



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

YCARO JORGE MAIA DA COSTA

FERRAMENTA DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE
INFLAMABILIDADE DE GASES COMBUSTÍVEIS SUBPRODUTO DO
PROCESSO SIDERÚRGICO

MOSSORÓ

2024

YCARO JORGE MAIA DA COSTA

FERRAMENTA DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE
INFLAMABILIDADE DE GASES COMBUSTÍVEIS SUBPRODUTO DO
PROCESSO SIDERÚRGICO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de mestre em Ciência
e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Pereira
Barbosa.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

d837f da Costa, Ycaro Jorge Maia.
 FERRAMENTA DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE
 INFLAMABILIDADE DE GASES COMBUSTÍVEIS SUBPRODUTO
 DO PROCESSO SIDERÚRGICO / Ycaro Jorge Maia da
 Costa. - 2025.
 86 f. : il.

Orientador: Júlio César Pereira Barbosa.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
 Ciência e Engenharia de Materiais, 2025.

1. Explosividade. 2. Inflamabilidade. 3.
 Diagrama ternário. 4. Segurança de processo.. I.
 Barbosa, Júlio César Pereira , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
 com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
 Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
 Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
 CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

YCARO JORGE MAIA DA COSTA

FERRAMENTA DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE
INFLAMABILIDADE DE GASES COMBUSTÍVEIS SUBPRODUTO DO
PROCESSO SIDERÚRGICO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de mestre em Ciência
e Engenharia de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Pereira
Barbosa.

Defendida em: 28/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Júlio César Pereira Barbosa, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Roner Ferreira da Costa, Prof. Dr. (UFERSA)

Ruthilene Catarina Lima da Silva, Prof. Dra. (IFRN)

RESUMO

Apesar dos avanços na prevenção de incêndios e explosões em operações com gases inflamáveis, a literatura carece de dados detalhados sobre a inflamabilidade de misturas gasosas combustíveis, geralmente limitando-se a gases puros. Essa lacuna é crítica em usinas siderúrgicas, onde misturas como COG, BFG e LDG representam uma fração significativa do balanço energético. Este estudo analisa a inflamabilidade dessas misturas, empregando coleta de amostras conforme ASTM D1945-2014, cromatografia para determinação da composição e PCI, além do cálculo dos Limites de Inflamabilidade (LEL e UEL) via Lei de Le Chatelier. Também foi determinada a Concentração Limite de Oxigênio (LOC) com base na NFPA 69, permitindo a construção de diagramas ternários de inflamabilidade. Desenvolveu-se uma interface gráfica no Microsoft Excel para simulação e cálculo automatizado dos parâmetros de segurança. Os resultados demonstram que a inflamabilidade das misturas siderúrgicas depende fortemente da composição dos gases e das condições de mistura com ar e oxigênio, ressaltando a necessidade de controle rigoroso na distribuição e no uso desses gases. A análise permitiu definir faixas seguras de operação e recomendações para mitigação de riscos. Um estudo de caso foi realizado para simular um processo de contaminação acidental com ar em uma instalação de gás, validando a ferramenta desenvolvida e sua aplicabilidade na previsão de cenários críticos. Os achados reforçam a importância do monitoramento contínuo e de intertravamentos de segurança para evitar condições inflamáveis. Conclui-se que a correta aplicação dos parâmetros de inflamabilidade, aliada a sistemas eficazes de controle, pode minimizar significativamente os riscos de incêndios e explosões, garantindo maior segurança operacional e integridade das instalações industriais.

Palavras-chave: Explosividade; Inflamabilidade; Diagrama ternário; Segurança de processo.

ABSTRACT

Despite advances in fire and explosion prevention in operations involving flammable gases, the literature lacks detailed data on the flammability of combustible gas mixtures, often focusing only on pure gases. This gap is critical in integrated steel plants, where mixtures such as COG, BFG, and LDG constitute a significant portion of the energy balance. This study analyzes the flammability behavior of these mixtures through sample collection following ASTM D1945-2014, chromatography for chemical composition and Lower Heating Value (LHV) determination, and calculation of Lower and Upper Flammability Limits (LFL and UFL) using Le Chatelier's law. The Limiting Oxygen Concentration (LOC) was also determined based on NFPA 69, enabling the construction of ternary flammability diagrams. A graphical interface was developed in Microsoft Excel to simulate and automatically calculate safety parameters. The results show that the flammability of steelmaking gas mixtures strongly depends on gas composition and mixing conditions with air and oxygen, highlighting the need for strict control over their distribution and use. The analysis defined safe operating ranges and provided recommendations for risk mitigation. A case study was conducted to simulate an accidental air contamination event in a gas installation, validating the developed tool and its applicability in predicting critical scenarios. Findings emphasize the importance of continuous monitoring and safety interlocks to prevent flammable conditions. It is concluded that the correct application of flammability parameters, combined with effective control systems, can significantly reduce fire and explosion risks, ensuring greater operational safety and industrial facility integrity.

Keywords: Explosivity; Flammability; Ternary diagram; Process safety;

LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

°C – Graus Celsius

ASTM – American Society for Testing and Materials – Sociedade Americana de Ensaios e Materiais

BFG – Blast Furnace Gas – Gás de Alto Forno

BLS – Bureau of Labor Statistics – Departamento de Estatísticas do Trabalho

C₂H₆ – Etano

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

COG – Coke Oven Gas – Gás de Coqueria

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

EBT - Electric Arc Furnace Tapping - Cuba de Forno Elétrico de Arco

H₂ – Hidrogênio

H₂O – Água

IAB – Instituto Aço Brasil

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Kcal/Nm³ - Quilocalorias por normal metro cúbico

Kcal/Nm³ - Quilocalorias por normal metro cúbico

Kg/Nm³ - Quilogramas por normal metro cúbico

LD – Linz Donawitz

LDG – Linz Donawitz Gas – Gás de Aciaria

LEL-ar – Limite de Inflamabilidade Inferior com o ar

LF – Laddle Furnace – Forno Panela

LOC – Limiting Oxygen Concentration – Concentração Limite de Oxigênio

LOL-O₂ – Limite de Inflamabilidade Inferior com o oxigênio

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

N₂ - Nitrogênio

Nb – Nióbio

NFPA – National Fire Protection Association – Associação de Proteção contra Incêndios

Ni – Níquel

Nm³ - Normal metro cúbico

Nm³/t – Normal metros cúbicos por tonelada

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

O₂ – Oxigênio

OSHA - Occupational Safety and Health Administration – Departamento de Saúde e Segurança Ocupacional

PCI – Poder Calorífico Inferior

RH - Ruhrstahl Heraeus – Desgaseificador a Vácuo

SO₂ – Dióxido de Enxofre

UEL-ar – Limite de Inflamabilidade Superior com o ar

UOL-O₂ – Limite de Inflamabilidade Superior com o oxigênio

VD - Vacuum Degassing – Desgaseificação a Vácuo

VOD - Vacuum Oxygen Degassing - Descarbonização do oxigênio a vácuo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Histórico e características do ferro e do aço	16
2.2 Processo Siderúrgico.....	22
2.2.1 Usina Integrada X Usina semi-integrada	22
2.2.2 Processos de preparação de carga	22
2.2.2.1 Aglomeração – Sinterização	23
2.2.2.2 Coqueificação	25
2.2.3. Redução – Alto Forno.....	27
2.2.4. Refino – Aciaria.....	29
2.2.4.1. Refino primário	30
2.2.4.2. Refino secundário	32
2.2.5. Lingotamento contínuo	33
2.3. Gases subprodutos do processo siderúrgico.....	35
2.3.1. Gás de Coqueria/ <i>Coke Oven Gas</i> (COG)	35
2.3.2. Gás de Alto Forno/ <i>Blast Furnace Gas</i> (BFG)	38
2.3.3. Gás de Aciaria – <i>Linz Donawitz Gas</i> (LDG)	40
2.4 Aspectos de segurança do processo siderúrgico.....	42
2.5 Inflamabilidade/Explosividade	45
2.6 Parâmetros de Inflamabilidade/Explosividade para misturas gasosas	50
3. METODOLOGIA	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57

4.1. Análises de Inflamabilidade dos gases do processo siderúrgico	57
4.2. Sistema de análise de inflamabilidade de misturas combustíveis.....	69
4.3. Estudo de caso de aplicação do sistema – Simulação de um processo de aspiração de ar para a rede de LDG devido falha em um equipamento turbo compressor	75
5. CONCLUSÃO	81
6. REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

Em usinas siderúrgicas integradas os gases combustíveis subprodutos de seus processos industriais constituem grande parte do balanço energético desse tipo de companhia, possibilitando maior sustentabilidade, eficiência energética e redução de custo com aquisição de combustíveis (HIGASHI, 1982; CAILLAT, 2017).

No entanto, os processos de geração e distribuição desses gases podem oferecer riscos de incêndios e explosões potencialmente catastróficos para pessoas, patrimônio e operações industriais. Normalmente, esses gases são formados por uma mistura de uma série de compostos, combustíveis, inertes ou não combustíveis e um pequeno teor de oxigênio, as proporções destes compostos estão sujeitas às variabilidades de processo. (BLS, 2015)

Deste modo, essas atividades requerem monitoramento e controle rigoroso dos parâmetros de qualidade dos gases de modo a atuar de forma preventiva para impedir a formação de mistura gasosa explosiva. O comportamento de um gás combustível, com as proporções de oxigênio e gás inerte pode ser representada em diagrama ternário, que delimita uma região em que uma série de combinações de proporções entre os gases fazem a mistura inflamável (HANSEN e CROWL, 2010; HANSEN, 2009).

Para alguns compostos inflamáveis individuais esse diagrama pode ser encontrado na literatura, no entanto, torna-se complexo prever esse comportamento quando há presença na mistura de diversos compostos combustíveis, que é como geralmente acontece para os gases de processo da indústria siderúrgica (HANSEN e CROWL, 2010). Objetiva-se, portanto, neste trabalho elaborar uma ferramenta computacional que possibilite obter o comportamento de inflamabilidade de misturas diversas entre os principais gases combustíveis existentes em interação com os teores de oxigênio e gases inertes/não inflamáveis, através do seu diagrama ternário.

Espera-se que os resultados deste trabalho contribuam para o desenvolvimento de sistemas de segurança e controle operacional em usinas siderúrgicas e outros tipos de plantas industriais que trabalhem com gases combustíveis compostos, de modo a reduzir o risco de explosões e incêndios em operações de manutenção em tubulações e equipamentos bem como no controle e prevenção de distúrbios operacionais na geração, transporte e consumo desse tipo de gases.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Elaborar uma ferramenta de análise do comportamento de inflamabilidade em interação com oxigênio e nitrogênio para misturas de gases combustíveis de processo da indústria siderúrgica e outros gases mistos

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar análise da composição típica dos gases subproduto do processo siderúrgico através de cromatografia gasosa;
- Estabelecer rotina para cálculo dos limites de inflamabilidade de misturas gasosas com diferentes combinações de componentes combustíveis;
- Estabelecer rotina para cálculo da Concentração Limite de Oxigênio (LOC) de misturas gasosas com diferentes combinações de componentes combustíveis;
- Criar interface que através dos parâmetros de inflamabilidade calculados evidencie o diagrama ternário de inflamabilidade conforme a composição atribuída.
- Realizar um estudo de caso aplicando a interface e o diagrama ternário de inflamabilidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico e características do ferro e do aço

Os primeiros usos do ferro pelo ser humano datam de épocas remotas, sendo inicialmente obtido de meteoritos. Em muitas línguas, a etimologia da palavra ferro está relacionada a um "metal vindo do céu" (MOURÃO et al., 2007). A metalurgia começou há mais de seis mil anos, permitindo a extração de metais da terra, inicialmente com o bronze. A Idade do Ferro teve início por volta de 1000 a.C., no Oriente, e se espalhou para a Europa. Os hititas, especialmente os chalibas, foram pioneiros na fabricação de ferramentas e armas de ferro (MOURÃO et al., 2007).

O processamento do minério de ferro evoluiu a partir da observação de minérios expostos ao fogo, onde partículas de carbono reagiam com óxido de ferro, formando uma massa forjável. O registro mais antigo desse processo foi encontrado em uma tumba egípcia de 1500 a.C. (WAKELIN, 1999). Métodos como o forno de redução africano e a forja Catalã, que surgiu no século XV e aumentaram significativamente a produção de ferro, marcaram avanços na tecnologia metalúrgica (ARAÚJO, 1997).

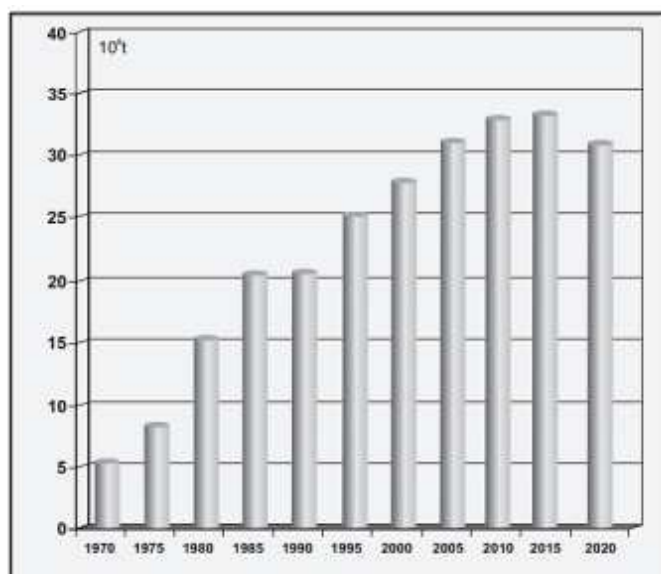
No século XVIII, o aumento da demanda por aço levou a impactos ecológicos, resultando em restrições ao desmatamento no Reino Unido e o estímulo à produção siderúrgica nas colônias norte-americanas. O primeiro alto-forno na América do Norte foi construído em 1622, na Virgínia, mas destruído antes de operar. Somente em 1645 um novo alto-forno entrou em funcionamento (JÚNIOR, 2002). Atualmente, altos-fornos modernos podem produzir até 13.000 toneladas diárias de ferro-gusa, que é um tipo de ferro bruto obtido no alto-forno a partir da fusão do minério de ferro com carvão coque e calcário, com alta eficiência energética (MOURÃO et al., 2007).

A indústria siderúrgica mundial avançou na Idade Moderna com inovações como os conversores a oxigênio, desenvolvidos pela Voest-Alpine em 1952, técnica que continua sendo usada para produções em larga escala (IAB, 2022). No Brasil as primeiras iniciativas siderúrgicas ocorreram no século XX, destacando-se a Companhia Siderúrgica Mineira, fundada em 1921 e posteriormente adquirida pela Belgo-Mineira. Nos anos 1930, houve expansão do setor com a inauguração da usina Monlevade (IAB, 2022).

O desenvolvimento da siderurgia nacional acelerou com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em 1946, triplicando a produção de aço em dez anos, conforme mostrado na Figura 1,. Nos anos 1990, privatizações modernizaram o setor, tornando o Brasil o oitavo maior produtor mundial de aço em 1993 (NEVES;

CAMISASCA, 2013). A partir de 2004, investimentos impulsionaram ainda mais a produção siderúrgica, resultando em crescimento contínuo do setor (IAB, 2021).

Figura 1 – Produção Brasileira de Aço Bruto de 1970 a 2020



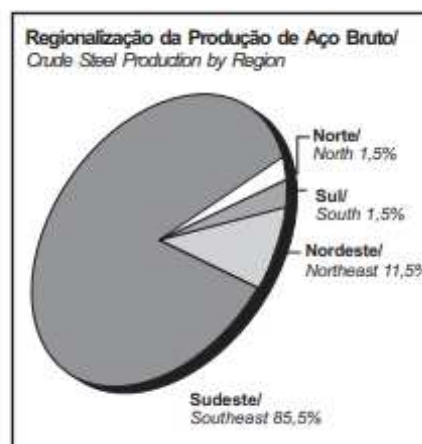
Fonte: IAB (2021).

A produção siderúrgica brasileira se concentra nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Ceará e São Paulo, conforme mostrado na Figura 2. A produção do aço nesses estados está relacionada principalmente aos lingotes, aos produtos de lingotamento contínuo e ao aço para fundição.

Figura 2 – Distribuição regional da produção de aço bruto em 2023.

Distribuição Regional da Produção de Aço Bruto - 2023
Regional Distribution of Crude Steel Production - 2023

ESTADO/ STATE	10 ³ t	Participação/ Share (%)
Minas Gerais	9.346	29,2
Rio de Janeiro	8.627	26,9
Espírito Santo	7.049	22,0
Ceará	3.098	9,7
São Paulo	2.358	7,4
Pará	475	1,5
Maranhão	386	1,2
Rio Grande do Sul	363	1,1
Pernambuco	214	0,7
Paraná	114	0,4
BRASIL/ BRAZIL	32.030	100,0



Fonte: IAB (2024).

O parque industrial siderúrgico brasileiro atualmente é representado por 15 empresas privadas, controladas por 11 grupos empresariais e operado por 31 usinas distribuídas por 10 estados brasileiros. Na Figura 3 são apresentados os dados de produção das principais usinas.

Figura 3 – Distribuição regional da produção de aço bruto em 2023.

EMPRESA/COMPANY	Unid./Unit: 10 ³ t					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Aço Verde do Brasil	279	338	321	345	388	386
Aperam	709	688	696	754	691	726
ArcelorMittal Aços Longos	3.135	2.870	3.007	3.184	4.053	3.740
ArcelorMittal Pecém	2.978	2.866	2.743	2.811	2.794	3.045
ArcelorMittal Sul Fluminense (*)	1.010	720	737	888	-	-
ArcelorMittal Tubarão	7.043	6.268	4.973	7.089	6.641	6.604
CSN	4.199	3.043	3.810	4.260	3.773	3.062
Gerdau	6.654	6.301	6.220	6.974	6.496	5.843
SIMEC	480	671	988	848	873	911
Sinobras	345	345	330	367	392	475
Ternium Brasil	4.606	4.379	4.138	4.529	4.424	4.372
Usiminas	3.086	3.264	2.760	3.178	2.655	2.069
Vallourec	769	705	588	710	776	684
Villares Metals	114	111	104	134	133	113
TOTAL	35.407	32.569	31.415	36.071	34.089	32.030

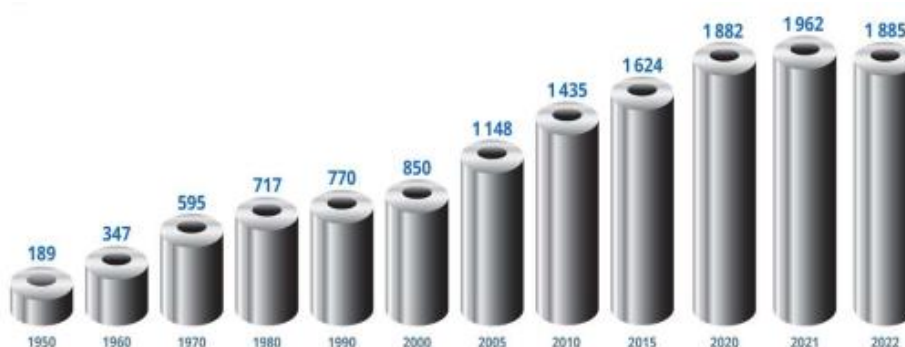
Nota/Note : Corresponde à produção de aço em lingotes + produtos de lingotamento contínuo + aço para fundição.
 Equal to the production of steel ingots + continuously cast products + steel for castings.

(*) Dados agrupados na ArcelorMittal Longos a partir de 2022. / Data aggregated at ArcelorMittal Longos for 2022.

Fonte: IAB (2024).

A produção mundial de aço bruto passou por uma enorme transformação entre 1950 e os dias atuais. Nos anos 1950, a produção global era limitada, concentrada principalmente nos países industrializados, como os Estados Unidos, a Europa Ocidental e o Japão. No entanto, ao longo das décadas seguintes, o cenário mudou drasticamente com o crescimento das economias asiáticas, especialmente da China.

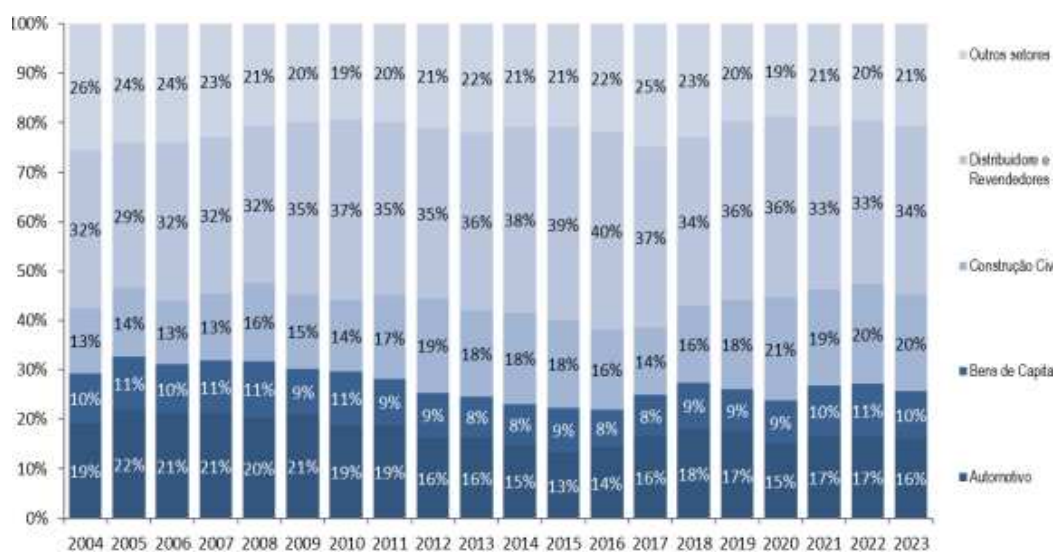
Figura 4 – Produção mundial de aço em milhões de toneladas de 1950 a 2022.



Fonte: World Steel Association (2023)

A partir da década de 1990, a China emergiu como o maior produtor de aço do mundo, representando mais de 50% da produção global em 2022. Durante esse período, o setor também adotou novas tecnologias para aumentar a eficiência e reduzir o impacto ambiental. Essa evolução, mostrada na Figura 4, reflete as mudanças econômicas globais e a crescente demanda por aço em setores como construção, infraestrutura e automotivo.

Figura 5 – Evolução da participação no consumo aparente dos principais setores consumidores de produtos siderúrgicos.

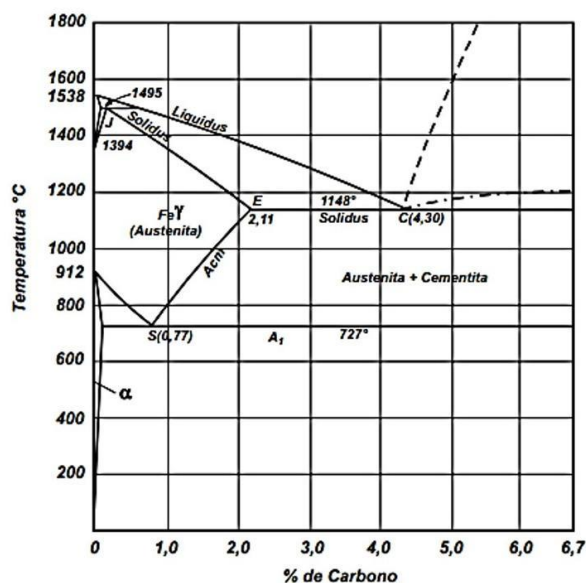


Fonte: IAB (2024).

