

PROJETO E VALIDAÇÃO DE UM APARATO LABORATORIAL PARA AVALIAÇÃO DOS RENDIMENTOS E QUALIDADE DOS PRODUTOS DA COQUEIFICAÇÃO*

Christian Manera¹

Tanye Dornelles²

Guilherme Liziero Ruggio da Silva³

Bruno Deves Flores⁴

Eduardo Osório⁵

Marcelo Godinho⁶

Antônio Cezar Faria Vilela⁷

Resumo

Os coprodutos da coqueificação tem um papel importante no bem estar econômico da indústria siderúrgica. Este trabalho teve como objetivo o projeto, construção e validação de um sistema laboratorial que permita o estudo da qualidade e rendimento dos 3 principais produtos da coqueificação: coque, alcatrão e gás de coqueria. O aparato é composto por uma retorta de coqueificação, um forno de craqueamento e um sistema de vidrarias. A validação foi realizada por meio da comparação dos resultados obtidos com rendimentos industriais. Os experimentos foram conduzidos com taxa de aquecimento de 3 °C/min e temperatura de coqueificação de 1000 °C. A condição de operação que melhor reproduziu as condições industriais foi temperatura de craqueamento de 800 °C e tempo de supercoqueificação de 30 min. COG foi obtido com rendimento 4% acima do industrial. Os rendimentos de coque e alcatrão foram obtidos com diferença inferior a 3%. Experimentos em triplicata mostraram o grau de repetibilidade da metodologia desenvolvida. Também foi possível reproduzir a composição industrial do COG, em especial dos dois gases majoritários (hidrogênio e metano). Por fim, os resultados obtidos demonstram a aptidão do sistema para reproduzir as condições industriais e permitir o estudo da contribuição de carvões e aditivos no rendimento e qualidade dos produtos da coqueificação.

Palavras-chave: Alcatrão; Carboquímica; Gás de coqueria; Retorta Jenkner.

DESIGN AND VALIDATION OF A LABORATORY APPARATUS FOR EVALUATION OF YIELDS AND QUALITY OF COKING PRODUCTS

Abstract

Coking by-products play an important role in the economic well-being of the steel industry. The objective of this work was the design, construction and validation of a laboratory system that allows the study of the quality and yield of the 3 main coking products: coke, coal tar and coke oven gas. The apparatus consists of a coking retort, a cracking furnace and a glassware system. Validation was carried out by comparing the results obtained with industrial yields. The experiments were carried out with a heating rate of 3 °C/min and a coking temperature of 1000 °C. The operating parameters that best reproduced industrial conditions were cracking temperature of 800 °C and coking time of 30 min. COG was obtained with a yield 4% above industrial. Coke and coal tar yields were obtained with a difference of less than 3%. Experiments in triplicate showed the degree of repeatability of the developed methodology. It was also possible to reproduce the industrial composition of COG, in particular of the two major gases (hydrogen and methane). Finally, the results obtained demonstrate the ability of the system to reproduce industrial conditions and

allow the study of the contribution of coals and additives to the yield and quality of coking products.]

Keywords: [Coal tar; Carbochemistry; Coke oven gas; Jenkner retort.]

¹ [Engenheiro Químico, aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Siderurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Aluna de graduação em Engenharia Química, Laboratório de Siderurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Doutor em Engenharia de Materiais, Gerente Técnico de Coqueria, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil.

⁴ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁵ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁶ Professor Dr., Laboratório de Energia e Bioprocessos, UCS, Caxias do Sul, RS, Brasil.

⁷ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.]

1 INTRODUÇÃO

O coque metalúrgico, utilizado como redutor nos altos-fornos, é um sólido carbonoso macroporoso produzido a partir da carbonização de carvões coqueificáveis de *rank* específico em temperaturas de cerca de 1000 °C na ausência de oxigênio [1]. A produção mundial de coque foi estimada em 705,9 Mt em 2021, com o Brasil sendo o 7º maior produtor e contribuindo com 1,4% (10,0 Mt) da produção global [2]. Os principais coprodutos do processo de coqueificação são o gás de coqueria (COG – *coke oven gas*) e o alcatrão.

O gás de coqueria, que representa cerca de 15 a 20 %m/m do rendimento do processo, é armazenado para aquecimento dos fornos de coqueificação e outras instalações integradas ao processo de fabricação de aço [3]. O alcatrão, que representa cerca de 3 a 5 %m/m do rendimento do processo, é composto por centenas de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Estima-se que são produzidas cerca de 20 Mt de alcatrão por ano [4]. O alcatrão tem sido reconhecido como uma valiosa fonte de compostos aromáticos a partir do carvão, e desta forma, mais importante do que um mero subproduto da fabricação de coque [1]. A importância do alcatrão tem sido abordada em diversas revisões recentes [3, 5]. Além disso, o alcatrão e o COG são coprodutos que proporcionam impactos importantes nas questões econômicas das plantas de produção de coque [6].

