

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA PARA MODELAGEM DE DESGASTES DE TIJOLOS REFRATÁRIOS DURANTE OS CICLOS DAS PANELAS SIDERÚRGICAS

ALUNO: Vítor Batista Matos¹

ORIENTADOR: Americo Barbosa da Cunha Junior¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Matemática e Estatística, Ciências Computacionais e Modelagem Matemática

Resumo. [Foram utilizadas neste trabalho ferramentas de Simulação Estocástica para simular três diferentes fórmulas que, ao fim, descrevem a taxa de erosão de tijolos refratários sob condições extremas de calor e corrosão proporcionados pelo processo de refino do aço. Ao aplicar as distribuições do Princípio de Máxima de Entropia (uniformes, normais e normais truncadas) nas variáveis chaves das fórmulas do estudo, junto com o Método de Monte Carlo para a estimativa de distribuição de probabilidade, foi gerado um resultado de frequência que demonstra uma taxa de até 60% de erosão do refratário dentro de uma zona de segurança e que demonstre um bom aproveitamento de produtividade da panela]

Palavras-chave. Simulação Estocástica, Método de Monte Carlo, Siderurgia, Panela, Tijolo Refratário, Aciaria, Refino do Aço, Resistência, Entropia.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento constante na demanda industrial e o aumento na quantidade de dados que temos capacidade de obter e processar, surge a necessidade de se utilizar de novas ferramentas e técnicas para ampliar a produtividade sem, claro, afetar a segurança do trabalho.

Neste trabalho serão abordados práticas dentro do domínio da Simulação Estocástica na área siderúrgica, especificamente o refino e produção de aço.

Neste simulado foi selecionada a etapa de ciclos da panela de aço, no qual estas (feitas também de aço), precisam estar constantemente isoladas de todo o calor, atrito e corrosão causado pelo próprio processo de refino. Dada esta condição, o uso de tijolos refratários se torna obrigatório,

e, em certo ponto precisa ser constantemente avaliada sua capacidade de resistir aos vários ciclos no qual a panela deverá passar, até este seja deteriorado a uma taxa de segurança, sem causar acidentes.

2. TIJOLO REFRATÁRIO

Refratários são materiais que apresentam suficiente estabilidade física e química capaz de torná-los elementos estruturais, mesmo quando sujeitos a altas temperaturas, sendo utilizados em muitos processos industriais. Além das altas temperaturas, os materiais refratários trabalham sob outras condições que podem comprometer seu desempenho, como por exemplo, tensões mecânicas, choques térmicos, erosão e corrosão por gases quentes e materiais fundidos – como metais, escórias ou vidros. Atualmente, a produção de metais, cimento, vidro, derivados do petróleo, cerâmicas e tantos outros materiais é totalmente dependente da utilização destes refratários. [1]

No contexto do refino do aço, é importante ressaltar que refratório usado nas panelas de aço passa por um ciclo de vida padrão, segundo o qual a quantidade de ciclos¹ é definida de acordo com análises feitas pelo próprio setor responsável. Após o fim da vida padrão do refratório, a panela é retirada de operação e passa por substituição da linha de escória. Este processo é denominado Reparo Intermediário. Ao retornar ao processo, a panela realiza mais corridas adicionais — estas em menor quantidade que anteriormente —, e então é afastada para a substituição de todo refratório. Sendo assim, a vida de uma panela de aço é a soma das duas sequências de ciclos. [11]



Exemplos de tijolos refratários para diferentes mercados [7, 8, 9]

