



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



ANA LAURA SANTOS VALLIM

ESTIMATIVA TEÓRICA DA EFICIÊNCIA DE CICLONES CLÁSSICOS PARA A
SEPARAÇÃO DE CATALISADORES EM PROCESSOS DE CRAQUEAMENTO
CATALÍTICO

Uberlândia

2026

ANA LAURA SANTOS VALLIM

ESTIMATIVA TEÓRICA DA EFICIÊNCIA DE CICLONES CLÁSSICOS PARA A
SEPARAÇÃO DE CATALISADORES EM PROCESSOS DE CRAQUEAMENTO
CATALÍTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a Dr^a Yanne Novais
Kyriakidis

Uberlândia

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso (Turma C33 - 2026/1)				
Data:	30/07/2026	Hora de início:	09h00min	Hora de encerramento:	10h00min
Matrícula do Discente:	[REDACTED]				
Nome do Discente:	Ana Laura Santos Vallim				
Título do Trabalho:	Estimativa teórica da eficiência de ciclones clássicos para a separação de catalisadores em processos de Craqueamento Catalítico				

A defesa do Trabalho de Conclusão de Curso ocorreu na **plataforma Google Meet** e a Banca Examinadora assim composta: **Prof. Rubens Gedraite - FEQUI/UFU**, **Dr.ª Suélen Mara Gonçalves - CTNano/UFMG** e **Prof.ª Yanne Novais Kyriakidis - FEQUI/UFU**, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, **Prof.ª Yanne Novais Kyriakidis - FEQUI/UFU**, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata e concedeu à discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada. Nota: [REDACTED].

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Yanne Novais Kyriakidis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2026, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2026, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **SUELEN MARA GONCALVES, Usuário Externo**, em 30/07/2026, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7528287** e o código CRC **60278273**.

Referência: Processo nº 23117.050603/2026-98

SEI nº 7528287

AGRADECIMENTOS

À minha família, ao meu noivo, Matheus, e aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante toda a minha trajetória acadêmica, oferecendo apoio, incentivo e compreensão em cada etapa desta caminhada. Agradeço profundamente por acreditarem em mim, celebrarem cada conquista e me darem forças para superar os desafios encontrados ao longo da graduação. Este trabalho também é reflexo do carinho, da confiança e da presença de cada um de vocês, que tornaram essa jornada mais leve, significativa e inesquecível.

RESUMO

O processo de craqueamento catalítico fluido desempenha papel fundamental na indústria do refino de petróleo por possibilitar a conversão de frações pesadas em produtos de maior valor agregado, como gasolina, gás liquefeito de petróleo e olefinas leves. Nesse processo, a recuperação eficiente das partículas de catalisador arrastadas pelos gases de processo é essencial para reduzir perdas econômicas, minimizar impactos ambientais e garantir a continuidade operacional da unidade. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de ciclones clássicos na separação de catalisadores com base em sua distribuição granulométrica. Para isso, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o processo de craqueamento catalítico fluido, os mecanismos de separação gás-sólido por ciclones, os parâmetros de desempenho desses equipamentos e os modelos matemáticos empregados na representação da distribuição granulométrica de partículas. Posteriormente, foi desenvolvido um estudo de caso utilizando dados granulométricos disponíveis na literatura, a partir dos quais foram determinadas as frações acumuladas das partículas e ajustados os modelos de Gates-Gaudin-Schuhmann e Rosin, Rammler e Bennett. Em seguida, foram estimados o diâmetro de corte e a eficiência global de coleta para as geometrias clássicas de ciclones Lapple e Stairmand, considerando condições operacionais obtidas da literatura. Os resultados mostraram que o modelo de Rosin, Rammler e Bennett apresentou melhor representatividade física da distribuição granulométrica analisada. Entre as geometrias avaliadas, o ciclone Stairmand apresentou diâmetro de corte compatível com a faixa granulométrica da amostra, resultando em eficiência global de coleta de 76,4%, enquanto o ciclone Lapple apresentou diâmetro de corte superior ao maior diâmetro das partículas analisadas, indicando baixa capacidade de separação. Conclui-se que, para as condições operacionais e a distribuição granulométrica consideradas, a geometria Stairmand apresentou desempenho superior ao da geometria Lapple, mostrando-se mais adequada para a separação de partículas de catalisador em unidades de craqueamento catalítico fluido.

Palavras-chave: craqueamento catalítico fluido; ciclones; distribuição granulométrica; eficiência de coleta; catalisadores.

ABSTRACT

The fluid catalytic cracking process plays a key role in the oil refining industry by enabling the conversion of heavy fractions into higher-value products, such as gasoline, liquefied petroleum gas, and light olefins. In this process, the efficient recovery of catalyst particles carried away by process gases is essential to reduce economic losses, minimize environmental impacts, and ensure the unit's operational continuity. In this context, the objective of this study was to evaluate the efficiency of conventional cyclones in separating catalysts based on their particle size distribution. To this end, a literature review was conducted on the fluid catalytic cracking process, the mechanisms of gas-solid separation by cyclones, the performance parameters of this equipment, and the mathematical models used to represent particle size distribution. Subsequently, a case study was conducted using particle size distribution data available in the literature, based on which the cumulative particle fractions were determined and the Gates-Gaudin-Schuhmann and Rosin, Rammler, and Bennett models were calibrated. Next, the cut-off diameter and overall collection efficiency were estimated for the classic Lapple and Stairmand cyclone geometries, considering operating conditions obtained from the literature. The results showed that the Rosin, Rammler, and Bennett model provided the best physical representation of the analyzed particle size distribution. Among the geometries evaluated, the Stairmand cyclone had a cut-off diameter compatible with the sample's particle size range, resulting in an overall collection efficiency of 76.4%, while the Lapple cyclone had a cut-off diameter greater than the largest diameter of the analyzed particles, indicating low separation capacity. It is concluded that, for the operating conditions and particle size distribution considered, the Stairmand geometry performed better than the Lapple geometry, proving to be more suitable for separating catalyst particles in fluid catalytic cracking units.

