



DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS DE MATERIAIS E METALÚRGICA

**Amanda Fernandes Pereira da Silva
(Organizadora)**

**Atena**
Editora
Ano 2022



DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS DE MATERIAIS E METALÚRGICA

Amanda Fernandes Pereira da Silva
(Organizadora)

 **Atena**
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Desenvolvimento e transferência de tecnologia nas engenharias de materiais e metalúrgica

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadora: Amanda Fernandes Pereira da Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D451 Desenvolvimento e transferência de tecnologia nas engenharias de materiais e metalúrgica / Organizadora Amanda Fernandes Pereira da Silva. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0565-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.658221508>

1. Engenharia de Materiais. 2. Metalurgia. I. Silva, Amanda Fernandes Pereira da (Organizadora). II. Título.

CDD 669

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A engenharia de materiais é um campo interdisciplinar que abrange o conhecimento acerca dos materiais e a relação que exige entre processamento, estrutura, propriedade e desempenho. É necessário compreender a interdependência entre esses componentes para que o material seja manuseado e aplicado da forma correta. A engenharia de materiais desenvolve modos de transformar esses materiais em dispositivos ou estruturas úteis.

A classificação dos materiais sólidos abrange, levando em consideração a composição química e estrutura atômica: metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e materiais avançados (aplicação). Nesse sentido, a busca por materiais com melhores propriedades físico-químicas, mecânicas, melhor comportamento térmico, tem sido alvo de grande destaque nesse meio. É comum profissionais da engenharia, sejam eles mecânicos, civis, químicos, ou elétricos, cientistas se depararem com problemas de projeto envolvendo materiais.

Desta forma, neste livro são destacados trabalhos científicos nesse ramo da Engenharia de Materiais com pesquisas atuais. Apresenta desenvolvimento de novos materiais com combinações máximas ou ideais requeridas de acordo com sua aplicação já existente.

Por isso, esta obra surge com grande importância para o meio acadêmico sabendo que cientistas de materiais e engenheiros precisam estar envolvidos na investigação de novos produtos com melhorias para situações reais.

Boa leitura!

Amanda Fernandes Pereira da Silva

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ALVENARIAS DE BLOCOS CERÂMICOS E DE CONCRETO POR MEIO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Rodrigo Manoel Rufino Leão

Amanda Fernandes Pereira da Silva

Alisson Rodrigues de Oliveira Dias

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215081>

CAPÍTULO 2..... 15

ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DA SUPERLIGA INCONEL 718 SUBMETIDA A SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO: COMPARAÇÃO PARA APLICAÇÕES NUCLEARES, AEROESPACIAIS E PETROLÍFERAS

Sara Nunes Rios

Vitória Ferreira de Oliveira Marques

Sérgio Renan Lopes Tinô

Vinicius Carvalhaes

Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela

Manoel Ivany de Queiroz Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215082>

CAPÍTULO 3..... 33

ROTINA DE SIMULAÇÃO EM YADE (LIVRE ACESSO) PARA ESCOAMENTO DE GRÃOS EM SILOS DE GRANDE PORTE UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

Gabriel Carvalho Matoso

Alexandre Candido Soares

Yara Daniel Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215083>

CAPÍTULO 4..... 47

SIMULAÇÃO VIA PYTHON DAS INTERAÇÕES DE ATRAÇÃO E REPULSÃO DE PARTÍCULAS PELO POÇO DE POTENCIAL DE LENNARD-JONES COMO REQUISITO PARA SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM SILOS

Gabriel Carvalho Matoso

Alexandre Candido Soares

Yara Daniel Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215084>

SOBRE A ORGANIZADORA..... 55

ÍNDICE REMISSIVO..... 56

ROTINA DE SIMULAÇÃO EM YADE (LIVRE ACESSO) PARA ESCOAMENTO DE GRÃOS EM SILOS DE GRANDE PORTE UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

Data de aceite: 11/08/2022

Data de submissão: 16/06/2022

Gabriel Carvalho Matoso

Universidade federal de Ouro Preto - DECAT
Ouro Preto – MG
<http://lattes.cnpq.br/7071168201328013>

Alexandre Candido Soares

Universidade federal de Ouro Preto -
REDEMAT
Ouro Preto – MG
<http://lattes.cnpq.br/5768088781427355>

Yara Daniel Ribeiro

Universidade federal de Ouro Preto -
REDEMAT
Ouro Preto – MG
<http://lattes.cnpq.br/6619922564101297>

RESUMO: Sistemas granulares apresentam comportamentos não previstos na mecânica de fluídos ou na mecânica de sólidos. Muito embora no passado tenham sido tratados num ou noutro campo, nas últimas décadas desenvolveu-se todo um novo campo teórico visando analisar fenômenos que eram conhecidos, mas não bem descritos na literatura. No Movimento em Silos, diversas situações podem ocorrer, como por exemplo, no escoamento de grãos numa ampulheta que ao contrário dos líquidos, a pressão nas paredes não é proporcional à altura. Por esse motivo, ao escoar, os grãos podem formar arcos de tensão, bloqueando o fluxo. Esse fluxo de grãos em silos é um tema de interesse