A cadeia siderúrgica envolve duas matérias-primas principais: o minério de ferro, que fornece a carga metálica para a produção de aço, e o carvão mineral, que, além de combustível, serve como fonte de carbono, essencial para as propriedades do aço. O diagrama Ferro-Carbono é fundamental para entender as transformações das ligas de ferro durante o aquecimento, mostrando que o aumento do carbono reduz a temperatura de fusão, facilitando a fabricação de ligas. O ferro puro funde a 1.538°C , mas com 4,3% de carbono, essa temperatura cai para 1.148°C , conforme mostrado na Figura 6, o que torna a produção mais acessível (MOURÃO et al., 2007).

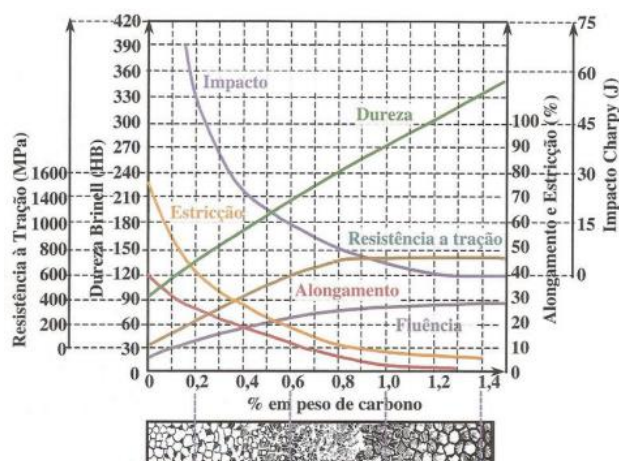
O teor de carbono é fundamental na formação das ligas de ferro, determinando o tipo de liga formada. Existem dois tipos principais: o aço, com carbono entre 0,008% e 2,11%, e o ferro fundido, com carbono de 2,11% a 6,7%. O aço se destaca por sua capacidade de sofrer transformações de fase com pequenas variações no teor de carbono e outros elementos na liga. Alterações na concentração de carbono entre 0% e 1% afetam as frações de fases, microestrutura e propriedades mecânicas do material, como ilustrado nos gráficos da Figura 7 (COSTA E SILVA, 2008).

Figura 6 – Diagrama de Equilíbrio Ferro-Carbono.



Fonte: Chiaverini (1996).

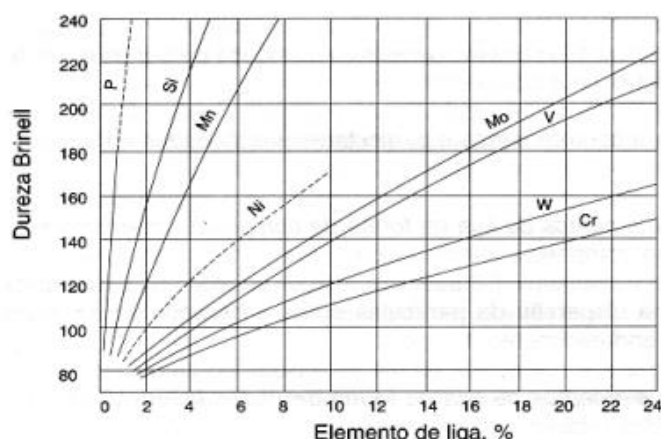
Figura 7 – Variação de propriedades mecânicas em função do teor de carbono.



Fonte: Rizzo (2005).

A combinação dos constituintes no diagrama de equilíbrio permite ajustar as condições de processamento para obter propriedades mecânicas e microestruturais específicas, variando parâmetros como temperatura e tempo. A adição de elementos de liga, como Mn, Ni, Mo e Nb, altera as temperaturas de transformação de fase, influenciando diretamente as propriedades mecânicas do material. Esse efeito, demonstrado no gráfico da Figura 8, mostra a relação entre dureza e concentração dos elementos de liga. Assim, amplia-se o desenvolvimento de novas ligas, embora o diagrama de equilíbrio se torne mais complexo devido às múltiplas combinações possíveis (GORNÍ, 2008).

Figura 8 – Variação de propriedades mecânicas em função do teor de carbono.



Fonte: Chiaverini (2005)

O aço é um material essencial na indústria moderna devido à sua resistência, durabilidade e versatilidade, características influenciadas por sua composição química e métodos de processamento. Amplamente utilizado na construção civil, ele é fundamental em edifícios, pontes e infraestruturas, suportando grandes cargas e resistindo a condições adversas (IAB, 2022). Sua aplicação se estende à fabricação de automóveis, máquinas industriais e eletrodomésticos, devido à sua capacidade de ser moldado conforme as necessidades específicas (NEVES; CAMISASCA, 2013).

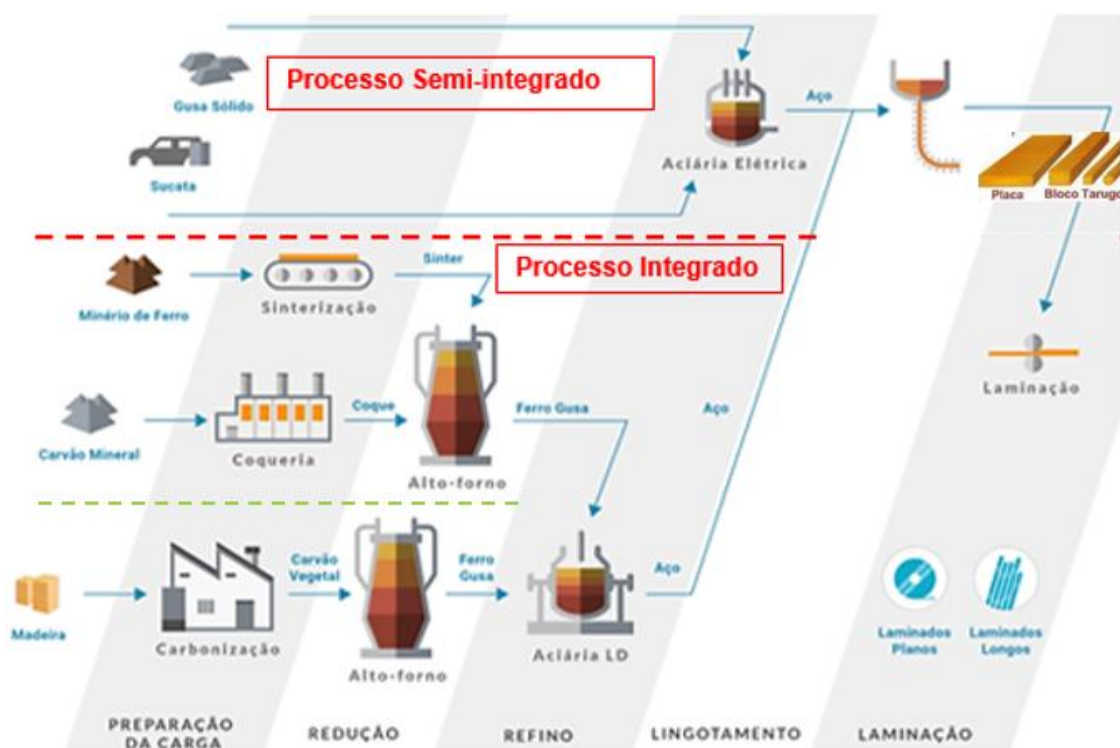
A reciclabilidade do aço contribui para a sustentabilidade industrial, reforçando seu valor no cenário atual. Além disso, seu custo-benefício o torna uma escolha econômica eficiente (ARCELOR MITTAL TUBARÃO, 2010). Avanços na metalurgia possibilitam o desenvolvimento de novas ligas com propriedades aprimoradas, ampliando sua aplicação em setores exigentes, como o aeroespacial, a tecnologia médica e a energia (MOURÃO et al., 2007). Assim, o aço sustenta o progresso industrial e tecnológico global, desempenhando um papel essencial na construção de um futuro mais sustentável e inovador (IAB, 2021).

2.2 Processo Siderúrgico

2.2.1 Usina Integrada X Usina semi-integrada

As usinas siderúrgicas são divididas em integradas e semi-integradas, conforme ilustrado na Figura 9. Nas usinas integradas, o aço é produzido a partir do ferro primário, com o minério sendo transformado em ferro-gusa nos altos-fornos, o calor para o aquecimento da carga metálica é fornecido pelo coque que pode ser originado do carvão mineral ou em alguns casos pelo carvão vegetal ou madeira. Já nas semi-integradas, o aço é produzido a partir de sucata reciclada, derretida em fornos elétricos de fusão (MOURÃO et al., 2007).

Figura 9 – Rotas vigentes de produção de aço.



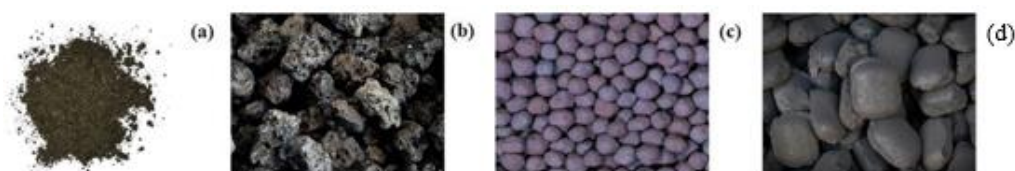
Fonte: IAB (adaptada) (2020).

2.2.2 Processos de preparação de carga

As principais matérias-primas do processo siderúrgico são o minério de ferro e o carvão mineral, com outros insumos também desempenhando papéis importantes. O processo começa fora da usina, com a seleção, aquisição e transporte das matérias-primas, que são armazenadas em pilhas no pátio de matérias-primas, próximas aos sistemas de transporte (MOURÃO et al., 2007). A otimização das misturas de minérios e carvões visa reduzir custos e melhorar a qualidade. As matérias-primas são organizadas em camadas horizontais nas pilhas, e a recuperação é feita por um *reclaimer*, garantindo maior uniformidade no processamento (MOURÃO et al., 2007).

2.2.2.1 Aglomeração – Sinterização

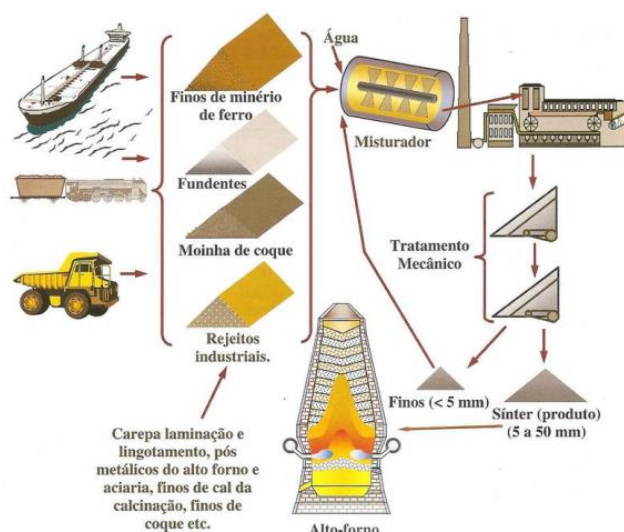
Os processos de aglomeração transformam os finos das matérias-primas em aglomerados adequados para os processos metalúrgicos subsequentes. Os principais métodos são sinterização, pelletização e briquetagem, os produtos desses processos são mostrados na Figura 10, com a sinterização sendo o mais utilizado na indústria siderúrgica devido à sua eficiência (MOURÃO et al., 2007). Além de facilitar o manuseio dos materiais, esses processos também ajudam a reduzir a geração de poeira durante o transporte e o carregamento dos reatores. Eles surgiram para aproveitar os finos acumulados durante a extração de minérios ou para viabilizar o uso de minérios de baixo teor de ferro, como os taconitos, comuns nos Estados Unidos (MOURÃO et al., 2007). Figura 10 – Finos de minério de ferro (a) e seus aglomerados: (b) sínter, (c) pelotas e (d) briquetes.



Fonte: Oliveira et. al (adaptada) (2023).

A sinterização, em particular, utiliza *sinter feed* com granulometria entre 0,1 e 9,5 mm, que é depositado em esteiras rolantes junto com finos de coque ou carvão, conforme o fluxo de processo mostrado na Figura 11. A mistura é aquecida por uma frente de combustão, com um fluxo de ar de cima para baixo, promovendo a fusão incipiente das partículas de minério. Isso resulta na formação do sínter, que é utilizado nos processos subsequentes de redução e transformação do ferro (MOURÃO et al., 2007).

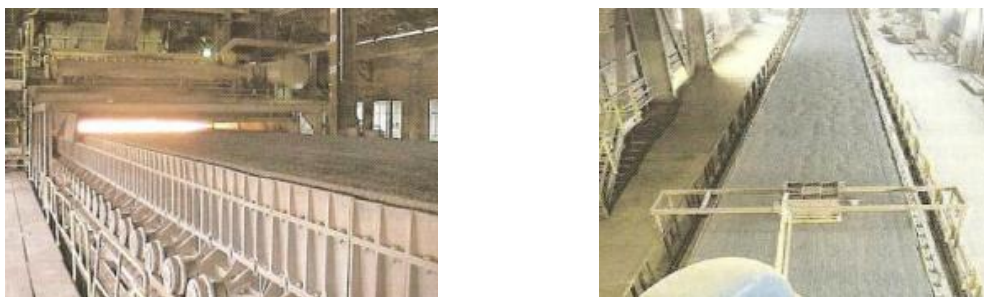
Figura 11 – Fluxograma esquemático do processo de sinterização.



Fonte: Rizzo (2005).

O processo de sinterização aglomera uma mistura de finos de minério, coque ou carvão vegetal, fundentes, sínter de retorno e água, utilizando fusão incipiente para consolidar os materiais. O calor necessário é gerado pela combustão do coque ou carvão, com o ar sendo continuamente succionado pela parte inferior da carga. A ignição ocorre na camada superior, sendo mantida ao longo do deslocamento da carga em uma esteira rolante, e a combustão avança conforme o ar interage com as partículas de combustível, conforme pode ser visualizado nas Figuras 12 e 13 (MOURÃO et al., 2007).

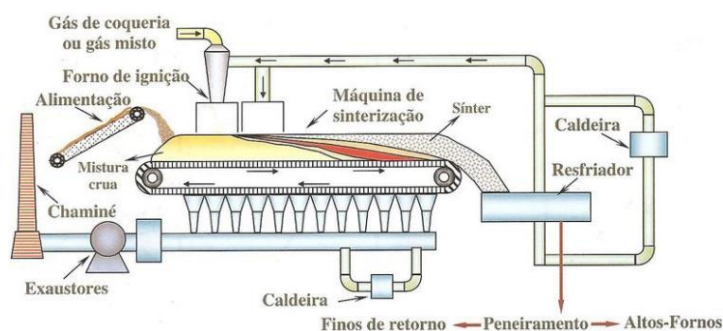
Figura 12 – Imagens de uma planta de sinterização.



Fonte: Rizzo (2005).

Durante a sinterização, o ar frio succionado resfria o sínter na parte inferior e pré-aquece o ar utilizado na combustão. A fusão parcial ocorre nas regiões mais quentes, enquanto os gases quentes (CO_2 , N_2 , O_2) pré-aquecem as camadas inferiores, tornando o processo eficiente em termos térmicos. O controle rigoroso da permeabilidade da carga otimiza o desempenho do sistema, e a água adicionada facilita a aderência das partículas, formando uma carga uniforme (MOURÃO et al., 2007).

Figura 13 – Processo de sinterização.



Fonte: Rizzo (2005).

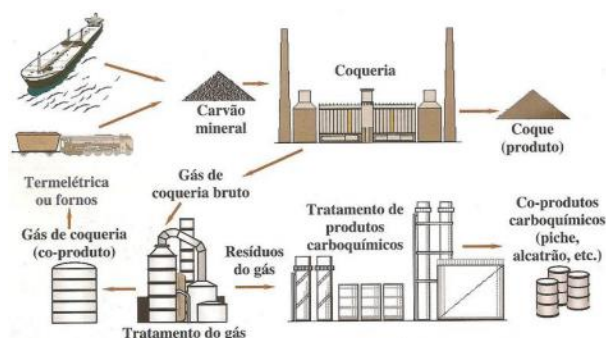
A produtividade do processo de sinterização depende do perfil térmico e da velocidade de propagação da combustão, influenciados por fatores como o tamanho das partículas, a reatividade do combustível e a permeabilidade da mistura. Partículas maiores aumentam o tempo de combustão, ampliando o perfil térmico e reduzindo o pico de temperatura. Já as partículas mais finas permitem uma propagação mais rápida da frente

de combustão, impactando a eficiência e os resultados do processo (MOURÃO et al., 2007).

2.2.2.2 Coqueificação

O processo de coqueificação na coqueria, ilustrado na Figura 14, transforma a mistura de carvões selecionados, modificando seu aspecto conforme mostrado na Figura 15, em coque, gerando subprodutos carboquímicos que, após purificação, podem ser comercializados, ajudando a reduzir custos operacionais. O gás de coqueria (COG) formado pela gaseificação dos compostos voláteis é usado como fonte de energia complementar na usina (MOURÃO et al., 2007). O coque deve ter alta resistência, elevado teor de carbono fixo, baixa reatividade ao CO_2 e baixo teor de enxofre, sendo produzido a temperaturas de cerca de 1000°C . Quando o processo é mais intenso, o coque apresenta menor reatividade, adequado para a metalurgia.

Figura 14 – Fluxograma esquemático do processo de coqueificação.



Fonte: Rizzo (2005).

No entanto, nem todos os carvões minerais são adequados para coqueificação. O carvão metalúrgico precisa ser plástico durante o aquecimento para se transformar em uma estrutura coesa. Misturas de carvões garantem a qualidade desejada, mas a oferta de carvões de baixo custo está diminuindo, o que representa um desafio para o setor. No Brasil, o carvão metalúrgico enfrenta dificuldades devido aos altos teores de enxofre nos carvões disponíveis, exigindo processos intensivos de cominuição para atender às necessidades do mercado (MOURÃO et al., 2007).

Figura 15 – Ilustração do carvão mineral (a) e do coque (b).

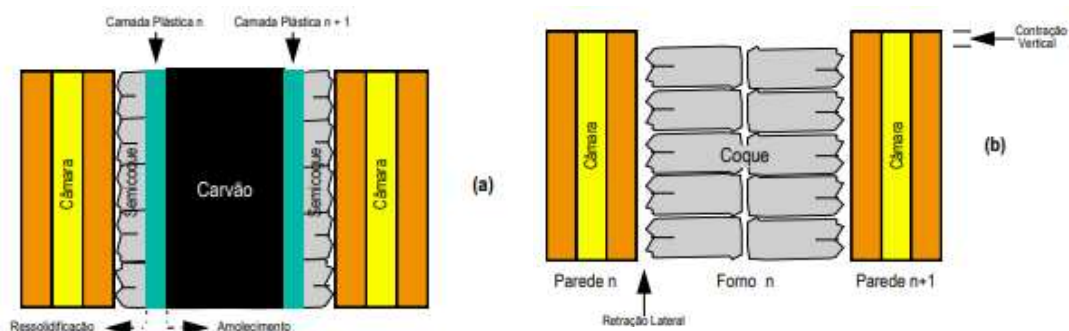


Fonte: Oliveira et. al (adaptada) (2023).

O processo de coqueria é composto por etapas sequenciais essenciais para garantir a produção de coque de alta qualidade para os altos-fornos, conforme descrito por Rizzo (2004). A primeira etapa é a preparação da mistura de carvões, onde a composição é ajustada de acordo com as especificações de qualidade, controlando variáveis como cinza, enxofre, voláteis, carbono e umidade. Após o processo de britagem, o carvão é misturado e armazenado em silos, com amostras analisadas periodicamente.

A segunda etapa, o enformamento, consiste no carregamento do carvão nos fornos, conforme Figura 17 (a), com máquinas especializadas garantindo a distribuição uniforme. A quantidade de carvão é monitorada para garantir precisão. Na terceira etapa, a coqueificação começa com a liberação de gases voláteis e ocorre em três fases: (1) remoção de umidade e início da desvolatilização até 350°C, (2) formação de pasta plástica entre 350°C e 500°C, e (3) endurecimento do material entre 500°C e 1100°C, resultando no semicoque e, por fim, no coque acabado, o processo de transformação é mostrado na Figura 16.

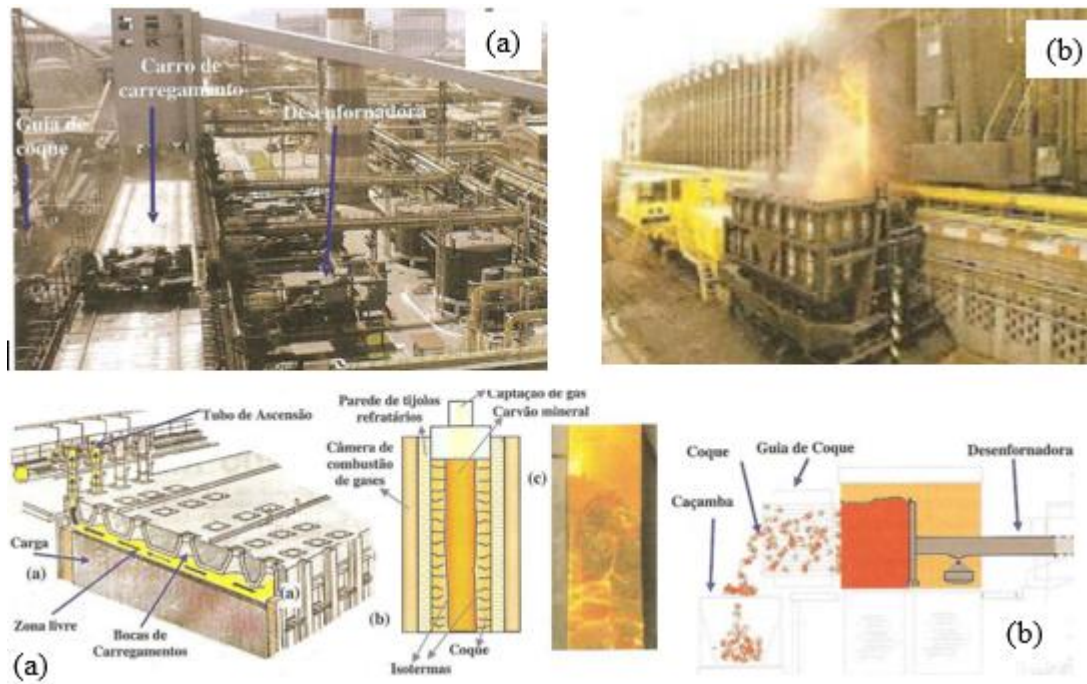
Figura 16 – Comportamento da carga no processo de coqueificação algumas horas após o início (a) e no final do processo (b)



Fonte: Ulhôa (2003).

Após a coqueificação, a etapa de desenformamento é realizada com o auxílio de uma desenformadora, conforme Figura 17 (b), que abre o forno e empurra o coque para o carro de extinção. O coque incandescente é então resfriado na torre de resfriamento antes de ser descarregado nas rampas para os altos-fornos.

Figura 17 – Operações de carregamento (a) e de descarregamento (b).