Keywords: fluid catalytic cracking; cyclones; particle size distribution; collection efficiency; catalysts.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Craqueamento Catalítico Fluido (FCC)	9
2.1.1	Reação ou Conversão	10
2.1.2	Tratamento de gases da queima do coque	11
2.1.3	Catalisadores.....	12
2.1.4	O arraste de catalisadores	13
2.2	Separação gás – sólido	15
2.2.1	Distribuição Granulométrica	15
2.2.2	Ciclones	16
2.2.3	Parâmetros de Desempenho.....	19
3	ESTUDO DE CASO	21
4	CONCLUSÃO.....	25
	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

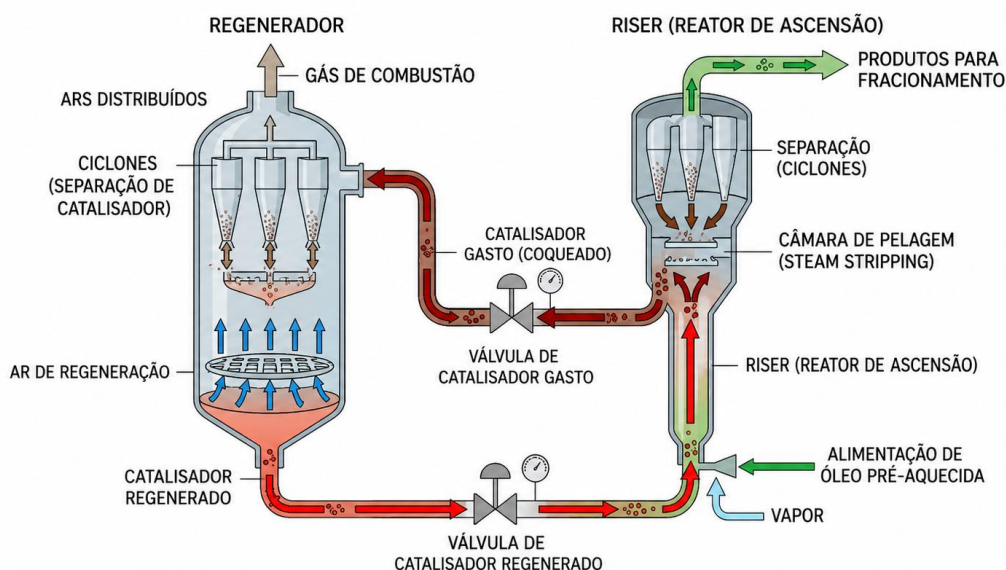
A Revolução Industrial gerou um grande impacto na dinâmica da população, impulsionando a demanda por uma ampla variedade de produtos derivados do petróleo destinados ao uso doméstico, ao transporte e às aplicações industriais, como combustíveis, produtos químicos e, mais recentemente, polímeros. Dessa forma, a tecnologia utilizada na transformação hidrocarbonetos em material de grande valor comercial vem sendo estudada cada vez mais e, segundo Anchieta (2005), em todo o processo de refino de petróleo, o Craqueamento Catalítico Fluido oferece o maior aumento de lucratividade da refinaria, pois uma pequena melhora no rendimento da gasolina pode resultar em um ganho econômico significativo.

Segundo Gauto et al. (2016), o aumento da demanda por derivados leves, como GLP (gás liquefeito de petróleo) e gasolina, evidenciou limitações nas unidades convencionais de destilação das refinarias, que não conseguiam suprir adequadamente as necessidades do mercado. Diante desse cenário, tornou-se necessário o desenvolvimento de processos capazes de aumentar a produção desses produtos de maior valor agregado. Nesse contexto, foi criada a unidade de Craqueamento Catalítico, representada na Figura 1, na qual correntes pesadas ricas em hidrocarbonetos de elevada massa molar, provenientes da destilação — como gasóleo de vácuo, RAT (resíduo atmosférico da destilação) e óleo desasfaltado — ou ainda gasóleo pesado oriundo da unidade de coqueamento, são convertidas em hidrocarbonetos mais leves por meio de reações de craqueamento catalítico.

A reação entre o catalisador e a carga ocorre em um reator tubular vertical de fluxo ascendente (*riser*). Essa reação tem como subproduto o coque, que é um composto carbônico sólido que se junta ao catalisador no final desta reação (Anchieta, 2015) fazendo com que este perca parte de sua atividade catalítica. Por isso, é importante que seja feita a remoção deste subproduto por meio de sua queima em um regenerador, neste caso, em leito fluidizado.

No regenerador, geralmente um reator CSTR (*Continuous Stirred-Tank Reactor*), ocorre a reação de combustão do coque. A energia proveniente desta reação exotérmica é reaproveitada para vaporizar a carga e manter as reações endotérmicas de craqueamento que ocorrem no *riser* (Maya-Yescas e Aguilar, 2003). O gás de combustão formado carrega uma porcentagem de catalisador na sua ascensão, o que pode acarretar em uma série de danos ambientais e de manutenção dentro da refinaria.

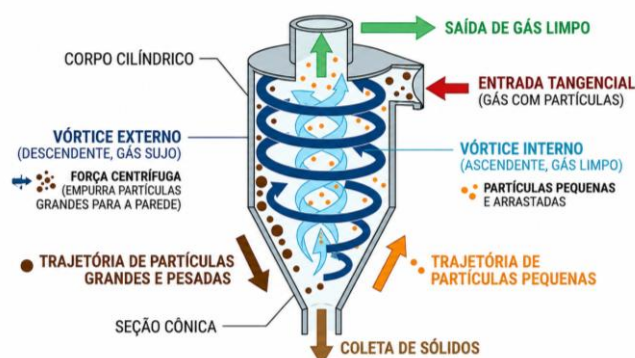
Figura 1 – Representação esquemática simplificada do processo de Craqueamento Catalítico Fluido.



Fonte: Gerada por Inteligência Artificial Gemini, em julho de 2026.

Para que os danos acarretados pelo arraste de catalisadores sejam minimizados, além dos ciclones no *riser*, uma segunda bateria de ciclones é posicionada de forma estratégica no regenerador. Segundo Massarani (2001), as partículas presentes no escoamento são separadas no interior do ciclone pela ação do campo centrífugo resultante, sendo impulsionadas em direção à parede do equipamento e, posteriormente, conduzidas para o *underflow*. Já o gás de combustão faz o movimento de ascensão, passando pelo *overflow* e seguindo para a próxima etapa de tratamento. Um esquema de funcionamento de um ciclone é demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Funcionamento de um ciclone.



Fonte: Gerada por Inteligência Artificial Gemini, em julho de 2026.

Tendo em vista a importância dos processos de separação no contexto do Craqueamento Catalítico Fluido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de ciclones clássicos na separação de catalisadores com base em sua distribuição granulométrica. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os métodos atualmente empregados na separação de catalisadores do gás de combustão, bem como a inferência da eficiência de ciclones clássicos a partir de dados granulométricos disponíveis na literatura, utilizando a metodologia proposta por Massarani (2001).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as informações necessárias para o entendimento dos fenômenos que ocorrem no Craqueamento Catalítico, destacando o processo de separação sólido - gás por ciclones. Primeiramente, é abordado o funcionamento do processo e o papel do ciclone na retenção dos catalisadores. Em seguida, são discutidos os modelos de ciclones clássicos que servem de estudo de caso para o trabalho, bem como os parâmetros que influenciam seu desempenho, como eficiência de coleta. Por fim, são apresentados os aspectos relacionados às propriedades de catalisadores, com destaque para sua distribuição granulométrica.