Após uma extensa revisão bibliográfica, 3 aparatos foram encontrados para o estudo dos rendimentos dos produtos da coqueificação: a norma GOST 18635-75 [7], o sistema comercial KARBOTest [8] e o sistema baseado na retorta Jenkner. A retorta Jenkner foi introduzida por Jenkner, Kühlwein e Hoffmann [9] em 1934 com o objetivo de estudar a capacidade coqueificante de carvões minerais, associado a avaliação dos rendimentos dos coprodutos da coqueificação. Ao longo dos anos o aparato Jenkner tem sido utilizado, com pequenas modificações, por diversos grupos de pesquisa para estudo do rendimento destes produtos [10-14]. A Tabela 1 apresenta as dimensões da retorta em sistemas encontrados na literatura.

Tabela 1. Dimensões da retorta Jenkner reportadas em trabalhos

Referência	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa de carvão (kg)	Densidade de carga (kg/m ³)
Krebs et al. [10]	260	120	1,0	740
Sutcu, Toroglu e Piskin [11]	260	120	1,2	-
Tiwari et al. [12]	-	-	1,2	750
Nomura e Nakagawa [13]	180	Largura: 35 Altura: 175	0,1	-
Loison, Foch e Boyer [14]	139 ^a	120	1,25	750

^aaltura de carga

Este trabalho teve como objetivo principal projetar e construir um aparato de coqueificação, com base na revisão da literatura, que reproduza as condições industriais para permitir o estudo do rendimento e qualidade dos produtos da coqueificação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Projeto do aparato experimental

A partir da revisão da literatura apresentada, alguns trabalhos foram encontrados com a descrição de sistemas baseados na retorta Jenkner, conforme apresentado na Tabela 1 e estes trabalhos foram utilizados como referência para o dimensionamento do aparato experimental do presente estudo. A partir dos dados tabelados, foram definidas as seguintes dimensões para a retorta: diâmetro de 120 mm e altura de 260 mm. Na ausência de informações detalhadas sobre a coluna de craqueamento, o dimensionamento da mesma foi realizado considerando uma razão L/D de 10, com um comprimento útil de 450 mm e diâmetro de 45 mm. O aquecimento do conjunto é realizado por 2 fornos independentes. Desta forma, o projeto incluiu um forno bipartido para o aquecimento da coluna de craqueamento e um forno com elevador para a retorta de coqueificação, permitindo o pré-aquecimento do mesmo com a retorta fora do forno.

2.2 Validação

A validação do reator e da metodologia foi conduzida com uma mistura coqueificável tipicamente utilizada na indústria. As amostras de estudo foram fornecidas pela empresa Gerdau Ouro Branco. Os rendimentos industriais obtidos na coqueificação desta mistura foram fornecidos pela empresa, para comparação e validação do aparato construído.

2.3 Desenvolvimento de metodologia experimental

Os experimentos foram conduzidos com 1,0 kg de mistura coqueificável, resultando em uma carga com 110 mm de altura e densidade de aproximadamente 800 kg/m³. A umidade da mistura foi corrigida para 8 %m/m. A coluna de craqueamento foi alimentada com 500 g de esferas de alumina, resultando em uma altura de 254 mm.

Inicialmente os fornos da retorta e da coluna de craqueamento foram aquecidos até as temperaturas de 550 °C e 800 ou 780 °C, respectivamente. Neste momento a retorta com a mistura coqueificável estava posicionada fora do forno, ao passo que a coluna de craqueamento encontrava-se no interior do respectivo forno. Após atingidas as temperaturas estabelecidas, a retorta foi inserida no forno com conseqüente queda da temperatura. Depois da recuperação da temperatura em 550 °C, o forno foi aquecido até a temperatura de 1060 °C com taxa de aquecimento de 3 °C/min. A temperatura de 1060 °C foi definida em experimentos preliminares como temperatura necessária para o centro da carga atingir 1000 °C. A Tabela 2 mostra as condições experimentais estudadas, onde foram avaliados diferentes tempos de supercoqueificação (10 e 30 min) e temperaturas de craqueamento (780 e 800 °C).

Tabela 2. Parâmetros de operação dos experimentos de coqueificação realizados para validação do sistema e metodologia

Condições operacionais	Experimento		
	V1	V2	V3
Temperatura coluna de craqueamento (°C)	800	800	780
Temperatura final no centro da carga (°C)	1000	1000	1000
Taxa de aquecimento (°C/min)	3	3	3
Tempo de supercoqueificação (min)	10	30	30

Após o fim do experimento, os fornos foram desligados e a retorta foi resfriada no interior do forno até atingir a temperatura de 500 °C, quando o forno foi abaixado e a retorta foi resfriada em contato com o ambiente. Depois do desenformamento o rendimento de coque (R_{coq}) foi obtido de acordo com a Equação (1).

$$R_{\text{coq}} = \frac{(m_{\text{coq},r} + m_{\text{coq},c})}{m_{\text{mist}}} \times 100 \quad (1)$$

onde:

$m_{\text{coq},r}$ é a massa de coque obtido na retorta de coqueificação (g);

$m_{\text{coq},c}$ é a massa de coque obtido pelo aumento de massa das esferas de alumina (g), e;

m_{mist} é a massa de mistura coqueificável em base seca (g).