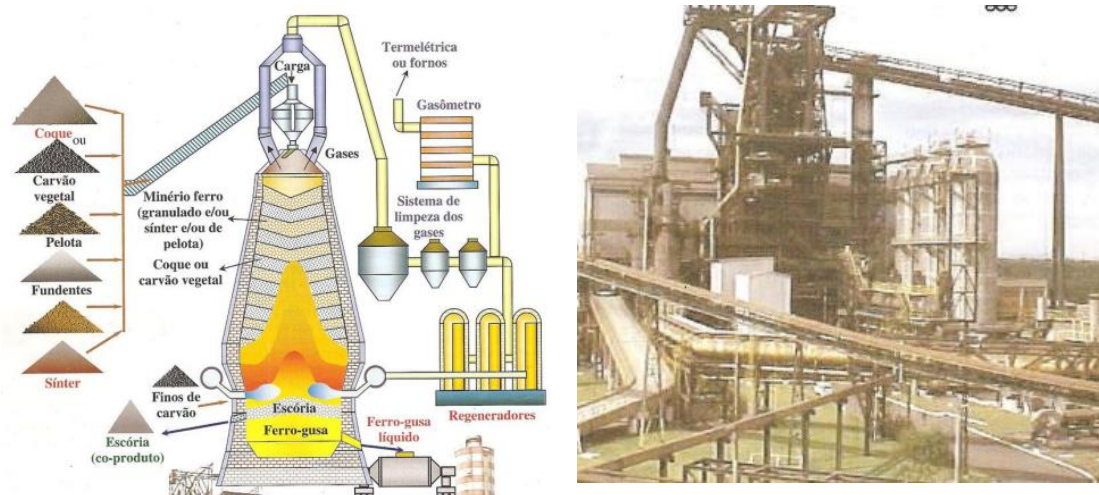
Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

2.2.3. Redução – Alto Forno

Após a preparação das matérias-primas por aglomeração e coqueificação, inicia-se a etapa de redução do oxigênio no ferro, permitindo sua combinação com o carbono no alto-forno (RIBEIRO, 2014). Este equipamento, essencial para a produção de ferro-gusa, opera a cerca de 1.500°C , usando matérias-primas como sinter, pelotas, minério granulado, coque ou carvão vegetal, fundentes e injeções auxiliares, como gás natural e carvão pulverizado (MOURÃO et al., 2007).

O alto-forno é um reator complexo, com reações simultâneas nos três estados da matéria. As temperaturas variam entre mais de 2.000°C perto das ventaneiras e cerca de 150°C na saída dos gases. As matérias-primas são introduzidas por uma calha rotativa no topo, e ar aquecido é injetado através das ventaneiras. O processo envolve o carregamento contínuo de materiais, drenagem de líquidos pela base, injeção de ar quente e retirada de gases e partículas sólidas, o fluxograma desses processos é mostrado na Figura 18. Nos altos-fornos modernos, o processo é automatizado, com mais de 3.000 variáveis monitoradas e controladas por sistemas supervisórios.

Figura 18 – Fluxograma de processo do alto-forno.

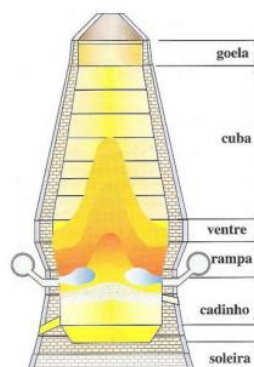


Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

A operação do alto-forno é contínua, com paradas esporádicas para manutenção, geralmente em ciclos de 24 horas ou trimestrais, e ajustes na carga para compensar variações energéticas. O controle térmico é sensível às mudanças nas matérias-primas, e qualquer desvio pode afetar a produção e a qualidade do ferro-gusa. A gestão precisa e constante é crucial para o sucesso do processo (MOURÃO et al., 2007). O objetivo principal é produzir ferro-gusa líquido, que se acumula no cadinho e é canalizado para os carros-torpedo, com a produção de escória e gás de alto-forno utilizado como combustível.

A redução dos óxidos de ferro ocorre à medida que a carga desce e os gases ascendem, através de reações com o coque e ar nas ventaneiras. As principais reações químicas incluem a formação de monóxido de carbono e a redução do óxido de ferro. O alto-forno é dividido em várias partes, conforme mostra a Figura 19: cadinho (base), rampa (parte cônica), ventre (parte vertical), cuba (parte cônica estreita), goela (parte superior final) e topo (onde ocorrem os carregamentos).

Figura 19 – Zonas do alto-forno.



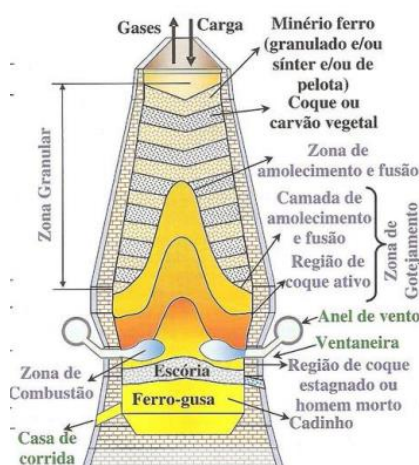
Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

No alto-forno, o ar aquecido injetado pelas ventaneiras é essencial para as reações químicas nas diferentes zonas do forno. Nas regiões da rampa e ventre, o ar aquece o coque e o minério de ferro, permitindo a remoção parcial de oxigênio e a fusão do material. O forno é dividido em três zonas principais, ilustradas na Figura 20:

- Zona Granular: A carga metálica desce em contracorrente aos gases, iniciando aquecimento e reações químicas.
- Zona de Amolecimento e Fusão: Onde a carga metálica amolece e funde, sendo crucial para a redução e fusão.
- Zona de Gotejamento: O metal líquido e a escória escoam em contracorrente aos gases.

A variação térmica no forno é fundamental para seu funcionamento. A zona de reserva térmica, entre as zonas de amolecimento e granular, estabiliza a temperatura em torno de 950°C, mantendo o equilíbrio necessário para as reações (JACOMINO et al., 2002).

Figura 20 – Zonas do alto-forno de acordo com o comportamento da carga.



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

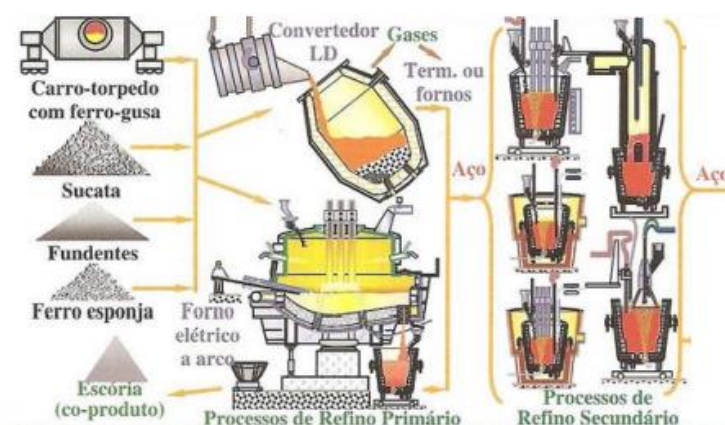
O gás no topo do alto-forno sempre contém CO, pois o carbono atua tanto como redutor quanto como combustível. Mais carbono é necessário para gerar calor do que para reduzir os óxidos de ferro, e a eficiência do alto-forno pode ser avaliada pela composição e temperatura do gás no topo. (JACOMINO et al, 2002)

2.2.4. Refino – Aciaria

A aciaria é responsável pelo refinamento do ferro-gusa, transformando-o em aço, conforme o fluxograma de sus processos apresentado na Figura 21. O ferro-gusa é transportado para a aciaria em carros-torpedo, e o método mais utilizado na conversão é

o processo a oxigênio (LD), no qual o ferro-gusa é oxidado com um fluxo de oxigênio para remover impurezas e ajustar a composição do aço. As aciarias modernas têm alta flexibilidade e podem produzir aços de qualidade equivalente aos produzidos em pequenas aciarias com sucata e fornos elétricos a arco. Tecnologias de refino secundário, como a injeção de pós reativos e o forno RH, são usadas para remover impurezas, homogeneizar a composição química e garantir um aço limpo, atendendo às necessidades industriais (MOURÃO et al., 2007).

Figura 21 – Fluxo do processo de refino do aço.



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

2.2.4.1. Refino primário

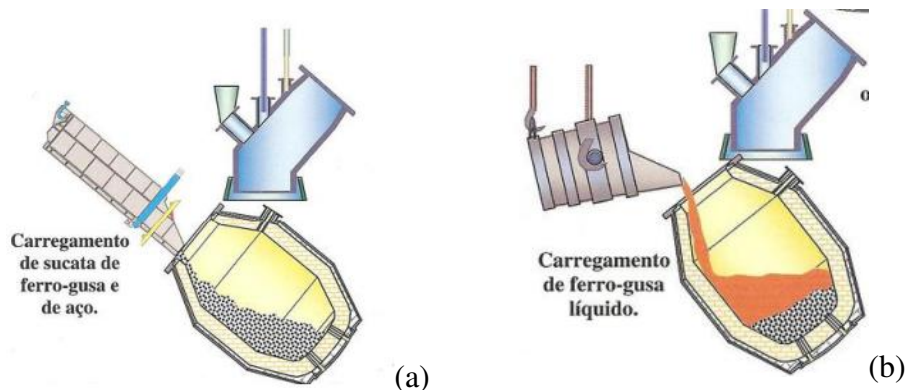
O uso de oxigênio na conversão do ferro-gusa em aço, desenvolvido por Bessemer, foi viabilizado após a Segunda Guerra Mundial, com o aumento da disponibilidade de oxigênio. Experimentos em Linz e Donawitz, na Áustria, em 1952 e 1953, demonstraram bons resultados, levando ao crescimento do processo LD na produção de aço, que se mostrou eficiente, de baixo custo e fácil de implementar.

No processo LD, as principais matérias-primas incluem gusa líquido e sólido, sucata de aço, ferro fundido, minério de ferro, cal, fluorita e oxigênio. Além disso, calcário e fluorita são usados como fundentes, e carepa de laminação e sinter substituem parte do minério de ferro. A adição de minério de manganês melhora o teor de manganês no aço, reduzindo a necessidade de ferroligas no refino secundário (MOURÃO et al., 2007).

O ciclo de operações do processo de refino LD no conversor segue uma sequência bem definida, conforme descrito por Mourão et al. (2007):

1. Carregamento de carga sólida: O conversor é inclinado a 60°, recebendo sucatas de aço e ferro gusa sólido de maneira estratégica para proteger o revestimento do conversor, conforme mostrado na Figura 22 (a).
2. Carregamento de gusa líquido: O conversor é reposicionado e recebe o ferro gusa líquido de placas pelicano, conforme mostrado na Figura 22 (b).

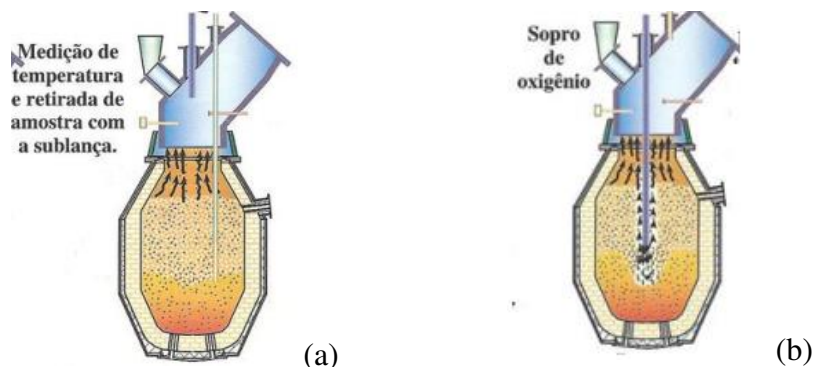
Figura 22 – Etapas de carregamento de sucata (a) e de ferro-gusa líquido (b).



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

3. Medição de temperatura e retirada de amostras: A temperatura é medida e amostras são coletadas antes de finalizar o carregamento com a ponte rolante, conforme a Figura 23 (a).
4. Sopros: O oxigênio é soprado no conversor, iniciando as reações de refino. O sopro é controlado com base na temperatura e teor de carbono, conforme a Figura 23 (b).

Figura 23 – Etapas de sopro de oxigênio e medição de temperatura.

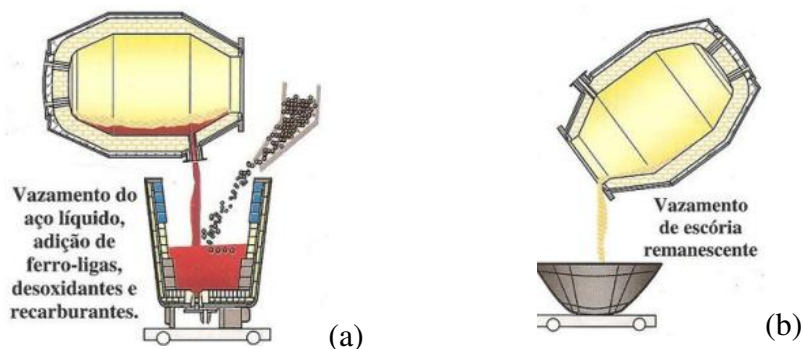


Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

5. Vazamento de aço líquido: O aço é vazado, conforme a Figura 24 (a) para a panela de aço quando a temperatura e a composição estão corretas. Caso contrário, o conversor recebe mais sopro e materiais.

6. Vazamento de escória: A escória é separada do aço usando dispositivos de retenção e despejada após o vazamento do aço, conforme a Figura 24 (b). O conversor retorna à posição inicial para o próximo ciclo.

Figura 24 – Etapas vazamento de aço líquido e escória.



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

Ao fim do ciclo a panela de aço após controlada sua temperatura pode ser destinada direto para o lingotamento ou para as operações de refino secundário em caso de fabricação de aços de melhor qualidade em relação a especificação de composição química.

2.2.4.2. Refino secundário

O refino secundário, ou metalurgia de panela, ocorre após o refino primário no conversor, com o objetivo de ajustar a composição química e a temperatura do aço, removendo impurezas e controlando elementos indesejados como enxofre e fósforo. Esse processo é essencial para a desoxidação e dessulfuração do aço, garantindo sua pureza e qualidade (FRUEHAN, 1998).

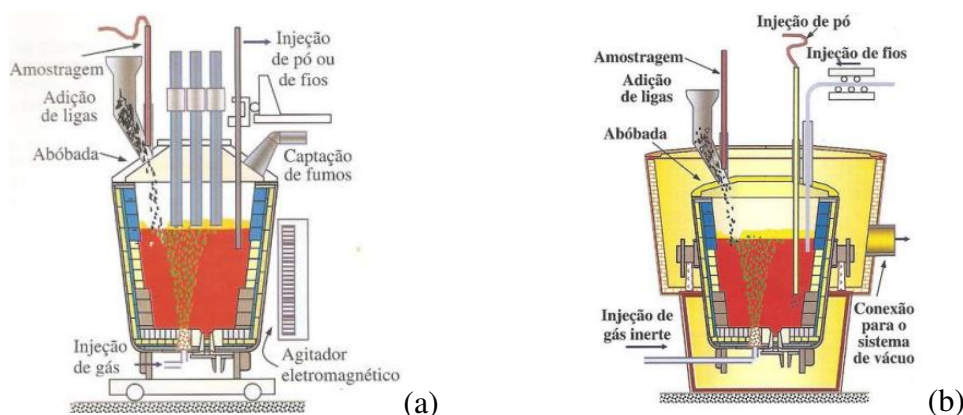
O refino secundário é crucial na produção de aços especiais e de alta pureza, usados em indústrias como a automotiva e aeroespacial (AISE STEEL FOUNDATION, 1998). Entre os principais processos estão:

- Vácuo (VD e VOD): Remove gases indesejados (hidrogênio, oxigênio, nitrogênio) através de baixa pressão (VD) e controle do carbono com oxigênio (VOD).
- Aquecimento Eletromagnético (EBT): Utiliza correntes elétricas para manter a temperatura do aço estável, importante durante longos períodos de processamento.

- Desoxidação e Dessulfuração: Agentes como alumínio e cálcio são adicionados para reduzir oxigênio e enxofre, melhorando propriedades como ductilidade e resistência.
- Injeção de Gases (Ar, Argônio, Nitrogênio): Facilita a homogeneização do aço e é utilizado para ajustar a composição em aços específicos.

Os principais equipamentos incluem o forno panela (LF), para ajuste de temperatura, e o forno de degaseificação a vácuo (VD), mostrados na Figura 24, que remove gases dissolvidos (FRUEHAN, 1998).

Figura 24 – Processos de refino secundário no forno panela (a) e na degaseificação a vácuo (b).



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

Ao fim do refino secundário, o aço é transferido para a estação de lingotamento contínuo. A panela é posicionada sobre uma torre que o conduz à distribuidora para controle de temperatura e, em seguida, ao molde refrigerado, onde ocorre a solidificação superficial. Esse molde vibra para evitar aderências, e o aço semissólido passa por resfriamento adicional até estar completamente solidificado, momento em que é cortado nas dimensões desejadas para o processamento final. (FRUEHAN, 1998)

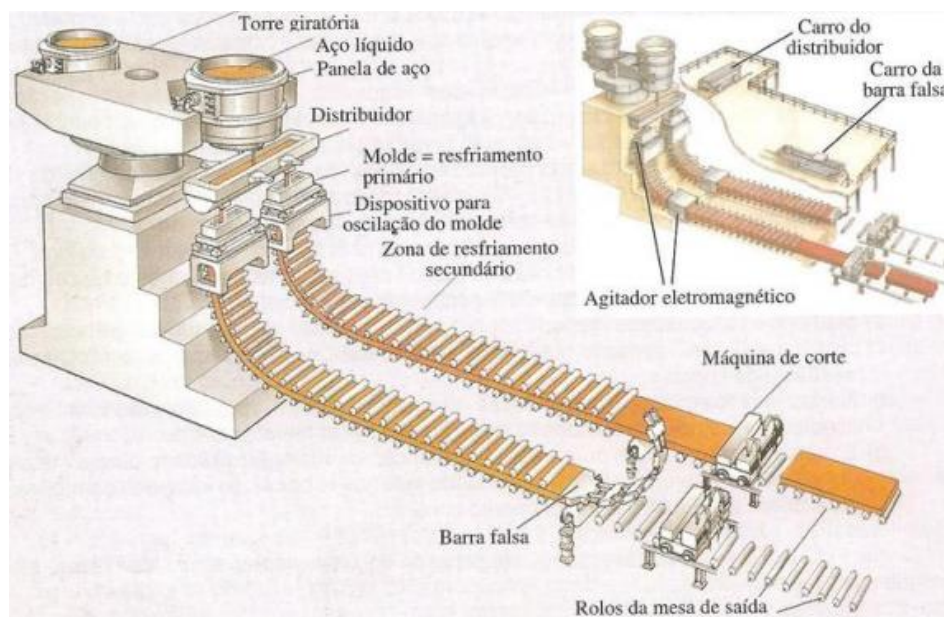
2.2.5. Lingotamento contínuo

O lingotamento contínuo de aço, desenvolvido na década de 1960, revolucionou a produção siderúrgica ao permitir a transformação do aço líquido em produtos semiacabados com formas específicas, como placas e tarugos. Esse processo supera as limitações dos métodos tradicionais, que usavam moldes fixos (MOURÃO et al., 2007).

Após o refino secundário, o aço líquido é transferido para uma panela de vazamento e depois para a distribuidora, que controla a vazão e a temperatura do metal até o molde refrigerado. O aço é despejado em um molde de aço com resfriamento interno,

promovendo sua solidificação, essas etapas são mostradas na Figura 25. A vibração do molde, controlada por mecanismos, evita que o aço se adira às superfícies, prevenindo defeitos como trincas e segregações, garantindo a qualidade do produto (FRUEHAN, 1998).

Figura 25 – Processo de lingotamento contínuo.



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

Após a solidificação, o aço passa por um resfriamento secundário com jatos de água para garantir uma solidificação uniforme. Em seguida, é transportado por rolos e cortado em comprimentos específicos por maçaricos, resultando em produtos como chapas, placas, tarugos e perfis (MOURÃO et al., 2007).

Esse processo automatizado utiliza equipamentos especializados, como fornos, painéis de vazamento, moldes refrigerados e máquinas de corte, com controle rigoroso de variáveis operacionais, como a taxa de resfriamento e composição química, para garantir a qualidade do aço (FRUEHAN, 1998; MOURÃO et al., 2007).

Após o lingotamento, os produtos podem passar por laminação a quente ou a frio, ajustando suas dimensões e propriedades mecânicas, sendo destinados a diversos setores como construção, automotivo e eletrodomésticos (AISE STEEL FOUNDATION, 1998).

2.3. Gases subprodutos do processo siderúrgico

2.3.1. Gás de Coqueria/ *Coke Oven Gas* (COG)

A produção de coque metalúrgico gera subprodutos de grande importância, entre os quais se destacam os hidrocarbonetos (matérias voláteis) originados da destilação do carvão. Esses hidrocarbonetos podem variar de compostos aromáticos complexos a compostos mais simples, incluindo alcatrão, amônia, enxofre, benzeno, tolueno e xileno. Embora esses compostos sejam valiosos em diversas indústrias, eles também compõem o gás de coqueria, que possui uma composição específica, sendo frequentemente aproveitado em processos industriais (MOURÃO et al., 2007).

Durante a transformação do carvão mineral em coque, é gerado um gás denominado COG (*Coke Oven Gas* – Gás de Coqueria). Este gás é produzido em grandes quantidades, com um volume aproximado de 439 Nm³/t de coque. O processo de geração do COG ocorre nas baterias de fornos de coque, onde o carvão é aquecido a temperaturas elevadas, variando entre 1000°C e 1200°C, em um ambiente de ausência de oxigênio. Esse aquecimento provoca a decomposição térmica do carvão e a liberação das matérias voláteis. As matérias voláteis presentes no carvão, como hidrocarbonetos, gases e vapores, são separadas por meio de destilação fracionada e resfriamento, resultando no COG como um subproduto essencial para o processo (MOURÃO et al., 2007).

O gás de coqueria é composto principalmente por metano (CH₄), hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), configurando-se como um gás combustível de alto valor energético. Embora sua composição exata possa variar de acordo com a origem do carvão e as condições operacionais da coqueria, em média, o COG contém cerca de 50-60% de metano, 20-30% de hidrogênio e 10-20% de monóxido de carbono. Também podem ser encontrados outros componentes em menores concentrações, como dióxido de carbono (CO₂), etano, propano e vestígios de compostos como amônia, enxofre e fenol (MOURÃO et al., 2007).

Uma das principais características do COG é o seu alto poder calorífico, que gira em torno de 4.000 kcal/Nm³. Esse valor torna o COG um combustível de alta densidade energética, aproximadamente metade do poder calorífico do gás natural 8.500 kcal/Nm³) e muito superior ao gás de alto-forno (800 a 1.000 kcal/Nm³). O elevado poder calorífico do COG o torna adequado para ser utilizado em processos térmicos, como o aquecimento de fornos e queimadores dentro da própria planta de coqueificação, bem como no aquecimento de ar nos regeneradores de alto-forno e no aquecimento de carros-torpedo. A energia gerada pelo COG também pode ser aproveitada em usinas termoeletricas para

a produção de eletricidade, contribuindo para a eficiência energética da planta integrada (MOURÃO et al., 2007).

Estudos técnicos indicam que cerca de 50-70% do gás produzido em uma planta de coqueificação é consumido internamente para manter os processos térmicos necessários, enquanto o excedente é frequentemente utilizado em outras operações dentro da planta ou, em alguns casos, convertido em energia elétrica (XU et al., 2018).

Segundo ARAÚJO (2006), o gás começa a ser gerado assim que o carvão é introduzido no forno. A água superficial presente no carvão evapora imediatamente após o aquecimento, escapando como gás, junto com outros produtos voláteis originados pela carbonização. À medida que a carga de carvão se aquece, ela atravessa rapidamente o estágio plástico, formando uma camada de coque de baixa temperatura nas paredes do forno. As regiões próximas às paredes do forno tornam-se mais ricas em piche e alcatrão, enquanto as zonas mais afastadas são compostas por hidrocarbonetos leves. Durante o processo de carbonização, o piche e o alcatrão sofrem redistilação, à medida que a reação avança, formando uma zona condensada que se expande e se torna progressivamente mais impermeável aos gases (ARAÚJO, 2006).

O gás gerado, ainda quente e livre de alcatrão, aquece a camada interna da carga de carvão, enriquecendo-se com vapor d'água, que se condensa no interior da carga fria. Esse processo de separação e redistribuição da água ocorre nas primeiras horas de carbonização, quando a temperatura do centro da carga atinge cerca de 100°C. A água evaporada escapa do interior da carga juntamente com o gás, sendo direcionada para a zona livre, um canal destinado à coleta das matérias voláteis (ARAÚJO, 2006).