2.1 Craqueamento Catalítico Fluido (FCC)

O craqueamento de petróleo, segundo Liu et al. (2024), consiste na quebra de compostos orgânicos de cadeia carbônica grande e sem importância econômica em compostos de cadeias menores e de alto valor de mercado. Este processo pode se dar de forma térmica, pelo aumento da temperatura de reação até que o material se fragmente, ou pode ocorrer pelo uso de um catalisador, que potencializará essa quebra, sem a necessidade de elevadas temperaturas.

O Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) é um processo utilizado no refino de petróleo que utiliza um catalisador para converter gasóleos oriundos do processo de destilação em produtos leves e de maior valor, especialmente gasolina e GLP e, além disso, produz frações médias que compõe a mistura final do diesel. De acordo com Ferreira, Souza-Aguiar e Aranda (2023), a evolução do processo, bem como o desenvolvimento de catalisadores de maior eficiência, permitiu também que ele passasse a processar cargas mais pesadas, como resíduo atmosférico, produto de fundo da torre de destilação atmosférica.

Para o desenvolvimento deste trabalho, destacam-se como etapas fundamentais a compreensão do processo de Craqueamento Catalítico Fluido, com ênfase nas seções de reação e conversão no *riser*, bem como no tratamento dos gases provenientes da queima do coque no regenerador. Além disso, são abordados aspectos essenciais relacionados aos catalisadores, incluindo suas propriedades e mecanismos de desativação, assim como o fenômeno de arraste de partículas, que impacta diretamente a eficiência do processo. Nesse contexto, o estudo dos ciclones assume papel central, uma vez que são responsáveis pela separação sólido-gás, sendo analisados em conjunto com a distribuição granulométrica das partículas, parâmetro determinante para a eficiência de coleta. Adicionalmente, são

considerados os principais parâmetros de desempenho dos ciclones, como o diâmetro de corte, a eficiência de coleta, fundamentais para a avaliação e comparação entre diferentes configurações desses equipamentos.

Um estudo de caso realizado por Peng et al. (2024) investigou os principais mecanismos de desgaste das partículas de catalisador na região do *stripper*, cuja principal função é remover os hidrocarbonetos retidos nos poros do catalisador após a etapa de reação no *riser*. Segundo os autores, nas condições avaliadas, o desgaste superficial provocado pela fricção e pelo impacto do vapor em alta velocidade promove a fragmentação das partículas em múltiplos fragmentos de geometria irregular. Como consequência, partículas com diâmetro inicial de aproximadamente 72 μm apresentaram redução para cerca de 49 μm nos casos de desgaste mais severo, evidenciando que esse fenômeno altera significativamente a distribuição granulométrica do catalisador e, conseqüentemente, pode influenciar a eficiência dos sistemas de separação por ciclones.

2.1.1 Reação ou Conversão

A sessão de reação e conversão no FCC se dá de maneira prioritária no *riser*, um reator de fluxo ascendente, o qual a sua carga, conforme Oloruntoba, Zhang e Hsu (2022), é pré aquecida a uma temperatura entre 150 °C e 400 °C e, quando em contato com o catalisador também aquecido pelo regenerador, é vaporizada instantaneamente. Segundo McTernan (2014), esse primeiro contato de vaporização é extremamente importante para que as reações de craqueamento ocorram, visto que as condições operacionais são tipicamente entre 477°C e 527°C, sob pressão próxima à atmosférica.

De acordo com Pinheiro et al. (2011), o processo de craqueamento catalítico ocorre na superfície do catalisador por meio de um intermediário carregado positivamente (podendo ser íons carbênio ou íon carbono). O primeiro momento da reação, que é o de principal interesse, consiste na quebra das ligações carbono-carbono para produção de olefinas e novos carbocátions de cadeias menores, já em um segundo momento acontecem as reações de isomerização, alquilação, transferência de hidrogênio e condensação. Durante as reações é formado o coque como subproduto, que é um material carbônico que se deposita na superfície porosa do catalisador, fazendo com que este perca parte da sua atividade catalítica.

Existem, porém, alguns parâmetros que podem afetar a conversão da reação, de acordo com os estudos realizados por Pinheiro et al. (2011):

- Razão Catalisador/Carga: existe um limite prático de ganho de conversão, mesmo que haja o aumento na quantidade de carga e sítios ativos para ocorrer a reação.

- Tempo de residência e fator de deslizamento: o gás geralmente apresenta velocidade superior à do catalisador, o que gera o fenômeno de deslizamento, sendo que a máxima conversão é alcançada quando esse deslizamento ocorre de forma equilibrada, garantindo um tempo de residência adequado para que o catalisador promova a degradação das moléculas
- Formação de *clusters*: a aglomeração do catalisador pode diminuir a quantidade de gasolina formada na reação primária, mas favorecer as reações secundárias que degradam a gasolina em gás e coque.

De acordo com Oloruntoba, Zhang e Hsu (2022), o coque é um subproduto formado na reação de craqueamento no reator (*riser*), composto predominantemente por carbono (cerca de 91-95%) e hidrogênio (cerca de 5-7%), além de pequenas quantidades de enxofre, nitrogênio e metais contaminantes. Seu principal impacto no processo se dá pela desativação rápida dos sítios ativos dos catalisadores. Essa desativação pode ocorrer de duas formas:

- Bloqueio de poros: o coque se deposita nas superfícies internas e externas dos poros, obstruindo os canais de acesso e impedindo a chegada da molécula pesada ao interior do sítio ativo (Pinheiro et al., 2011).
- Perda de atividade: a presença do coque dificulta a seletividade de produção de material economicamente viável, como a nafta de craqueamento, e aumenta a produção de gás seco e mais coque, formando um ciclo de desativação (Ferreira, Souza-Aguiar e Aranda, 2023).

Para que o catalisador volte a ter sua função catalítica, segundo Pinheiro et al. (2011), é necessário que passe pelo regenerador, onde o coque é queimado em leito fluidizado a altas temperaturas (normalmente entre 677°C e 757°C). Para isso, ar quente é injetado no regenerador, então o carbono reage formando CO e CO₂ e o hidrogênio reage produzindo vapor de água. O calor liberado pela reação de combustão é absorvido pelo catalisador e, o catalisador então aquecido, retorna ao *riser* fornecendo energia necessária para vaporizar a carga, fechando o balanço térmico do sistema.

2.1.2 Tratamento de gases da queima do coque

Conforme apontado por Oloruntoba, Zhang e Hsu (2022), a queima do coque no regenerador tem como produto compostos poluentes, como monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado. Dessa forma, o

tratamento desses gases é extremamente importante, tanto para recuperação de catalisadores e controle ambiental, quanto para recuperação de energia.

