



## Metodologia de Avaliação de Catalisadores de FCC em Unidade de Bancada

### *Methodology for Evaluating FCC Catalysts in a Bench Scale Unit*

**Débora Pereira dos Santos**

Universidade Federal do Rio de Janeiro. <https://lattes.cnpq.br/7887110907422802>

**Eduardo Falabella Sousa-Aguiar**

Orientador. Universidade Federal do Rio de Janeiro. <http://lattes.cnpq.br/1345111382543539>

**Pedro Nothafft Romano**

Orientador. Universidade Federal do Rio de Janeiro. <http://lattes.cnpq.br/694515021770153>

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi estudar uma metodologia em avaliação de catalisadores de unidade de bancada, em especial a unidade Micro Downflow Unit (MDU). Uma unidade de avaliação de catalisadores tem como meta testes de diferentes catalisadores em pequena escala para fins de pesquisa, desenvolvimento e controle de qualidade. Além desses objetivos, pode-se incluir também o estudo de catalisadores cada vez mais promissores que maximizem a conversão e seletividade de produtos desejados. Os resultados deste trabalho reforçam a importância de metodologias laboratoriais bem definidas no contexto da indústria de refino, especialmente diante da crescente necessidade de aumentar a eficiência energética, reduzir emissões atmosféricas e maximizar a produção de combustíveis de maior valor agregado e com maior “pegada verde”.

**Palavras-chave:** MDU; conversão; seletividade.

**Abstract:** The objective of this work was to study a methodology for evaluating catalysts in bench-scale unit, specifically the Micro Downflow Unit (MDU). A catalyst evaluation unit aim to test different catalysts on a small scale for research, development, and quality control purposes. In addition to these objectives, the study of increasingly promising catalysts that maximize the conversion and selectivity of desired products can also be included. The results of this work reinforce the importance of well-defined laboratory methodologies in the context of the refining industry, especially given the growing need to increase energy efficiency, reduce atmospheric emissions, and maximize the production of higher value-added fuels with a greater “green footprint”.

**Keywords:** MDU; conversion; selectivity.

## INTRODUÇÃO

O craqueamento catalítico fluido ou FCC (Fluid Catalytic Cracking) é um processo de refino que visa aumentar a produção de gasolina de alta octanagem, diesel, querosene, gás liquefeito de petróleo em uma refinaria, por meio da conversão de cortes pesados provenientes da destilação do petróleo (gasóleo e resíduos). Ao longo do tempo o processo evoluiu para atender às novas tendências do refino.

Concebido inicialmente para o processamento de gasóleos, o processo se adaptou para processar cargas mais pesadas como o resíduo atmosférico. Para

isso, o desenvolvimento de novos catalisadores de maior eficiência, bem como inovações e concepções mais arrojadas no projeto básico, permitiram a evolução do processo para outro estágio, como trabalhar com o FCC na direção de produzir olefinas leves em especial o propeno, que é um produto de alto valor agregado para a indústria petroquímica.

As unidades de FCC utilizam um catalisador cujo principal componente ativo para essa reação são as zeólitas (Weitkamp, 2000). Estes materiais são aluminosilicatos, conhecidos por sua alta cristalinidade e arranjo microporoso regular e bem definido. A estrutura desses materiais é formada por átomos de silício e alumínio coordenados tetraedricamente com átomos de oxigênio, sendo que, pela coordenação assumida por esse último elemento, a estrutura fica carregada negativamente (Stöcker, 2005). Quando prótons ( $H^+$ ) extraestruturais compensam essa carga negativa formam-se sítios ácidos que viabilizam a ocorrência das reações de craqueamento.

Cada vez mais desenvolvem-se sistemas catalíticos e equipamentos que minimizem os impactos do FCC numa refinaria. Para isso é necessário investimento em pesquisas laboratoriais através de unidades que possam avaliar os catalisadores utilizados. O foco deste estudo é avaliar o desempenho de um catalisador de equilíbrio (E-Cat) em uma MDU (Micro Downflow Unit), com foco na análise dos derivados obtidos pela MDU.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os rendimentos e as conversões das frações obtidas no craqueamento catalítico fluido (FCC) de uma amostra de gasóleo de vácuo (VGO), comparando-os com dados disponíveis na literatura. As frações foram geradas na unidade de bancada MDU, pertencente à empresa HTE (High-Throughput Experimentation), a qual simula o processo de FCC aplicado a uma amostra de VGO proveniente da Refinaria Duque de Caxias (REDUC), localizada no Rio de Janeiro. Utilizaram-se catalisadores de equilíbrio fornecidos pela Fábrica Carioca de Catalisadores (FCCSA), situada no município de Santa Cruz, também no Rio de Janeiro.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### O Conceito de FCC

O processo mais utilizado no mundo inteiro para a produção de nafta craqueada e GLP é o craqueamento catalítico fluido. Esse processo tem como objetivo converter uma carga pesada (gasóleo) obtida de uma unidade de destilação a vácuo em produtos mais leves (GLP e nafta craqueada), que apresentam um maior valor agregado e uma maior demanda no mercado consumidor.