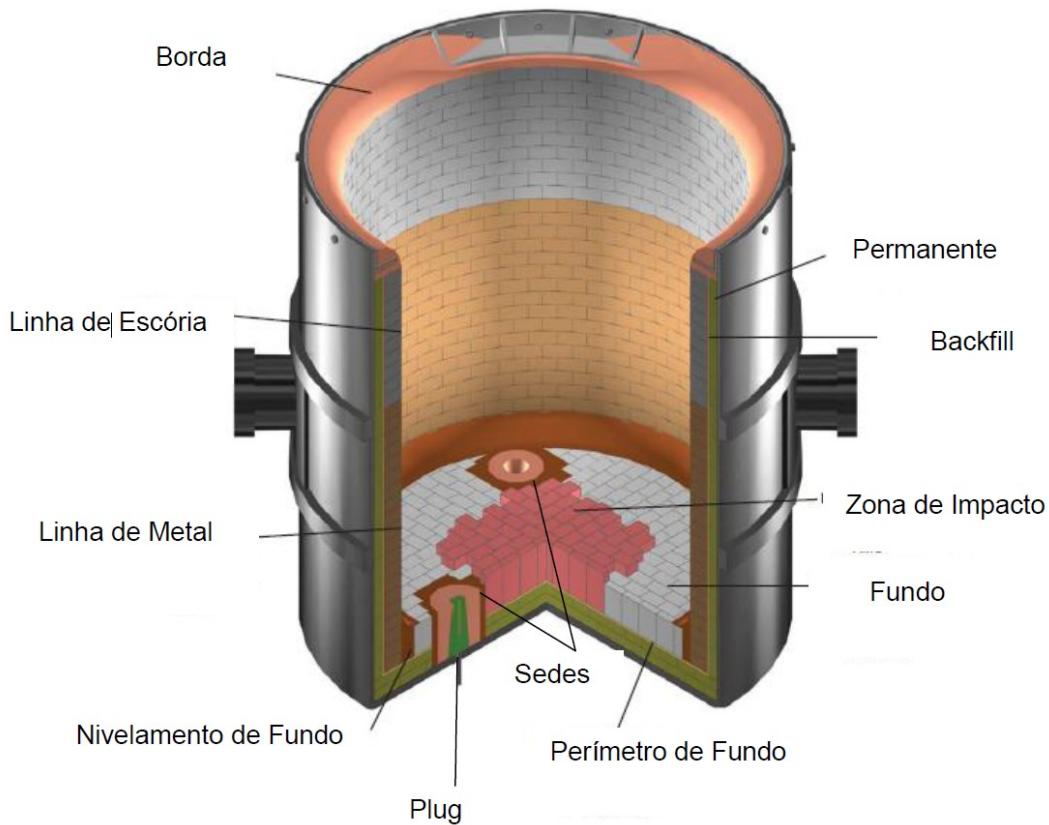
3. PANELA SIDERÚRGICA

A Panela Siderúrgica, ou Forno Panela (Ladle Furnace - LF), é usada para refinar vários tipos de aços, como para rolamentos, estrutural de liga, ferramentas, molas, aço-carbono, etc. Em combinação com o forno elétrico a arco (Electric Arc Furnace - EAF) e a Máquina de Lingotamento Contínuo (Continuous Casting Machine - CCM), o LF forma uma linha de produção de alta eficiência e processo curto, com excelentes capacidades de refino.

¹ Será detalhado mais a frente em um tópico próprio.

O LF utiliza eletrodos para aquecimento, enquanto o aço líquido é agitado através de tijolos permeáveis em sua base. Suas principais funções são: Aquecimento, agitação com argônio, ajuste de ingredientes, alimentação de arame, sistema de exaustão e integração eficiente de processos. [3]