Existem quatro principais tecnologias e métodos utilizados neste tratamento:

- Recuperação de energia e remoção de CO: em operações em regime de combustão parcial o gás de exaustão, rico em CO, é queimado em uma caldeira, produzindo CO₂ e vapor de alta pressão, sendo recuperada uma grande quantidade de calor. Além disso, os gases quentes e de alta pressão que saem do regenerador podem passar por uma turbina, gerando eletricidade para a refinaria.
- Controle de material particulado: a maioria dos catalisadores são capturados por ciclones presentes dentro do regenerador. Porém, partículas menores (0 – 20 µm) escapam desta primeira barreira, sendo necessárias outras etapas de separação, como separadores de terceiro e quarto estágio, que são ciclones menores em paralelo projetados para capturar partículas remanescentes, precipitadores eletrostáticos e filtros de barreira.
- Remoção de óxidos de enxofre: estes óxidos são gerados pela combustão do enxofre presente no coque e podem ser tratados por lavadores de gases (*scrubbers*), onde o gás se encontra com uma solução alcalina, normalmente soda cáustica, dentro de uma torre e é neutralizado. Além disso, podem ser utilizados catalisadores especiais para transformar o enxofre no regenerador em H₂S, que será tratado em etapas posteriores.
- Redução de óxidos de nitrogênio: podendo ser por Redução Não-Catalítica Seletiva (SNCR), processo no qual a amônia ou ureia aplicada ao fluxo de gás quente reage com o NO_x e forma nitrogênio gasoso e água ou por Redução Catalítica Seletiva (SCR), o qual a reação entre a amônia e NO_x é realizada em temperaturas mais baixas por meio de um catalisador a base de vanádio ou tungstênio.

2.1.3 Catalisadores

Em reações de craqueamento, o catalisador é um material sólido, fino e poroso, e, de acordo com Kim et al. (2012), geralmente composto por zeólitas de base inorgânica, principalmente por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃). Além disso, o catalisador desenvolve um papel muito importante no processo de craqueamento, visto que sua principal função é proporcionar a quebra de grandes moléculas de hidrocarbonetos de baixo valor econômico em moléculas menores e de maior valor comercial e em condições de operação mais amenas do que no craqueamento térmico, por exemplo.

Segundo os autores Whitcombe (2003) e Liu et al. (2024), os catalisadores podem ser de caráter zeolítico ou amorfo, se diferenciando na sua estrutura molecular e por consequência na sua estabilidade e capacidade de conversão no processo de craqueamento:

- Catalisadores amorfos: foram os primeiros a serem utilizados no FCC, são compostos por argila sólida não cristalina, o seu atrito gera finos de tamanho esperado e são regenerados a temperaturas mais baixas, aproximadamente 600°C.
- Catalisadores zeolíticos: representam um avanço tecnológico, pois são mais ativos que os amorfos, são formados por aluminossilicatos cristalinos (tetraedros de SiO_4 e AlO_4 unidos por oxigênio), são mais seletivos, favorecendo a produção de gasolina e nafta, são amplamente utilizados em 90% das indústrias atualmente, porém a sua regeneração se dá a até 760°C e seu desgaste pode acarretar na perda da sua estrutura cristalina e ser desativado de forma permanente.

Além da sua principal função de fragmentação de grandes moléculas de hidrocarbonetos, os catalisadores têm algumas sub funções também importantes. De acordo com os estudos realizados por Ferreira, Souza-Aguiar e Aranda (2023), o catalisador absorve o calor gerado pela queima do coque no regenerador e oferece a energia necessária para vaporizar a carga, sustentando e aumentando a velocidade das reações endotérmicas de craqueamento, sem alterar o equilíbrio térmico do sistema, atuando fisicamente como um meio de transferência térmica. Ademais, promove o aumento de produtos desejáveis e limita o aparecimento de subprodutos indesejáveis por meio do uso de materiais específicos, como as zeólitas.

De acordo com o trabalho realizado por Liu et al. (2024), os catalisadores aplicados no processo de FCC possuem como propriedades físicas: morfologia microesferoidal, visando sofrer menos atrito, com esfericidade entre 0,8 e 1, ou seja, são partículas relativamente esféricas e de fácil fluidização, além de ter distribuição granulométrica abrangendo partículas entre 5 a 100 μm , com densidade que varia de acordo com o material que é formado, podendo chegar a até 2300 kg/m^3 . Além disso, segundo Vieira et al. (2004), sua área superficial pode variar entre 121 e 145 m^2/g de catalisador e o volume de microporos associados à zeólitas ativas e disponíveis pode ser de 0,041 a 0,055 cm^3/g , porém estes valores são afetados pelo acúmulo de metais pesados e coque em sua superfície à medida que a reação acontece.

2.1.4 O arraste de catalisadores

No regenerador, a queima do coque produz um fluxo de gases de combustão que, ao ascender, eventualmente arrasta os catalisadores para fora do leito fluidizado. Este arraste

ocorre, segundo Whitcombe (2003), quando as bolhas de gás da queima do coque atravessam o leito denso de catalisadores e explodem na superfície, transportando as partículas para a região de *freeboard* (zona de dispersão), onde passaram por uma bateria de ciclones.

Embora os ciclones apresentem alta eficiência, eles não conseguem recuperar os catalisadores em sua totalidade. De modo geral, conforme Oloruntoba, Zhang e Hsu (2022), apesar de uma maior quantidade de partículas finas favorecer a fluidização do leito, essa nem sempre é uma estratégia vantajosa. Isso ocorre porque essas partículas são mais facilmente arrastadas pelo fluxo de gás. Além disso, os pesquisadores Oloruntoba, Zhang e Hsu (2022), afirmam que catalisadores com tamanho de até 40 μm têm maior dificuldade em atingir velocidades terminais superiores à velocidade superficial do gás, o que dificulta sua recuperação pelos ciclones e, por consequência, seu retorno ao leito.

No regenerador os produtos da queima do coque são misturados com ar injetado. A velocidade superficial do gás é um fator determinante do regime de fluidização, seja ele borbulhante, turbulento ou rápido, influenciando de forma direta a taxa de arraste dos catalisadores. E, segundo Oloruntoba, Zhang e Hsu (2022), o aumento da sua velocidade expande o leito, aumentando a força com que as bolhas explodem na superfície, aumentando por consequência a quantidade de partículas finas carregadas para os ciclones.

Um estudo de caso realizado por Whitcombe (2003) destacou uma perda média aproximada de 210 toneladas de catalisadores por ano devido ao desgaste por colisões e atrito das partículas. Essa é uma perda econômica significativa para a refinaria, que deve repor catalisadores virgens ao processo e realizar de maneira ainda mais meticulosa o acompanhamento e manutenção dos aparelhos do sistema e à jusante do regenerador.