Esse vapor e gás interno quebram as pontes de água que impedem que as partículas de carvão se aproximem umas das outras. A ação lubrificante do alcatrão condensado também contribui para a redução da resistência entre as partículas, resultando em um aumento na densidade da carga e causando uma contração da carga no forno, que continua até a completa evaporação da água presente no centro da carga.

Entre 350°C e 550°C, os voláteis primários são liberados, compostos principalmente por alcatrão, CO₂, CO, C₂H₆, CH₄ e H₂O. Esses voláteis primários passam por craqueamento e polimerização, originando os voláteis secundários, compostos por hidrocarbonetos como C₂H₆, CH₄, CO₂, CO e H₂O, além de alcatrão secundário. Quando a temperatura atinge entre 550°C e 1000°C, os voláteis terciários são liberados, com destaque para o hidrogênio (H₂) e hidrocarbonetos gasosos saturados e insaturados (ARAÚJO, 2006).

Após a formação dos voláteis, o gás gerado nos fornos é succionado pelos exaustores, passando pelos tubos coletores e resfriadores, onde sua temperatura é reduzida a abaixo de 35°C. Durante esse resfriamento, o alcatrão e a água absorvem amônia do gás. O condensado gerado nos coletores e resfriadores primários é composto por alcatrão e licor amoniacal. Esse condensado é bombeado para tanques de decantação, onde ocorre a separação por gravidade: o alcatrão bruto é transferido para a usina de alcatrão, enquanto o licor amoniacal é direcionado ao destilador de amônia (ARAÚJO, 2006).

O gás segue então para os precipitadores eletrostáticos, onde ocorre a pré-limpeza, removendo as partículas finas. O gás limpo é conduzido aos resfriadores finais, onde é resfriado à temperatura mais baixa possível com a ajuda de água de resfriamento. Esse resfriamento condensa compostos como o naftaleno, que é removido através de chuveiros de destilado de petróleo, enquanto compostos derivados de benzol, conhecidos como óleos leves de coqueria, também são extraídos. O gás de coqueria (COG), agora limpo e resfriado, é então enviado ao gasômetro para distribuição aos consumidores, sendo utilizado como combustível ou em outros processos industriais, como a geração de energia elétrica e o aquecimento de fornos.

A flexibilidade do COG como combustível está diretamente relacionada à sua composição, o que permite sua utilização em diferentes tipos de queimadores e fornos. No entanto, seu uso exige cuidados específicos quanto à sua umidade, teor de amônia e impurezas, que podem afetar a eficiência do processo e comprometer a vida útil dos equipamentos. Por isso, o gás frequentemente passa por processos de purificação antes de ser utilizado em queimadores e fornos, incluindo desumidificação e remoção de compostos indesejáveis, como amônia e enxofre, que em concentrações elevadas podem causar corrosão e outros danos aos equipamentos (ZHAO et al., 2019).

Além disso, com o avanço das tecnologias, tem-se explorado novas formas de aumentar a eficiência na recuperação e utilização do COG. Tecnologias de captura de calor residual, como os sistemas de cogeração, têm sido implementadas em algumas usinas integradas, maximizando o aproveitamento do COG e, consequentemente, aumentando a eficiência energética da planta. Esse aprimoramento contribui para a redução de custos operacionais e para o aumento da sustentabilidade econômica do processo (XU et al., 2018).

2.3.2. Gás de Alto Forno/ *Blast Furnace Gas* (BFG)

O alto-forno é um reator de contracorrente amplamente utilizado na produção de ferro gusa, no qual ocorre a redução do minério de ferro por meio do coque, que atua como combustível. Durante esse processo, o jato de ar quente injetado pelas ventaneiras aquece e queima o coque na zona de combustão, liberando uma quantidade significativa de calor e formando um gás quente. Este gás ascende pelo forno, interagindo com o minério de ferro e promovendo sua redução para ferro líquido. O processo desencadeia uma série de reações químicas e energéticas complexas, resultando na formação do BFG (*Blast Furnace Gas*), ou gás de alto-forno, que é um subproduto essencial dessa operação (MOURÃO et al., 2007).

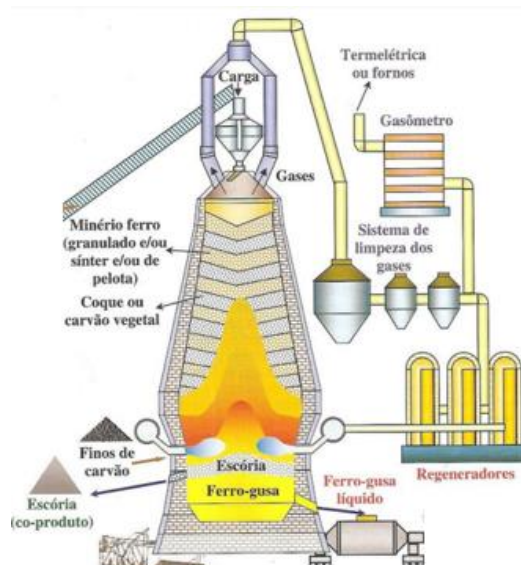
O gás de alto-forno (BFG) é composto predominantemente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e nitrogênio (N₂). Sua composição exata pode variar conforme uma série de fatores, como a qualidade do coque utilizado, o tipo de minério empregado e as condições operacionais do forno. De maneira geral, o BFG contém cerca de 60-70% de monóxido de carbono (CO), que desempenha um papel fundamental como o principal agente redutor no processo de conversão do minério de ferro em ferro líquido. Também é composto por aproximadamente 20-30% de dióxido de carbono (CO₂), gerado a partir da oxidação incompleta do coque, 4-6% de hidrogênio (H₂), originado pelas reações de redução da água, e cerca de 1-2% de metano (CH₄), que se forma pela decomposição térmica de hidrocarbonetos. Além disso, o BFG contém pequenas quantidades de nitrogênio (N₂), que é introduzido com o ar atmosférico injetado nas ventaneiras (MOURÃO et al., 2007).

O poder calorífico do BFG varia entre 800 a 1.000 kcal/Nm³, sendo influenciado pela sua composição, especialmente pelos níveis de monóxido de carbono e hidrogênio presentes. Embora o BFG tenha um poder calorífico inferior ao do gás natural (cerca de 8.500 kcal/Nm³), ainda assim se configura como um combustível eficiente para diversas aplicações dentro da planta siderúrgica, como o aquecimento das ventaneiras e dos regeneradores, além de ser utilizado em termoelétricas para a geração de energia elétrica. No processo de redução do minério de ferro, o monóxido de carbono (CO) desempenha uma função essencial, pois é o principal agente redutor que facilita a conversão do minério de ferro em ferro líquido. O BFG também contribui para manter a temperatura do forno, um fator crucial para a continuidade das reações químicas que são necessárias à produção de ferro (MOURÃO et al., 2007).

A geração do BFG inicia-se com a queima do coque nas ventaneiras do alto-forno, onde o oxigênio presente no ar quente reage com o coque, formando monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). Estes gases gerados ascendem pelo forno e são coletados na parte superior, sendo posteriormente tratados e purificados antes de sua reutilização (MOURÃO et al., 2007).

O primeiro estágio do tratamento do BFG envolve a coleta do gás quente nos *uptakes*, sendo então resfriado no *downcommer*, uma etapa crucial para proteger os componentes do sistema e evitar a corrosão dos equipamentos. Após esse resfriamento, o gás é filtrado em coletores de pó, que removem as partículas grosseiras. O gás, então, passa por sistemas de lavagem tipo Venturi, onde partículas finas e outras impurezas são removidas, e, finalmente, o BFG chega ao gasômetro, como ilustrado na Figura 26. Neste ponto, a pressão das redes de gás é estabilizada e o gás é distribuído aos consumidores, podendo ser utilizado em diversas aplicações industriais, como combustível ou para a geração de energia (MOURÃO et al., 2007).

Figura 26 – Processo de aproveitamento do BFG.



Fonte: Adaptada de Rizzo (2005).

O aproveitamento do BFG vai além de sua utilização no processo de redução do minério de ferro no alto-forno, desempenhando um papel significativo na otimização da eficiência energética da planta siderúrgica. A recuperação de calor proveniente dos gases quentes gerados no processo, juntamente com o uso do BFG para a geração de eletricidade, proporciona uma importante economia de coque e contribui para a melhoria da eficiência global do processo. Este ciclo virtuoso não só diminui a necessidade de combustíveis fósseis externos, mas também torna a operação da planta mais sustentável,

reduzindo sua pegada ambiental e aprimorando a sua viabilidade econômica (MOURÃO et al., 2007).

Em síntese, BFG é um subproduto essencial na produção de ferro no alto-forno, com uma composição predominante de monóxido de carbono e hidrogênio. Esse gás desempenha um papel crucial tanto no processo de redução do minério de ferro, como também no fornecimento de benefícios energéticos substanciais. Sua aplicação se estende a diversas fases da operação da planta siderúrgica, incluindo aquecimento, geração de eletricidade e recuperação de calor, todos essenciais para o funcionamento eficiente da planta. O tratamento adequado e a gestão do BFG são fundamentais para garantir não só a eficiência energética das operações, mas também a sustentabilidade do processo siderúrgico, contribuindo para a redução do consumo de recursos e para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção de ferro.

2.3.3. Gás de Aciaria – *Linz Donawitz Gas* (LDG)

O gás de aciaria LD (Linz-Donawitz), também conhecido como gás de conversor, é um subproduto relevante gerado durante o processo de conversão do ferro-gusa em aço por meio do método LD, que se baseia na injeção de oxigênio puro para oxidar as impurezas presentes no ferro-gusa. Este gás possui características que o tornam de grande interesse, tanto para a indústria siderúrgica, onde é tratado e reutilizado, quanto sob a ótica energética e ambiental. O processo de geração, composição e aproveitamento desse gás, bem como as tecnologias envolvidas no seu tratamento, são aspectos centrais para a busca de uma siderurgia mais eficiente e sustentável (ALVARENGA et al., 2018; SIEGEL et al., 2014).

A composição do gás de aciaria LD pode variar dependendo das condições operacionais e dos materiais utilizados, mas de forma geral, ele é composto por aproximadamente 50-60% de monóxido de carbono, 15-25% de dióxido de carbono, 20-30% de nitrogênio, 1-5% de oxigênio e pequenas quantidades de hidrogênio, metano, óxidos de nitrogênio (NOx) e outros componentes. O gás apresenta um poder calorífico que varia entre 1.700 e 2.300 kcal/Nm³, dependendo da composição exata. Além do elevado poder calorífico, o gás de aciaria LD se caracteriza por sua alta temperatura e pela presença de partículas sólidas e gases ácidos, como óxidos metálicos e poeiras formadas durante o processo de conversão. Esses compostos podem representar desafios tanto para a eficiência operacional quanto para o tratamento ambiental do gás (ALVARENGA et al., 2018; KUMAR & ROY, 2017).

Após a sua formação, o gás de aciaria LD deve ser tratado para ser reutilizado de maneira segura ou liberado para a atmosfera, dado que contém partículas sólidas e gases poluentes. O tratamento do gás inicia-se com a remoção das partículas sólidas, que é realizada em sistemas de precipitadores eletrostáticos ou filtros de manga, responsáveis por capturar as partículas finas, como óxidos metálicos e poeiras, que podem causar danos ambientais ou aos equipamentos subsequentes. Em seguida, o gás passa por lavadores de gases, que utilizam água ou soluções alcalinas para remover gases ácidos, como o dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). (SIEGEL et al., 2014; FUKUSHIMA et al., 2019).

Em algumas instalações, o gás também pode ser submetido a unidades de desumidificação para reduzir a umidade, evitando a corrosão de equipamentos e melhorando a eficiência do seu uso posterior. Durante esses processos de tratamento, o gás é resfriado para garantir que compostos voláteis e tóxicos sejam removidos de maneira eficaz. Após o processo de purificação, o gás pode ser armazenado ou direcionado para processos internos da planta siderúrgica. A purificação eficaz do gás de aciaria LD é essencial para garantir seu reaproveitamento de forma segura e eficiente (SIEGEL et al., 2014; FUKUSHIMA et al., 2019).

O gás de aciaria LD, devido ao seu alto poder calorífico, é amplamente utilizado dentro da planta siderúrgica. Uma de suas principais aplicações é o aquecimento de fornos e o pré-aquecimento do ar injetado no conversor LD, o que resulta na redução do consumo de energia elétrica e gás natural. O gás também pode ser utilizado em usinas termoelétricas internas, onde é queimado para gerar calor e eletricidade, contribuindo para a autossuficiência energética da planta e a redução dos custos operacionais. Além disso, o gás de aciaria pode ser empregado em processos de redução de ferro em outros fornos, como os fornos de redução direta, ou ainda utilizado para auxiliar em processos de aquecimento de matérias-primas ou secagem de sucata, aumentando a eficiência operacional da planta siderúrgica (FUKUSHIMA et al., 2019; LIU et al., 2020).

O aproveitamento eficiente do gás de aciaria LD tem um impacto direto na sustentabilidade da siderurgia. A reutilização deste gás contribui para a redução do consumo de combustíveis fósseis e para a diminuição das emissões de CO_2 . Além disso, o tratamento adequado do gás minimiza os impactos ambientais, especialmente a liberação de poluentes como dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x), substâncias prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Estudos demonstram que, ao adotar tecnologias avançadas de recuperação de energia e tratamento de gases, as

plantas siderúrgicas podem reduzir de forma significativa suas emissões e custos operacionais, ao mesmo tempo em que melhoram a eficiência energética e contribuem para os objetivos globais de sustentabilidade (LIU et al., 2020; FUKUSHIMA et al., 2019).

2.4 Aspectos de segurança do processo siderúrgico

A segurança operacional nas usinas siderúrgicas, especialmente em relação às operações com gases combustíveis e inflamáveis, assume uma importância crucial devido aos riscos associados às misturas gasosas geradas durante os processos produtivos. Gases como o gás de alto-forno (BFG), gás de aciaria (LDG) e gás de coqueria (COG) são compostos por substâncias como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrogênio (H₂), além de vapores de alcatrão e amônia.

A presença do monóxido de carbono, um gás altamente tóxico e asfixiante, juntamente com o alto poder calorífico desses gases, implica sérios riscos de contaminação, asfixia, incêndios e explosões, caso não sejam seguidas estritas normas de segurança. A complexidade dos processos siderúrgicos, que operam sob altas temperaturas e pressões, exige a implementação de controles operacionais e preventivos extremamente rigorosos para mitigar tais riscos (BLS, 2015).

O tratamento, recuperação e distribuição segura desses gases combustíveis e inflamáveis envolve uma série de etapas, incluindo purificação, desumidificação, remoção de partículas sólidas e análise contínua da composição do gás.

Adicionalmente, a equalização da pressão e a distribuição controlada dos gases para os diferentes equipamentos de consumo, como fornos, caldeiras e usinas termoelétricas, requerem a instalação de sistemas automatizados de controle de pressão, detecção de fugas e monitoramento contínuo da concentração de gases inflamáveis. A exposição a esses ambientes sem o devido controle pode gerar sérios riscos de incêndio e explosão, razão pela qual sistemas de monitoramento contínuo e alarmes são essenciais para identificar prontamente qualquer alteração nas condições do gás (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001).

Um dos casos mais emblemáticos de falha na gestão de gases combustíveis ocorreu na Usiminas, em Ipatinga, Minas Gerais, em agosto de 2018. O acidente envolveu uma explosão no gasômetro da usina, resultando em múltiplos feridos e danos estruturais significativos. As investigações indicaram que a explosão foi causada pelo acúmulo descontrolado de gases inflamáveis, agravado por falhas na contenção e na exaustão de gases. O evento reforçou a necessidade de aprimoramento dos protocolos de segurança,

incluindo inspeções mais rigorosas, redundância nos sistemas de alívio de pressão e a modernização dos sistemas de monitoramento de gases combustíveis.

No cenário internacional, um dos acidentes mais graves relacionados a gases inflamáveis ocorreu na usina siderúrgica de ThyssenKrupp, na Alemanha, em 2007. O incidente envolveu uma explosão de gás em um dos fornos da planta, resultando na morte de vários trabalhadores e ferimentos graves em outros. A causa principal foi uma falha no sistema de contenção e distribuição de gás de coqueria, que levou a um vazamento significativo e posterior ignição. O desastre evidenciou a importância da manutenção preventiva e do treinamento contínuo dos operadores para lidar com emergências envolvendo gases inflamáveis.

A indústria siderúrgica é uma das mais complexas em termos de riscos operacionais, com destaque para os riscos relacionados à manipulação de gases inflamáveis e combustíveis. O gás de aciaria LD, por exemplo, é gerado durante a conversão do ferro-gusa em aço, resultando em uma mistura rica em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), ambos altamente inflamáveis. A elevada temperatura associada aos processos de aquecimento aumenta o risco de acidentes, como explosões de gás ou incêndios acidentais, especialmente quando os gases não são devidamente direcionados ou ocorrem falhas nos sistemas de segurança. Além disso, operações que envolvem soldagem ou corte a quente, principalmente próximas a sistemas de distribuição de gás ou em áreas de tratamento, podem gerar faíscas que potencialmente provocam ignição (NFPA, 2020).

Segundo a NFPA, as cinco principais causas de incêndios e explosões industriais são: a ignição de pós combustíveis, o cuidado inadequado durante trabalhos a quente, o manuseio impróprio de líquidos e gases inflamáveis, falhas em equipamentos e máquinas, e incidentes relacionados a instalações elétricas. No contexto da indústria siderúrgica, esses fatores se traduzem diretamente nas operações de geração e distribuição de gás, sendo que falhas nos sistemas de fornos, exaustores, compressores, queimadores de gases, podem resultar no acúmulo de gases inflamáveis, culminando em explosões. A negligência no manuseio de materiais combustíveis ou a insuficiente formação dos operadores sobre os riscos associados aos gases inflamáveis são fatores críticos em muitos acidentes.

Dada a gravidade dos riscos envolvidos, a implementação de controles preventivos e de barreiras de segurança é fundamental para proteger tanto os trabalhadores quanto os ativos da planta siderúrgica. Essas medidas incluem o uso de

detectores de gases fixos e móveis, como detectores de monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄), que devem ser estrategicamente posicionados em pontos críticos da planta, como nas proximidades dos sistemas de geração de gases, nos consumidores e áreas de distribuição e tratamento. Além disso, a utilização de analisadores de gases em tempo real é fundamental para monitorar continuamente a composição do gás, garantindo que as concentrações de compostos inflamáveis não ultrapassem os limites seguros (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001).

De forma complementar, a instalação de sistemas de ventilação forçada e pressurização nas áreas críticas de espaço confinado ajuda a assegurar que qualquer fuga de gás seja rapidamente diluída ou desviada para áreas seguras. Em casos de vazamentos de gás, a presença de extintores automáticos, sprays de água e sistemas de supressão de incêndio por gás inerte é crucial para conter o risco de incêndios. O treinamento constante dos operadores em procedimentos de segurança e a manutenção preventiva dos sistemas de controle de gases, são indispensáveis para garantir uma operação segura (NFPA, 2020; AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001).

Os impactos dos acidentes industriais relacionados a gases combustíveis não se limitam às questões de saúde e segurança, mas também englobam elevados custos financeiros devido aos danos aos ativos, interrupção das operações e compensações às vítimas. De acordo com a NFPA, incêndios industriais e explosões geram custos significativos, tanto diretos quanto indiretos, para as empresas siderúrgicas. Além disso, as siderúrgicas devem estar em conformidade com diversas normas regulamentadoras, tanto nacionais quanto internacionais, que regulamentam o manuseio de gases combustíveis, como as diretrizes da OSHA (Occupational Safety and Health Administration) e da NFPA, com o intuito de garantir a segurança operacional e reduzir os riscos ambientais.

Portanto, a segurança nas operações com gases combustíveis e inflamáveis na siderurgia não é apenas uma questão de conformidade legal, mas também uma necessidade estratégica para assegurar a eficiência e sustentabilidade das usinas, prevenindo prejuízos econômicos e danos à reputação da empresa. Investimentos em tecnologia de segurança, junto a uma cultura organizacional voltada para a prevenção, são fundamentais para mitigar os riscos de incêndios e explosões nas usinas siderúrgicas (BLS, 2015; NFPA, 2020).

2.5 Inflamabilidade/Explosividade

No contexto da prevenção de incêndios e explosões, mistura explosiva ou inflamável é a faixa percentual de combustível em uma mistura gasosa, acima da qual a mistura é rica (excesso de combustível) e abaixo da qual a mistura é pobre (deficiência de combustível). (BRASIL, 2012)

Os limites de inflamabilidade (ou explosividade) são fundamentais para o entendimento desse fenômeno e são definidos por dois parâmetros principais: o Limite Inferior de Inflamabilidade e o Limite Superior de Inflamabilidade. Esses limites indicam, respectivamente, a menor e a maior concentração de combustível em uma mistura gasosa capaz de propagar uma chama na presença de uma fonte de ignição. (ZEBETAKIS, 1965)

Para prevenção de deflagração de chama em locais confinados através da redução da concentração de combustível a norma NFPA 69 permite considerar quando a mistura entre combustível e oxidante é confinada em uma instalação em que sua composição possa ser mantida abaixo do limite inferior de inflamabilidade, devendo ser mantida a 25% do limite inferior em condições de operação, e quando monitorada continuamente por intertravamentos de segurança deverá permanecer menor 60% do limite inferior de inflamabilidade.

Na prática, misturas inflamáveis podem ser formadas por acidente ou por projeto. Quando elas são formadas por acidente, é desejável reduzir a concentração de combustível rapidamente através da injeção de ar ou um gás inerte como nitrogênio para produzir uma mistura não inflamável. Em certas condições, também pode ser possível aumentar a concentração de combustível para produzir uma mistura não inflamável, tornando-a rica. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

Quando uma mistura inflamável é formada por acidente ou quando se deseja realizar intervenções de manutenção nas instalações de gás a concentração de combustível é reduzida para um patamar seguro através da purga com um gás inerte, geralmente nitrogênio. A purga é realizada através de dois mecanismos: deslocamento e diluição. Praticamente todos os métodos de purga combinam a ação dos dois mecanismos de purga simultaneamente, em maior ou menor proporção a depender do procedimento utilizado. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

A purga por deslocamento consiste na substituição de um gás por outro de forma controlada, minimizando a mistura entre os dois. Nesse método, o gás de purga é introduzido de maneira que expulse o gás original diretamente pelos pontos de saída,

sendo geralmente mais eficiente em sistemas lineares como tubulações. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

Já a purga por diluição ocorre quando há uma mistura significativa entre o gás de purga e o gás original, exigindo maiores volumes de gás inerte para reduzir a concentração de combustível ou oxigênio abaixo dos limites inflamáveis. Essa técnica é mais utilizada em recipientes de geometria complexa ou onde o deslocamento completo é inviável. Ambos os métodos exigem planejamento cuidadoso para evitar a formação de misturas inflamáveis durante a transição. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

Basicamente, para que uma chama se propague em um combustível, deve haver uma quantidade mínima de oxigênio suficiente para oxidar o combustível na reação química de combustão, e além disso deve haver uma fonte de ignição com temperatura alta o suficiente para iniciar a propagação. (US BUREAU OF MINES, 1965)

Portanto, visa-se eliminar no projeto, operação e manutenção dos equipamentos a gases combustíveis, fontes de ignição ou de quaisquer objetos que se adequem a tal. Além disso, os dispositivos de monitoramento de composição, analisadores de gases e detectores de vazamento de gases visam eliminar a possibilidade de formação de mistura explosiva, evitando o acúmulo de oxigênio suficiente na mistura gasosa para torná-la explosiva. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

A *National Fire Protection Association* (NFPA) em sua norma 69 de 2019 recomenda uma série de medidas e métodos para controlar e monitorar sistemas de prevenção de incêndio e explosão, especialmente para empresas que trabalham com gases inflamáveis. Uma das principais recomendações é o uso de diagramas ternários de inflamabilidade para identificar as regiões inflamáveis e não inflamáveis em sistemas contendo combustível, oxigênio e nitrogênio. Esses diagramas ajudam a determinar os limites de inflamabilidade e a estabelecer condições seguras de operação. (NFPA, 2019)

O método mais seguro para prevenir incêndios e explosões de misturas inflamáveis é conhecendo seu diagrama ternário de inflamabilidade. O diagrama ternário de inflamabilidade, também conhecido como diagrama de Kennedy, é uma representação gráfica crucial para a análise da inflamabilidade de gases, sendo utilizado em estudos de segurança industrial, especialmente em processos químicos, petroquímicos e siderúrgicos. (HANSEN E CROWL, 2010)

O diagrama é estruturado em um gráfico de três eixos, cada um representando a concentração de um dos componentes da mistura (oxigênio, combustível e inerte). O gráfico é dividido em áreas que mostram as concentrações que são seguras (não

inflamáveis) e as concentrações que estão dentro da faixa inflamável, ou seja, onde a mistura pode pegar fogo ou explodir se uma ignição for iniciada.