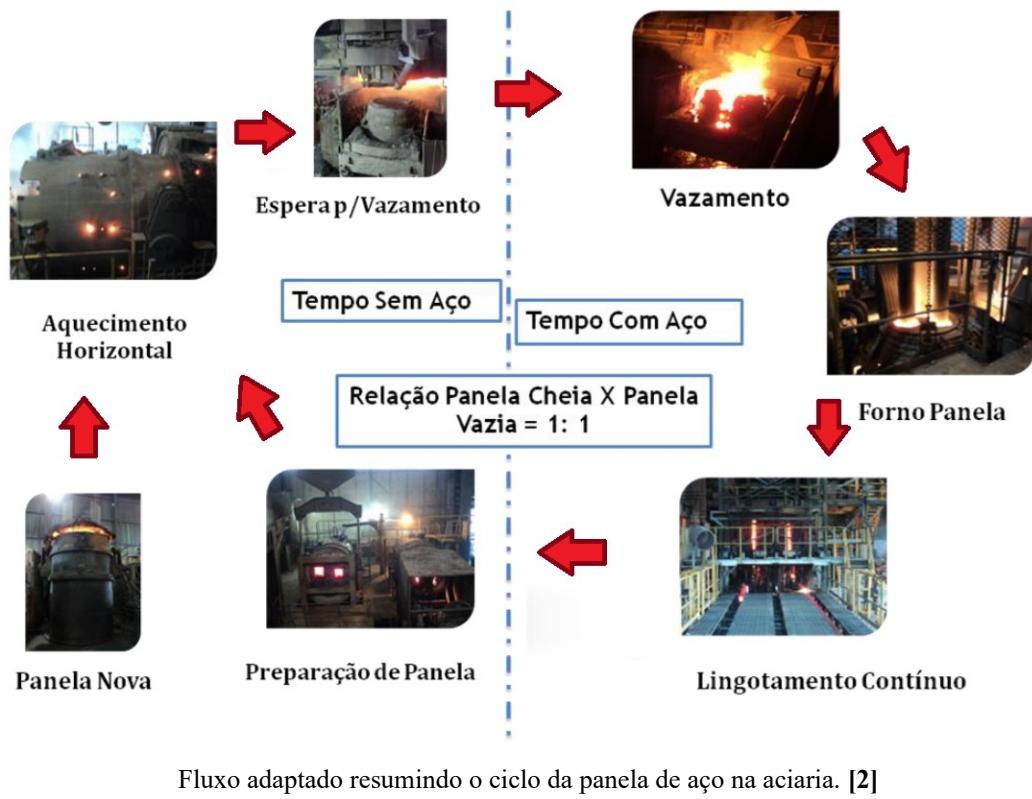
Conforme figura a baixo, são utilizados diferentes tipos de tijolos na mesma LF — cada tipo tem características específicas para resistir nos diversos cenários presentes.



Representação da divisão das regiões e dos componentes da panela de aço de siderurgia. [2]

4. CICLO DA PANELA

Todo o processo de refino secundário do aço depende exclusivamente das panelas de aço, onde cada uma delas é submetida a diferentes etapas durante todo um ciclo. Como resumido no fluxograma abaixo, a panela inicialmente é preparada, para então receber o aço vazado dos convertedores (etapa final do refino primário), passa por uma série de tratamentos, e, por fim, libera o aço refinado no lingotamento. Assim que a panela é esgotada ela é direcionada para resfriamento e limpeza. [11]



Após a limpeza, a panela é levada à área de preparação — local em que são verificadas as condições refratárias da mesma —, realizados os padrões de troca e eventuais projeções de massa refratária para seu retorno aos convertedores, onde receberão a próxima corrida, reiniciando o ciclo operacional. [11]

5. MÉTODO DE MONTE CARLO

Experimentação de Monte Carlo significa o uso de valores aleatórios para a estimativa de alguma função de uma distribuição de probabilidade. Um problema que não possui um componente estocástico pode ser colocado como um problema com um componente que pode ser identificado como a esperança de uma função de uma variável aleatória (VA). Isso pode ser feito através da decomposição de uma função densidade de probabilidade. O problema é então resolvido pela estimativa do valor esperado por meio do uso de uma amostra aleatória da distribuição da VA. [4]

6. PRINCÍPIO DE MÁXIMA DA ENTROPIA

O Princípio de Máxima da Entropia possibilita tratar vários fenômenos que envolvem imprevisibilidade e incerteza, como ocorre frequentemente na análise de sistemas estatísticos, na