De maneira bastante resumida, o processo FCC é composto por três estágios: reação, separação e regeneração. Em um processo FCC convencional, no primeiro estágio, a carga líquida é introduzida na parte inferior do reator (riser), onde é vaporizada a 300 °C, e entra em contato com o catalisador previamente aquecida a 700 °C por um curto intervalo de tempo (3-5 segundos), levando a uma temperatura de reação em torno de 530 °C. A pressão no riser varia de 49 a 147 kPa. Os vapores do óleo são arrastados juntamente com o catalisador até o topo do riser, ocorrendo nesse percurso as reações de craqueamento catalítico, de natureza endotérmica. Grande quantidade de coque é gerada durante a reação e se deposita no catalisador, diminuindo a atividade catalítica do mesmo pelo bloqueio dos sítios ativos.

No segundo estágio, o catalisador é separado dos produtos reacionais através de ciclones e transportado para o regenerador, onde ocorre a queima do coque. As reações que ocorrem no regenerador são exotérmicas, levando a temperaturas em torno de 700 °C, e à produção de uma mistura de gases composta por  $N_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  e particulados. Após esta etapa, o catalisador regenerado inicia assim, um novo ciclo. Os produtos da reação de craqueamento catalítico são enviados para torres de destilação para que ocorra sua separação em frações de interesse.

Segundo a Revista Momento Técnico, da Empresa FCCSA (Coelho, 2025), a seleção do catalisador mais apropriado para uma unidade de craqueamento catalítico em leito fluidizado (UFCC) constitui um elemento determinante para o desempenho global e para a confiabilidade operacional do processo.

## Unidade de Avaliação de Catalisador de FCC

### Micro Downflow Unit (MDU)

A unidade Micro Downflow (MDU), desenvolvida pela empresa HTE (High-Throughput Experimentation), subsidiária da empresa BASF, é baseada em uma tecnologia de escala laboratorial e oferece um sistema de reator com fluxo de catalisador arrastado, análogo às unidades comerciais de craqueamento catalítico fluido (UFCCs) ("Micro Downflow Unit", [S.d.]). Pode ser operada dentro de uma ampla faixa de condições de processo, incluindo pressões elevadas típicas das UFCCs.

O crescente investimento em pesquisa e desenvolvimento, tecnologias e expansão de capacidade na indústria de refino criam oportunidades para catalisadores de refinarias.

Os principais fabricantes do mercado estão focados na adoção de novas tecnologias, projetos de propriedade e adequação de equipamentos para esses catalisadores. Consequentemente, as empresas estão melhorando as propriedades catalíticas dos produtos para garantir estabilidade e confiabilidade. Isso os ajudará a produzir combustível de alta qualidade com custo reduzido ("Tamanho do mercado de catalisadores de refinaria, crescimento, relatório global, 2032", 2026).

As refinarias de todo o mundo estão investindo progressivamente em atualizações de infraestrutura para atender aos padrões regulatórios, crescendo a demanda por combustíveis mais verdes. Como resultado, há uma demanda crescente por soluções catalíticas inovadoras que melhoram a eficiência e a eficácia dos procedimentos de remoção de enxofre, o que está impulsionando a expansão e a diversificação do mercado. Essa tendência não apenas aborda preocupações ambientais, mas também promove os avanços tecnológicos e o crescimento do mercado de catalisadores de refinarias (“Tamanho do mercado de catalisadores de refinaria, crescimento, relatório global, 2032”, 2026).

## Principais Matérias-Primas

A carga de processo de FCC pode abranger desde VGO (gasóleo de vácuo) até resíduo atmosférico (RAT), sem mencionar cargas não-convencionais como tight oil (ou óleo de xisto (Union of Concerned Scientists, 2016)) ou cargas pesadas como areias betuminosas ou betume (8). Gasóleo é a porção do óleo cru que comumente possui faixa de ebulição de 330 a 500°C, dependendo do tipo de petróleo. A faixa de ebulição do resíduo atmosférico (RAT), que é a fração mais pesada do petróleo remanescente após a destilação atmosférica, situa-se acima de 340°C a 400°C. Alguns estudos indicam que essa faixa pode se estender para além de 510°C, dependendo do tipo de petróleo processado (Freitas *et al.*, 2016).

## MATERIAIS E METODOLOGIA

### Materiais

Os resultados experimentais foram obtidos através de uma Unidade MDU (Micro Downflow Unit), da empresa HTE (High Throughput Experimentation), existente no Laboratório de Intensificação de Processos e Catálise localizado na Ilha do Fundão – UFRJ. A matéria-prima utilizada como matéria-prima para a Unidade MDU é de uma amostra de gasóleo de vácuo (VGO) obtida através da Refinaria Duque de Caxias – Reduc, RJ. O catalisador utilizado foi um catalisador de equilíbrio de FCC fornecido pela empresa FCC S.A (Fábrica Carioca de Catalisadores).