Esta ferramenta requer conhecimento detalhado da região de inflamabilidade em função das concentrações de combustível, oxigênio e nitrogênio. O diagrama ternário de inflamabilidade permite identificar a fronteira entre a zona inflamável e a zona não inflamável através da visualização das condições sob as quais uma mistura de três componentes (tipicamente, oxigênio, combustível e um agente inerte ou diluente) pode ou não apresentar risco de ignição. A principal aplicação do diagrama de Kennedy é na determinação dos limites de segurança operacional em processos que envolvem gases ou vapores combustíveis, contribuindo para a prevenção de acidentes e para o controle eficaz de riscos associados a incêndios e explosões. (HANSEN E CROWL, 2010) (MASHUGA E CROWL, 2004)

O uso do diagrama ternário de inflamabilidade é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de riscos, como o controle da ventilação, o uso de sistemas de supressão de incêndios, o monitoramento da concentração de gases e a definição de medidas de segurança operacionais. Ele também é utilizado para planejamento de resposta a emergências, onde entender as faixas inflamáveis pode ser determinante para definir as melhores práticas de contenção e resfriamento de áreas de risco. (CROWL E LOUVAR, 2001)

Portanto, além de sua aplicação direta na prevenção de acidentes, o diagrama ternário de inflamabilidade é uma ferramenta essencial para a modelagem de processos industriais que lidam com gases inflamáveis, colaborando para a criação de processos mais seguros e eficientes. (MANNAN, 2012)

As fronteiras entre as zonas inflamáveis e não-inflamáveis são definidas por 5 pontos de interesse no diagrama (NFPA, 2019; ZEBETAKIS, 1965):

- **1) Limite Inferior de Explosividade com o ar (LEL ar):** É o menor percentual em combustível que faz com que a mistura gasosa com o ar (78% N₂ + 21% O₂) seja capaz de propagar chama. Misturas gasosas com o ar com percentuais em combustível **abaixo do LEL são consideradas não inflamáveis;**
- **2) Limite Superior de Explosividade com o ar (UEL):** É o maior percentual em combustível que faz com que a mistura gasosa com o ar (78% N₂ + 21% O₂) seja capaz de propagar chama; Misturas gasosas com o ar com percentuais em combustível **acima do UEL são consideradas não inflamáveis;**

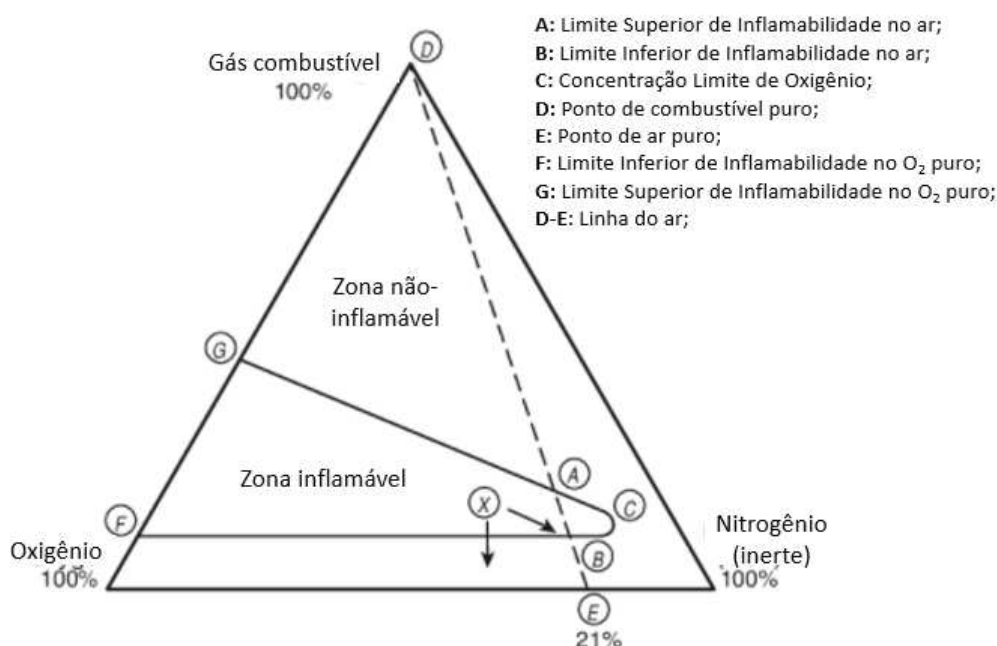
- **3) Limite Inferior de Explosividade com O₂ Puro (LOL):** É o menor percentual em combustível que faz com que a mistura gasosa com o O₂ seja capaz de propagar chama.
- **4) Limite Superior de Explosividade com O₂ Puro (UOL):** É o maior percentual em combustível que faz com que a mistura gasosa com o O₂ seja capaz de propagar chama;
- **5) Concentração Limite de Oxigênio (LOC):** É a concentração de O₂ em uma mistura com combustível(is) abaixo da qual não ocorrerá a deflagração de chama;

O LOC de cada combustível ou mistura depende da proporção que cada combustível necessita em sua equação fundamental de combustão, tipicamente os hidrocarbonetos requerem um teor de O₂ bastante superior comparado com gases como CO ou H₂; (ZLOCHWER, 2009)

A região inflamável aparece como um polígono ou triângulo dentro do diagrama ternário, conforme apresentado na Figura 27, delimitado pelas linhas que representam os limites inferiores e superiores de inflamabilidade de cada combinação com oxigênio e nitrogênio e o LOC. A região não inflamável ocupa o restante do diagrama, indicando combinações de combustível, oxidante e inerte que não podem sustentar combustão. Esses pontos e limites são fundamentais para projetar sistemas seguros e evitar condições que possam levar à formação de misturas inflamáveis em ambientes industriais. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

A Concentração Limite de Oxigênio é o parâmetro crítico que determina a quantidade máxima de oxigênio que pode estar presente em uma mistura gasosa para que ela permaneça não inflamável, mesmo na presença de uma fonte de ignição. Este conceito é amplamente utilizado em aplicações industriais para planejar procedimentos de controle de inflamabilidade. (NFPA, 2019)

Figura 27 – Diagrama de inflamabilidade ternário genérico.



Fonte: Adaptada de NFPA 69 (2019).

Nos procedimentos de purga com gás inerte, à medida que se aumenta a sua concentração a proporção dos constituintes é modificada de modo que os limites de inflamabilidade são diferentes, portanto, é mais conveniente controlar a purga pela concentração de oxigênio. (NFPA, 2019)

A norma NFPA 69 - 2019 recomenda que, em sistemas de gases inflamáveis ou produtos combustíveis deve-se estar abaixo do LOC, e que sejam seguidas as seguintes recomendações:

Nos casos em que a concentração de oxigênio da mistura seja continuamente monitorada e controlada por intertravamentos de segurança, um dos seguintes requisitos deverá ser atendido:

a) Quando o LOC da mistura for maior ou igual a 5% de oxigênio, deverá ser utilizada uma margem de segurança de pelo menos 2% menor que o LOC.

b) Quando o LOC da mistura for inferior a 5%, o equipamento deverá operar com no máximo 60% do valor do LOC da mistura.

Nos casos em que a concentração de oxigênio da mistura não seja continuamente monitorada e controlada por intertravamentos de segurança, um dos seguintes requisitos deverá ser atendido:

a) Quando o LOC da mistura for maior ou igual a 7,5% de oxigênio, deverá ser utilizada uma margem de segurança de pelo menos 4,5% menor que o LOC.

b) Quando o LOC da mistura for inferior a 7,5%, o equipamento deverá operar com no máximo 40% do valor do LOC da mistura. (NFPA 2019)

O aumento da concentração de oxigênio na mistura gasosa aproxima o ponto representativo da combinação de composição da zona inflamável no diagrama ternário. Isso significa que, quando a concentração de oxigênio está abaixo do LOC, a mistura está fora da zona inflamável, mesmo que a concentração de combustível seja alta. A presença de gases inertes, como nitrogênio ou dióxido de carbono, é capaz diluir o oxigênio, empurrando a mistura para uma região de segurança no diagrama, ou seja, para fora da zona inflamável. Isso é especialmente útil em ambientes confinados, como tanques ou sistemas de transporte de gases, onde o controle da oxigenação pode ser uma estratégia de segurança eficaz. (KREBS E RHOADS, 2016) (NFPA 2019)

Portanto, o LOC é um parâmetro fundamental para determinar os limites de segurança em um diagrama ternário de inflamabilidade, ajudando a estabelecer as condições seguras de operação em sistemas que lidam com misturas de gases combustíveis. Ela indica a quantidade mínima de oxigênio necessária para que a mistura atinja a faixa de inflamabilidade, sendo um critério chave no controle de riscos de incêndio e explosão. (KREBS E RHOADS, 2016) (NFPA 2019)

2.6 Parâmetros de Inflamabilidade/Explosividade para misturas gasosas

Poucas misturas combustíveis gasosas são compostas por gases ou vapores puros, na maioria dos casos, eles são misturas de muitos gases diferentes. Então para efetuar uma operação de purga ou inertização para intervir no processo ou tornar um equipamento seguro para realização de manutenção, é, portanto, necessário determinar os limites de inflamabilidade da mistura específica de gases em questão. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

As literaturas de Coward e Jones (1952) e Zebtakís (1965) apresentaram dados experimentais de valores dos pontos de interesse dos diagramas ternários de diversas substâncias inflamáveis puras, no entanto, não é frequente encontrar informações do tipo para misturas compostas por diferentes proporções de componentes combustíveis.

Quando há disponibilidade de equipamentos e tempo, podem-se preparar misturas de gás combustível e ar, e sua inflamabilidade pode ser determinada por ignição. No entanto, quando os gases do processo apresentam variabilidade, torna-se impraticável realizar procedimentos experimentais por ignição, é muito mais fácil determinar os limites de inflamabilidade de misturas gasosas complexas por meio de cálculos. A

experiência tem mostrado que os resultados obtidos por esse método geralmente são suficientemente confiáveis. (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2001)

Melhem (1997) apresentou um método de equilíbrio complexo para estimar o comportamento de inflamabilidade, sendo eficaz para correlacionar dados experimentais, mas difícil de aplicar. Mashuga e Crowl (1999) desenvolveram o comportamento de inflamabilidade em combinações de metano, etileno e mistura 50% metano/50% etileno. Eles também estimaram os limites superior e inferior da zona de inflamabilidade usando uma temperatura de chama adiabática constante com critério de aumento de 1200 K e técnica de minimização por Energia de Gibbs. Esses artigos representam a maior parte do trabalho nesta área.

Para misturas com mais de um componente combustível, a literatura dos trabalhos relativos a medição e estimativa dos parâmetros que delimitam as fronteiras da zona inflamável, fora da condição de mistura com o ar, é limitada, tendo em vista que se torna fundamentalmente complexo avaliar o LOC e Limites Superior e Inferior de Inflamabilidade em oxigênio puro (UOL e LOL) para misturas gasosas com vários componentes de combustíveis.

Não há na literatura diagramas ternários de inflamabilidade amplamente disponíveis para misturas complexas de gases devido à grande variabilidade das composições possíveis e à dificuldade experimental de determinar os limites de inflamabilidade e da concentração limite de oxigênio para cada combinação. Misturas complexas podem conter múltiplos combustíveis, inertes e diferentes proporções de oxigênio, o que torna a caracterização experimental extensa e inviável para todas as combinações possíveis. (CROWL E LOUVAR, 2001)

Por essas razões, os estudos experimentais de diagramas ternários de inflamabilidade geralmente se concentram em misturas simples, o que limita a construção de diagramas ternários generalizados para misturas mais complexas, no entanto, também praticamente não há na literatura diagramas ternários de inflamabilidade de misturas gasosas complexas calculados através de procedimentos analíticos. (CROWL E LOUVAR, 2001)

Levando em conta que principais pontos que delimitam as regiões inflamável e não inflamável em um diagrama ternário de inflamabilidade são determinados pelos limites de inflamabilidade e pela Concentração Limite de Oxigênio, determinar o diagrama ternário de inflamabilidade de uma mistura complexa de gases inflamáveis depende da determinação de cada uma dessas variáveis para a combinação da mistura.

A Norma NFPA 69 (2019) apresenta um método analítico que permite estimar os pontos de interesse de misturas de combustíveis com oxigênio e nitrogênio como diluente sem a necessidade de execução de procedimentos empíricos.

Os Limites de Inflamabilidade da mistura podem ser calculados de maneira confiável aplicando a Lei de Le Chatelier, levando-se em conta a proporção volumétrica de cada componente e o Limite de inflamabilidade individual de cada componente conforme a equação (NFPA, 2019):

$$LXLmis = \frac{P1 + P2 + \dots + PN}{\frac{P1}{LXL1} + \frac{P2}{LXL2} + \dots + \frac{PN}{LXLN}}$$

$$UXLmis = \frac{P1 + P2 + \dots + PN}{\frac{P1}{UXL1} + \frac{P2}{UXL2} + \dots + \frac{PN}{UXLN}}$$

Onde:

LXLmis: Limite de inferior de inflamabilidade (com ar ou oxigênio puro) da mistura;

PN: Proporção volumétrica de um componente combustível;

LXLN: Limite de inferior de inflamabilidade (com ar ou oxigênio puro) de um componente combustível;

UXLmis: Limite de superior de inflamabilidade (com ar ou oxigênio puro) da mistura;

UXLN: Limite de superior de inflamabilidade (com ar ou oxigênio puro) de um componente combustível;

É possível calcular a Concentração Limite de Oxigênio (LOC) de misturas gasosas inflamáveis complexas, embora o processo seja mais desafiador do que para misturas simples. Esse cálculo geralmente requer o uso de modelos teóricos baseados em regras de mistura, dados experimentais ou simulações matemáticas que levem em consideração os diferentes componentes da mistura.

A Concentração Limite de Oxigênio (LOC) de uma mistura de gases combustíveis (LOCmix) pode ser calculada levando-se em conta a fração molar (x_i), a razão estequiométrica (S_i) e a Concentração Limite de Oxigênio (LOCi) de cada componente combustível, segundo a norma NFPA 69/2019 da seguinte maneira:

$$LOCmis = \frac{\sum_i x_i \cdot S_i}{\sum_i \left(x_i \cdot \frac{S_i}{LOC_i} \right)}$$

3. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo baseou-se na pesquisa e análise de dados provenientes da literatura especializada, com o propósito de determinar os Limites de Inflamabilidade e Explosividade (LEL, UEL, LOL e UOL) de componentes gasosos combustíveis, tanto em mistura com ar quanto com oxigênio puro. Além disso, foi determinada a Concentração Limite de Oxigênio para cada gás componente, visando a avaliação da segurança de misturas gasosas industriais. Para isso, foram adotadas como referência a norma NFPA 69/2019 e literaturas consolidadas na área, incluindo AMERICAN GAS ASSOCIATION (2001), CHEN (2011) e HANSEN e CROWL (2010).

Inicialmente, foi realizado um levantamento detalhado dos principais componentes individuais presentes nas misturas de combustíveis utilizados na indústria, levando em consideração composições históricas dos gases de processo de uma indústria siderúrgica integrada localizada no Nordeste do Brasil.

A coleta de amostras dos gases siderúrgicos – gás de coqueria, gás de alto-forno e gás do conversor LD – foi conduzida diretamente no sistema de redes de tubulações, por meio de tomadas de coleta de gás posicionadas nas tubulações de entrada dos gasômetros. O procedimento de amostragem, análogo ao ilustrado na Figura 28, foi realizado utilizando equipamentos específicos, tais como: Sonda de amostragem: para extração do gás diretamente das tubulações; Mangueiras flexíveis e filtros: para condução do gás até o sistema de coleta, minimizando impurezas e contaminantes; Condensador e dreno: para remoção de umidade excessiva presente no gás coletado e de condensado; Bomba de vácuo: para garantir a sucção eficiente da amostra; Manômetros: para medição de pressão na coleta; Ampolas de coleta: para armazenamento seguro das amostras, preservando suas características originais.

Figura 28 – Ilustração do procedimento de coleta de gases em uma indústria siderúrgica.



Fonte: IPT (2025)

As amostras coletadas foram submetidas a análises laboratoriais por meio de cromatografia gasosa utilizando o equipamento Shimadzu GC-2014, equipado com colunas de peneira molecular e de polímeros porosos, além dos detectores de condutividade térmica e ionização de chama. A análise procedeu-se seguindo os procedimentos estabelecidos na norma NBR 14.903. As análises permitiram a quantificação precisa da composição dos gases siderúrgicos, identificando a proporção de cada componente inflamável presente nas misturas.

Figura 29 – Equipamento de cromatografia gasosa Shimadzu GC-2014.



Fonte: Shimadzu (2025)

Após a determinação das composições típicas dos gases siderúrgicos, realizou-se a tabulação sistemática desses dados e, posteriormente, foram consultadas diversas fontes bibliográficas para levantar os respectivos limites de inflamabilidade (LEL-ar, UEL-ar, LEL-O₂ e UEL-O₂) e as Concentrações Limite de Oxigênio (LOC) para cada gás combustível identificado.

De posse dos dados tabulados, aplicaram-se as equações de mistura de Le Chatelier para o cálculo dos limites de inflamabilidade das misturas gasosas e as equações da NFPA 69/2019 para a determinação da Concentração Limite de Oxigênio (LOC) de cada composição analisada. A partir desses cálculos, foram gerados os parâmetros essenciais para a construção dos diagramas ternários de inflamabilidade dos gases siderúrgicos COG, BFG e LDG.

Os diagramas ternários foram elaborados para representar graficamente as regiões inflamáveis e não inflamáveis de cada mistura, permitindo a identificação do

comportamento do gás combustível em diferentes condições de oxigenação e diluição com nitrogênio.

Para facilitar a manipulação e visualização dos dados, foi desenvolvida uma interface de cálculo automatizada no Microsoft Excel, programada para calcular os limites de inflamabilidade e as LOCs com base na composição do gás combustível. Essa interface permitiu a identificação dos principais pontos de interesse no diagrama ternário, incluindo os Limites Inferior e Superior de Inflamabilidade para ar e oxigênio puro, bem como a Concentração Limite de Oxigênio.

Adicionalmente, foi implementada uma lógica algorítmica para a automatização do cálculo das variáveis de inflamabilidade, possibilitando a geração dinâmica dos diagramas ternários e a demarcação das regiões inflamável e não inflamável. Essa funcionalidade garantiu maior precisão e eficiência na interpretação dos resultados.

Com base na análise dos diagramas ternários e nos parâmetros calculados, foram estabelecidas tabelas com faixas de segurança para as misturas gasosas, garantindo conformidade com as diretrizes da NFPA 69/2019. Essas faixas de segurança são fundamentais para a mitigação de riscos operacionais em ambientes industriais, permitindo a definição de condições seguras de operação e reduzindo a probabilidade de explosões ou incêndios.

A metodologia aplicada neste estudo combinou pesquisa bibliográfica, coleta de dados experimentais, modelagem matemática e desenvolvimento computacional, resultando em uma abordagem robusta e confiável para a análise dos limites de inflamabilidade de gases siderúrgicos. A implementação de diagramas ternários e ferramentas automatizadas fortaleceu a capacidade de análise preditiva, fornecendo subsídios técnicos para a segurança industrial e controle operacional em plantas siderúrgicas.

A pesquisa apresentada pode ser classificada, segundo a metodologia científica, como uma investigação aplicada, descritiva e experimental. Trata-se de um estudo aplicado, pois busca solucionar um problema prático na indústria siderúrgica, fornecendo informações essenciais para a segurança operacional. Além disso, enquadra-se como descritivo, uma vez que caracteriza e analisa as propriedades de misturas gasosas inflamáveis, sistematizando dados a partir de normas e referências consolidadas. Por fim, possui um caráter experimental, visto que envolve a coleta de amostras em campo, análises laboratoriais por cromatografia gasosa e cálculos baseados em modelos

matemáticos para determinar os limites de inflamabilidade, resultando na construção de diagramas ternários que representam as condições seguras de operação.

Os resultados obtidos a partir dessa metodologia fornecem informações essenciais para a formulação de estratégias de mitigação de riscos e aprimoramento das práticas de segurança na manipulação de misturas gasosas inflamáveis, contribuindo para a eficiência e segurança dos processos industriais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análises de Inflamabilidade dos gases do processo siderúrgico

Inicialmente, coletou-se gases do processo siderúrgico conforme descrito na metodologia e seguindo a norma ASTM D1945-2014 para realização de ensaios cromatográficos para determinação de sua composição química e demais propriedades como Poder Calorífico Inferior (PCI) e densidade, conforme mostra a Tabela 1:

Tabela 1 - Resultados dos testes cromatográficos dos gases.

Gás	Composição Química (%)							Densidade Kg/Nm³	Poder Calorífico kcal/Nm³
	CO₂	C_mH_n	O₂	CO	CH₄	H₂	N₂		
COG	1,81%	3,74%	0,51%	6,45%	21,64%	58,40%	7,45%	0,53	4.050
BFG	21,13%	-	0,58%	24,80%	-	4,96%	48,53%	1,27	834
LDG	13,69%	-	0,23%	61,42%	-	0,96%	23,71%	1,30	1.790

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na tabela acima que a maior parte do conteúdo do composto de cada gás está dentro ou muito próximo das faixas de Caillat (2017). Destaca-se os riscos que esses gases representam no ambiente de trabalho quanto à sua toxicidade, relacionada principalmente ao teor de monóxido de carbono que é um gás de capacidade asfixiante além de ser inflamável

Através de pesquisa bibliográfica nas fontes: AMERICAN GAS ASSOCIATION (2001), CHEN (2011) e HANSEN e CROWL (2010) realizou-se a tabulação os dados dos limites de inflamabilidade superior e inferior dos principais componentes gasosos presentes das misturas combustíveis da indústria siderúrgica, bem como em gases de outros tipos de indústrias conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Compilado de dados dos Limites de Inflamabilidade no ar e no oxigênio

Componentes	LEL-ar (%)	UEL-ar (%)	LOL-O₂ (%)	UOL-O₂ (%)
Hidrogênio - H₂	4,00%	75,00%	4,00%	94,00%
Monóxido de Carbono - CO	12,50%	74,00%	15,50%	94,00%
Metano - CH₄	5,30%	14,00%	5,10%	61,00%
Propano - C₃H₈	2,20%	9,50%	2,30%	55,00%
Butano - C₄H₁₀	1,90%	8,50%	1,80%	49,00%
Propeno - C₃H₆	2,40%	10,40%	2,50%	60,00%

Isobutano - iso-C₄H₁₀	1,80%	8,40%	1,80%	48,00%
Eteno - C₂H₄	3,00%	12,50%	3,00%	80,00%
Etano - C₂H₆	3,00%	12,50%	3,00%	66,00%
Acetileno - C₂H₂	2,50%	81,00%	2,50%	96,00%
Benzeno - C₆H₆	1,40%	7,10%	2,80%	24,90%
Tolueno - C₇H₈	1,27%	6,75%	1,27%	24,90%
m, p Xileno - m, p C₈H₁₀	1,00%	6,00%	1,27%	24,90%
o Xileno - o C₈H₁₀	1,00%	6,00%	1,27%	24,90%
Amônia - NH₃	15,50%	26,60%	15,30%	79,00%
Sulfeto de Hidrogênio - H₂S	4,30%	45,50%	4,90%	66,00%
Naftaleno - C₁₀H₈	0,90%	5,90%	1,27%	24,90%

Fonte: Adaptado de AMERICAN GAS ASSOCIATION (2001), CHEN (2011) e HANSEN e CROWL (2010)

Realizou-se os cálculos dos Limites de Inflamabilidade das misturas descritas na tabela 1, de COG, BFG e LDG coletados na indústria utilizando como referência os dados compilados dos Limites de inflamabilidade individuais, calculando-os aplicando a Lei de Le Chatelier, conforme as fórmulas descritas anteriormente, levando-se em conta a proporção volumétrica de cada componente e o Limite de inflamabilidade individual obtido na literatura, tanto para a condição de mistura com o ar como de mistura com o oxigênio puro, conforme apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 - Resultados dos Limites de Inflamabilidade calculados.