Além disso, este arraste é considerado a maior fonte de poluição dentro de uma refinaria, sendo responsável pelas emissões de material particulado para a atmosfera, causando danos ambientais e riscos à saúde humana. Segundo a Environmental Protection Agency (EPA, 2025), partículas finas com diâmetro inferior a 10 μm podem penetrar profundamente nos pulmões e, em alguns casos, alcançar a corrente sanguínea, afetando não apenas o sistema respiratório, mas também o sistema cardiovascular. Estudos associam a exposição a esse material particulado a diversos problemas de saúde, como morte prematura em indivíduos com doenças cardíacas ou pulmonares, ataques cardíacos não fatais, arritmias, agravamento de quadros de asma, redução da função pulmonar e aumento de sintomas respiratórios, como irritação das vias aéreas, tosse e dificuldade respiratória. Além dos impactos à saúde, essas partículas também provocam efeitos ambientais relevantes, uma vez que podem ser transportadas por longas distâncias, contribuindo para a acidificação de solos e

corpos d'água, alterações no equilíbrio de nutrientes, danos à vegetação e redução da visibilidade atmosférica. Ademais, a presença de compostos associados ao material particulado pode intensificar fenômenos como a chuva ácida e causar degradação de materiais, incluindo estruturas e monumentos. A fim de minimizar esses danos, separadores sólido-gás, como ciclones, podem ser utilizados.

2.2 Separação gás – sólido

A separação gás-sólido é uma operação unitária amplamente empregada na indústria para promover a recuperação de partículas sólidas suspensas em correntes gasosas, sendo de grande importância em processos nos quais o material particulado possui elevado valor econômico ou potencial poluidor, sendo o ciclone, segundo Whitcombe (2003), o equipamento mais comum e econômico para essa finalidade. No processo de Craqueamento Catalítico Fluido (FCC), essa operação é indispensável, pois as partículas de catalisador são continuamente transportadas pelo escoamento gasoso durante as etapas de reação e regeneração, tornando necessária sua separação para possibilitar o retorno do catalisador ao processo, reduzir perdas de material e minimizar a emissão de particulados para a atmosfera.

Além disso, o desempenho dos equipamentos empregados nessa operação está diretamente relacionado às características físicas das partículas e às condições de operação do sistema. Nesse contexto, Massarani (2001) destaca a necessidade de conhecer a distribuição granulométrica e os princípios de funcionamento dos ciclones para a estimativa da eficiência de separação e para a avaliação do desempenho desses equipamentos.

2.2.1 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica representa a variedade de tamanhos das partículas de uma amostra. De acordo com Cremasco (2012), em vez de se considerar um único diâmetro representativo, a análise granulométrica permite descrever como essas partículas estão distribuídas em diferentes faixas de tamanho, sendo a quantidade de material em cada intervalo expressa pela fração mássica. Essa distribuição pode ser apresentada de duas formas principais: como distribuição de frequência (Δx) e como distribuição acumulativa (X). A distribuição de frequência indica a fração ou porcentagem em massa de partículas pertencentes a um intervalo específico de diâmetro, sendo geralmente representada em função do diâmetro médio do intervalo (D). Já a distribuição acumulativa expressa a fração em massa de partículas com diâmetro inferior a um determinado valor, permitindo uma análise mais completa do comportamento do sistema particulado.

Alguns modelos matemáticos possibilitam descrever a distribuição granulométrica acumulada (X) como uma função dos diâmetros das partículas, possibilitando caracterizar amostras de finos, como os catalisadores do FCC.

O modelo matemático de Gates-Gaudin-Schumman (GGS) é representado na equação 01:

$$X = \left(\frac{D}{D_{100}} \right)^m \quad (01)$$

em que D_{100} e m são parâmetros que representam, respectivamente, o diâmetro máximo da amostra - correspondente à condição em que a fração acumulada atinge o valor unitário ($X = 1$) - e o índice de uniformidade da distribuição. A equação linearizada do modelo se dá pela Equação 02:

$$\ln(x) = m \ln(D) - m \ln(D_{100}) \quad (02)$$

O equacionamento do modelo de Rosin-Rammler-Bannet (RRB) é representado pela Equação 03:

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D'}\right)^n} \quad (03)$$

em que D' corresponde ao diâmetro característico da amostra, definido como o tamanho de partícula para o qual a fração acumulada atinge o valor de $X = 0,632$, enquanto n representa o índice de dispersão da distribuição granulométrica. A equação linearizada deste modelo pode ser expressa pela Equação 04:

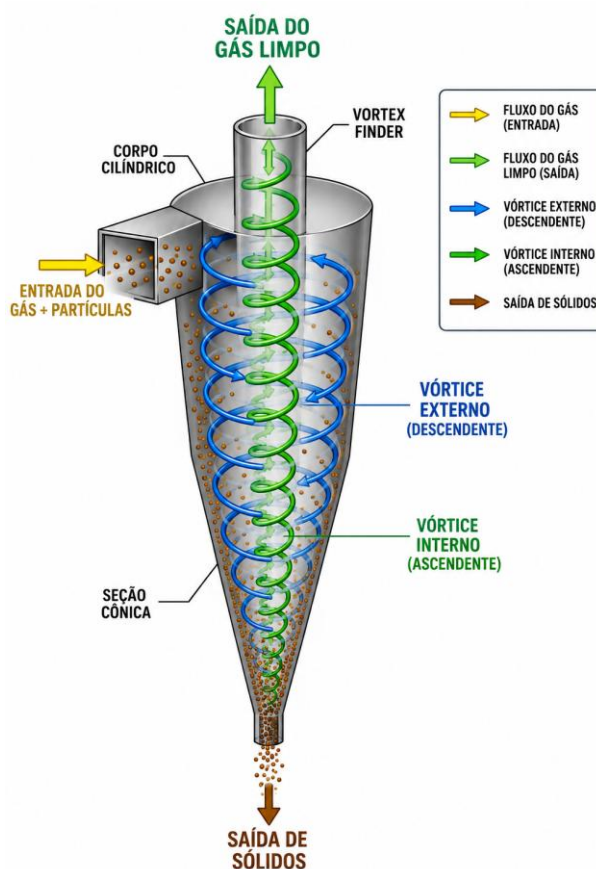
$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) \right) = n \ln(D) - n \ln(D') \quad (04)$$

2.2.2 Ciclones

Os ciclones são equipamentos que separam sólidos de uma corrente gasosa por ação de um campo de força centrífuga criado devido ao formato da sua alimentação. Segundo McTernan (2014), o fluido contendo partículas sólidas é introduzido de forma tangencial na parte superior cilíndrica do ciclone, gerando um movimento rotacional que dá origem a um vórtice descendente ao longo das paredes internas do equipamento. Nesse escoamento, as partículas mais densas, como o catalisador de FCC, apresentam maior inércia e, devido à ação da força centrífuga associada à alta velocidade de rotação, são lançadas contra as paredes do ciclone.