O sistema utilizado para separação e coleta dos coprodutos foi projetado com base em diversas fontes estudadas e o desenho esquemático do sistema está apresentado na Figura 1. Inicialmente ele é composto por dois condensadores resfriados com água e um balão para coleta do alcatrão condensado. A água de refrigeração foi fornecida por um banho ultratermostático (marca 7Lab, modelo Bio Termo 20L) mantido na faixa de temperatura de 3 a 5 °C. Filtros de algodão foram posicionados após o segundo condensador para reter os aerossóis de alcatrão não recuperados pelos condensadores.

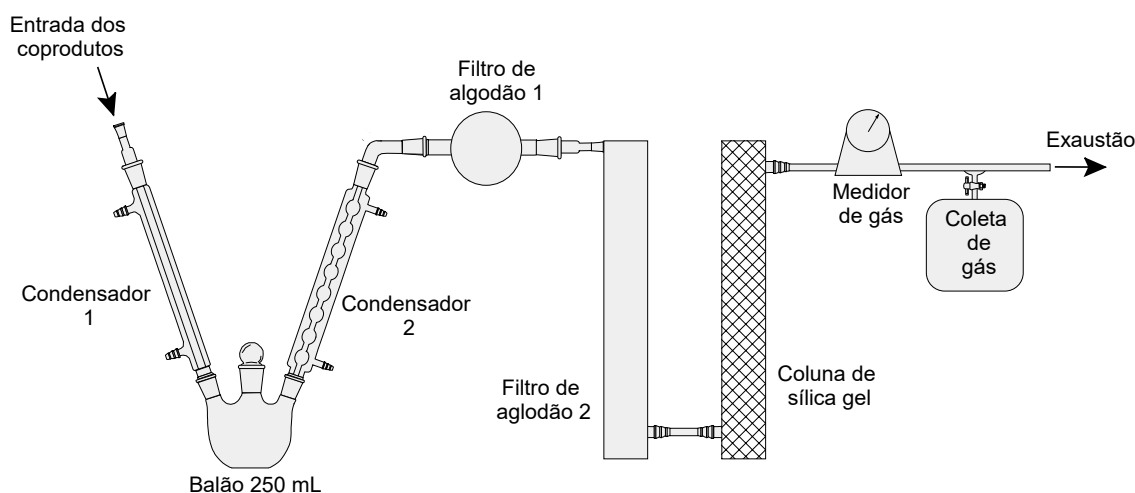


Figura 1. Esquema do sistema para coleta de alcatrão e gás de coqueria

Após o segundo filtro de algodão, uma coluna contendo sílica gel foi utilizada para remoção da umidade do gás. O gás de coqueria seco e isento de alcatrão foi encaminhado para um medidor de gás tipo diafragma (marca LAO, modelo G1). A jusante do medidor, amostras de gás foram coletadas em *bags* apropriados (modelo FlexFoil®, marca SKC) em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

2.3.1 Quantificação do rendimento de alcatrão

O rendimento de alcatrão foi obtido por meio da soma de duas parcelas. A parcela de alcatrão recuperado nas vidrarias, mangueiras e filtros de algodão foi obtida pela diferença de massa do conjunto. Para quantificação da outra parcela de alcatrão, coletada no balão, uma metodologia foi desenvolvida devido a elevada quantidade

de água condensada concomitantemente ao alcatrão. Inicialmente, o alcatrão foi extraído da suspensão por 2 ciclos de extração com 20 mL de diclorometano. Após isso, as vidrarias foram lavadas com acetona e todo o alcatrão recuperado foi encaminhado para separação em evaporador rotativo para remoção dos solventes. Desta forma, o rendimento de alcatrão (R_{alc}) foi calculado a partir da Equação (2).

$$R_{alc} = \frac{(m_{alc,1} + m_{alc,2})}{m_{mist}} \times 100 \quad (2)$$

onde:

$m_{alc,1}$ é a massa de alcatrão da parcela 1 (g);

$m_{alc,2}$ é a massa de alcatrão da parcela 2 (g), e;

m_{mist} é a massa de mistura coqueificável em base seca (g).

2.3.2 Quantificação do rendimento de água

O rendimento de água ($R_{água}$) foi calculado a partir da Equação (3), somando a parcela de água adsorvida na coluna de sílica gel e a parcela de água condensada no balão de coleta. A massa de água no balão foi obtida pela diferença entre a massa total coletada no balão e a massa de alcatrão obtida após a evaporação.

$$R_{água} = \frac{(m_{água,1} + m_{água,2} - m_{água,mist})}{m_{mist}} \times 100 \quad (3)$$

onde:

$m_{água,1}$ é a massa de água condensada no balão de coleta (g);

$m_{água,2}$ é a massa de água obtido pelo ganho de massa na coluna de sílica gel (g);

$m_{água,mist}$ é a massa de água contida na mistura coqueificável (g), e;

m_{mist} é a massa de mistura coqueificável em base seca (g).