### Metodologia

#### Unidade MDU

Através da MDU, que é uma unidade de bancada de leito fluidizado empregada para testar catalisadores com cargas desde óleo cru, nafta, até óleos vegetais (hte\_Micro\_Downflow\_Unit, 2026), utilizando um reator tubular de dimensões (100cm de comprimento e diâmetro interno de 8,4 mm). Cada ensaio na unidade MDU foi conduzido com tempo de 60s (conforme dados obtidos no Anexo A), em conformidade com o método ASTM 3907 (mesmo utilizado para Microactivity Test) e ASTM D5154M-25, que recomenda tempos curtos de contato para simular as

condições do riser do FCC e evitar craqueamento secundário excessivo (ASTM D5154 / D5154M-25, 2025).

Para retirar impurezas, o catalisador é calcinado a 550°C por 4h, respeitando uma rampa de aquecimento de 2°C/min. Este é peneirado para obtenção de partículas entre 50-200 µm, em seguida é colocado em um recipiente de dosagem da unidade. O gasóleo (VGO) é adicionado a um frasco na unidade e ambos o catalisador e o gasóleo são injetados automaticamente na unidade.

Os gases produzidos foram diretamente enviados em linha para o cromatógrafo a gás e analisados, enquanto os produtos líquidos foram analisados por destilação simulada. A quantidade exata de carga alimentada foi determinada pela diferença de massa da microseringa antes e após cada ensaio. Segundo dados do Anexo A foram utilizados aproximadamente 7g de óleo que foram injetados no reator durante 60s. As condições operacionais e os dados obtidos da unidade MDU são apresentadas no Anexo A, e foram utilizados para posterior interpretação.

## Análise dos produtos gasosos, líquidos e do coque

O produto obtido através do craqueamento na MDU é composto por frações gasosas, líquidas e coque sólido. Para avaliar a carga, foi realizada uma análise cromatográfica abrangente dos produtos obtidos na unidade MDU, fornecendo distribuições detalhadas de rendimento.

### Análise dos produtos gasosos

Os componentes gasosos foram analisados utilizando um cromatógrafo gasoso Agilent 8890, equipado com detector de ionização por chama (FID), que permite a quantificação precisa de hidrocarbonetos leves até C<sub>4</sub>, incluindo parafinas C<sub>5</sub>, hidrogênio e gases. Todas as quantificações de massa e rendimentos são realizadas através do software da empresa HTE myhteTM.

### Análise dos produtos líquidos

A destilação simulada dos produtos líquidos foi realizada através do cromatógrafo a gás ThermoScientific Trace 1600 que utiliza detector por ionização de chama (FID) e uma coluna MXT-1HT de dimensões 10m x 530µm x 2,65µm. O cromatógrafo utiliza o software SimDist Analyser que permite obter os rendimentos mássicos em linha das frações líquidas além de uma análise rápida e precisa da distribuição dos pontos de ebulição. Os produtos líquidos foram classificados em três frações: gasolina ou nafta (C<sub>5</sub>–221 °C), óleo leve de ciclo (LCO, 221–343 °C) e óleo pesado de ciclo (HCO, acima de 343 °C) (Kirchmann, 2019) .

### Análise do coque sólido

A quantidade de coque depositada no catalisador após ensaio na MDU foi determinada por meio de um analisador termogravimétrico (modelo Discovery STD650). Uma amostra de 10 mg de catalisador gasto é aquecida a uma taxa de 2°C/min de 100 a 800°C passando ar. Após esse procedimento é possível obter a estimativa do teor de carbono como porcentagem da massa do catalisador.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resíduo e VGO são duas cargas típicas utilizadas para craqueamento catalítico fluido. De modo geral, VGO contém mais hidrocarbonetos saturados e menos aromáticos do que o resíduo. O VGO também possui uma faixa de ebulição mais baixa. Como resultado, o VGO é mais fácil de craquear e gera menos óleo de fundo.

Para a plotagem dos gráficos e facilitação na visualização das tabelas dos tópicos seguintes, foi considerado uma técnica de arredondamento na primeira casa decimal dos dados originais obtidos do software mythe™. Os resultados originais estão disponíveis no Anexo A.

### Conversão e Razão CatOil

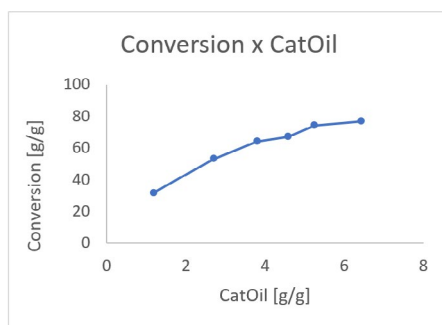
A razão CatOil (massa de catalisador / massa de óleo) é uma variável de controle que a equipe de operação pode ajustar para influenciar a conversão, que é uma variável de desempenho do processo de craqueamento catalítico. Ambas são fundamentais para a eficiência e rentabilidade da refinaria.