Gas	LEL-ar (%)	UEL-ar (%)	LEL-O₂ (%)	UEL-O₂ (%)
COG	4,54%	29,78%	4,72%	76,69%
BFG	31,03%	74,16%	35,22%	94,00%
LDG	19,41%	74,02%	23,80%	94,00%

Fonte: Autoria própria.

A norma NFPA 69 fornece dados da Concentração Limite de Oxigênio (LOC) de diversos componentes individuais e é um dos parâmetros mais valiosos para o controle de segurança dos processos operacionais, sendo um dos pontos de interesse essenciais para construção do diagrama ternário de inflamabilidade, os dados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados das Concentrações Limite de Oxigênio para diversos componentes combustíveis.

Componentes	LOC (%)
Hidrogênio - H₂	4,60%
Monóxido de Carbono - CO	5,10%
Metano - CH₄	11,10%
Propano - C₃H₈	10,70%
Butano - C₄H₁₀	10,60%
Propeno - C₃H₆	10,00%
Isobutano - iso-C₄H₁₀	10,50%
Eteno - C₂H₄	8,50%
Etano - C₂H₆	9,50%
Acetileno - C₂H₂	6,20%
Benzeno - C₆H₆	11,40%
Tolueno - C₇H₈	9,50%
m, p Xileno - m, p C₈H₁₀	9,00%
o Xileno - o C₈H₁₀	9,00%
Amônia - NH₃	11,60%
Sulfeto de Hidrogênio - H₂S	6,40%
Naftaleno - C₁₀H₈	10,80%

Fonte: Autoria própria.

Seguindo a metodologia apresentada pela norma NFPA 69 – 2019 apresentada anteriormente, foram determinadas as Concentrações Limites de Oxigênio para os três gases. Também foram determinados os parâmetros de controle recomendados pela norma para instalações ou equipamentos Monitorados e Controlados Continuamente por Intertravamentos de Segurança (MCCIS) e Monitorados e Controlados Não Continuamente por Intertravamentos de Segurança (Não-MCCIS), apresentados na Tabela 5, considerando em ambos os casos a condição mais restritivamente segura abordada por o padrão.

Tabela 5 - Concentrações Limite de Oxigênio e níveis de controle de segurança recomendados de acordo com o tipo de instalação de acordo com a norma NFPA – 2019.

Gas	LOC (%O₂)	LOC recomendado (MCCIS) - (%O₂)	LOC recomendado (não-MCCIS) - (%O₂)
COG	7,80%	4,45%	2,97%
BFG	5,01%	3,00%	2,00%
LDG	5,09%	3,05%	2,03%

Fonte: Autoria própria.

Como mostrado anteriormente, os cálculos de LOC consideram apenas compostos combustíveis. Apesar dos compostos inertes e não combustíveis serem importantes na purga e na inertização, tornando a mistura menos inflamável ou não inflamável, se o teor de oxigênio estiver abaixo de LOC, a mistura não é inflamável. Em outras palavras, LOC previne o pior cenário possível, pois se não houver oxigênio para iniciar uma deflagração de chama, não ocorrerá incêndio ou explosão.

Portanto, o LOC destaca-se como parâmetro de controle da inflamabilidade da mistura em equipamentos industriais e tubulações. Não importa quão alto seja o teor de gases combustíveis na mistura, se não houver oxigênio suficiente para causar a oxidação dos compostos combustíveis, não causará a propagação da chama mesmo que haja uma fonte de ignição.

Em relação ao LOC do COG, seu maior percentual de gás combustível é dado pelo hidrogênio, que é um gás altamente inflamável que necessita de pouco oxigênio para oxidar a reação de combustão, na ordem de 4,60%. Porém, o LOC da mistura é influenciado principalmente pelo teor de hidrocarbonetos de 25,38%, uma vez que as cadeias de carbono desses compostos necessitam de maior teor de oxigênio para formar uma mistura inflamável, de 10,00 a 12,00%.

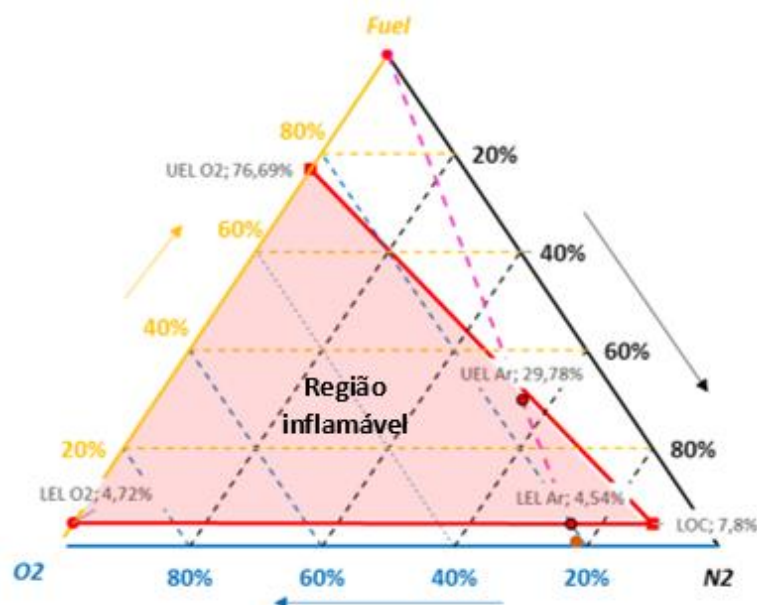
Nos casos BFG e LDG, apenas o monóxido de carbono e o hidrogênio aparecem como combustíveis em sua composição, diferindo apenas em relação à proporção entre eles em cada mistura. O monóxido de carbono é tão inflamável quanto o hidrogênio, necessitando apenas de 5,10% de oxigênio para propagar a chama. Apesar do BFG e do LDG apresentarem valores de LOC próximos, deve-se notar também que o BFG possui um teor de gás inerte bastante considerável, o que o torna menos energético e geralmente requer a utilização de outros gases com maior teor de combustível como estabilizadores em sua queima.

Embora a determinação do LOC conforme a norma NFPA 69 – 2019 ofereça boa precisão, os valores de segurança recomendados para o controle dos equipamentos devem

ser utilizados de forma adequada, monitorando-os da melhor forma possível, seja através de intertravamentos automáticos de segurança ou não, a norma apresenta fatores de segurança conforme a condição de segurança dos equipamentos e instalações. Esses fatores de segurança recomendados pela norma podem fazer a diferença em relação à ocorrência ou não de uma catástrofe. Além disso, é altamente recomendável tê-los como limite a nunca ser atingido e dividir esta faixa atribuindo alarmes aos equipamentos em percentuais menores dessa faixa, para que o sistema ofereça maior confiabilidade em termos de proteção contra incêndios e explosões.

Através dos resultados tabulados, destacando as cinco variáveis de interesse (LEL-ar, UEL-ar, LEL-O₂, UEL-O₂ e LOC) plotou-se o diagrama de inflamabilidade, mostrado na Figura 30, para as misturas de gases tratadas, no qual é possível identificar a região em que o combustível é inflamável em interação com as proporções de nitrogênio (inertizante) e oxigênio conforme diferentes combinações de misturas entre estes.

Figura 30 – Diagrama de inflamabilidade ternário do COG.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o diagrama de inflamabilidade do COG apresenta grande amplitude da região inflamável, principalmente em razão do alto teor de hidrogênio da mistura, caracterizando-o como uma mistura combustível que demanda razoável teor de oxigênio (7,8%), que influenciado pela presença de hidrocarbonetos tende a fazer com que o COG demande mais oxigênio do que o hidrogênio puro para realizar deflagração de chama.

Além da amplitude da região inflamável observada no diagrama, nota-se que a inclinação das fronteiras de inflamabilidade indica a influência dos demais componentes presentes na mistura, como o monóxido de carbono e os hidrocarbonetos leves. O monóxido de carbono, apesar de ser menos reativo que o hidrogênio, contribui para a extensão da zona inflamável, aumentando a faixa de concentração em que a mistura pode sustentar a combustão. Além disso, a presença de metano e outros hidrocarbonetos altera a estequiometria da combustão, tornando necessário um ajuste na proporção de oxigênio para garantir a ignição.

Outro aspecto relevante é a variação da inflamabilidade em função da diluição com nitrogênio, que atua como gás inerte, reduzindo a reatividade da mistura. O diagrama demonstra que, à medida que a concentração de nitrogênio aumenta, a faixa inflamável se estreita significativamente, evidenciando a possibilidade de controle da inflamabilidade por meio da inertização. Esse comportamento é fundamental para aplicações industriais, onde a adição de nitrogênio pode ser utilizada como estratégia de mitigação de riscos de explosão.

Além disso, a análise do diagrama permite identificar limites operacionais seguros para o manuseio e armazenamento do COG, contribuindo para a definição de diretrizes de segurança em processos industriais. A comparação com diagramas de outros gases industriais, como o gás de alto-forno (BFG) e o gás de aciaria (LDG), possibilita um entendimento mais abrangente sobre a variabilidade da inflamabilidade dos gases siderúrgicos e suas implicações para o controle de processos.

Adicionalmente, observa-se que a presença de hidrocarbonetos leves, como metano e etano, impacta diretamente a posição dos limites de inflamabilidade, ampliando a faixa na qual a mistura pode sustentar a combustão. Essa característica ressalta a complexidade da interação entre os componentes do gás e a necessidade de um controle rigoroso da composição para mitigar riscos industriais. Em comparação com gases de composição mais simples, como hidrogênio puro, o COG apresenta um comportamento inflamável menos previsível devido à variação da proporção de seus constituintes.

Outro fator relevante é a influência da pressão e temperatura na inflamabilidade da mistura. Embora o diagrama tenha sido construído para condições padrão, é sabido que o aumento da temperatura reduz a energia de ativação necessária para a ignição, podendo expandir ainda mais a zona inflamável. Esse aspecto é de extrema importância para processos siderúrgicos, pois apesar de nos processos de distribuição do gás não haverem modificações relevantes de temperatura, em equipamentos com condições onde

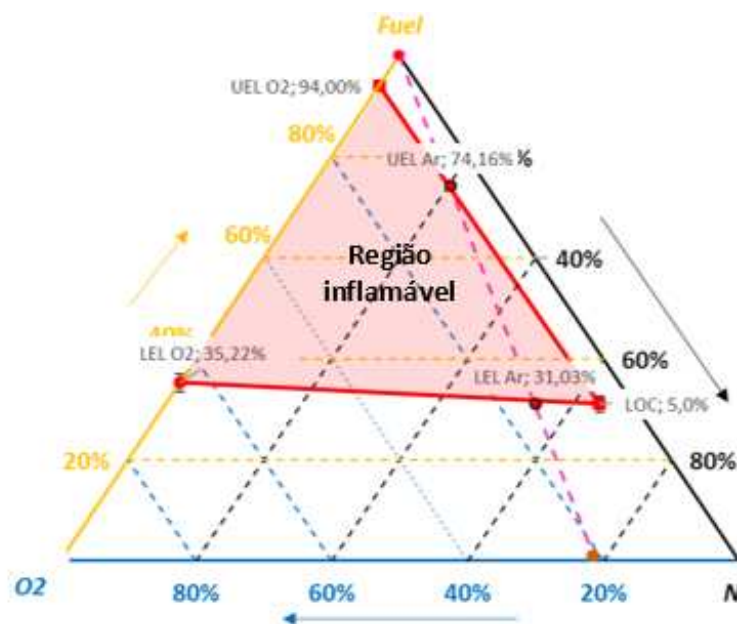
variações térmicas são constantes podem influenciar significativamente a segurança operacional. A alta reatividade do COG, em combinação com temperaturas elevadas, exige monitoramento contínuo para evitar cenários propícios à deflagração.

A análise do diagrama também permite avaliar o efeito da diluição com dióxido de carbono (CO_2), um dos constituintes do gás, que pode atuar como agente inerte, reduzindo a inflamabilidade da mistura. Diferente do nitrogênio, que apenas reduz a concentração do comburente sem reagir, o CO_2 pode influenciar a cinética da combustão, alterando a dinâmica da propagação da chama. Esse comportamento pode ser explorado no desenvolvimento de estratégias de segurança, como a recirculação de gases inertes para minimizar riscos de explosão em sistemas de tubulação e armazenamento.

Além disso, o diagrama ternário de inflamabilidade do COG serve como uma ferramenta essencial para modelagem preditiva e simulações computacionais de risco. Com a crescente automação dos processos industriais, a utilização desses diagramas na programação de sensores de detecção de gases e nos sistemas de controle de atmosfera explosiva pode otimizar a segurança em plantas siderúrgicas. A identificação de regiões seguras e perigosas dentro do diagrama permite estabelecer protocolos operacionais, como limites críticos de ventilação e porcentagem máxima de oxigênio permitida em diferentes pontos do processo.

Sendo assim, a construção do diagrama fornece um embasamento quantitativo para estudos comparativos entre diferentes composições de COG provenientes de variadas fontes industriais. Pequenas variações na composição do gás, decorrentes de alterações nos processos de coqueificação ou nas condições de operação do alto-forno, podem modificar os limites de inflamabilidade e, conseqüentemente, impactar as estratégias de controle de segurança. Assim, a constante atualização desses diagramas, considerando novas composições e condições operacionais, é fundamental para manter a confiabilidade das análises de risco e garantir maior segurança nos processos industriais que fazem uso do gás COG.

Figura 31 – Diagrama de inflamabilidade ternário do BFG.



Fonte: Autoria própria.

No diagrama de inflamabilidade do BFG, apresentado na Figura 31, o teor de inertes faz com que a amplitude da região inflamável seja reduzida, bem como que seja localizada mais distante do eixo horizontal. Um outro aspecto relevante observado no diagrama é a influência do monóxido de carbono (CO) como principal componente combustível do BFG. Apesar de ser um gás inflamável, sua capacidade de sustentar a propagação da chama é inferior à de hidrocarbonetos ou hidrogênio, exigindo uma concentração mínima de oxigênio na ordem de 5% para ocorrer a ignição. Esse valor relativamente baixo sugere que, mesmo com a presença de inertes, o BFG ainda pode apresentar risco de inflamabilidade em determinadas condições operacionais, especialmente em ambientes confinados onde o acúmulo do gás pode levar a atmosferas potencialmente perigosas.

Além dessas observações, nota-se que a elevada concentração de dióxido de carbono (CO₂) e nitrogênio (N₂) no BFG exerce um forte efeito diluente, limitando a propagação da chama e reduzindo significativamente a reatividade da mistura. Esse comportamento justifica a necessidade de um maior enriquecimento com oxigênio ou a adição de combustíveis auxiliares para otimizar a eficiência da combustão em processos industriais que utilizam BFG como fonte energética, como é o caso da utilização de gás misto de BFG com COG nos processos de pré-aquecimento do ar nos regeneradores do Alto Forno, antes de efetuar o sopro nas ventaneiras desse equipamento.

Outro fator que pode ser explorado a partir do diagrama ternário é a interação do BFG com outros combustíveis em sistemas de combustão híbridos. Em muitos casos, o BFG é misturado com outros gases siderúrgicos, como o COG, para melhorar seu poder calorífico e otimizar sua combustão. A análise conjunta dos diagramas de inflamabilidade desses dois gases permite estimar a faixa segura de operação e determinar as proporções ideais para maximizar a eficiência energética sem comprometer a segurança do processo.

Além disso, a composição do BFG pode variar conforme o regime de operação do alto-forno, impactando diretamente sua inflamabilidade. Pequenas variações no teor de CO e CO₂, por exemplo, podem alterar os limites de inflamabilidade e deslocar a posição da região inflamável no diagrama. Dessa forma, o monitoramento contínuo da composição do BFG é essencial para a segurança industrial, garantindo que os processos de combustão sejam ajustados conforme a disponibilidade e as características do gás gerado.

Outro ponto relevante é a comparação do BFG com outros gases siderúrgicos, como o COG e o LDG. Enquanto o COG possui uma ampla zona inflamável devido ao alto teor de hidrogênio, o BFG, por conter majoritariamente monóxido de carbono (CO), apresenta uma região de inflamabilidade mais restrita. Esse fator impacta diretamente a segurança e o controle operacional, exigindo um monitoramento rigoroso das condições de oxidação e ventilação para evitar acumulações perigosas do gás em ambientes fechados em caso de apagamento de chama.

A posição deslocada da zona inflamável no diagrama ternário indica que o BFG requer uma proporção mais específica de oxigênio para sustentar a combustão de forma eficiente. Essa característica pode influenciar a estratégia de queima do gás em equipamentos industriais, como fornos e caldeiras, onde ajustes na relação ar/combustível são essenciais para garantir uma combustão completa e muitas vezes se utilizam queimadores auxiliares com COG ou gás natural para prevenir o apagamento de chama e minimizar emissões poluentes.

Além disso, o comportamento do BFG em diferentes temperaturas deve ser considerado. A elevação da temperatura pode expandir ligeiramente a zona inflamável, tornando o gás mais reativo em condições operacionais de alta energia térmica. Esse fator reforça a importância da modelagem preditiva para avaliar o risco de ignição espontânea em locais onde o BFG é armazenado ou transportado.

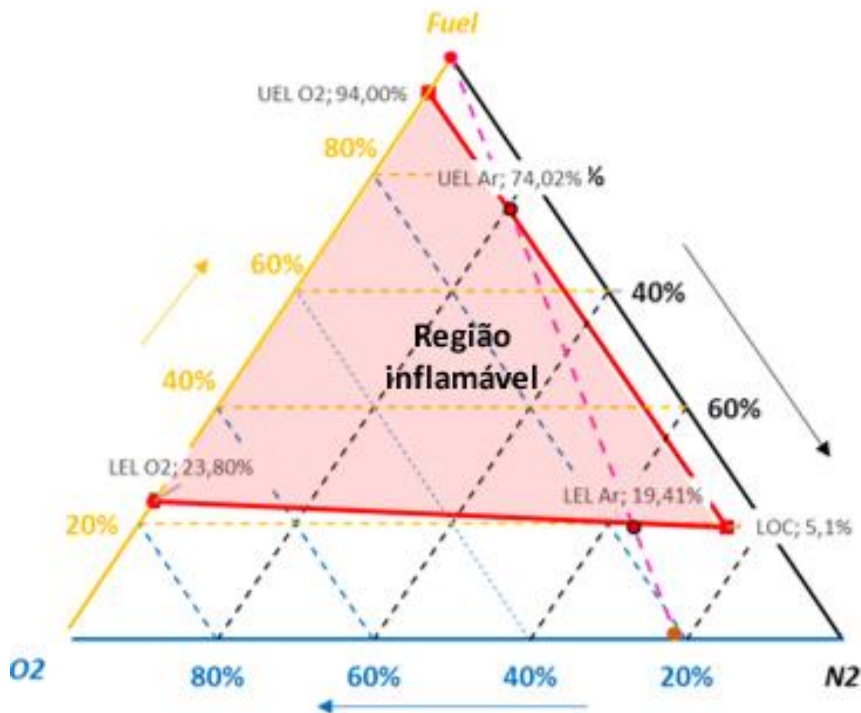
A análise do diagrama ternário também evidencia o impacto da variação na composição do BFG, que pode flutuar de acordo com a eficiência do alto-forno e o tipo

de matéria-prima utilizada. Pequenos desvios na concentração de CO e CO₂ podem modificar a posição da região inflamável, tornando necessário o acompanhamento contínuo das propriedades do gás para garantir uma operação segura e eficiente.

A partir da análise do diagrama ternário do BFG, também é possível avaliar estratégias para reduzir emissões poluentes. A queima incompleta desse gás pode gerar produtos indesejáveis, como monóxido de carbono residual e hidrocarbonetos não queimados, contribuindo para a poluição atmosférica. O estudo detalhado da zona inflamável auxilia na otimização das condições de combustão, promovendo uma queima mais completa e eficiente, reduzindo emissões e melhorando o desempenho ambiental da indústria siderúrgica.

Por fim, a construção do diagrama ternário do BFG fornece uma ferramenta valiosa para a otimização de processos térmicos na siderurgia. A identificação precisa dos limites de inflamabilidade auxilia na definição de parâmetros seguros de queima, reduzindo o risco de explosões acidentais e garantindo melhor aproveitamento energético desse subproduto industrial.

Figura 32 – Diagrama de inflamabilidade ternário do LDG.



Fonte: Autoria própria.

O gás do conversor LD (LDG) é gerado durante o refino do ferro-gusa no conversor LD, sendo composto predominantemente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂) e dióxido de carbono (CO₂). Apesar de possuir

composição similar ao gás de alto-forno (BFG), apresenta proporções distintas, com um teor mais elevado de combustível e menor quantidade de inertes, o que influencia diretamente sua inflamabilidade.

A análise do diagrama ternário de inflamabilidade do LDG confirma que sua região inflamável é mais ampla do que a do BFG, indicando um maior potencial energético e maior facilidade de ignição. Esse comportamento ocorre devido à presença mais expressiva de CO, conhecido por sua elevada reatividade com o oxigênio. A concentração limite de oxigênio (LOC) de 5,1% sugere que essa mistura gasosa pode entrar em combustão com baixos teores de oxigênio, representando um risco operacional relevante e exigindo um controle rigoroso da atmosfera em instalações que manipulam esse gás.

A presença do CO como principal combustível no LDG influencia diretamente a faixa inflamável da mistura. O CO tem um comportamento peculiar, pois possui um limite de inflamabilidade relativamente estreito quando comparado a hidrocarbonetos, mas sua presença em grandes quantidades torna o LDG altamente inflamável. Esses fatores tornam o LDG um gás que, mesmo com pequenas quantidades de oxigênio, pode facilmente sofrer deflagração.

Além disso, a presença de inertes, como o dióxido de carbono (CO_2) e o nitrogênio (N_2), desempenha um papel importante na modulação da inflamabilidade. O CO_2 absorve calor durante a combustão, reduzindo a velocidade da chama e tornando a propagação do fogo menos intensa, enquanto o N_2 atua como diluente, restringindo a propagação da chama e aumentando a quantidade de oxigênio necessária para que a combustão ocorra. Entretanto, como o teor de inertes no LDG é inferior ao do BFG, sua mistura ainda apresenta alta inflamabilidade.