2.3.3 Quantificação do rendimento e avaliação da composição do COG

O rendimento de COG foi obtido por meio de um medidor de gás (Figura 1). As amostras de gás de coqueria foram analisadas em um cromatógrafo a gás (marca Shimadzu, modelo GC-2014ATF/SPL) provido de um detector por condutividade térmica. O cromatógrafo é equipado com uma pré-coluna HayeSep Q 80/100, uma coluna de separação Carboxen-1000 60/80 e hélio como gás de arraste. A partir da análise cromatográfica, o volume dos gases produzidos foi calculado considerando as concentrações analisadas e o volume de COG produzido em cada intervalo de tempo, obtido pelo medidor de gás.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o sistema de coqueificação construído, composto pelo conjunto retorta/coluna de craqueamento e dois fornos com potência de 2,8 kW cada. A Figura 3 apresenta o perfil típico de variação das temperaturas em função do tempo, obtido para os experimentos de coqueificação realizados. Os dados de temperatura foram coletados a cada 1 min nos primeiros 10 min e a cada 10 min no restante do experimento. Após a inserção da retorta no forno pré-aquecido observou-se uma queda de temperatura de 550 para 425 °C no forno e recuperação até a temperatura inicial após cerca de 7 min.

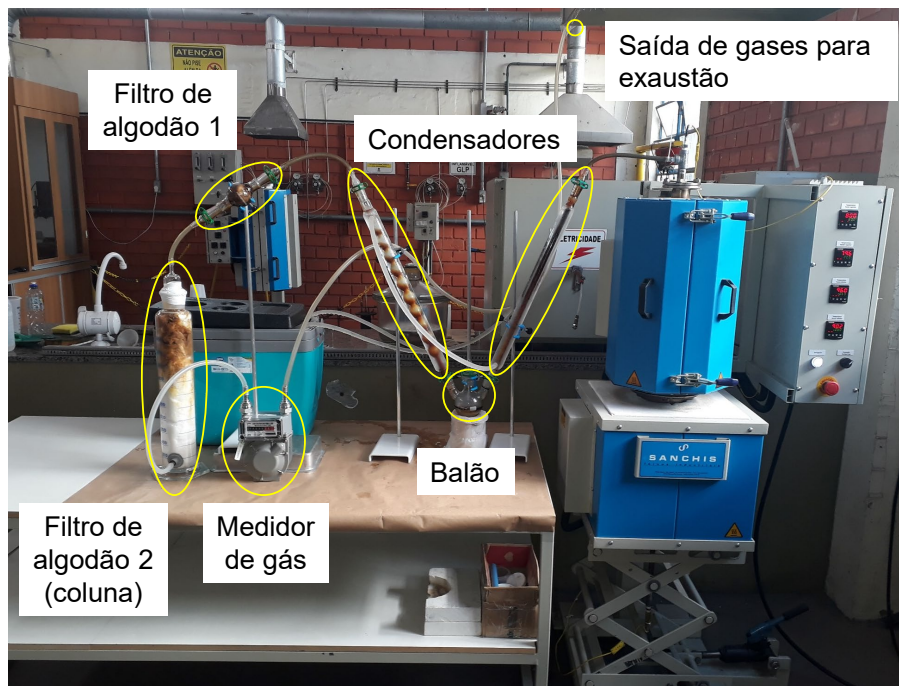


Figura 2. Aparato experimental montado para os experimentos de coqueificação

O centro da retorta manteve-se próximo de 100 °C, temperatura de evaporação da água, durante cerca de 70 min. Após a chegada da frente de coqueificação no centro da retorta, observou-se uma taxa de aquecimento elevada, de até 25 °C/min, até que uma diferença de temperatura de 60 °C para o forno (em 900 °C – 140 min) foi alcançada. Essa diferença foi mantida até o fim do experimento seguindo a taxa de aquecimento do forno de 3 °C/min. O volume de gás de coqueria limpo produzido foi registrado nos mesmos intervalos de tempo da temperatura. A vazão foi obtida pelo volume de gás gerado em cada intervalo de tempo e os resultados estão apresentados na Figura 3. Observa-se que o pico de geração de gás de coqueria (4,1 NL/min) ocorre quando o centro da retorta está a cerca de 820 °C.