**Tabela 1 - Relação CatOil versus Conversão.**

CatOil [g/g]	Conversion [wt.%]
6,4	76,9
5,2	74,2
4,6	67,0
3,8	63,9
2,7	53,3
1,2	31,9

**Fonte: autoria própria, 2025.**

**Figura 1- Relação Conversão versus CatOil.**



**Fonte: autoria própria, 2025.**

A característica principal do gráfico é uma relação diretamente proporcional entre o CatOil e a conversão do óleo. À medida que a razão CatOil aumenta, a

conversão também aumenta. Isso ocorre porque uma maior quantidade de catalisador oferece mais sítios ativos para quebrar as moléculas pesadas de hidrocarbonetos em moléculas menores, aumentando a eficiência do processo.

Eventualmente, a curva tende a se achatar, atingindo um platô ou uma conversão máxima (pelo gráfico pode-se observar que é em torno de aproximadamente 80%). Isso indica que, a partir de um certo ponto, adicionar mais catalisador em relação ao óleo não aumenta significativamente a conversão, pois outros fatores (como o tempo de residência no reator, a temperatura ou a termodinâmica da reação) tornam-se os fatores limitantes.

O gráfico acima é crucial para os engenheiros de refinaria determinarem o ponto de operação ideal. Eles buscam um valor de CatOil que maximize a conversão para os produtos desejados (como a gasolina) sem desperdiçar catalisador ou energia além do ponto economicamente viável.

### Análise de Rendimentos por Grupo de Produtos – FCC

Os sub itens abaixo apresentarão a análise dos rendimentos mássicos (yields) por grupo de produtos gerados no processo do FCC (Fluid Catalytic Cracking), com base em dados de rendimento em peso percentual (wt. %) obtidos. A seguir, cada grupo é apresentado com uma breve explicação, acompanhado por um gráfico de variação dos rendimentos ao longo das amostras.

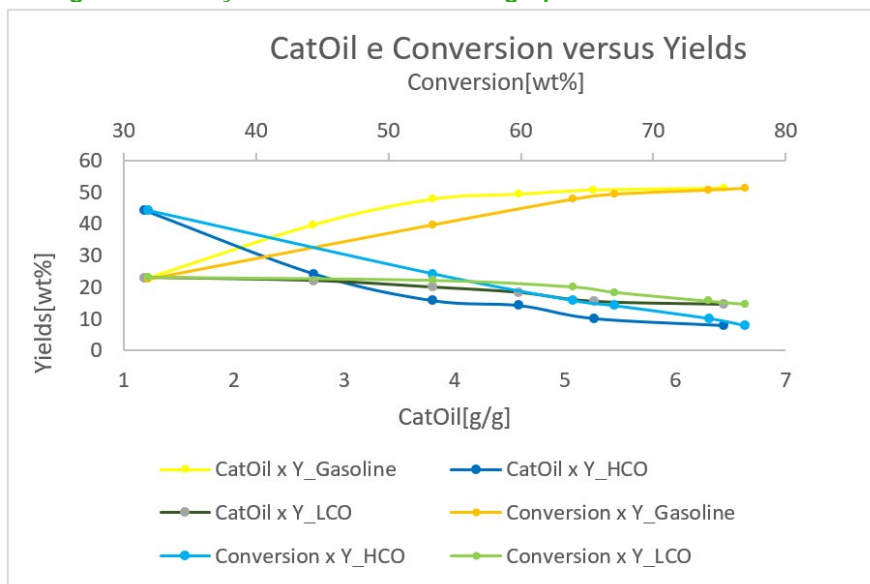
#### Gasolina e derivados

O grupo 'Gasolina e derivados' inclui os seguintes rendimentos mássicos: Y\_Gasoline, Y\_LCO, Y\_HCO. LCO (Light Cycle Oil), ou melhor dizendo, Óleo Leve de Reciclo e HCO (Heavy Cycle Oil) são óleos de reciclo oriundos do craqueamento catalítico.

**Tabela 2 - Dados experimentais de Conversão versus rendimentos mássicos.**

CatOil [g/g]	Conversion [wt.%]	Y_Gasoline [wt.%]	Y_LCO [wt.%]	Y_HCO [wt.%]
6,4	76,9	51,3	14,7	7,9
5,2	74,2	50,7	15,6	10,1
4,6	67,0	49,4	18,5	14,2
3,8	63,9	47,8	20,1	15,8
2,7	53,3	39,6	22,2	24,3
1,2	31,9	22,4	23,2	44,3

**Fonte: autoria própria, 2025.**

**Figura 2 - Variação dos rendimentos do grupo 'Gasolina e derivados'.**

**Fonte: autoria própria, 2025.**

Consegue-se observar que o rendimento mássico de gasolina aumenta inicialmente, à medida que a conversão aumenta e a razão catalisador / óleo (CatOil) aumentam. Isso ocorre porque mais moléculas pesadas da carga de óleo (no caso deste presente trabalho, o VGO) são quebradas em moléculas menores e mais leves, que se enquadram na faixa de ebulição da gasolina. Eventualmente, a curva atinge um ponto de rendimento máximo de gasolina. Além desse ponto, um aumento adicional na conversão leva a uma diminuição do rendimento de gasolina. Isso acontece porque as moléculas de gasolina começam a ser craqueadas em produtos ainda mais leves, como gases (GLP, gases leves) e, em menor grau, coque. Já os rendimentos mássicos de LCO e HCO caem à medida que a conversão e a razão catalisador / óleo (VGO) aumentam.