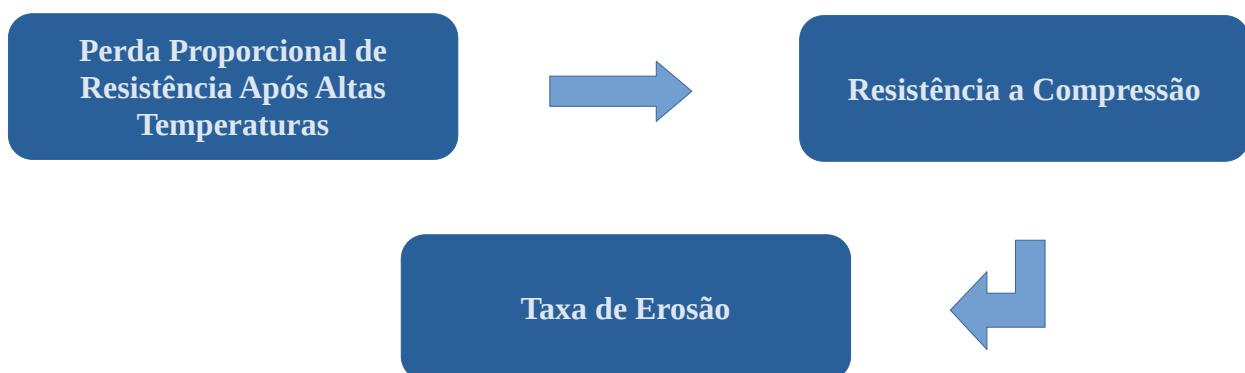
mecânica quântica e na termodinâmica, onde um dos maiores obstáculos está na correspondência entre os fenômenos microscópicos e macroscópicos. [5]

É utilizado para determinar a distribuição de probabilidade imparcial, dado um conjunto de informações parciais, ou a ausência deste — sendo que a distribuição que melhor representa o estado de incerteza do sistema é a que maximiza a entropia.

7. METODOLOGIA

O objetivo final das simulações a seguir será descobrir qual a melhor condição para que a panela de aço seja retirada de ciclo devido ao desgaste de revestimento refratário. O momento e o tempo certo são essenciais, pois são estes que garantem a segurança de se utilizar materiais em altas temperaturas — sem danificar a panela —, mas que ao mesmo tempo também são responsáveis pela redução de produtividade, uma vez que uma panela em processo de remoção não está sendo utilizada para o próximo ciclo de refino.

Com base na fórmula de Perda de Resistência apresentada por [6], e nas fórmulas de Resistência a Compressão e Taxa de Erosão de [2], será montada uma sequência de simulações no qual o resultado de cada etapa irá compor a próxima, conforme sequenciado no fluxograma a baixo.



Fluxograma representando a sequência de etapas até a resposta para o melhor momento de retirada da panela.

Uma vez que temos a necessidade de escolher uma distribuição de entrada imparcial para as variáveis das equações, será usado o Princípio da Máxima de Entropia. E, para se obter as distribuições de saídas, usaremos o Método de Monte Carlo.

- **Perda Proporcional de Resistência Após Altas Temperaturas**

Fórmula: $\text{perda_resist} = (\text{res_high_temperature} - \text{res_room_temperature}) / \text{res_room_temperature}$ [6]

perda_resist – Perda percentual de resistência após altas temperaturas (%)

res_high_temperature – resistência média após altas temperaturas (MPa)
res_room_temperature – resistência média em temperatura ambiente (MPa)
[7, 8, 9]

Para modelar a perda de resistência do refratário será definido um intervalo, onde este se inicia entre 40MPa e 65MPa, em temperatura ambiente. A resistência do material pode variar entre dois limites, A e B em β . Sem mais informações sobre o comportamento exato da resistência dentro desse intervalo, a distribuição escolhida para representar a incerteza do resultado, em altas temperaturas, será uma **distribuição uniforme** desse intervalo. Em outras palavras, a resistência R terá uma distribuição uniforme $R \sim U(A, B)$, onde a entropia de R é maximizada dada a restrição de que R só pode assumir valores entre A e B.

