

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. [Adicionar]

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

1. INTRODUÇÃO

Adicionar..

2. TIJOLO REFRATÁRIO

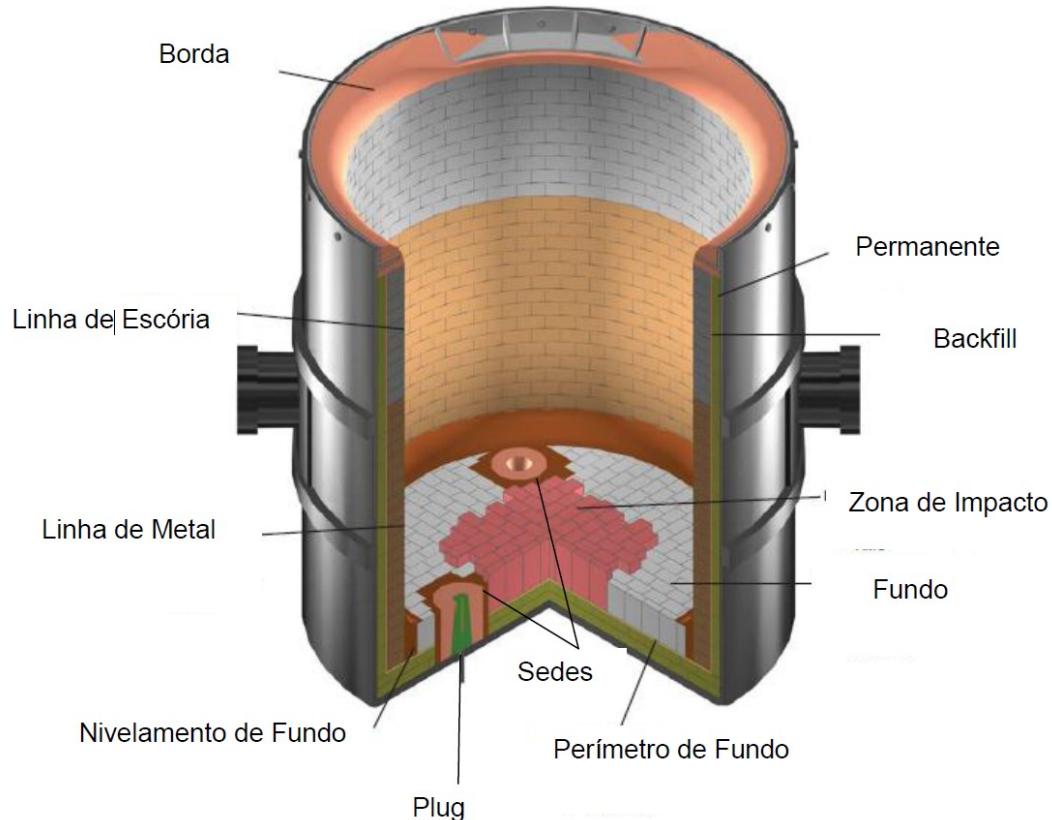
Refratários são materiais que apresentam suficiente estabilidade física e química capaz de torná-los elementos estruturais, mesmo quando sujeitos a altas temperaturas, sendo utilizados em muitos processos industriais. Além das altas temperaturas, os materiais refratários trabalham sob outras condições 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]

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.

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]



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

4. CICLO DA PANELA

Adicionar..



Fluxo adaptado resumindo o ciclo da panela de aço na aciaria. [2]

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]

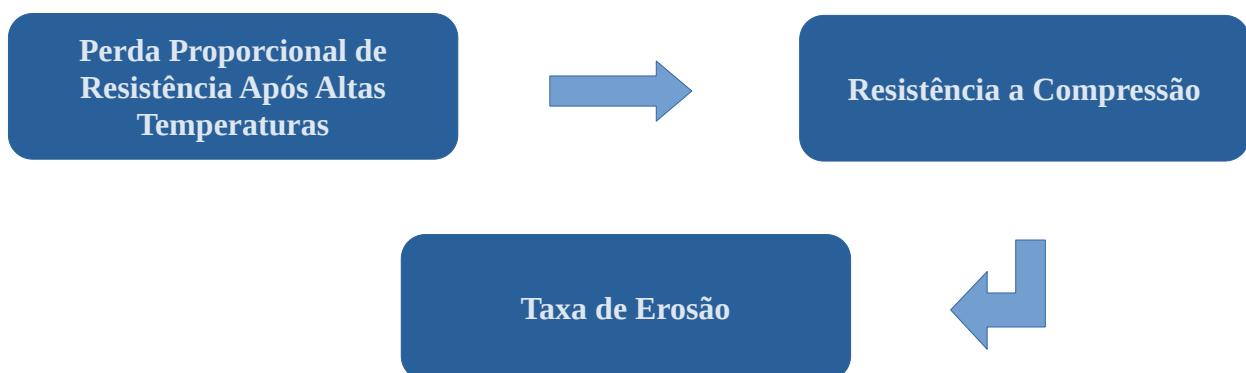
6. PRINCÍPIO DE MÁXIMA DA ENTROPIA

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]

7. METODOLOGIA

O objetivo final das simulações a seguir será descobrir qual o melhor momento para que o revestimento refratário seja trocado na panela de aço. O momento e o tempo certo de troca 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 troca de revestimento 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 mostrado no fluxograma a baixo.



Fluxograma representando a sequência de etapas até a resposta para o melhor momento de troca de refratário.

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 (%)

$\text{res_high_temperature}$ – resistência média após altas temperaturas (MPa)

$\text{res_room_temperature}$ – resistência média em temperatura ambiente (MPa)

[7, 8 ,9]

Resistência à Compressão

Fórmula: $R_{\text{comp}} = P/A - (P/A * \text{Presist})$ [2]

R_{comp} – resistência à compressão (MPa)

P – carga de ruptura (N)

A – área do refratário = 170 (cm³)

Presist – Porcentagem de perda de resistência após altas temperaturas (%)

[7, 8 ,9]

Taxa de Erosão

Fórmula: $VE = ((P2 - P1) / d.m.a.geom) - Rcomp$ [2]

VE – volume erodido (cm^3)

P1 – peso do corpo de prova antes do ciclo = 460 (g)

P2 – peso do corpo de prova após o ciclo (g)

d.m.a.geom. – densidade geométrica do refratário (g/cm^3)

Rcomp – resistência à compressão (MPa)

[7, 8 ,9]

Uma vez que temos a necessidade de escolher uma distribuição de entrada para os valores das 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.

Sabendo então o volume médio erodido do tijolo refratário em cada ciclo da panela, será possível prever o melhor momento de troca do revestimento, afetando pouco a produtividade e garantindo a segurança do processo de refino.

8. RESULTADOS

Adicionar..

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.

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	97.5
	CaO	2.5	2.0	1.6	1.2
	SiO2	3.5	2.5	1.2	0.6

APÊNDICE B – Código Python da Simulação Estocástica