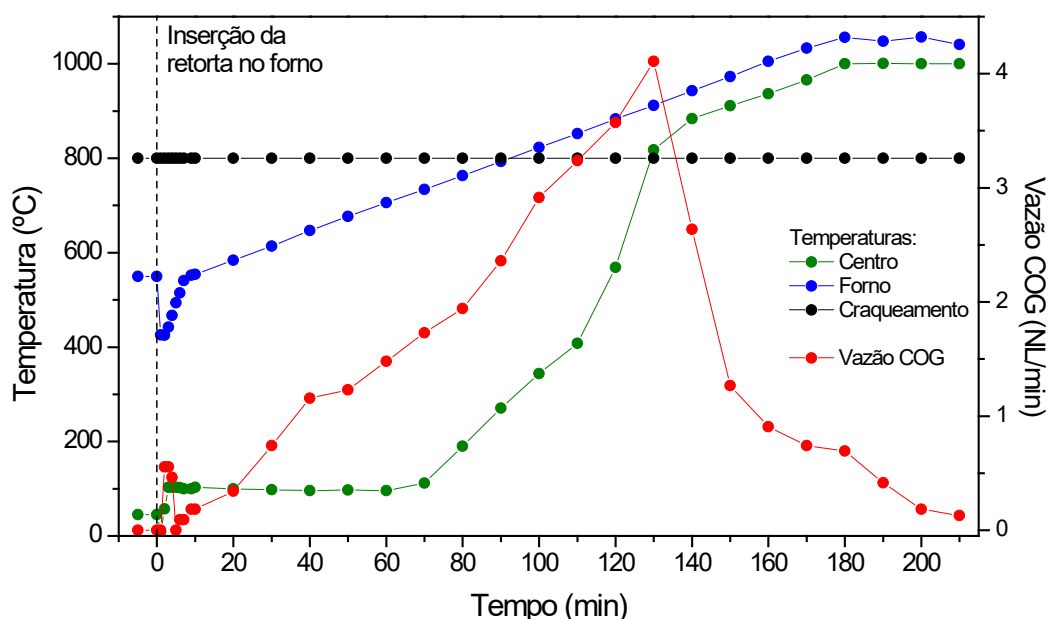


Figura 3. Variação das temperaturas do forno, retorta e da coluna craqueamento durante a coqueificação e vazão de gás de coqueria gerado ao longo do tempo para o experimento V2

Os rendimentos dos produtos gerados nos 3 experimentos realizados estão apresentados na Tabela 3. A Figura 4 apresenta o aspecto visual das amostras produzidas nos experimentos. O rendimento de coque obtido foi similar em todas as condições avaliadas e é próximo ao rendimento industrial. O maior rendimento obtido está associado as condições laboratoriais controladas, onde não há combustão de uma pequena parcela do coque durante o descarregamento [14]. Do rendimento de cerca de 82 %m/m obtido, o coque retirado da retorta e da coluna de craqueamento contribuem com cerca de 81 e 1 %m/m, respectivamente. Ainda, não houve diferença no rendimento de coque com o aumento do tempo de supercoqueificação de 10 para 30 min.

Tabela 3. Comparação dos rendimentos dos experimentos de coqueificação com os rendimentos industriais de referência

Parâmetro	Referência (Industrial)	Experimento		
		V1	V2	V3
Condições operacionais				
Temperatura de craqueamento (°C)	-	800	800	780
Temperatura de coqueificação (°C)	-	1000	1000	1000
Taxa de aquecimento (°C/min)	-	3	3	3
Tempo de supercoqueificação (min)	-	10	30	30
Rendimentos (base seca)				
Coque (%m/m)	80,3	81,8	81,7	81,5
Gás de coqueria (Nm ³ /t)	300 – 330	343,8	349,3	323,7
Alcatrão (%m/m)	2,5	2,6	2,4	3,4
Água (%m/m)	-	0,7	4,2	4,0

O rendimento de alcatrão obtido também é similar ao rendimento industrial para ambos os tempos de supercoqueificação avaliados. O tempo de permanência a 1000 °C não tem influência no rendimento de alcatrão uma vez que não há liberação de alcatrão ao longo da desvolatilização secundária. Por outro lado, um aumento na geração de gás de coqueria foi observado.

Apesar do aumento na geração de COG e distanciamento do rendimento de referência, o maior tempo de residência ocasionou uma redução da vazão específica ao final do experimento, de 0,38 para 0,13 NL/(min·kg_{carga}). Este critério é utilizado em trabalhos da literatura para definição do término da coqueificação em sistemas laboratoriais, quando a vazão específica atinge 0,13 NL/(min·kg_{carga}) [8, 15]. Seguindo o critério descrito, o tempo de supercoqueificação de 30 min foi definido.

A diminuição da temperatura de craqueamento para 780 °C (V3) resultou em um aumento do rendimento de alcatrão para 3,4 %m/m, um valor 33% maior que o valor de referência. O aumento no rendimento do alcatrão é acompanhado por uma diminuição no rendimento de gás de coqueria de 349,3 para 323,7 Nm³/t. Observe-se, desta forma, que os rendimentos de alcatrão e COG são fortemente sensíveis a temperatura da coluna, que está diretamente relacionada a severidade do craqueamento.

Conforme avaliado, os parâmetros experimentais V2, com tempo de supercoqueificação de 30 min e temperatura de craqueamento de 800 °C, foram

definidos como os melhores parâmetros para reprodução da condição industrial. O rendimento de gás mais elevado (5,8%) quando comparado ao rendimento de referência pode estar relacionado a contribuição de amônia e sulfeto de hidrogênio que não são coletados na configuração laboratorial e contabilizados junto ao COG.