- **Resistência à Compressão**

Fórmula: resist_comp = $P/A - (P/A * \text{perda_resist})$ [2]

resist_comp – resistência à compressão (MPa)
P – carga de ruptura (N)
A – área do refratário = 170 (cm^3)
perda_resist – Porcentagem de perda de resistência após altas temperaturas (%)
[7, 8, 9]

Dadas informações básicas obtidas pelos fabricantes dos tijolos refratários, serão considerados limites de valores entre 19.000N e 21.000N para a modelagem da variável P. Tendo em vista essa necessidade, será usada uma **distribuição normal truncada**, cujo objetivo é justamente aplicar uma distribuição normal que leva em consideração um intervalo mais realista de variações.

- **Taxa de Erosão**

Fórmula: $VE = ((P_2 - P_1) / \text{densi_geom}) - R_{\text{comp}}$ [2]

VE – volume erodido (cm^3)
P1 – peso do corpo de prova antes dos ciclos = 460 (g)
P2 – peso do corpo de prova após os ciclos (g)
densi_geom – densidade geométrica do refratário (g/cm^3)
resist_comp – resistência à compressão (MPa)
[7, 8, 9]

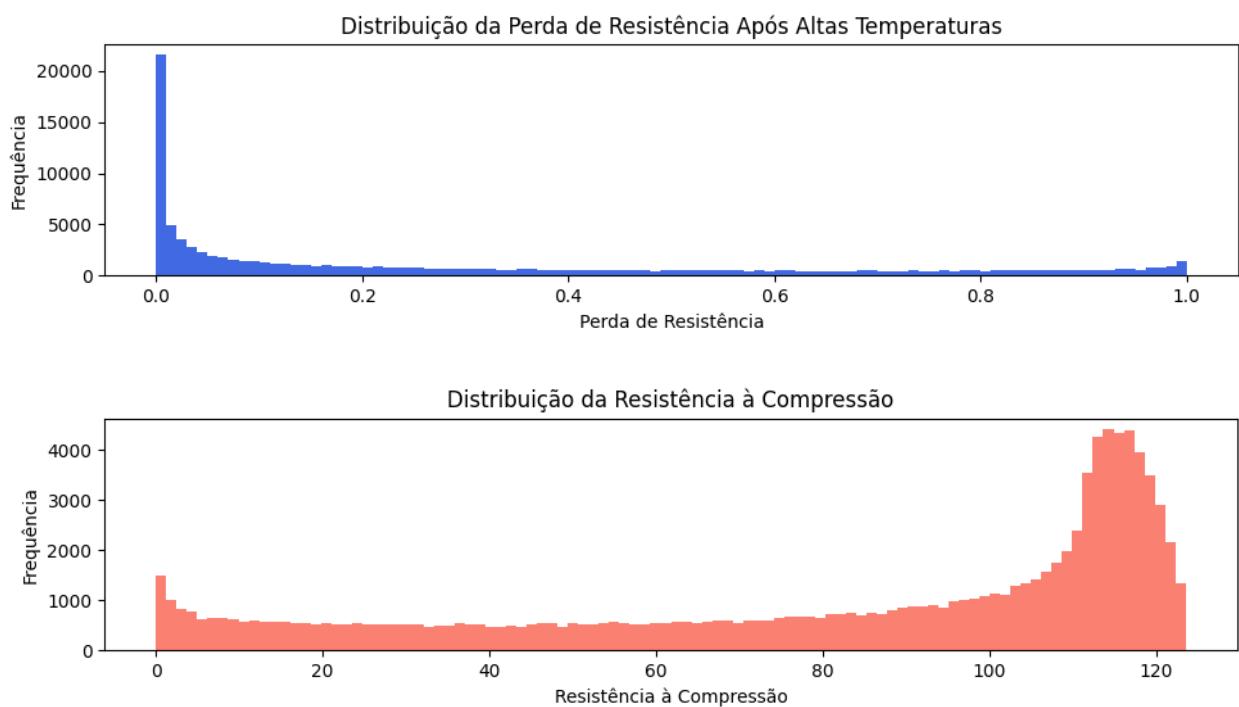
Para a simulação da taxa de erosão, será aplicada a **distribuição uniforme** para as médias de pesos (antes e depois), enquanto que a **distribuição normal** será usada para modelar a densidade — que descreve de forma contínua as influências causadas por possíveis fatores pequenos e independentes, como variações na composição do material.