LCO e HCO são produtos intermediários e à medida que a reação evolui, são quebrados em moléculas menores, daí o rendimento mássico dessas moléculas caírem à medida que a reação avança. São produtos de faixa de ebulição intermediária na reação de craqueamento catalítico fluido e com o avanço da reação (ou aumento do tempo de residência, temperatura ou relação catalisador/óleo), essas moléculas são expostas a condições de craqueamento mais severas e sofrem re-craqueamento, quebrando-se em produtos ainda mais leves, como gasolina (nafta), GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) e gases leves (C1-C4).

LCO e HCO são correntes ricas em hidrocarbonetos aromáticos. Embora os aromáticos sejam mais difíceis de craquear do que parafinas e naftenos, eles sofrem reações de alquilação, desidrogenação e condensação que os convertem em moléculas maiores ou em coque, em vez de permanecerem como LCO/HCO líquido.



O gráfico permite identificar as condições operacionais ótimas (combinação de conversão e CatOil) para maximizar a produção de gasolina. O objetivo é operar próximo, mas aquém, do ponto de *overcracking* para a relação CatOil escolhida, buscando a melhor seletividade para a faixa de ebulição da gasolina, minimizando a produção de subprodutos indesejados (gases leves e coque).

## Gás Liquefeito de Petróleo

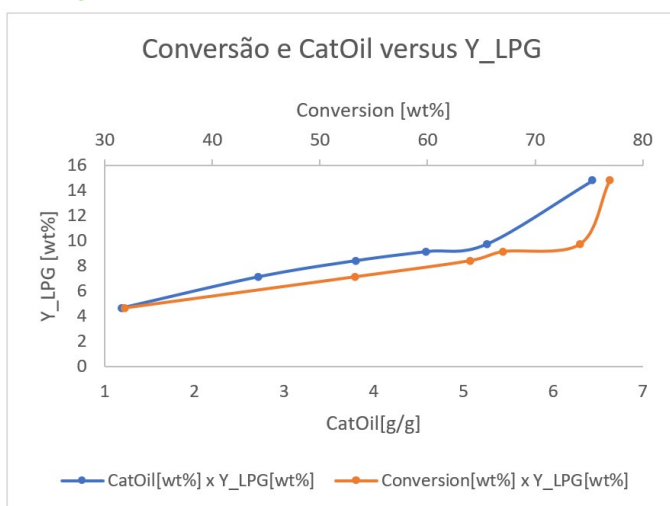
O gás liquefeito de petróleo (GLP ou LPG, em inglês) é um produto valioso, pois contém componentes que podem ser usados como matérias-primas para processos de alquilação e para a indústria petroquímica. Considerando no caso deste presente estudo, que as reações foram realizadas em um reator à temperatura constante, conforme dados operacionais obtidos, podemos observar os seguintes gráficos obtidos abaixo:

**Tabela 3 - Dados Experimentais obtidos de CatOil versus rendimentos mássicos de GLP.**

CatOil [g/g]	Conversion [wt.%]	Y_LPG [wt.%]
6,4	76,9	14,8
5,2	74,2	9,7
4,6	67,0	9,1
3,8	63,9	8,4
2,7	53,3	7,1
1,2	31,9	4,6

Fonte: autoria própria, 2025.

**Figura 3 - Conversão e CatOil em relação a Y\_LPG.**



Fonte: autoria própria, 2025.

Pode-se observar que em ambos os gráficos há um acentuado crescimento nos dois últimos pontos, tanto nos gráficos de CatOil versus Yields de GLP em termos mássicos, quanto no gráfico Conversão versus Yields de GLP também em bases mássicas. E que também há um platô entre o quarto e quinto ponto nos dois gráficos.

O crescimento vertiginoso existente entre as conversões 74% e 77% aproximadamente, se dão ao fato do sobre craqueamento existente no reator, fazendo ocorrer a produção de mais GLP que gasolina. Essa tendência que pode existir na reação de FCC pode ser algo desejável quando há necessidade de produção mais de leves que de gasolina, dependendo da sazonalidade em que a refinaria pode estar inserida, no contexto econômico do ano. Há a maximização da formação de GLP alcançada em uma dada temperatura. Já o platô que foi verificado entre o quarto e o quinto ponto se dá devido a relação ótima existente para a concentração de catalisador.