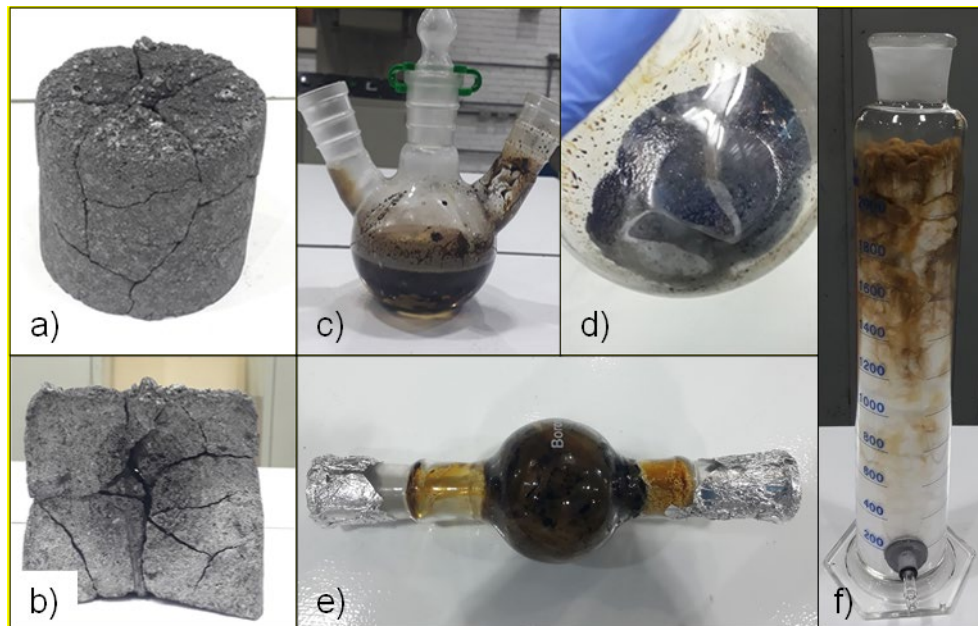


Figura 4. Amostras geradas na coqueificação: a) coque b) centro do coque c) balão com água e alcatrão d) alcatrão recuperado após evaporador rotativo e) filtro de algodão 1 e f) filtro de algodão 2

Outros 3 experimentos foram realizados, nas condições V2, para avaliar a repetibilidade do ensaio e caracterizar o COG de acordo com metodologia descrita no capítulo 2.3.3. Os resultados obtidos para os rendimentos das correntes estão apresentados na Tabela 4. Observaram-se desvios de até 0,2 %m/m para os resultados obtidos em 3 coqueificações nas mesmas condições. O desvio obtido para o COG foi de 4,9 Nm³/t. Os desvios baixos mostram a consistência da metodologia desenvolvida.

Tabela 4. Comparação dos rendimentos médios laboratoriais obtidos em triplicata com os rendimentos industriais de referência

Rendimentos (base seca)	Referência (Industrial)	Experimento				
		V4	V5	V6	Média	σ
Coque (% m/m)	80,3	81,5	81,8	81,4	81,6	0,2
Gás de coqueria (Nm ³ /t)	300 – 330	335,8	340,6	345,5	340,7	4,9
Alcatrão (% m/m)	2,5	2,6	2,4	2,4	2,5	0,1
Água (% m/m)	-	4,2	3,9	4,3	4,2	0,2

A Figura 5 mostra a composição do COG obtido nos experimentos laboratoriais em comparação a composição do COG industrial. Foram obtidos valores similares aos industriais e com baixo desvio para as concentrações de hidrogênio e metano, que são os dois gases majoritários (~90 %v/v) na composição do COG.

Com relação aos gases combustíveis, uma diferença considerável foi observada para o monóxido de carbono, com concentrações 46% mais baixas obtidas em

condição laboratorial. Além disso, foi observada uma concentração inferior de nitrogênio e oxigênio na condição laboratorial. Atribui-se a diferença observada às condições mais controladas em laboratório que possibilitaram uma menor contaminação do COG por ar atmosférico.