Sabendo então a frequência do volume médio erodido do tijolo refratário, será possível prever o melhor momento de afastamento da panela, aumentando assim a produtividade sem afetar a segurança no processo de refino.

8. RESULTADOS

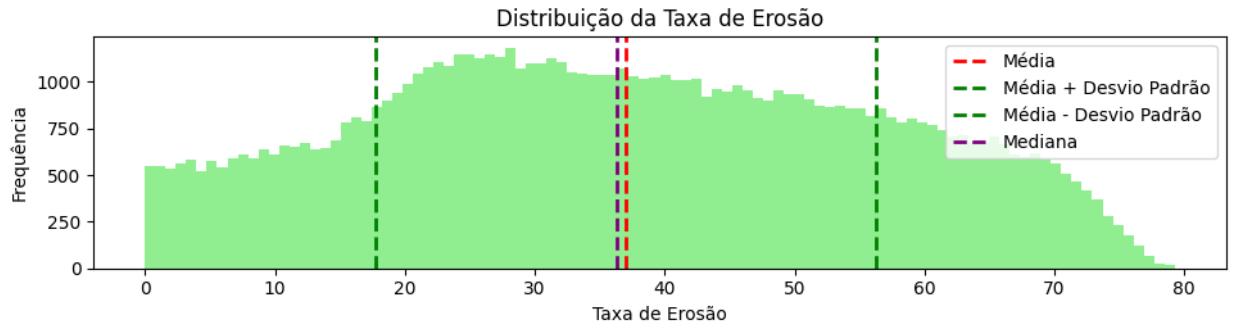
Os dois gráficos abaixo descrevem as distribuições das fórmulas de Perda de Resistência em Altas Temperaturas e de Resistência à Compressão. O que se pode entender que há uma tendência forte para pouca perda de resistência por temperaturas, mas, ainda assim, há uma proporção muito próxima de perda em maiores intensidades (mesmo que bem mais baixa). Já para a resistência à compressão, parece exercer um efeito contrário — onde surge uma frequência mais alta para uma maior resistência e menor para baixas resistências.

Considerando ambos resultados é possível reforçar o fato que estes tijolos simulados estão bem preparados para resistir bem ao ambiente extremo no qual eles são aplicados.



Por fim, o gráfico que representa a distribuição da Taxa de Erosão, mostra uma realidade mais dispersa — comparada com os gráficos anteriores. Ao calcular a média, mediana e seus desvios

padrões, pode-se visualizar que a faixa de erosão mais frequente se posiciona entre (aproximadamente) 20% e 60%. O que, em termos de segurança e produtividade, demonstra um boa faixa. Dentro do possível, seria aplicável o uso das panelas até o limite de 60% de desgaste do refratário. Após esta faixa o risco de um acidente crítico seria acumulativamente aumentado conforme novos ciclos em que a panela correria.



