. 20, p. 4188–4195, 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468605000988.

TAKENAKA, Sakae et al. Decomposition of methane over supported-Ni catalysts: Effects of the supports on the catalytic lifetime. **Applied Catalysis A: General**, [s. l.], v. 217, n. 1–2, p. 101–110, 2001.

TAN, P J; REID, S R; HARRIGAN, J J. Discussion: "The Resistance of Clamped Sandwich Beams to Shock Loading" Fleck, N. A., and Deshpande, V. S., 2004, ASME J. Appl. Mech., 71, pp. 386–401. **Journal of Applied Mechanics**, [*s. l.*], v. 72, n. 6, p. 978–979, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1115/1.2040452.

TEIXEIRA, Silvio Rainho et al. Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 91, n. 6, p. 1883–1887, 2008.

TEIXEIRA, S. R. et al. Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 134, p. 15–19, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.029.

TEZEL, Elif; FIGEN, Halit Eren; BAYKARA, Sema Z. Hydrogen production by methane decomposition using bimetallic Ni–Fe catalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 44, n. 20, p. 9930–9940, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.151.

THOMMES, Matthias et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, [*s*. *l*.], v. 87, n. 9–10, p. 1051–1069, 2015.

TROTMAN, E R. **Dyeing And Chemical Technology Of Textile Fibres**. 6. ed. [*S. l.*]: Lubrecht & Cramer Ltd, 1991.

TSENG, I. Hsiang; YOU, Bo Ju; CHANG, Po Ya. Sugarcane bagasse supported graphitic carbon nitride for photocatalytic conversion of carbon dioxide. **Catalysis Communications**, [*s. l.*], v. 164, p. 106431, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106431.

TURSUNOV, Obid et al. Studies of CO<sub>2</sub> gasification of the Miscanthus giganteus biomass over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> with K<sub>2</sub>O promoter as catalysts. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], v. 139, n. 6, p. 3481–3492, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10973-019-08773-w.

TYAGI, Swati et al. Production of Bioethanol From Sugarcane Bagasse: Current Approaches and Perspectives. **Applied Microbiology and Bioengineering**, [*s. l.*], p. 21–42, 2019.

UPHAM, D. Chester et al. Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon. **Science**, [*s. l.*], v. 358, n. 6365, p. 917–921, 2017.

VARÃO, Leandro Henrique Ribeiro et al. Synthesis of methyl biodiesel by esterification using magnetic nanoparticles coated with sulfonated lignin. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13399-021-02214-1.

VEDYAGIN, Aleksey A. et al. Selected Aspects of Hydrogen Production via Catalytic Decomposition of Hydrocarbons. **Hydrogen (Switzerland)**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 122–133, 2021.

VERMA, D. et al. Bagasse fiber composites-A review. Journal of Materials and Environmental Science, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 1079–1092, 2012.

VESENJAK, M.; VEYHL, C.; FIEDLER, T. Analysis of anisotropy and strain rate sensitivity of open-cell metal foam. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 541, p. 105–109, 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.010.

VILAY, V et al. Effect of fiber surface treatment and fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites. **Composites Science and Technology**, [*s. l.*], v. 68, p. 631–638, 2008. Disponível em: www.elsevier.com/locate/compscitech.

VILLANUEVA, Florentina et al. Levels and sources of volatile organic compounds including carbonyls in indoor air of homes of Puertollano, the most industrialized city in central Iberian Peninsula. Estimation of health risk. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, [*s. l.*], v. 218, n. 6, p. 522–534, 2015.

VOLTOLINA, Sara et al. Open-cell foams as beds in multiphase reactors: Residence time distribution and mass transfer. **Chemical Engineering Journal**, [*s. l.*], v. 316, p. 323–331, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.113.

WANG, Weiwei et al. CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol over Cu/CeO<sub>2</sub> and Cu/ZrO<sub>2</sub> catalysts: Tuning methanol selectivity via metal-support interaction. **Journal of Energy Chemistry**, [*s. l.*], v. 40, p. 22–30, 2020.