A pressão e temperatura são variáveis fundamentais que podem modificar o comportamento inflamável do LDG. Em sistemas pressurizados, a mistura pode se tornar mais propensa à ignição, pois a compressão do gás aumenta a densidade das moléculas reativas, facilitando a combustão. Além disso, temperaturas elevadas expandem a zona inflamável do diagrama ternário, aumentando o risco de ignição acidental. Esse fator é especialmente relevante em fornos siderúrgicos, caldeiras e outros sistemas térmicos, onde o controle da temperatura e da ventilação desempenha um papel essencial na segurança operacional.

Ao comparar o LDG com os outros gases analisados, como o COG (gás de coqueria) e o BFG (gás de alto-forno), observa-se que o LDG apresenta maior

inflamabilidade do que o BFG devido ao seu teor reduzido de inertes e maior concentração de CO e H₂. Já o BFG, por conter mais CO₂ e N₂, possui uma região inflamável mais restrita e necessita de uma maior concentração de oxigênio para sustentar a combustão.

Em relação ao COG, este possui hidrocarbonetos leves, como metano e etileno, que contribuem para uma chama mais energética e um diagrama de inflamabilidade mais amplo. O LDG, por outro lado, tem sua combustão dominada pelo CO, resultando em uma ignição mais fácil, porém com menor liberação de energia por unidade de volume. Dessa forma, o LDG se encontra em uma posição intermediária entre os outros dois gases, possuindo uma inflamabilidade maior que a do BFG, mas menor que a do COG em termos de energia de combustão.

Os resultados obtidos no diagrama ternário de inflamabilidade reforçam a necessidade de medidas de segurança rigorosas para a manipulação e armazenamento do LDG. O monitoramento da concentração de oxigênio é fundamental, pois o LDG pode inflamar com baixos teores de O₂, tornando essencial o uso de sensores para garantir que a atmosfera ao redor do gás permaneça segura. Além disso, a ventilação adequada deve ser garantida para evitar o acúmulo de misturas inflamáveis no ambiente.

Do ponto de vista ambiental, a presença de CO no LDG é um fator crítico. O CO é um gás tóxico e poluente, exigindo medidas rigorosas para evitar emissões descontroladas. Uma queima eficiente do LDG reduz as emissões de CO e melhora o aproveitamento energético do gás, aumentando a sustentabilidade do processo siderúrgico. Além disso, a utilização otimizada do LDG pode contribuir para a redução de custos operacionais, uma vez que seu aproveitamento como combustível auxilia na diminuição da demanda por fontes energéticas externas. A análise do diagrama ternário auxilia no desenvolvimento de estratégias para melhorar a eficiência da queima, garantindo maior aproveitamento térmico e menor impacto ambiental.

A análise do diagrama ternário de inflamabilidade do LDG evidencia sua alta reatividade e facilidade de ignição, especialmente devido à presença significativa de CO. A região inflamável ampliada e a baixa LOC de 5,1% indicam que esse gás requer rigoroso controle operacional, especialmente no que se refere à ventilação, controle de oxigênio e prevenção de faíscas. Além disso, sua utilização como combustível deve ser otimizada para garantir eficiência energética e redução de emissões, minimizando o impacto ambiental da queima.

A modelagem baseada no diagrama ternário permite que indústrias siderúrgicas otimizem o uso do LDG, maximizando seu aproveitamento enquanto garantem a segurança das operações. Dessa forma, a compreensão detalhada dos parâmetros de inflamabilidade do LDG contribui diretamente para a prevenção de riscos industriais, aumento da eficiência energética e aprimoramento das estratégias de segurança no setor siderúrgico.

4.2. Sistema de análise de inflamabilidade de misturas combustíveis

A partir dos resultados compilados e apresentados anteriormente, desenvolveu-se uma interface gráfica no Microsoft Excel, mostrada nas Figuras 33 e 34, por meio da implementação de rotinas de cálculo baseadas nas formulações descritas, permitindo a simulação do comportamento de inflamabilidade de diversas misturas gasosas inflamáveis. O sistema inclui tabelas com parâmetros de controle relevantes e margens de segurança conforme a norma NFPA 69, proporcionando uma ferramenta robusta para análise de riscos e tomada de decisões em ambientes industriais.

A interface foi projetada para automatizar os cálculos dos limites de inflamabilidade, concentração limite de oxigênio (LOC) e outras variáveis fundamentais, além de apresentar os resultados de forma intuitiva por meio de diagramas ternários interativos. Sua usabilidade foi otimizada com botões de seleção que permitem escolher composições padrão obtidas nas análises laboratoriais, além de possibilitar ajustes personalizados das proporções dos componentes, o que se torna essencial para acompanhar variações operacionais e prever possíveis cenários de risco. Dessa forma, a ferramenta não apenas simplifica a simulação do comportamento de inflamabilidade dos gases siderúrgicos, como também possibilita um planejamento mais confiável para intervenções operacionais e manutenções nas instalações de transporte e armazenamento desses gases.

Além da capacidade de ajuste da composição, a interface também permite a simulação de misturas de gases em diferentes proporções, ampliando suas aplicações para diversos contextos industriais. Por exemplo, é possível avaliar o comportamento da inflamabilidade do gás misto de COG (gás de coqueria) e BFG (gás de alto-forno), utilizado nos regeneradores do alto-forno, bem como misturas de BFG com gás natural, prática comum para melhorar a estabilidade da chama em processos de combustão. Essas simulações permitem otimizar o consumo de combustíveis, garantindo maior eficiência energética e segurança operacional.

Outro diferencial da ferramenta é sua versatilidade, permitindo o estudo de gases além do setor siderúrgico. O sistema pode ser aplicado na análise de misturas de gás em indústrias petroquímicas, químicas e sistemas de biogás, possibilitando a previsão do comportamento inflamável de diferentes composições encontradas nesses setores. A simulação de cenários com variações de composição em função da dinâmica dos processos industriais auxilia na formulação de estratégias para mitigação de riscos, controle de atmosferas explosivas e otimização do uso dos gases combustíveis.

Além da geração dos diagramas ternários, o sistema dispõe de funcionalidades adicionais, como a exibição automática de pontos críticos da mistura, incluindo limites superior e inferior de inflamabilidade em diferentes atmosferas e faixas seguras de operação. Essas informações são fundamentais para a avaliação da segurança em processos industriais, auxiliando na implementação de controles adequados e na tomada de decisões estratégicas para mitigação de riscos.

Dessa forma, o sistema desenvolvido apresenta-se como uma ferramenta eficiente e acessível para o monitoramento da inflamabilidade de misturas gasosas, permitindo análises detalhadas e previsões seguras para diferentes cenários operacionais. Seu uso não apenas contribui para a segurança na manipulação de gases inflamáveis, mas também auxilia na otimização energética e no aprimoramento das estratégias de controle em diversos setores industriais.

Figura 33 – Interface do sistema de simulação do comportamento de inflamabilidade – Mostrando botão composição padrão COG.

Componentes	Valor	Unidade	Densidade NTP	Densidade Px-Ty
Amônia - NH ₃	0.016	%	0.73 kg/Nm ³	0.77 kg/Nm ³
Propeno - C ₃ H ₆	0.198	%	1.79 kg/Nm ³	1.92 kg/Nm ³
Propano - C ₃ H ₈	0.055	%	1.67 kg/Nm ³	2.01 kg/Nm ³
Isobutano - iso-C ₄ H ₁₀	0.003	%	2.49 kg/Nm ³	2.67 kg/Nm ³
Oxigênio - O ₂	0.503	%	1.33 kg/Nm ³	1.43 kg/Nm ³
Nitrogênio - N ₂	7.216	%	1.16 kg/Nm ³	1.24 kg/Nm ³
Monóxido de Carbono - CO	5.365	%	1.25 kg/Nm ³	1.34 kg/Nm ³
Metano - CH ₄	22.163	%	0.72 kg/Nm ³	0.77 kg/Nm ³
Dióxido de Carbono - CO ₂	1.480	%	1.83 kg/Nm ³	1.96 kg/Nm ³
Etileno - C ₂ H ₄	1.707	%	1.60 kg/Nm ³	1.53 kg/Nm ³
Etilano - C ₂ H ₆	0.902	%	1.34 kg/Nm ³	1.33 kg/Nm ³
Acetileno - C ₂ H ₂	0.049	%	1.11 kg/Nm ³	1.23 kg/Nm ³
Hidrogênio - H ₂	57.542	%	0.09 kg/Nm ³	0.09 kg/Nm ³
Benzeno - C ₆ H ₆	7.906	%	3.84 kg/Nm ³	4.12 kg/Nm ³
Tolueno - C ₇ H ₈	0.634	%	4.11 kg/Nm ³	4.41 kg/Nm ³
n, p Xileno - m, p C ₈ H ₁₀	0.118	%	0.00 kg/Nm ³	0.00 kg/Nm ³
o Xileno - o C ₈ H ₁₀	0.028	%	0.00 kg/Nm ³	0.00 kg/Nm ³
Estileno - C ₈ H ₈	0.057	%	0.00 kg/Nm ³	0.00 kg/Nm ³
Sulfeto de Hidrogênio - H ₂ S	0.205	%	1.43 kg/Nm ³	1.53 kg/Nm ³
Butano - C ₄ H ₁₀	0.001	%	2.54 kg/Nm ³	2.73 kg/Nm ³
Total	100.00%			

COG
padrão

BFG
padrão

LDG
padrão

Pressão:

Temperatura:

Resultados da mistura gasosa:

Densidade NTP:

Densidade Px-Ty:

PCE:

LEL no ar:

NFPA 69 LEL no ar:

NFPA 69 UEL no ar:

LEL em O₂:

UEL em O₂:

NFPA 69 LEL em O₂:

NFPA 69 UEL em O₂:

LOC:

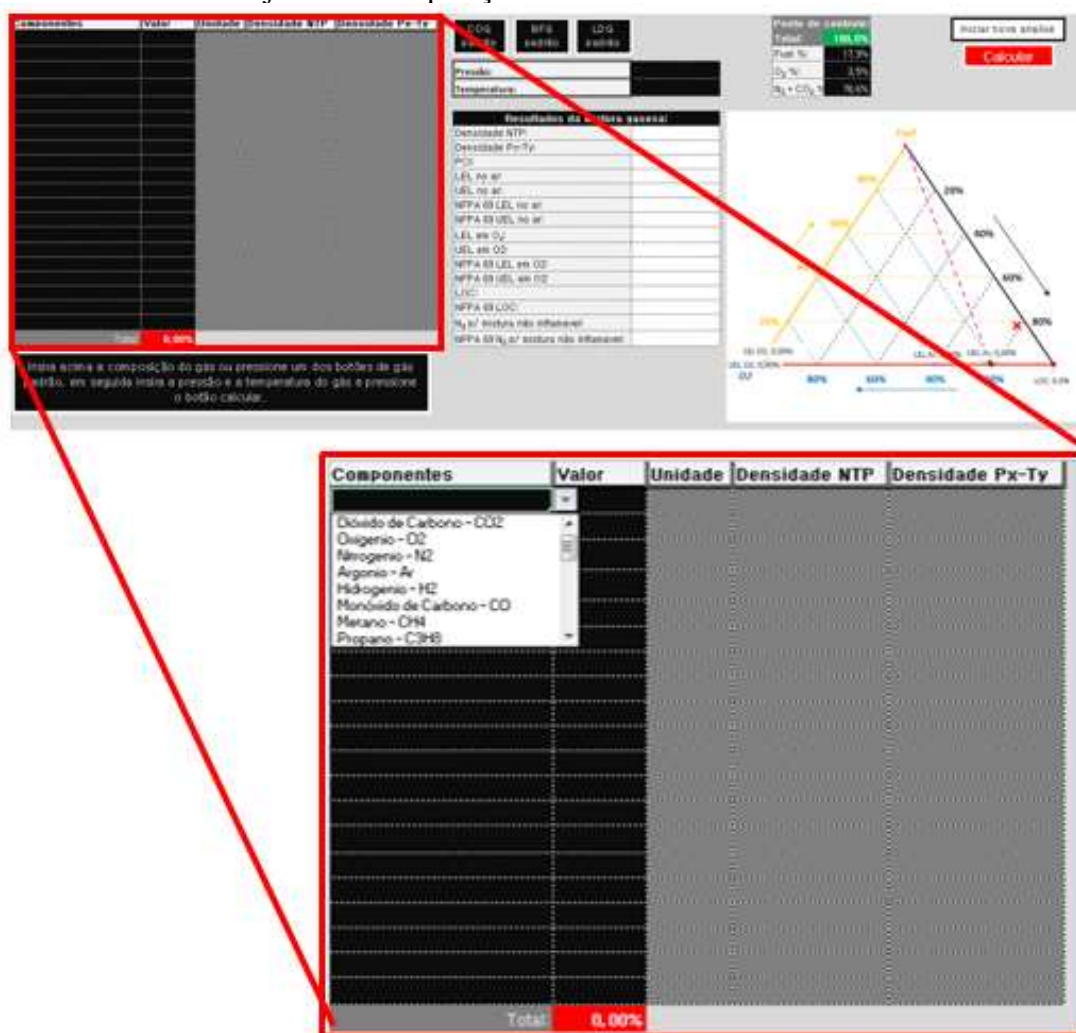
NFPA 69 LOC:

N₂ p/ mistura não inflamável:

NFPA 69 N₂ p/ mistura não inflamável:

Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Interface do sistema de simulação do comportamento de inflamabilidade – Mostrando tabela de ajuste de composição.



Fonte: Autoria própria.

O percentual da proporção de cada componente escolhido na caixa de seleção pode ser ajustado digitando o seu valor diretamente na interface, sendo necessário que a soma totalize 100%. Para facilitar a conferência, um indicador visual na interface muda para a cor verde quando a soma dos componentes atinge o valor correto, permitindo que a análise seja realizada. Caso o total fique acima ou abaixo de 100%, o indicador permanecerá em vermelho, alertando o usuário para a necessidade de ajuste antes de prosseguir com os cálculos.

Além dessa funcionalidade de ajuste de composição, a interface exibe, de forma pré-definida, os valores de densidade de cada componente nas condições padrão de temperatura e pressão. No entanto, um diferencial do sistema é que ele também permite a personalização das condições operacionais, possibilitando que o usuário ajuste a temperatura e a pressão da mistura conforme necessário. Com esses ajustes, o software

recalcula automaticamente a densidade média da mistura, considerando as novas condições especificadas. Esse recurso é essencial para simulações mais precisas, pois permite avaliar o comportamento da mistura gasosa em diferentes cenários operacionais, como variações sazonais de temperatura ou mudanças nas condições de processo dentro da indústria.

Outro aspecto importante da interface é que, além da densidade, os cálculos incorporam a influência da composição na relação de equivalência e no poder calorífico da mistura, permitindo análises mais abrangentes para a caracterização dos gases. Dessa forma, o sistema não apenas facilita o ajuste da composição para simulação da inflamabilidade, mas também fornece informações detalhadas sobre as propriedades físicas da mistura, auxiliando na otimização do uso dos gases e no planejamento de segurança.

Figura 35 – Interface do sistema de simulação do comportamento de inflamabilidade – Botões “Calcular” e “Iniciar nova análise”.

Ponto de controle:	
Total:	100,0%
Fuel %:	17,9%
O ₂ %:	3,5%
N ₂ + CO ₂ %:	78,6%

Fonte: Autoria própria.

Ao configurar uma combinação de componentes ou ao pressionar um dos botões dos gases siderúrgicos padrão e, em seguida, pressionar o botão "Calcular", na Figura 35, os dados processados serão automaticamente exibidos na tabela de resultados, apresentando os parâmetros relevantes da mistura, como limites de inflamabilidade, concentração limite de oxigênio (LOC) e densidade média da mistura. Simultaneamente, o diagrama ternário de inflamabilidade será gerado e plotado na interface, permitindo uma visualização gráfica das zonas inflamáveis e não inflamáveis da mistura selecionada.

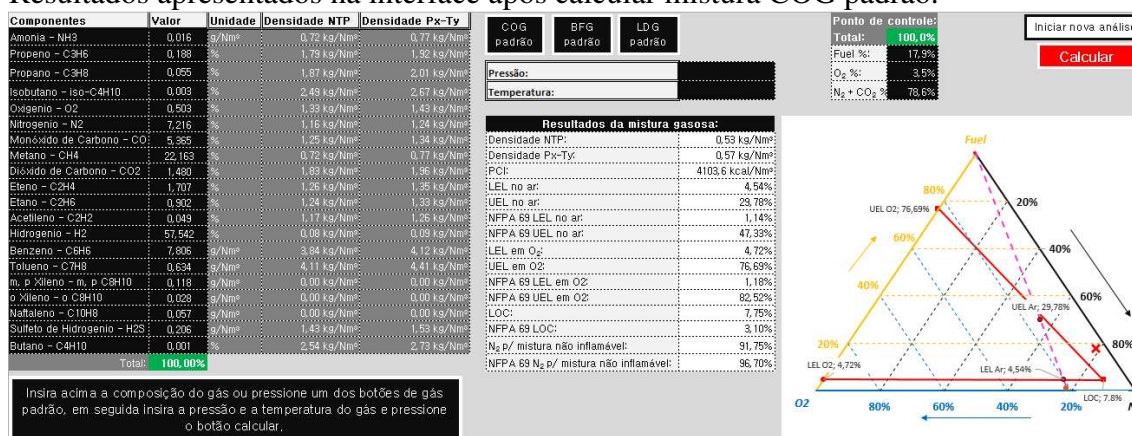
Caso seja necessário realizar um novo estudo, o usuário pode pressionar o botão "Iniciar Nova Análise", que irá limpar automaticamente as proporções dos componentes da mistura, os valores da tabela de resultados e o diagrama ternário exibido. Esse procedimento garante que cada simulação seja conduzida de forma independente, evitando interferências entre análises anteriores e novas composições.

Outro aspecto relevante da ferramenta é sua capacidade de ajuste dinâmico da composição em tempo real. Caso um dos componentes tenha sua proporção alterada manualmente, os cálculos são automaticamente atualizados, refletindo as mudanças no

diagrama ternário sem a necessidade de repetir todo o processo de configuração. Isso torna o sistema altamente intuitivo e eficiente para simulações rápidas e ajustes operacionais.

Dessa forma, o sistema desenvolvido não apenas automatiza os cálculos dos limites de inflamabilidade e exibe os diagramas ternários, conforme mostrado na Figura 36, mas também proporciona uma interface interativa e flexível para otimização da segurança e controle operacional no uso de misturas gasosas.

Figura 36 – Interface do sistema de simulação do comportamento de inflamabilidade – Resultados apresentados na interface após calcular mistura COG padrão.

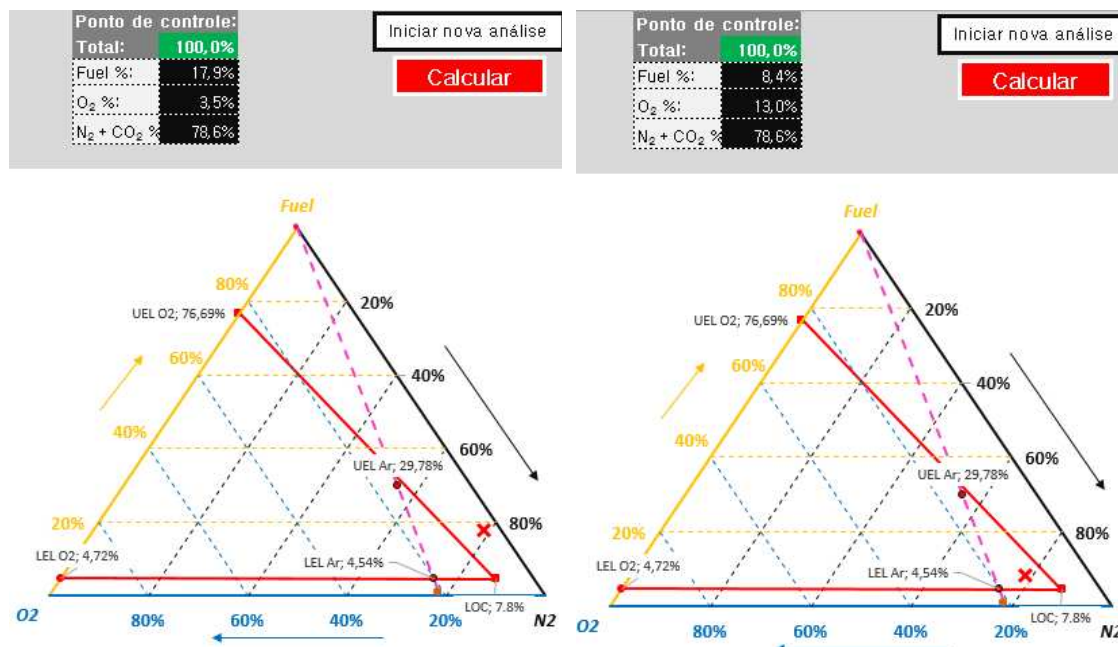


Fonte: Autoria própria.

No diagrama ternário de inflamabilidade, é possível estabelecer um ponto de controle, representado pelo “x” vermelho representado na Figura 37, que serve como indicador das interações entre o gás combustível, o oxigênio e o nitrogênio. Esse ponto de controle permite prever o comportamento do sistema sob diferentes condições, como a adição de oxigênio ou nitrogênio, comuns em operações de inertização ou em situações de contaminação acidental da rede de gás com oxigênio. Tais interações influenciam diretamente a posição do ponto de controle dentro do diagrama, o que implica em uma alteração da zona em que o sistema se encontra, podendo transitar entre as regiões inflamáveis ou não inflamáveis.

À medida que a proporção desses compostos é ajustada, o ponto de controle se desloca, refletindo as mudanças nas condições de risco. Dessa forma, a análise do ponto de controle no diagrama ternário oferece uma ferramenta importante para a avaliação de riscos em processos, permitindo um acompanhamento dinâmico da segurança operacional e facilitando a tomada de decisões durante intervenções ou modificações no processo. Essa abordagem contribui para uma gestão mais eficaz dos riscos associados a variações na composição do gás e nas condições operacionais.

Figura 37 – Interface do sistema de simulação do comportamento de inflamabilidade – Modificação da posição do ponto de controle no diagrama após modificação da proporção combustível (fuel)-oxigênio-nitrogênio.



Fonte: Autoria própria.

A interface do sistema de cálculo de inflamabilidade não apenas apresenta os resultados calculados da mistura de gases, mas também disponibiliza uma tabela detalhada com os parâmetros comportamentais da mistura previamente definida. Esta tabela inclui os valores calculados dos principais parâmetros de inflamabilidade, acompanhados das margens de segurança mais rigorosas, especialmente indicadas para sistemas não controlados ou que não são monitorados de forma contínua por intertravamentos de segurança, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma NFPA 69. A inclusão dessas margens de segurança é fundamental para garantir a operação em condições de risco minimizado, permitindo que os operadores possam identificar rapidamente se o sistema está fora das condições seguras de operação.

Adicionalmente, a tabela também exibe parâmetros termodinâmicos cruciais, como o Poder Calorífico, a densidade e o percentual de nitrogênio necessário para tornar a mistura inerte, oferecendo uma visão completa e abrangente da composição e comportamento do sistema de gás. Estes parâmetros não só são importantes para avaliar a eficiência energética e a segurança do processo, mas também para ajustar as condições de operação e garantir a integridade do sistema, especialmente em cenários de injeção de nitrogênio, onde o controle preciso da inércia da mistura é essencial. A combinação desses

dados permite uma análise detalhada e integrada, proporcionando aos usuários as ferramentas necessárias para a gestão eficiente do risco de inflamabilidade e a otimização dos processos em ambientes industriais.