9. REFERÊNCIAS

- [1] NEDOCHETKO, A. P. F. S; TOFFOLI, S. M. **Refratários ao Carbono para Siderurgia – Uma Breve Revisão.** Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias, Cubatão, vol 4, n 4, 02 fev. 2019. Disponível em:
https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume04/Engenharia/Artigo_E_04_218_239.pdf. Acesso em: 18 out. 2025.
- [2] ALVES, E. O. **Estudo dos Parâmetros de Desgaste de Refratários: Comparativo de Tijolos Dolomíticos Para Linha de Escória em Panelas de Aço de Siderurgia.** 2011. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Marabá. Disponível em:
https://repositorio.unifesspa.edu.br/bitstream/123456789/314/1/TCC_Estudo%20dos%20par%C3%A2metros%20de%20desgaste%20de%20refrat%C3%A1rios.pdf. Acesso em: 16 out. 2025.
- [3] SME-GROUP. **Forno de Panela.** 2010. Disponível em:
<https://www.sme-group.com/pt-br/blog/forno-de-panela>. Acesso em: 19 out. 2025.
- [4] MAYER, F. P. **Métodos de Monte Carlo.** 2022. Disponível em:
http://cursos.leg.ufpr.br/ce089/06_MC_intro.html. Acesso em: 19 out. 2025.
- [5] ANTUNES, M . M; OLIVEIRA, A. L. **O Princípio da Máxima Entropia e o Problema da Razão Insuficiente.** Scientiarum Historia XI – Filosofia, Ciências e Artes: Conexões Interdisciplinares “Scudindo a Poeira”, Rio de Janeiro, 07 nov. 2018. Disponível em:
<https://revistas.hcte.ufrj.br/index.php/interdisciplinaridadeemrevista/article/download/11/19>. Acesso em: 19 out. 2025.
- [6] QIN, X; MA, Q; GUO, R; TAN, S. **Prediction of Compressive Strength Loss of Normal Concrete after Exposure to High Temperature.** Appl. Sci. 2022, 12, 12237.
<https://doi.org/10.3390/app122312237>, 29 nov. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/23/12237>. Acesso em: 20 out. 2025.
- [7] YUFEN. **Ladle Brick for Steel Ladle Lining.** Disponível em:
<https://yufengrefractory.en.made-in-china.com/product/nSMJATzXIfro/China-Ladle-Brick-for-Steel-Ladle-Lining.html>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [8] LAUREL. **Refractory High Alumina Brick.** Disponível em:
<https://www.laurelrefractory.com/refractory-high-alumina-brick.html>. Acesso em: 11 nov. 2025.

[9] JUCOS. **Magnesia Carbon Refractory Brick for Ladle Basic Oxygen Furnace**. Disponível em: <https://www.jucosrefractory.com/showroom/mgo-c-brick-magnesia-carbon-refractory-brick-for-ladle-basic-oxygen-furnace-mgo-89-92-95-97-98-230x114x65-75-60-50-40-30mm-size-customized-china-zibo.html>. Acesso em: 11 nov. 2025.

[10] GABRIEL, I. N. L. **Análise do Fluxo Térmico na Sola de Panelas de Aciaria**. 2022. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4920/7/MONOGRAFIA_An%C3%A1liseDoFluxoT%C3%A9rmico.pdf. Acesso em: 07 dez. 2025.

[11] BATISTA, A. S; SCHIMITZ, L. B. S; ROCHA, M. R. **Predição de Desgaste Refratário para Reparo Intermediário da Linha de Escória de Panelas de Aço em uma Aciaria**. 2023. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciência de Dados) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5744/6/MONOGRAFIA_Predi%C3%A7%C3%A3oDesgasteRefrat%C3%A1rio.pdf. Acesso em: 10 dez. 2025.

10.APÊNDICES

APÊNDICE A – Descrição Técnica de Tijolos Refratários Conforme Anunciado Pelas Fabricantes.

Yufeng [7]

Item	Unit	Index			
		SLL-55	SLL-65	SLL-75	SLL-80
Al ₂ O ₃	%	≥ 55.0	≥ 65.0	≥ 75.0	≥ 80.0
Fe ₂ O ₃	%	2.10	2.10	2.00	2.20
Cold Crushing Strength	MPa	45	35	40	50
Apparent Porosity	%	≤22	≤28	≤28	≤24
Refractoriness Under Load 0.2 MPa	°C	≥ 1470	≥1490	≥1510	≥1530
Permanent Linear Change	1450°Cx2h	%	0.1-0.5	--	--
	1500°Cx2h	%	--	0.1-0.5	0.1-0.5
	1550°Cx2h	%	--	--	0.1-0.5

Laurel [8]

Item		HA55	HA65	HA70	HA75	HA80
Al ₂ O ₃	%	55	65	70	75	80
Fe ₂ O ₃	%	≤2.8	≤2.6	≤2.5	≤2.5	≤2.0
Apparent Porosity	%	22-24	22-24	22-24	22-24	22-24
Bulk Density	g/cm ³	≥2.25	≥2.35	≥2.40	≥2.50	≥2.60
Cold Crushing Strength	MPa	45	50	55	60	65
Refractoriness Under Load (0.2MPa)	°C	1450	1500	1510	1520	1530