## Coque

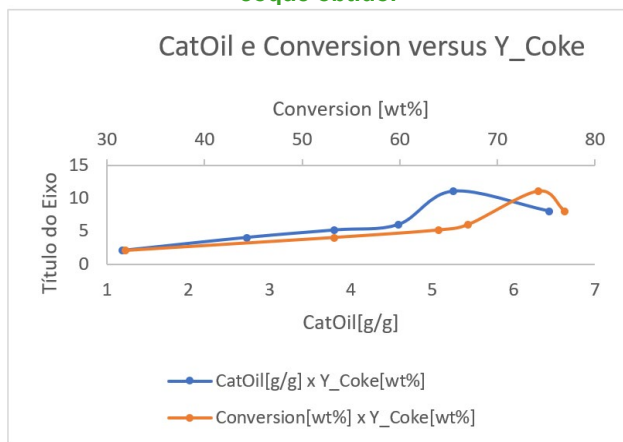
Na operação de unidades FCC, é necessário ter coque para fornecer o calor para o pré-aquecimento da alimentação e para o craqueamento. No entanto, se houver coque em excesso, pode ocorrer o envenenamento do catalisador e pode sobrecarregar o soprador de ar durante a regeneração do catalisador resultando em temperaturas excessivamente altas no regenerador.

**Tabela 4 - Dados Experimentais obtidos de CatOil versus rendimentos mássicos de Coque.**

CatOil [g/g]	Conversion [wt.%]	Y_Coke [wt.%]
6,4	76,9	8,1
5,2	74,2	11,1
4,6	67,0	6,0
3,8	63,9	5,2
2,7	53,3	4,0
1,2	31,9	2,0

**Fonte: autoria própria, 2025.**

**Figura 4 - Gráfico Conversão e CatOil em relação ao rendimento de coque obtido.**



**Fonte: autoria própria, 2025.**

Os pontos do gráfico mostram que um aumento na conversão e na razão CatOil tendem a aumentar a produção de coque. O aumento do CatOil significa mais massa de catalisador por massa de óleo processado, o que na prática faz aumentar a severidade por unidade de óleo (mais sítios ácidos disponíveis, maior taxa de conversão). Isso intensifica tanto o craqueamento desejado quanto as reações que formam coque.

Aumentar a severidade (maior conversão em base mássica) promove reações secundárias, ou seja, reações que convertem intermediários olefinicos/aromáticos em carbono depositado sobre o catalisador, resultando em mais coque. Em termos práticos, quando se “força” mais a conversão (temperatura, tempo efetivo, C/O ou atividade do catalisador), cresce a fração de matéria que é transformada em matéria sólida (coque). No caso deste presente trabalho, a temperatura é considerada constante (dados obtidos pelo programa myhtteTM (TM- Trade Mark)), logo pode-se desconsiderar o efeito da temperatura na interpretação.

### Olefinicidade do GLP

A olefinicidade do GLP é um parâmetro que indica o quanto da fração de GLP (ou LPG em inglês) produzida no teste contém olefinas, ou seja, porção de hidrocarbonetos insaturados ( $C=C$ ) dentro da fração de GLP. É uma medida de quanto olefínico é o GLP gerado no craqueamento.

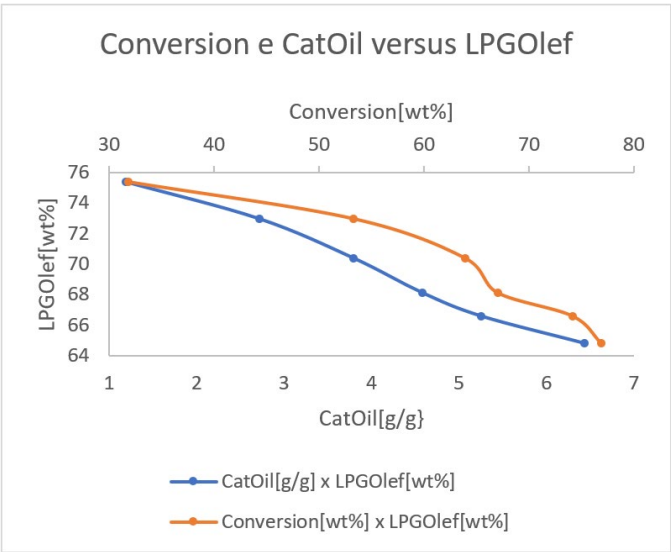
Este parâmetro está diretamente ligado a acidez do catalisador, severidade do processo e mecanismo de craqueamento. Catalisadores mais ácidos e com mais sítios fortes produzem mais olefinas. Quanto maior a temperatura, quanto maior for o tempo de contato entre a amostra e o catalisador e quanto maior a razão CatOil, maior o teor de olefinas no GLP. A tabela e o gráfico abaixo mostram o comportamento do teor de olefinicidade em relação à conversão:

**Tabela 5 - Dados Experimentais obtidos de CatOil e Conversion versus rendimentos mássicos de LPGOlef.**

CatOil [g/g]	Conversion [wt.%]	LPGOlef [wt.%]
6,4	76,9	64,8
5,2	74,2	66,6
4,6	67,0	68,1
3,8	63,9	70,4
2,7	53,3	73,0
1,2	31,9	75,4

Fonte: autoria própria, 2025.