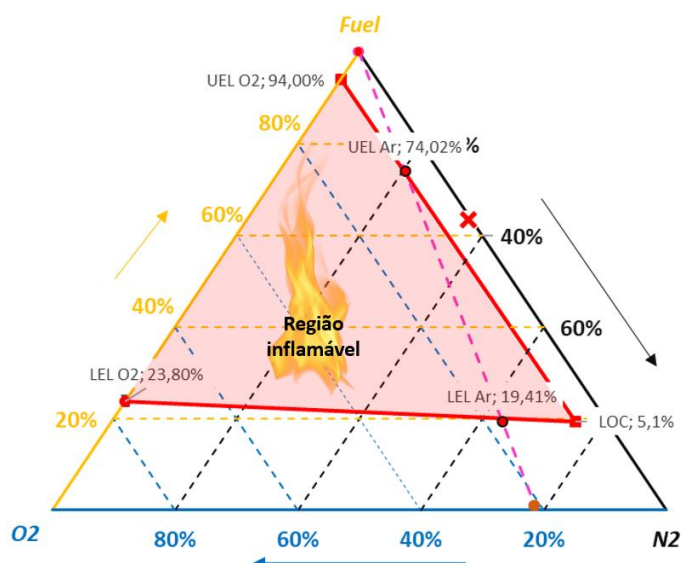
4.3. Estudo de caso de aplicação do sistema – Simulação de um processo de aspiração de ar para a rede de LDG devido falha em um equipamento turbo compressor

A aplicação do diagrama ternário de inflamabilidade no estudo do comportamento de uma mistura de Gás de Aciaria (LDG) em um processo de contaminação acidental por ar foi realizada por meio de uma simulação baseada na iteração em diferentes cenários de adição de ar ao sistema. O objetivo deste estudo de caso foi observar o deslocamento do ponto de controle dentro do diagrama, à medida que o ar, composto principalmente por oxigênio (21%) e nitrogênio (78%), é progressivamente acrescentado à mistura de LDG e inertes ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$), simulando uma falha de equipamento que resulta na aspiração acidental de ar.

Passo 1: Condição inicial (Sem ar acrescentado):

No Passo 1, a mistura inicial consiste em 63,5% de LDG (combustível), 36% de inertes ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$), e 0,5% de O_2 . Não há adição de ar neste estágio. O ponto de controle “x” se encontra, neste cenário, bem distante da região inflamável do diagrama ternário, conforme mostra a Figura 38, já que a concentração de oxigênio é baixa (0,5%) não oferecendo riscos e a mistura de gases está composta majoritariamente por inertes que não contribuem para a combustão. O sistema encontra-se, portanto, em uma região não inflamável, com uma margem de segurança significativa para o risco de ignição.

Figura 38 – Diagrama na condição do passo 1.

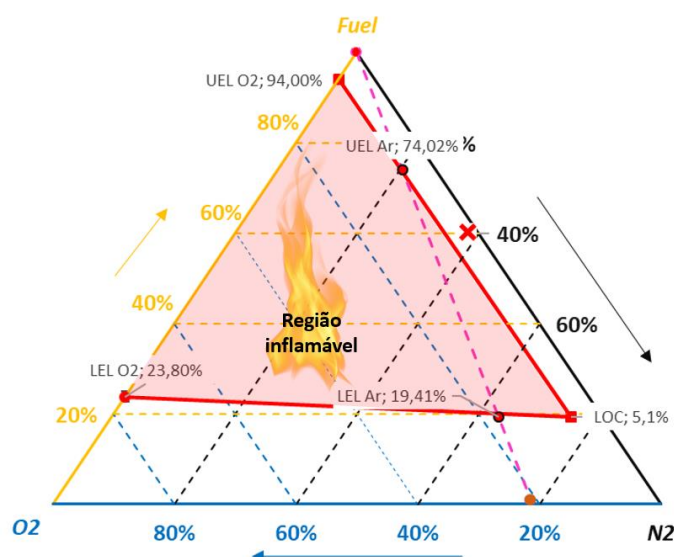


Fonte: Autoria própria.

Passo 2: Introdução de 5% de ar:

No Passo 2, a proporção da fração combustível de LDG diminui para 60,3%, enquanto a porcentagem de inertes ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$) sobe para 38,1% devido ao teor de nitrogênio presente no ar. A quantidade de oxigênio na mistura aumenta para 1,6%, com a introdução de 5% de ar. Esse acréscimo de ar faz com que o ponto de controle “x” comece a se deslocar gradualmente em direção à região inflamável no diagrama ternário, conforme mostra a Figura 39. A mistura ainda se mantém fora da zona de inflamabilidade, mas já há uma redução na margem de segurança. A interação entre a adição de oxigênio e a composição de inertes faz com que o ponto de controle se aproxime da linha limite entre a zona não inflamável e a zona inflamável.

Figura 39 – Diagrama na condição do passo 2.



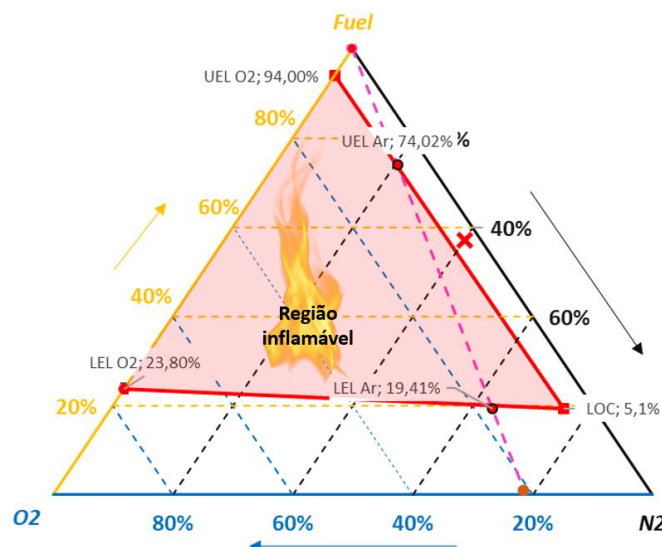
Fonte: Autoria própria.

Passo 3: Introdução de 10% de ar:

No Passo 3, a concentração da fração combustível de LDG diminui ainda mais, alcançando 57,2%, enquanto a proporção de inertes atinge 40,2%, devido ao teor de nitrogênio presente no ar. A concentração de oxigênio chega a 2,6%, com a introdução de 10% de ar. Nesse ponto, o deslocamento do ponto de controle “x” dentro do diagrama ternário é mais evidente, com a mistura agora se aproximando significativamente da região inflamável, apesar de ainda não atingir a concentração limite de oxigênio (LOC), conforme mostrado na Figura 40. A adição de ar aumenta ainda mais o oxigênio disponível na mistura, reduzindo a margem de segurança e indicando que o risco de

inflamabilidade está aumentando. A mistura está muito próxima da zona de ignição, mas ainda se mantém ligeiramente fora dela.

Figura 40 – Diagrama na condição do passo 3.

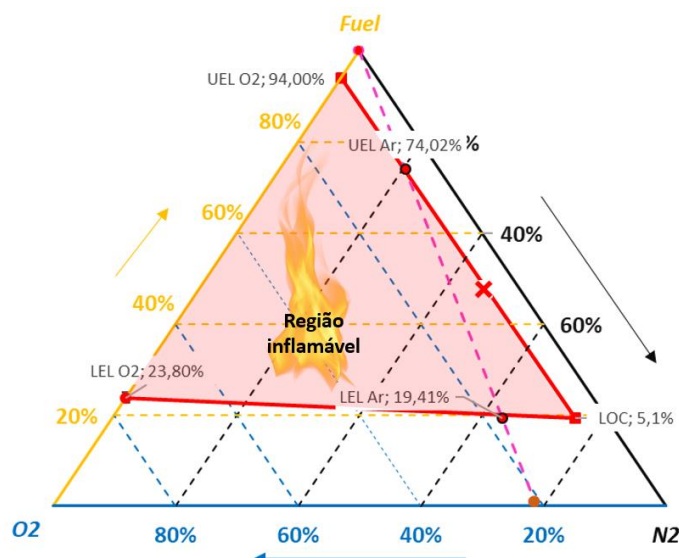


Fonte: Autoria própria.

Passo 4: Introdução de 25% de ar:

No Passo 4, a concentração da fração combustível de LDG diminui para 47,6%, os inertes aumentam para 46,5%, devido ao teor de nitrogênio presente no ar, e a quantidade de oxigênio sobe para 5,9%, com a introdução de 25% de ar. Neste estágio, o ponto de controle “x” entra efetivamente na região inflamável do diagrama ternário, conforme mostra a Figura 41, e o teor de oxigênio agora já é superior ao LOC de 5,1%. A mistura agora está em uma condição em que a combustibilidade do sistema é alta, devido à significativa concentração de oxigênio, alarmes e intertravamentos devem ser acionados e a operação deve intervir injetando inertes e contendo a falha que resultou na aspiração de ar imediatamente. Esse deslocamento para a zona inflamável indica que a mistura se tornou susceptível à ignição sob as condições atuais, o que representa um risco operacional crítico, caso o processo não seja controlado adequadamente. A entrada de ar no sistema resultou em um aumento substancial na proporção de oxigênio, facilitando a combustão.

Figura 41 – Diagrama na condição do passo 4.

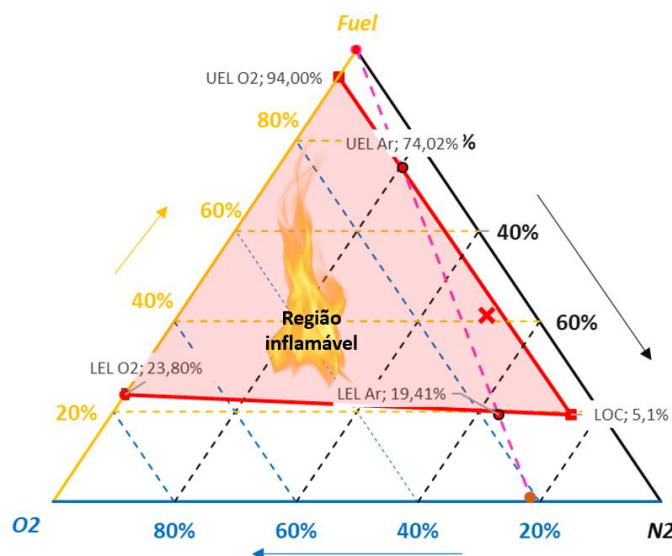


Fonte: Autoria própria.

Passo 5: Introdução de 35% de ar:

No Passo 5, a concentração da fração combustível de LDG continua a diminuir, agora com 41,3%, os inertes aumentam para 50,7%, e o oxigênio atinge 8,0%, com a adição de 35% de ar. Neste último passo, a mistura permanece na região inflamável do diagrama ternário, mas com um risco ainda maior de ignição devido ao aumento contínuo de oxigênio, que agora é bastante superior ao LOC de 5,1%. O ponto de controle “x” se encontra bem dentro da zona inflamável, conforme verificado na Figura 42, o que indica uma alta probabilidade de que o sistema seja inflamável ou até explosivo em condições de ignição. A mistura, com sua maior proporção de oxigênio, alcançou um ponto crítico, aumentando significativamente o risco de acidente caso o processo não seja rapidamente corrigido.

Figura 42 – Diagrama na condição do passo 5.



Fonte: Autoria própria.

A simulação demonstrou como a adição progressiva de ar, em consequência de uma falha no equipamento, pode deslocar o ponto de controle no diagrama ternário de inflamabilidade, alterando o comportamento do sistema de LDG. À medida que o ar é introduzido, a concentração de oxigênio na mistura aumenta, o que favorece a transição da mistura de um estado não inflamável para um estado inflamável. Este deslocamento foi claramente visualizado no diagrama ternário, que forneceu uma representação precisa de como a mistura se comporta sob diferentes condições de contaminação acidental.

Nos passos iniciais, a mistura se manteve em uma zona segura, mas à medida que a quantidade de oxigênio aumentou, a mistura se aproximou cada vez mais da zona de inflamabilidade. A partir do Passo 4, a mistura entrou de fato na zona inflamável, indicando que a simples adição de ar pode rapidamente comprometer a segurança de um sistema que depende de um controle rigoroso das proporções de gases para manter-se fora de condições de risco.

Este estudo de caso sublinha a importância de monitoramento e controle contínuos em sistemas de processos industriais que envolvem combustíveis, pois a contaminação acidental pode rapidamente levar a situações perigosas. A visualização no diagrama ternário de inflamabilidade oferece uma ferramenta útil para antecipar e mitigar riscos associados a falhas operacionais e a alterações imprevistas na composição do gás, sendo uma ferramenta essencial para estabelecer mecanismos de contenção de riscos através do

estabelecimento de margens de segurança, alarmes e intertravamentos que auxiliem a operação de maneira segura e consciente de modo a dar mais subsídios a eliminação das falhas de maneira mais rápida, possibilitando assim uma melhor prevenção contra sinistros relacionadas à operação sistema de distribuição de gases inflamáveis, bem como a realização de manutenção nessas instalações.

5. CONCLUSÃO

A análise da inflamabilidade dos gases siderúrgicos realizada neste trabalho permitiu uma compreensão mais aprofundada sobre os parâmetros que influenciam o comportamento de misturas gasosas combustíveis, proporcionando subsídios para um controle mais eficiente dos riscos associados ao seu manuseio, operação e manutenção de suas instalações. A determinação dos Limites de Inflamabilidade, Concentração Limite de Oxigênio (LOC) e outros parâmetros fundamentais, conforme descrito pela norma NFPA 69, demonstrou a importância da quantificação rigorosa desses valores na prevenção de explosões e incêndios em processos industriais.

A construção dos diagramas ternários de inflamabilidade mostrou-se uma ferramenta essencial para a visualização das condições nas quais as misturas gasosas tornam-se inflamáveis, permitindo uma avaliação precisa dos riscos em diferentes cenários operacionais. Esses diagramas possibilitam a identificação das faixas seguras para operação e servem como base para o desenvolvimento de estratégias de controle e monitoramento da inflamabilidade.

Uma das principais contribuições deste estudo é a possibilidade de aplicação dos resultados obtidos a misturas gasosas compostas por diferentes proporções de combustíveis, indo além dos dados disponíveis na literatura, que geralmente se concentram em diagramas ternários para componentes individuais. A modelagem proposta permite uma análise mais abrangente e precisa, possibilitando prever o comportamento inflamável de misturas industriais reais, que podem variar sua composição conforme a dinâmica de operação, possibilitando então ao usuário modificar as combinações de composição conforme seja adequado. Isso amplia significativamente o campo de aplicação do estudo, tornando a abordagem útil não apenas para a indústria siderúrgica, mas também para diversos setores que lidam com gases combustíveis em suas operações.

A implementação de uma interface gráfica no Microsoft Excel para a simulação do comportamento inflamável das misturas gasosas representa uma contribuição relevante para a segurança industrial. O sistema desenvolvido permite a análise automatizada dos parâmetros de inflamabilidade e a geração de cenários dinâmicos, facilitando a tomada de decisões relacionadas à segurança na operação de redes de gases combustíveis. A possibilidade de ajustar as composições gasosas e simular diferentes

condições operacionais torna a ferramenta uma solução versátil e aplicável em diversos segmentos industriais, incluindo siderurgia, petroquímica e biogás.

Os resultados obtidos reforçam a importância da adoção de estratégias de monitoramento contínuo e controle rigoroso das condições de inflamabilidade, considerando-se a implantação de intertravamentos de segurança em instalações industriais. O estudo evidencia que a correta aplicação dos parâmetros calculados, associada a sistemas eficazes de controle, pode minimizar significativamente o risco de acidentes, promovendo a segurança dos trabalhadores e a integridade das instalações.

Além disso, as informações apresentadas são fundamentais para o planejamento e realização de operações de purga e inertização com segurança em intervenções de manutenção, como na realização de serviços a quente em tubulações ou equipamentos das redes de gás. O conhecimento detalhado sobre os limites de inflamabilidade e a influência da concentração de oxigênio permite a definição de estratégias eficazes para a remoção/diluição de gases inflamáveis em tubulações e equipamentos antes da realização de trabalhos. E no caso de ambientes confinados fortalece os procedimentos de prevenção e controle contra possíveis vazamentos de gás que possam causar incêndio ou explosão no ambiente de trabalho. Essa abordagem é essencial especialmente diante de distúrbios nos processos de geração de gás, garantindo que os trabalhadores possam atuar com segurança e que as condições operacionais sejam restabelecidas sem riscos adicionais de incêndios ou explosões.

Portanto, este trabalho contribui para o aprimoramento da gestão de riscos em processos industriais envolvendo gases combustíveis, fornecendo uma base técnica para a implementação de medidas preventivas mais eficazes. A interface desenvolvida pode contemplar novos gases e condições operacionais ou misturas de outras indústrias além da siderúrgica, consolidando-se como uma ferramenta valiosa para a segurança industrial e o planejamento de intervenções em instalações que lidam com misturas gasosas inflamáveis.

6. REFERÊNCIAS

- AISE STEEL FOUNDATION. *Steelmaking and Refining Volume*. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1998.
- ALVARENGA, J. F. et al. Characterization and utilization of EAF gases in steelmaking plants. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 2018.
- AMERICAN GAS ASSOCIATION. AGA XK0101: Purging Principles and Practice. Washington DC, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AD MATERIALS. ASTM D1945: Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography. West Conshohocken, 2014.
- ARAÚJO, L. A., Manual de Siderurgia, São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. Volume 1.
- ARCELOR MITTAL TUBARÃO. História do aço. Disponível em: . Acesso em: 13 set. 2024.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego, Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho (SSST). NR 20: Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis. Diário Oficial República Federativa do Brasil – Brasília, 1978. Aprovada pela Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978; alterada pela Portaria SIT nº 3088 de 29 de fevereiro de 2012.
- BRITTON, Laurence G.; CLOUTHIER, Martin P.; HARRISON, Benjamin K.; RODGERS, Samuel A.. Limiting oxygen concentrations of gases. *Process Safety Progress*, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 107-114, 16 fev. 2016.
- Bulletin 627, Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapours, U.S. Bureau of Mines, Alexandria, 1965.
- Bureau of Labor Statistics. (2015a). *Census of Fatal Occupational Injuries: Current and Revised Data*, 2015.
- CAILLAT, Sébastien. Burners in the steel industry: utilization of by-product combustion gases in reheating furnaces and annealing lines, *Energy Procedia*, v. 120, p. 20-27, 2017.
- CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais – uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHIAVERINI, Vicente, “Aços e Ferros fundidos” 7º Edição. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996.

- CHIAVERINI, Vicente; Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos 7.ed. ampl e ver.-São Paulo-2005;
- CHEN, Chan-Cheng. A Study on Estimating Flammability Limits in Oxygen. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. (2011).50. 10.1021/ie102373g.
- COWARD H.F.; JONES C.W., Limits of Flammability of Gases and Vapors, Bureau of Mines, United States Department of the Interior, Pittsburgh, Pennsylvania (1952).
- CROWL D.A.; LOUVAR J.A., Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- FRUEHAN, R. J. The Making, Shaping, and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1998.
- FUKUSHIMA, K. et al. Energy recovery in steelmaking processes: Opportunities and challenges. *Journal of Energy Resources Technology*, 2019.
- GORNI, A. A. Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas. Corte & Conformação de Metais, São Paulo, dez. 2008.
- HANSEN T., Estimation of the flammability zone boundaries with thermodynamic and empirical equations, MS Thesis, Michigan Technological University, Houghton, MI, 2009
- HANSEN T.J.; CROWL D.A., Estimation of the flammability zone boundaries for flammable gases, *Process Safety Progress* 29 (2010), 209–215.
- HIGASHI, Iwao. Energy Balance of Steel Mills and the Utilization of By-product Gases. *Transactions of The Iron And Steel Institute Of Japan*, Toquio, v. 22, p. 57-65, 1982.
- IAB. INSTITUTO AÇO BRASIL. História do Aço. IAB, 2022. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/historia-do-aco/> Acesso em 18 de agosto de 2024.
- IAB. INSTITUTO AÇO BRASIL. Estatísticas da Siderurgia 4º Trimestre 2020. Rio de Janeiro:IAB, 2021.
- IBS. Instituto Aço Brasil. Disponível em: <http://acobrasil.org.br/site/portugues/>. Acesso em 02 abr. 2024.
- IPT Gases siderúrgicos. Disponível em: <https://ipt.br/2018/05/09/gases-siderurgicos/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

- JACOMINO, V. M. F. et Al. Controle Ambiental das Indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.
- JÚNIOR, J. H. N. Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes autoredutores. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Puc - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- KREBS, P. R.; RHOADS, W. A. *Fire Protection Handbook*. 20. ed. Quincy: National Fire Protection Association, 2016.
- KUMAR, A.; ROY, S. Development of sustainable steelmaking: Energy and environmental considerations. *Journal of Cleaner Production*, 2017.
- LIU, Q. et al. Integration of CO2 utilization technologies in steel industry: A review. *Journal of Environmental Management*, 2020.
- MANNAN, M. S. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- MASHUGA C.V.; CROWL D.A., Flammability zone prediction using calculated adiabatic flame temperatures, *Process Saf Prog* 18 (1999), 127–134.
- MASHUGA, Chad V. *et al.* Application of the flammability diagram for evaluation of fire and explosion hazards of flammable vapors. *Process Safety Progress*, New York, v. 3, n. 17, p. 176-183, jun. 2004.
- MELHEM G.A., A detailed method for estimating mixture flammability limits using chemical equilibrium, *Process Saf Prog* 16 (1997), 203–218.
- MOURÃO et. Al; Introdução a siderurgia. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). São Paulo, 2007.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Fire Loss in the United States During 2019. Quincy, 2020.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems. Quincy, 2019.
- NEVES, O.R.; CAMISASCA, M.M. Aço Brasil : uma viagem pela indústria do aço - Belo Horizonte: Escritório de Histórias, 2013.
- OLIVEIRA, Marina; SCHONS, Elenice; LAMEIRAS, Fernando; SILVA, Leone, SILVA, André. (2023). BRIQUETAGEM DE MINÉRIO DE FERRO: UMA REVISÃO. REVISTA FOCO. 16. e3432. 10.54751/revistafoco.v16n12-021.

- RIBEIRO, B. A. B. Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise do Processo de Vazamento de Aço Líquido da Panela de Aço para o Distribuidor no Processo de Lingotamento Contínuo. Belo Horizonte, 2014. 63p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- RIZZO, E. M. S. Introdução aos Processos Siderúrgicos. [S.l.]: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- SIEGEL, S. et al. Steelmaking: Gases and efficiency. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014
- SHIMADZU. Cromatógrafo Gasoso GC-2014. Disponível em: <https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/cromatografo-gasoso/sistemas-gc/gc-2014/option.html>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- ULHOA, M. B. Coqueificação em Baterias de Fornos Horizontais. São Paulo: ABM, p.153-199, Junho 2003.
- XU, M., et al. (2018). Coke oven gas as a fuel for industrial applications: Thermodynamic analysis and utilization perspectives. *Energy Reports*.
- WAKELIN, D. H.; RICKETTS, J. A. The nature of ironmaking. In: __The making, shaping and treating of steel. Chapter 1, 11th Edition. AISE, USA, 1999. pp. 01-35.
- WORLD_STEEL_ASSOCIATION. Crude Steel Production. Acesso em 27/09/2024, em: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/may-2023rudesteelproduction/#:~:text=World%20crude%20steel%20production%20for,chart%20with%206%20data%20series>.
- ZABETAKIS M.G., Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, United States Department of the Interior, Washington, DC (1965).
- ZHAO, Y., et al. (2019). Energy optimization of coke oven gas utilization in integrated steel plants. *Journal of the Energy Institute*.
- ZHANG K., et al. A by-product gas distribution model for production users considering calorific value fluctuation and supply patterns in steel plants. *Alexandria Engg*, 76(2023) 821–834
- ZLOCHWER, I. A.; GREEN, G. M., The Limiting Oxygen Concentration and Flammability of Gases and Gas Mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Pittsburgh. V. 22 n. 4, p. 499-505, 2009.