Jucos [9]

Brand Properties	MD92	MD95	MD97	MD98
Bulk density(g/cm3)	2.90	2.95	3.00	3.00
Refractoriness under load T2 (°C)	1550	1650	1700	1700
Apparent Porosity (%)	18	16	15	15
Cold Crushing Strength(MPa)	55	60	70	80

Thermal shock resistance 950deg air cool (times)	10	10	10	10
Composition(%)	MGO	92	95	97
	CaO	2.5	2.0	1.6
	SiO2	3.5	2.5	1.2

APÊNDICE B – Código Python da Simulação Estocástica

Código completo disponível em:

[https://github.com/VBMatos/TrabalhoSimulacaoEstocastica20252.](https://github.com/VBMatos/TrabalhoSimulacaoEstocastica20252)

```
def perda_resist_temp(n_sim, rng):  
  
    # Distribuição uniforme, considerando que a resistência em temperatura  
    # ambiente pode variar entre A e B (máxima entropia dado o intervalo) (MPa)  
    res_room_temperature = rng.uniform(40, 65, n_sim) #(MPa)  
  
    # Para cada valor de res_room_temperature, sorteia-se uniformemente,  
    # considerando que a resistência pode variar entre R e C  
    perda_prop = rng.beta(0.3, 0.8, n_sim)  
    res_high_temperature = res_room_temperature * (1 - perda_prop)  
  
    # Calcula perda proporcional de resistência (%)  
    perda_resist = (res_room_temperature - res_high_temperature) /  
res_room_temperature  
  
    return perda_resist
```

```
from scipy.stats import truncnorm  
  
def calcula_resist_compres(p_resist_tempr, n_sim, rng):  
    # Parâmetros  
    media_carga_ruptura = 20000 #(N)  
    desvio_carga_ruptura = 1000 #(N)  
  
    # Limites de truncagem  
    limite_min = 19000 #(N)  
    limite_max = 21000 #(N)  
  
    # Distribuição Normal da carga de ruptura  
    a = (limite_min - media_carga_ruptura) / desvio_carga_ruptura  
    b = (limite_max - media_carga_ruptura) / desvio_carga_ruptura  
  
    distr_carga_ruptura = truncnorm(a, b, loc=media_carga_ruptura,  
scale=desvio_carga_ruptura)  
    distr_carga_ruptura = distr_carga_ruptura.rvs(n_sim) #rvs: Gerador de variáveis  
aleatórias com base em uma probabilidade pré-definida  
  
    media_area_refratario = 170 #(cm³)  
  
    # Calcula resistência (MPa)  
    res_base = distr_carga_ruptura / media_area_refratario
```

```
return res_base - (res_base * p_resist_tempr)
```

```
def calcula_taxa_erosao(resist_compr, n_sim, rng):
    # Parâmetros
    media_peso_anter = 460 #(g)

    media_peso_depois_min = 200 #(g)
    media_peso_depois_max = 455 #(g)

    media_densidade = 3.0 #(g/cm³)
    vari_densidade = 0.1 #(g/cm³)

    media_vol_inicial = media_peso_anter / media_densidade

    # Distribuição Uniforme do peso do refratário após o uso
    distr_peso_depois = rng.uniform(media_peso_depois_min, media_peso_depois_max,
n_sim)

    # Distribuição Normal da densidade geométrica do refratário
    distr_densidade = rng.normal(media_densidade, vari_densidade, n_sim)

    # Calcula taxa (%)
    vol_erodido = ((media_peso_anter - distr_peso_depois) / distr_densidade) -
resist_compr
    taxa_erosao = (vol_erodido / media_vol_inicial) * 100

    #Desconsidera valores abaixo de Zero
    return [v for v in (taxa_erosao * -1) if v > 0]
```