**Figura 5 - Gráfico Conversão e CatOil em relação ao rendimento.**



Fonte: autoria própria, 2025.

Analisando os gráficos acima, pode-se observar que à medida que a Conversão e a razão CatOil aumentam, o rendimento mássico de olefinicidade no GLP diminuem. Isso significa que à medida que a reação de craqueamento catalítico avança, menos hidrocarbonetos insaturados ocorrem nas frações de GLP, indicando maior severidade na reação, formação de mais coque e parafinas. Esse comportamento também mostra que o sistema está privilegiando a saturação, ao invés de preservar olefinas.

Da mesma forma interpreta-se em relação a razão catalisador/óleo. Através do gráfico infere-se que quanto mais catalisador, mais a carga está exposta aos sítios ácidos, há mais quebra das insaturações e maior consumo de olefinas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos ensaios realizados na unidade Micro Downflow Unit (MDU), unidade de onde foram obtidos os resultados deste estudo, permitiu avaliar, de forma consistente, o comportamento de um catalisador de equilíbrio de FCC na conversão de gasóleo de vácuo (VGO) da Refinaria Duque de Caxias. A MDU, por operar em regime de leito fluidizado (arrastado), análogo ao riser industrial e sob condições controladas e que apresentam reprodutibilidade, mostrou-se adequada para a investigação da influência da razão catalisador/óleo (CatOil) e da conversão, como descrito na revisão bibliográfica.

Os resultados obtidos revelaram inicialmente uma relação diretamente proporcional entre CatOil e conversão, comportamento esperado devido ao maior número de sítios ácidos disponíveis quando se eleva a massa de catalisador por massa de carga. A curva observada, entretanto, tende ao platô próximo de 80% de conversão, indicando a transição para uma região limitada por efeitos de contato, cinética e termodinâmica, conforme discutido na seção de resultados. Esse comportamento é coerente com o que se espera de catalisadores operando em sistemas FCC em regime de severidade crescente, reforçando a coerência entre a resposta experimental e os fundamentos teóricos apresentados na revisão bibliográfica.

A análise dos grupos de produtos mostrou que o catalisador apresentou comportamento estável e seletivo ao longo das condições avaliadas. O rendimento de gás seco, por exemplo, apresentou correlação praticamente linear tanto com CatOil quanto com a conversão, mantendo-se em valores médios de 2,62% em massa, com  $R^2$  elevados (0,919 e 0,9149, respectivamente). Esse comportamento denota a ausência de overcracking significativo, indicador de um catalisador equilibrado e de boa estabilidade operacional. Resultados semelhantes são observados para outros grupos de produtos, como gasolina, LPG e derivados, cujas tendências acompanharam o aumento da severidade, sem desvios abruptos, demonstrando coerência no desempenho catalítico.

No caso do coque, observou-se o aumento progressivo do rendimento de acordo com a elevação do CatOil e da conversão, resultado consistente com a intensificação das reações secundárias características do processo de FCC quando a severidade é aumentada. A interpretação está alinhada com a literatura e com os fundamentos de formação de coque apresentados no referencial teórico. O gráfico correspondente confirmou que o catalisador segue o padrão esperado: maior atividade leva a maior geração de coque por aumento da taxa global de craqueamento.

Outro parâmetro relevante avaliado foi a olefinicidade do GLP. Os resultados evidenciaram que, à medida que a conversão diminui, a fração de olefinas no GLP aumenta, atingindo valores próximos a 75% nas condições de menor severidade. Essa resposta é coerente com o mecanismo catalítico apresentado na revisão bibliográfica, segundo o qual a acidez do catalisador, o tempo de contato e a disponibilidade de sítios ácidos influenciam diretamente a formação de olefinas.

A MDU, ao operar sob temperatura fixa, permitiu isolar o efeito da razão CatOil e favorecer interpretação mais objetiva dos fatores relacionados à acidez e reatividade do catalisador.

De modo geral, os resultados demonstram que a MDU é uma ferramenta eficaz e confiável para avaliação laboratorial de catalisadores de FCC, permitindo investigar seletividade, formação de coque e tendências de craqueamento com elevada reprodutibilidade. Também se confirma o potencial da técnica para estudos comparativos e desenvolvimento de formulações catalíticas, conforme indicado pelas características intrínsecas da tecnologia discutidas no corpo deste estudo.

Assim, conclui-se que a metodologia aplicada permitiu caracterizar adequadamente o comportamento catalítico do E-CAT (catalisador de equilíbrio) utilizado, validando a MDU como plataforma robusta para análise em microescala e contribuindo com conhecimento experimental relevante para o desenvolvimento de catalisadores e a otimização operacional de unidades FCC. Os resultados reforçam a importância de metodologias laboratoriais bem definidas no contexto da indústria de refino, especialmente diante da crescente necessidade de aumentar a eficiência energética, reduzir emissões atmosféricas e maximizar a produção de combustíveis de maior valor agregado e com maior “pegada verde”.