WANG, Jiaofei et al. Effect of hydrogen addition on formation of hydrogen and carbon from methane decomposition over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 98, n. 2, p. 536–543, 2020.

WANG, Youhe et al. One-step synthesis of egg-tray-like layered ordered macro-mesoporous SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites for enhanced hydrodesulfurization performance. **Microporous and Mesoporous Materials**, [*s. l.*], v. 322, p. 111131, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181121002572.

WANG, Jia; YANG, Man; WANG, Aiqin. Selective hydrogenolysis of glycerol to 1,3propanediol over Pt-W based catalysts. **Chinese Journal of Catalysis**, [*s. l.*], v. 41, n. 9, p. 1311–1319, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63586-0.

WANG, Jianzhu; ZHAO, Junxue. Investigating the effect of SPRM on mechanical strength

and thermal conductivity of highly porous alumina ceramics. **Ceramics International**, United Kingdom, v. 43, n. 18, p. 16430–16435, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884217319338.

WEN, Shangyan et al. Fabrication of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aerogel-SiO<sub>2</sub> fiber composite with enhanced thermal insulation and high heat resistance. **Journal of Porous Materials**, [*s. l.*], v. 26, n. 4, p. 1027–1034, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s10934-018-0700-6.

XIAO, Menglan et al. Effects of supports and combined process on hydrogen purification over nickel supported catalysts. **Journal of Rare Earths**, [*s*. *l*.], v. 38, n. 1, p. 52–58, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002072118309220.

XIE, L. J. et al. Preparation and characterization of biomorphic nickel oxide microtubes templated from cotton. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 65, n. 2, p. 153–156, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2010.09.088.

XIE, Qiao Guang et al. Removal of organic impurities in waste glycerol from biodiesel production process through the acidification and coagulation processes. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 65, n. 7, p. 1158–1163, 2012.

XU, Mengze et al. Structure sensitivity and its effect on methane turnover and carbon coproduct selectivity in thermocatalytic decomposition of methane over supported Ni catalysts. **Applied Catalysis A: General**, [*s. l.*], v. 611, n. September 2020, p. 117967, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117967.

XU, Lin Qiong; HUANG, Han Xiong. Formation mechanism and tuning for bi-modal cell structure in polystyrene foams by synergistic effect of temperature rising and depressurization with supercritical CO<sub>2</sub>. **Journal of Supercritical Fluids**, [*s*. *l*.], v. 109, p. 177–185, 2016.

YAHYA, Muhamad Azani et al. Usage of Sugarcane Bagasse as an Additive in Building Materials. **Applied Mechanics and Materials**, [*s. l.*], v. 754–755, p. 369–372, 2015.

YAN, Qiangu; KETELBOETER, Timothy; CAI, Zhiyong. Production of COx-Free Hydrogen and Few-Layer Graphene Nanoplatelets by Catalytic Decomposition of Methane over Ni-Lignin-Derived Nanoparticles. **Molecules**, [*s*. *l*.], v. 27, n. 2, 2022.

YANG, Haiping et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, [*s*. *l*.], v. 86, p. 1781–1788, 2007. Disponível em: www.fuelfirst.com. Acesso em: 18 jun. 2021.

YANG, Huanggen et al. Preparation and catalytic performance of Ag, Au, Pd or Pt nanoparticles supported on 3DOM CeO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for toluene oxidation. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, [*s. l.*], v. 414, p. 9–18, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1381116915301734.

YANG, Wen; FENG, Yanyan; CHU, Wei. Promotion Effect of CaO Modification on Mesoporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Supported Ni Catalysts for CO<sub>2</sub> Methanation. **International Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 2016, 2016.

YU, Lei et al. Alumina-Supported Spinel NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as a Catalyst for Re-forming Pyrolysis Gas. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [*s*. *l*.], v. 58, n. 27, p. 11770–11778, 2019.