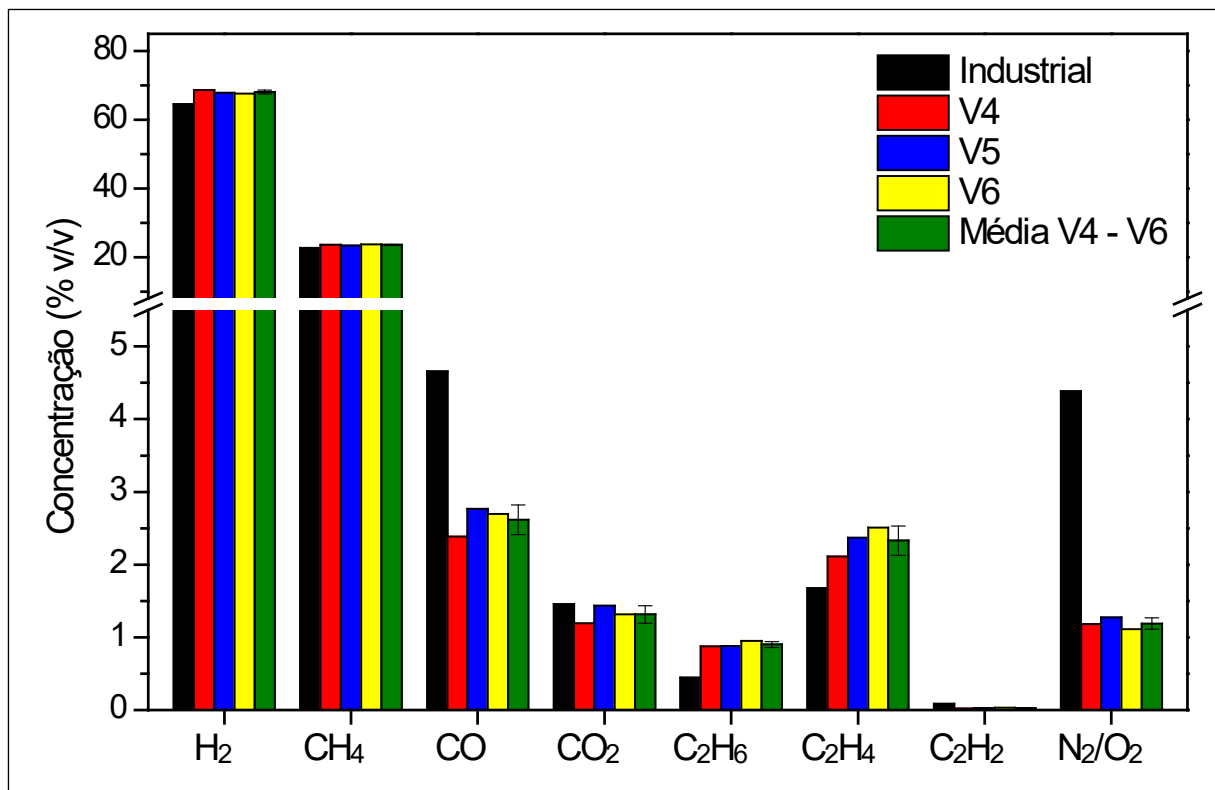


Figura 5. Comparação da composição do COG obtido nas condições laboratoriais em triplicata e a composição do COG industrial de referência

N₂/O₂: soma das concentrações de nitrogênio e oxigênio

A Figura 6 mostra a relação entre os rendimentos dos produtos da coqueificação e a análise imediata da mistura coqueificável. A figura foi calculada com base nos resultados obtidos em laboratório. Um destaque foi dado a distribuição da matéria volátil, que contribui com a geração de todos os produtos: COG, água, alcatrão e coque. A maior parte da matéria volátil é convertida em COG, seguido por água e parcelas similares de coque e alcatrão.

A ilustração desta distribuição, apresentada por meio da Figura 6, para a mistura coqueificável é interessante, mas encontrará sua maior aplicação quando carvões individuais forem avaliados. A quantificação da contribuição dos componentes da mistura na geração dos produtos irá colaborar para a precificação dos carvões e composição das misturas. Este trabalho também será estendido para o entendimento de como aditivos (por exemplo: coque verde de petróleo e carvão vegetal) contribuem na geração e composição dos produtos da coqueificação.