Considerando os resultados obtidos e as limitações inerentes à escala laboratorial, sugere-se que estudos para trabalhos futuros avancem nas seguintes direções:

- Integração entre MDU e técnicas de caracterização pós-reator, como TGA (Análise Termogravimétrica), DRX (Difração de Raios X) e FTIR (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier), visando a quantificação do coque formado e alterações estruturais no catalisador após o teste;
- Implementação de testes com E-CATs com diferentes níveis de contaminação por metais (Ni, V e Na), dada a relevância negativa desses envenenadores para a seletividade, formação de hidrogênio e coque, conforme discutido na revisão teórica;
- Testes em condições isotérmicas e não isotérmicas, a fim de comparar o comportamento da MDU com unidades ACE, MAT e plantas piloto, aprofundando o entendimento das diferenças hidrodinâmicas e limitações mencionadas das unidades de bancada;
- Avaliação de diferentes formulações catalíticas, incluindo catalisadores com proporções variadas de zeólitas Y e ZSM-5, aditivos metálicos e materiais com diferentes hierarquias de poros, realizando uma análise comparativa mais ampla da performance catalítica em condições equivalentes.

## REFERÊNCIAS

ASTM D5154/D5154M-25. **Standard Test Method for Determining Activity and Selectivity of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalysts by Microactivity Test.** Disponível em: <[https://store.astm.org/d5154\\_d5154m-25.html](https://store.astm.org/d5154_d5154m-25.html)>. Acesso em: 17 dez. 2025.

COELHO, Tiago. **Avaliação de catalisadores para UFCC: limitações dos ensaios laboratoriais frente à realidade operacional**. Momento Técnico, FCC S.A., Jul. 2025. Disponível em: [https://fccsa.com.br/media/filer\\_public/8c/1c/8c1c4194-61cf-4bdf-ac69-00252cfecc40/avaliacao\\_de\\_catalisadores.pdf](https://fccsa.com.br/media/filer_public/8c/1c/8c1c4194-61cf-4bdf-ac69-00252cfecc40/avaliacao_de_catalisadores.pdf). Acesso em: 15 dez. 2025.

FALABELLA, Eduardo. **FCC Catalyst Accessibility—A Review**. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4344/13/4/784>>. Acesso em: 4 nov. 2025.

FREITAS, Iasmim Cristina S.; CORIOLANO, Ana Catarina F.; ARAUJO, Antonio S. **Destilação Catalítica De Resíduo Atmosférico De Petróleo (RAT)**. Utilizando Zeólitas HZSM-5 E HY. 2016.

HTE\_MICRO\_DOWNFLOW\_UNIT. hte\_Micro\_Downflow\_Unit. Disponível em: <[https://www.hte-company.com/wp-content/uploads/hte\\_Micro\\_Downflow\\_Unit.pdf](https://www.hte-company.com/wp-content/uploads/hte_Micro_Downflow_Unit.pdf)>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KIRCHMANN, Dr Marius. **Micro Downflow Unit (MDU)**. 2019.

Micro Downflow Unit: Fluid Catalytic Cracking (FCC) Unit. hte GmbH, [S.d.]. Disponível em: <<https://www.hte-company.com/en/laboratory-systems/micro-downflow-unit/>>. Acesso em: 4 nov. 2025

STÖCKER, Michael. **Microporous and Mesoporous Materials, 2005**. 2005.

Tamanho do mercado de catalisadores de refinaria, crescimento, relatório global, 2032. Disponível em: <<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/refinery-catalyst-market-101090>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. **What is Tight Oil?** | Union of Concerned Scientists. Disponível em: <<https://www.ucs.org/resources/what-tight-oil>>. Acesso em: 5 nov. 2025.

WEITKAMP, Jens. **Zeolites and catalysis**. Solid State Ionics, v. 131, n. 1, p. 175–188, 1 jun. 2000.

## ANEXO A: DADOS OBTIDOS DO SOFTWARE MYHTETM UTILIZADOS.

Oil [g]	Experiment Time[s]	CatOil [g/g]	Conversion [wt.%]	Y_LPG [wt.%]	Y_Gasoline [wt.%]	Y_HCO [wt.%]	Y_LCO [wt.%]	Y_Coke [wt.%]	LPGOlef [wt.%]
7	60	6,43883	76,9144268	14,7985	51,28871	7,9217025	14,69074	8,06157	64,8096
7	60	5,25876	74,17078	9,72659	50,7131	10,1506927	15,65035	11,0969	66,5892
7	60	4,58328	67,022203	9,13689	49,37902	14,250857	18,46591	6,00444	68,12
7	60	3,79891	63,9487461	8,40955	47,8151	15,8137891	20,15065	5,17538	70,3809
7	60	2,7166	53,3002968	7,12533	39,62728	24,3559154	22,24174	4,03515	72,9671
7	60	1,19056	31,874843	4,63469	22,40283	44,3495707	23,24819	2,05281	75,3791

Fonte: autoria própria, 2025.