As partículas colidem com as superfícies do equipamento, perdem energia por atrito e passam a se deslocar para a região cônica inferior sob o arraste do fluido, onde são coletadas e armazenadas em um reservatório, sendo posteriormente devolvidas ao processo por meio de um duto denominado *dipleg*. Enquanto isso, o gás, já com a maior parte dos sólidos removida, inverte seu sentido de escoamento próximo à base do cone, formando um vórtice interno ascendente, e é então conduzido para fora do equipamento pela região superior através de um tubo central chamado *vortex finder*, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Representação dos vórtices nos ciclones.



Fonte: Gerada por Inteligência Artificial Chat GPT, em julho de 2026.

Entre os modelos clássicos de ciclones, destacam-se as famílias Lapple e Stairmand, que diferem em suas proporções geométricas, conforme indicado na Tabela 1. Segundo Massarani (2001), o ciclone de Lapple é baseado em correlações empíricas e apresenta geometria mais simples, sendo frequentemente utilizado em análises preliminares. Já o ciclone de Stairmand possui proporções padronizadas otimizadas, resultando em maior

eficiência de coleta, porém com maior gasto energético. De forma genérica, apresentam-se as principais dimensões de um ciclone na Figura 4.

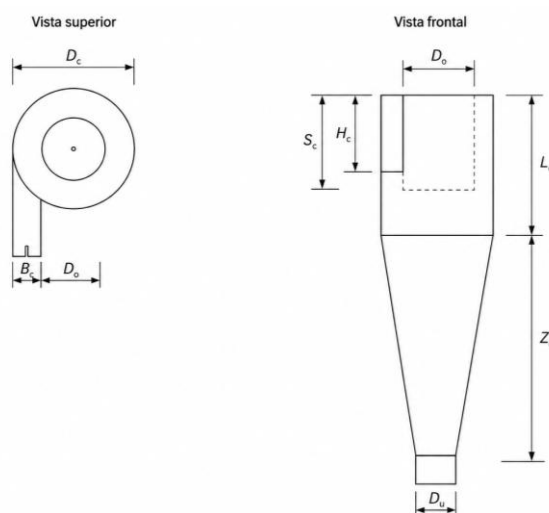
Segundo Dizajyekan et al. (2022), o ciclone de geometria Stairmand é um modelo clássico de alta eficiência, capaz de capturar partículas menores que o modelo Lapple devido ao seu diâmetro de corte menor. Porém, enfrenta alguns desafios operacionais, como pontos de tensão devido à altas taxas de deformação e grande desgaste, visto que altas velocidades e colisões de partículas resultam em zonas de máxima erosão, principalmente na entrada e na seção cônica do ciclone.

Tabela 1 – Razões geométricas para os ciclones Lapple e Stairmand.

Ciclone	Lapple	Stairmand
B_c/D_c	0,25	0,20
D_o/D_c	0,50	0,50
H_c/D_c	0,50	0,50
L_c/D_c	2,00	1,50
S_c/D_c	4,00	4,00
Z_c/D_c	0,62	0,50
D_u/D_c	0,25	0,35

Fonte: Massarani (2001).

Figura 4 – Configuração dos ciclones Lapple e Stairmand.



Fonte: Adaptado de Massarani (2001).

em que:

Símbolo	Significado
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica do ciclone
B_c	Largura da entrada do ciclone
D_0	Diâmetro do duto de saída do gás
S_c	Comprimento do duto de saída do gás
H_c	Altura da entrada do ciclone
L_c	Altura da parte cilíndrica do ciclone
Z_c	Altura da parte cônica do ciclone
D_u	Diâmetro da saída inferior de sólidos

2.2.3 Parâmetros de Desempenho

O desempenho de ciclones é avaliado principalmente por três parâmetros: eficiência de coleta $\bar{\eta}$, diâmetro de corte (D^*) e número de Euler (β).

O diâmetro de corte (D^*), segundo Massarani (2001), é definido como o diâmetro da partícula cuja a eficiência de coleta é de 50%, conforme apresentado na Equação 05.

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho_f)} \right]^{1/2} \quad (05)$$

em que D_c é o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone, K é um parâmetro que depende da configuração do ciclone conforme Tabela 2, Q e μ são vazão volumétrica e viscosidade dinâmica do fluido de alimentação e ρ_s e ρ_f são, respectivamente, a densidade real do sólido e do fluido de alimentação.

A eficiência individual de coleta, refere-se à capacidade do ciclone de coletar partículas de um tamanho específico D , tal como é mostrado na Equação 06.

$$\eta(D/D^*) = \frac{(D/D^*)^2}{1 + (D/D^*)^2} \quad (06)$$

onde D é o diâmetro da partícula e D^* é o diâmetro de corte.

Além disso, a distribuição granulométrica desempenha papel fundamental no cálculo da eficiência global de coleta em ciclones, uma vez que, em condições industriais, as correntes particuladas são compostas por uma ampla faixa de tamanhos de partículas. Dessa forma, a eficiência global não depende de um único diâmetro representativo, mas sim da

contribuição de cada fração granulométrica presente no sistema, conforme descrito de forma generalizada pela Equação (07).

$$\bar{\eta} = \int_0^1 \eta(D) dX \quad (07)$$

Tabela 2 – Parâmetros de configuração e condições operacionais.

Configuração	K	β
Lapple	0,095	315
Stairmand	0,041	400

Fonte: Cremasco (2012).

onde X representa a fração acumulada de partículas com diâmetro menor que D.

A equação global de eficiência integrada para o modelo RRB foi proposta por Massarani (2001) e descrita pela Equação (08):

$$\bar{\eta} = \left\{ \frac{\frac{1,11n}{0,0118 + n}}{1,81 - 0,322n + \left(\frac{D'}{D^*}\right)} \right\} * \frac{D'}{D^*} \quad (08)$$

Dessa forma, ao considerar a distribuição granulométrica do sistema, torna-se possível estimar a fração de catalisadores com diâmetro inferior ao diâmetro de corte. De acordo com Massarani (2001), essa informação é importante para prever a quantidade de partículas que apresentam maior probabilidade de serem arrastadas pelo fluxo e saírem pelo *overflow*.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de Liu et al. (2024) analisou as características de escoamento e as colisões entre partículas de catalisador em unidades de Craqueamento Catalítico Fluido (FCC). A partir dos dados fornecidos pelos autores, como o diâmetro das partículas, a quantidade de partículas em cada faixa granulométrica e a densidade do catalisador (2.300 kg/m^3), foram calculados o volume individual das partículas, o volume total de cada faixa granulométrica e a massa correspondente. Com base nesses resultados, determinaram-se a fração mássica relativa de cada faixa de tamanho de partículas (Δx) e a fração mássica acumulada (X), que representa a proporção de partículas com diâmetro inferior a um determinado valor. Os resultados desses cálculos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização das partículas de catalisador.