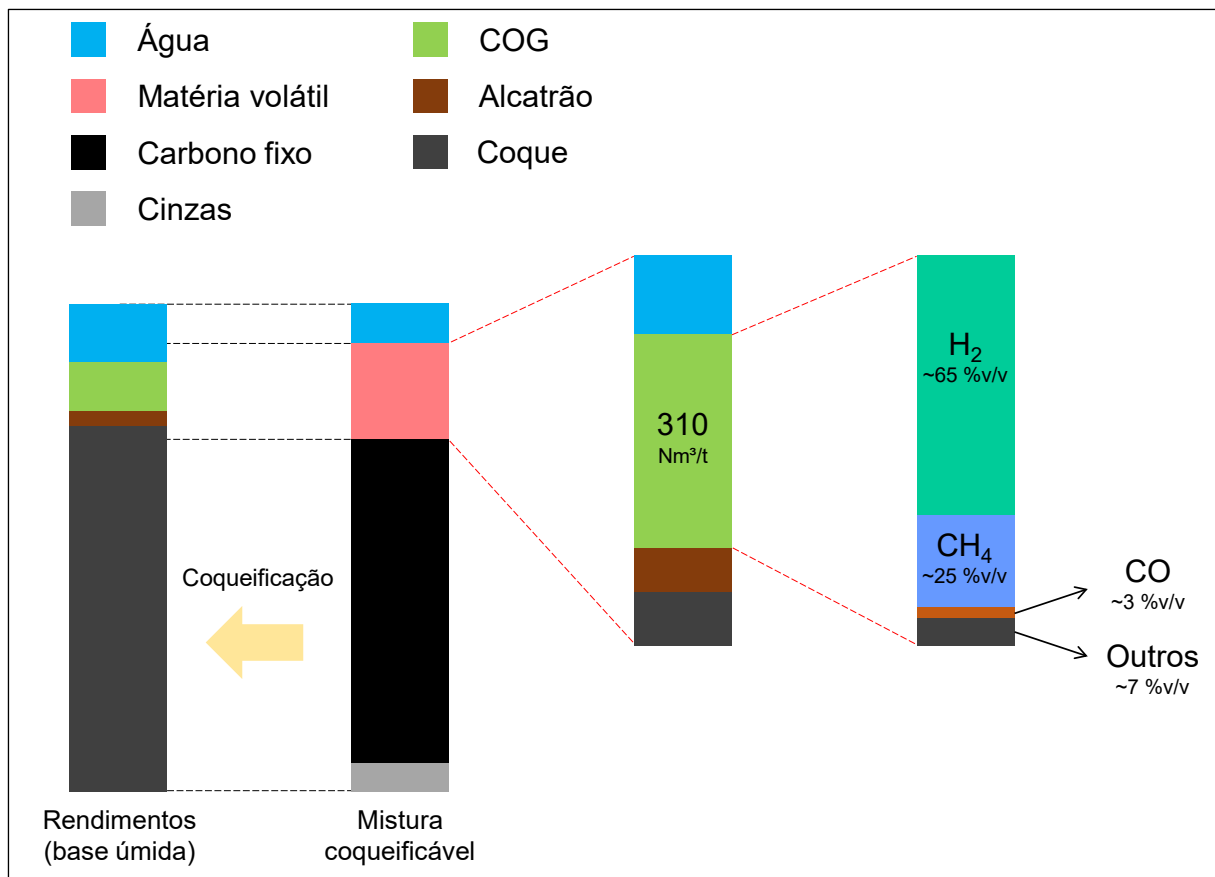


Figura 6. Esquema do balanço de massa do processo de coqueificação calculado para os resultados de escala laboratorial com ênfase na distribuição da matéria volátil e do COG

A adição de um sistema para absorção de amônia (NH₃) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) permitiria uma maior precisão na avaliação da composição do gás de coqueria. Além disso, seria possível obter um balanço de massa para o enxofre, conhecendo a sua distribuição entre o gás de coqueria e o alcatrão. Este desenvolvimento é interessante para dar apoio as iniciativas de inserção de carvões com elevado teor de enxofre (S > 1,5 %m/m) nas misturas coqueificáveis, com objetivo de redução do custo. Estas melhorias no aparato laboratorial serão incorporadas ao longo de trabalhos futuros.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a aptidão do equipamento construído para reproduzir as condições industriais de coqueificação. A metodologia desenvolvida mostrou-se adequada para determinação dos rendimentos de alcatrão e gás de coqueria, além de coque. Resultados satisfatórios foram obtidos na comparação destes valores com os rendimentos obtidos na coqueificação industrial da mesma mistura coqueificável. Desta forma, conclui-se que o sistema laboratorial de coqueificação desenvolvido é adequado para a avaliação da contribuição de carvões individuais e aditivos no rendimento e qualidade dos produtos da coqueificação que será conduzida na sequência do trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro (141151/2019-6 e 406275/2021-1), a Gerdau Ouro Branco pelo apoio técnico e financeiro e a empresa Sanchis Fornos Industriais pelo suporte no desenvolvimento do reator.

REFERÊNCIAS

1. Suárez-Ruiz I, Rubiera F, Diez MA. New trends in coal conversion: combustion, gasification, emissions and coking. Duxford: Woodhead Publishing; 2019. 487 p.
2. U. S. Energy Information Administration (EIA). 2023; Disponível em: <https://www.eia.gov/international/data/world/coal-and-coke/coal-and-coke-production>. Acesso em: 28 abr. 23.
3. Granda M, Blanco C, Alvarez P, Patrick JW, Menéndez R. Chemicals from coal coking. Chemical Reviews. 2014;114(3):1608-1636.
4. Majka M, Tomaszewicz G, Mianowski A. Experimental study on the coal tar hydrocracking process over different catalysts. Journal of the Energy Institute. 2018;91(6):1164-1176.
5. Manera C, Osório E, Godinho M, Vilela ACF, editors. Uma revisão das áreas de estudo em alcatrão produzido no processo de coqueificação (1990 - 2021). 2021. Porto Alegre: VI Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. Disponível em: <https://proceedings.science/cbcm-2021/papers/uma-revisao-das-areas-de-estudo-em-alcatrao-produzido-no-processo-de-coqueificacao--1990---2021-?lang=pt-br>. Acesso em: 28 abr. 2023.
6. Tiwari HP, Sharma R, Kumar R, Mishra P, Roy A, Haldar SK. A review of coke making by-products. Coke and Chemistry. 2014;57(12):477-484.
7. EASC. GOST 18635 - 73. Hard coals: method of determination of the yield of chemical coking products. EAC, Minsk, 1973.
8. Denisenko EV, Kosareva TY. Operational experience with a Karbotest laboratory coking system at Altai-Koks. Coke and Chemistry. 2021;64(12):578-582.
9. Jenkner A, Kühlwein FL, Hoffmann E. Prüfung der verkokungseignung von kohlen im laboratorium. Glückauf Berg- und Hüttenmännische Zeitschrift. 1934;21:473-496.
10. Krebs V, Furdin G, Marêché J-F, Dumay D. Effects of coal moisture content on carbon deposition in coke ovens. Fuel. 1996;75(8):979-986.
11. Sutcu H, Toroglu I, Piskin S. High temperature carbonization of turkish bituminous coals in Jenkner retort. Energy Sources. 2004;26(7):671-683.
12. Tiwari HP, Banerjee PK, Sharma R, Haldar SK, Joshi PC. A comparative study of by-products yield from coke making processes in a Jenkner apparatus. Coke and Chemistry. 2014;57(5):192-198.
13. Nomura S, Nakagawa T. The yield of coke oven gas from hard and semi-soft coking coals. International Journal of Coal Geology. 2016;168:179-185.
14. Loison R, Foch P, Boyer A. Coke: Quality and Production. 2 ed. ed. London: Butterworths; 1989. 572 p.
15. Rejdak M, Bigda R, Wojtaszek M. Use of alternative raw materials in coke-making: new insights in the use of lignites for blast furnace coke production. Energies. 2020;13(11):2832.