YU, Hongen et al. Bimetallic Ru-Ni/TiO<sub>2</sub> catalysts for hydrogenation of N-ethylcarbazole: Role of TiO<sub>2</sub> crystal structure. **Journal of Energy Chemistry**, [*s. l.*], v. 40, p. 188–195, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209549561930275X.

ZAREEI, Seyed Alireza; AMERI, Farshad; BAHRAMI, Nasrollah. Microstructure, strength,

and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 184, p. 258–268, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153.

ZHANG, Cen et al. CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts prepared by tailoring the surface properties of alumina for highly selective hydrodesulfurization of FCC gasoline. **Applied Catalysis A: General**, [*s. l.*], v. 570, p. 84–95, 2019. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X18305465.

ZHANG, Mengrong et al. Self-supported Ni<sub>2</sub>P nanosheets on low-cost three-dimensional Fe foam as a novel electrocatalyst for efficient water oxidation. **Journal of Energy Chemistry**, [*s. l.*], v. 42, p. 71–76, 2020. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209549561930720X.

ZHANG, Zailei et al. Thermally stable single atom Pt/m-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for selective hydrogenation and CO oxidation. **Nature Communications**, [*s. l.*], v. 8, n. 1, p. 16100, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1038/ncomms16100.

ZHAO, X. 17 - Porous materials for direct and indirect evaporative cooling in buildings. *In*: HALL, Matthew R B T - Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings (org.). **Woodhead Publishing Series in Energy**. [*S. l.*]: Woodhead Publishing, 2010. p. 399–426. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695262500177.

ZHAO, Fei et al. A novel method for the fabrication of porous calcium hexaluminate (CA6) ceramics using pre-fired CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pellets as calcia source. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 46, n. 4, p. 4762–4770, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.208.

ZHAO, Bo et al. Nanoscale Ni enveloped in hydrochar prepared by one-step hydrothermal method for dry reforming of CH<sub>4</sub> with CO<sub>2</sub>. **Molecular Catalysis**, [*s. l.*], v. 514, n. September, p. 111869, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111869.

ZHAO, Qingying et al. Platinum in-situ catalytic oleylamine combustion removal process for carbon supported platinum nanoparticles. **Journal of Energy Chemistry**, [s. l.], v. 41, p. 120–125, 2020. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495619303857.

ZHOU, Xiangyang et al. Cotton-templated fabrication of hierarchical SnO<sub>2</sub> mesoporous microtubes as the anode material of lithium ion battery. **Materials Letters**, [*s. l.*], v. 120, p. 279–282, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2014.01.106.

ZHU, Shanhui et al. Promoting effect of WOx on selective hydrogenolysis of glycerol to 1,3propanediol over bifunctional Pt-WOx/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, [*s. l.*], v. 398, p. 391–398, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.molcata.2014.12.021.

ZHU, Xinwen; JIANG, Dongliang; TAN, Shouhong. Improvement in the strength of reticulated porous ceramics by vacuum degassing. **Materials Letters**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 363–367, 2001.

ZHU, Xinwen; JIANG, Dongliang; TAN, Shouhong. The control of slurry rheology in the processing of reticulated porous ceramics. **Materials Research Bulletin**, [*s*. *l*.], v. 37, n. 3, p. 541–553, 2002.

ZOPPAS, F. M. et al. Improving selectivity to dinitrogen using Palladium-Indium coated on activated carbon fibers: Preparation, characterization and application in water-phase nitrate

reduction using formic acid as an alternative reductant source. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 4764–4772, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.015.

ŽUMBAR, Tadej et al. Influence of Alumina Precursor Properties on Cu-Fe Alumina Supported Catalysts for Total Toluene Oxidation as a Model Volatile Organic Air Pollutant. **Catalysts**, [s. l.], v. 11, n. 2, 2021.