Tamanho de Partícula D (μm) (Liu et al., 2024)	Volume da partícula (m^3). 10^{-13}	Quantidade de Partículas (Liu et al., 2024)	Volume do conjunto (m^3). 10^{-11}	Massa do conjunto (kg). 10^{-8}	Fração Relativa (Δx) %	Fração Acumulada (X) %
100	5,23599	5830	302,53	702,09	42,393	100
80	2,68083	8540	228,94	526,57	31,794	57,607
60	1,13097	13495	152,62	351,04	21,196	25,813
40	0,33510	9109	30,52	70,21	4,239	4,617
20	0,04189	6012	2,52	5,79	0,350	0,378
10	0,00523	3644	0,19	0,44	0,028	0,028
5	0,00065	1866	0,01	0,03	0,002	0,002

Fonte: autora própria e Liu et al. (2024)

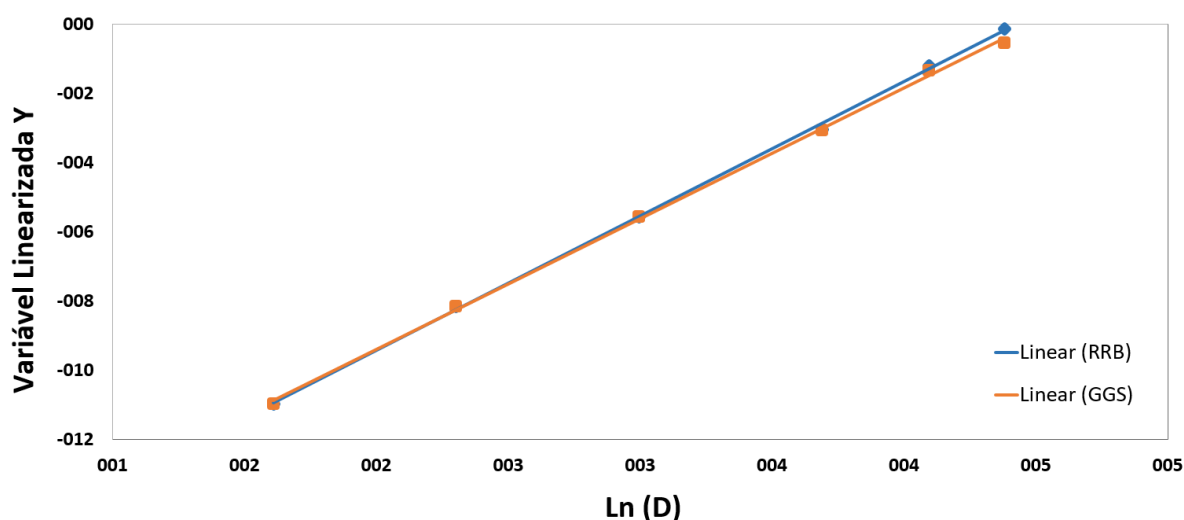
De posse dos dados tratados de distribuição do tamanho de partículas da amostra (Liu et al 2024) foi realizado o ajuste dos dados de distribuição granulométrica aos modelos de GGS e RRB.

A partir dos dados calculados (Tabela 4), foi plotado um gráfico pelo *software* Libre Office Calc, afim de comparar o ajuste de cada modelo aos dados do artigo base. O gráfico é apresentado na Figura 5, onde o modelo GGS é caracterizado pela cor azul e tem $Y = \ln(x)$ e o modelo RRB pela cor laranja e tem $Y = \ln(\ln(\Theta))$.

Tabela 4 – Valores calculados de distribuição granulométrica para os modelos linearizados.

Ln (D)	Ln (X)	$\Theta = 1 / (1-X)$	Ln (Θ)	Ln (Ln (Θ))
4,38203	-0,55152	2,35889	0,85819	-0,15293
4,09434	-1,35430	1,34794	0,29858	-1,20872
3,68888	-3,07542	1,04841	0,04727	-3,05188
2,99573	-5,57824	1,00379	0,00379	-5,57634
2,30259	-8,17384	1,00028	0,00028	-8,17370
1,60944	-10,98461	1,00002	0,00002	-10,98460

Figura 5 – Representação gráfica dos modelos linearizados.



A partir da linearização dos modelos ($Y = ax + b$) e das curvas de ajuste apresentadas na Figura 5, foram obtidas as equações das retas correspondentes, os coeficientes de determinação (R^2) e os parâmetros característicos de cada modelo pelas Equações 02 e 04, permitindo avaliar a qualidade do ajuste aos dados experimentais, conforme explicitado na Tabela 5.

Observa-se que ambos os modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) elevados e bastante próximos, indicando bom ajuste estatístico aos dados experimentais. Entretanto, o modelo GGS não se mostrou adequado para representar a distribuição granulométrica da amostra, uma vez que o parâmetro K , que corresponde ao diâmetro máximo da distribuição ($X = 1$), deveria assumir valor próximo ao maior diâmetro observado experimentalmente (100 μm). Como o valor estimado diferiu significativamente desse limite,

concluiu-se que o modelo não apresenta coerência física para a amostra estudada. Dessa forma, optou-se por utilizar o modelo RRB na continuidade do estudo de caso.

Tabela 5 – Valores encontrados na linearização.

	GGs	RRB
a (m e n)	3,77791	3,88537
b	-16,96233	-17,20897
D100 e D' (µm)	89,10998	83,89794
R²	0,99921	0,99944

Afim de calcular a eficiência dos ciclones Lapple e Stairmand para esta distribuição granulométrica, foram utilizados os parâmetros operacionais do artigo de Liu et al. (2024), como a velocidade de entrada (v), densidade do catalisador (ρ_s), a densidade do gás (ρ_f) e a viscosidade dinâmica (μ), apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros Operacionais do Ciclone.

v (m/s)	ρ_s (Kg/m³)	ρ_f (Kg/m³)	μ (Kg/(m.s))
1,2	2.300,00	1,225	$1,7894 \cdot 10^{-05}$

Fonte: Liu et al. (2024)

Para se estimar o desempenho dos ciclones clássicos na separação das partículas caracterizadas por Liu et al. (2024), é necessário definir um diâmetro da seção cilíndrica. Com este fim, foram consultados os trabalhos de Kim et al. (2012) e Cho et al. (2013), que utilizaram ciclones com diâmetros da seção cilíndrica (D_c) da ordem de 1,27 a 1,42 m, sendo adotado por Cho et al. (2013) o valor de 1,30 m. Considerando a proximidade entre as dimensões empregadas nesses estudos e visando utilizar uma geometria representativa de aplicações industriais de FCC, foi adotado, neste trabalho, o diâmetro da seção cilíndrica do ciclone igual a 1,30 m. A partir desse valor, das constantes geométricas (K) apresentadas na Tabela 2 e dos parâmetros operacionais citados na Tabela 6, foram calculados a vazão volumétrica (Q), o diâmetro de corte (D^*), pela Equação 05, e a eficiência global de coleta ($\bar{\eta}$), utilizando a Equação 08, para as geometrias de Lapple e Stairmand. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores calculados de Q, D* e $\bar{\eta}$ para cada geometria.

	Lapple	Stairmand
Q (m³/s)	0,0055	0,0055
D* (μm)	167,51	72,30
$\bar{\eta}$ (%)	54,28	76,41

Para o diâmetro da seção cilíndrica adotado ($D_c = 1,30$ m), o ciclone Lapple apresentou diâmetro de corte (D^*) de aproximadamente 167,5 μm , valor 67,5% superior ao maior diâmetro das partículas da distribuição granulométrica considerada (100 μm). Esse resultado indica que grande parte das partículas de catalisador seria arrastada juntamente com o gás para a corrente de *overflow*, evidenciando que essa geometria não seria adequada para a separação dos catalisadores nas condições avaliadas. Em contrapartida, o ciclone Stairmand apresentou diâmetro de corte de aproximadamente 72,3 μm , situado dentro da faixa granulométrica da amostra, resultando em uma eficiência global de coleta de 76,4%. Esse resultado demonstra um desempenho de aproximadamente 22,1% superior ao do ciclone Lapple, indicando maior capacidade de retenção das partículas de catalisador e, consequentemente, maior adequação para aplicação no processo de FCC.

4 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica evidenciou que a eficiência da separação gás-sólido em unidades de craqueamento catalítico fluido está diretamente relacionada às características da distribuição granulométrica dos catalisadores, às condições operacionais e à geometria do ciclone empregado. Verificou-se também que a representação adequada da distribuição granulométrica constitui uma etapa essencial para a estimativa da eficiência global de coleta. Além dos benefícios operacionais e econômicos decorrentes da recuperação dos catalisadores, a literatura destaca que a retenção eficiente dessas partículas contribui para a redução da emissão de material particulado para a atmosfera, minimizando impactos ambientais e riscos à saúde humana associados à inalação de partículas finas. Dessa forma, a utilização de sistemas de separação eficientes representa um fator importante tanto para o desempenho do processo quanto para a mitigação dos impactos ambientais das unidades de craqueamento catalítico fluido.

Os resultados obtidos a partir do estudo de caso permitiram avaliar o desempenho das geometrias clássicas de ciclones Lapple e Stairmand na separação de partículas de catalisador para a distribuição granulométrica considerada. Nas condições operacionais adotadas e utilizando os dados granulométricos obtidos da literatura, o ciclone Stairmand apresentou eficiência global de coleta 22,1% superior à do ciclone Lapple. Esses resultados são coerentes com o comportamento esperado para essa geometria e estão de acordo com os valores reportados na literatura.

Dessa forma, o objetivo proposto neste trabalho foi atingido, uma vez que foi possível inferir a eficiência de ciclones clássicos a partir de dados granulométricos disponíveis na literatura e comparar o desempenho das geometrias avaliadas. Nas condições analisadas, conclui-se que o ciclone Stairmand apresentou desempenho superior ao ciclone Lapple para a separação de partículas de catalisador em unidades de Craqueamento Catalítico Fluido.

REFERÊNCIAS

ANCHIETA, Jorge. **Modelagem e simulação de processos catalíticos para o refino de petróleo**. Rio de Janeiro: 2015.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

CHO, H.; CHA, B.; KIM, S.; RYU, J.; KIM, J.; MOON, I. Numerical analysis for particle deposit formation in reactor cyclone of residue fluidized catalytic cracking. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, DC, v. 52, n. 21, p. 7252–7258, 2013.

DIZAJYEKAN, Sajed Naiemi et al. Evaluation of Centrifugal Force, Erosion, Strain Rate, and Wall Shear in a Stairmand Cyclone. **Processes**, v. 10, art. 2381, 2022.

FERREIRA, José Marcos Moreira; SOUSA-AGUIAR, Eduardo Falabella; ARANDA, Donato Alexandre Gomes. FCC Catalyst Accessibility—A Review. **Catalysts**, v. 13, n. 4, art. 784, 2023.

GAUTO, Marcelo Antunes; APOLUCENO, Daniela de Melo; AMARAL, Messias Cândido; AURÍQUIO, Paulo Cezar; PINTO, Vinícius Ramos. **Petróleo e Gás: princípios de exploração, produção e refino**. 1. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

KIM, S.; et al. Numerical simulation of gas–solid flow in industrial FCC cyclones. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 76, p. 69–80, 2012.

LIU, Fang et al. Study on the flow and collision characteristics of catalyst particles in FCC reactor. **Powder Technology**, v. 438, art. 119642, 2024.

LIU, Y.; et al. Characteristics of flow and collision of catalyst particles in fluid catalytic cracking units. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 441, p. 119820, 2024.

MASSARANI, Giulio. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001.

NNABALU, C. R.; FALCONE, G.; BORTONE, I. The Role of Fluid Catalytic Cracking in Process Optimisation for Petroleum Refineries. **International Journal of Chemical and Molecular Engineering**, v. 13, n. 7, 2019.

OLORUNTOBA, Adefarati; ZHANG, Yongmin; HSU, Chang Samuel. State-of-the-Art Review of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst Regeneration Intensification Technologies. **Energies**, v. 15, n. 6, art. 2061, 2022.

PENG, Wei et al. Properties analysis of catalyst particles during stripper distributor fault in industrial fluid catalytic cracking unit. **Fuel**, v. 381, art. 133279, 2025.

PENG, Y.; et al. Investigation of catalyst attrition behavior in the stripper of a fluid catalytic cracking unit. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 442, p. 119933, 2024.

PINHEIRO, Carla I. C. et al. Fluid Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 1, p. 1–29, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Health and environmental effects of particulate matter (PM)**. Washington, D.C., 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>. Acesso em: 20 jun. 2026.

VIEIRA, Roberta C. et al. Simulation of Catalytic Cracking in a Fixed-Fluidized-Bed Unit. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 20, p. 6027–6034, 2004.

WHITCOMBE, Joshua Matthew. **Study of Catalyst Particle Emissions from a Fluidized Catalyst Cracker Unit**. 2003. Thesis (PhD Doctorate) – School of Environmental Engineering, Griffith University, Brisbane, 2003.

WIDIAWATY, Candra Damis et al. Identifying the influence of inlet velocity changes to pressure drop and collecting efficiency in Stairmand and Lapple type cyclone separators. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 4, n. 6 (130), p. 22–28, 2024.

YUAN, Shiwei et al. Experimental and numerical study of maximum efficiency vortex finder insertion depth of a Stairmand cyclone. **Particuology**, v. 95, p. 343–355, 2024.

ZHANG, X.; et al. Kinetic study of catalytic cracking on the effect of reaction parameters in short-contact cyclone reactors. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, Beijing, v. 19, n. 5, p. 801–812, 2011.