de diversos setores da economia. Desde silos de grãos na agroindústria, passando por transporte de minérios na mineração até o fluxo de carvão para a siderurgia, com isso percebe-se a importância desse tema. As características do fluxo dos grãos dependem de vários fatores, como o formato e composição da partícula, até suas propriedades mecânicas. Juntando essa gama de variações e o fato do sistema granular não ser contínuo, sua descrição por meio de simulação computacional é mais adequada para observarmos comportamentos de fluxo. Dada essa importância, diversas plataformas comerciais para monitoramento e previsão de escoamentos foram desenvolvidas nos últimos anos, com licenças de elevado custo. Contudo, existem soluções em código aberto, sendo estes baseados no método de elementos discretos, capazes de realizar simulações de grande porte. Com isso, o presente estudo apresenta um código aberto, adaptado e testado no *Python*, utilizando método de elementos discretos – DEM, com ênfase na aplicação típica em mineração e siderurgia. Esse código dá a oportunidade de além de entender as rotinas, adapta-las para o cenário no qual será utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas granulares, escoamento, silos, arcos de tensão.

SIMULATION ROUTINE IN YADE (OPEN ACCESS) FOR GRAIN FLOW IN LARGE SILOS USING DISCRETE ELEMENT METHOD (DEM)

ABSTRACT: Granular systems exhibit behaviors not predicted in fluid mechanics or solid

mechanics. Although in the past they have been treated in one field or another, in recent decades a whole new theoretical field has been developed to analyze phenomena that were known, but not well described in the literature. In Silos Movement, several situations can occur, such as in the flow of grains in an hourglass that, unlike liquids, the pressure on the walls is not proportional to the height. For this reason, when flowing, the grains can form tension arcs, blocking the flow. This flow of grains in silos is a topic of interest to several sectors of the economy. From grain silos in the agroindustry, through the transport of ores in mining to the flow of coal to the steel industry, with this I realized the importance of this topic. The flow characteristics of the grains depend on several factors, such as the shape and composition of the particle, to its mechanical properties. Adding this range of variations and the fact that the granular system is not continuous, its description through computer simulation is more suitable for observing flow behavior. Given this importance, several commercial platforms for monitoring and predicting flows have been developed in recent years, with high-cost licenses. However, there are open source solutions, which are based on the discrete element method, capable of performing large-scale simulations. With this, the present study presents an open code, adapted and tested in Python, using the discrete element method - DEM, with emphasis on the typical application in mining and steel. This code gives the opportunity to, in addition to understanding the routines, adapt them to the scenario in which it will be used.

KEYWORDS: Granular systems, flow, simulation, python.

1 | INTRODUÇÃO

O início das discussões sobre a dinâmica de sistemas particulados foi o trabalho pioneiro sobre pilha de areia [1]. Partindo dos resultados encontrados, criou-se toda uma teoria sobre o comportamento e interação entre grãos em escoamento, mobilizando boa parte da Física Estatística da época [2]. Com isso, diversos autores correlacionaram a dinâmica de partículas à suas situações. Temos como exemplo o estudo sobre otimização energética em escoamento de grãos e minérios, demonstrando a importância do estudo da dinâmica de sistemas granulares [1-5].

Os materiais granulares são aglomerados de partículas sólidas, no qual a interação entre as partículas ocorrem por forças de contato [2]. Apesar de que em muitos casos esses grãos serem diminutos, são muito grandes para serem tratados como flutuações termodinâmicas, então essas interações são consideráveis [6,7]. Além disso, os sistemas granulares são sistemas muito longe do equilíbrio termodinâmico, sendo necessários métodos de simulação computacional para entender sua dinâmica [8].

Como exemplos comuns de materiais granulares tem-se a areia, sementes, brita, cimento e minérios. Esses materiais estão presentes em diversas áreas industriais como, por exemplo, agroindústria, produtos farmacêuticos, da geologia, mineração e siderurgia. Por isso, seu comportamento é estudado por vários grupos de pesquisa em todo o mundo todo, tanto para a pesquisa básica, quanto para as ciências aplicadas e as engenharias.

O Brasil é o segundo maior exportador de minério de ferro do mundo, responsável por valores da ordem de R\$22 bilhões em 2019 [9]. Além disso, também é o maior produtor

de soja do mundo e 8ª maior produtor de aço do mundo, estando em oitavo lugar no ranking de produtores [10]. Assim, armazenamento e fluxo de grãos (aqui incluídos grãos de soja, de carvão ou pelotas de minério de ferro) tem importância estratégica para o país, pois a otimização dos parâmetros pode reduzir muito o custo de produção e transportes desses itens.

Os estudos são normalmente feitos em modelos físicos ou por meio de simulações, ou a combinação das duas abordagens, no qual normalmente os modelos físicos são usados para “calibrar” os modelos computacionais [10].

Para obter informações úteis para processos industriais, foi utilizando o método de elementos discretos (DEM), pois esses métodos permitem abordagens mais realistas e ajustes de parâmetros mais próximos da realidade [1,2].

Diante da importância do monitoramento e simulação de escoamento de partículas, diversas plataformas de simulação estão disponíveis no mercado, porém seu custo, em geral, é muito alto. Assim, os trabalhos de pesquisa têm usado licenças com restrições de tamanho, disponíveis para estudantes ou restritas ao uso acadêmico, limitando as simulações, pois para sistemas mais realistas são necessários milhões ou bilhões de partículas [1,2,11].

Com isso, o presente estudo desenvolveu uma rotina para simulação para o fluxo de grãos em silos, com a possibilidade de simular sistemas de grande porte utilizando o software YADE, que apresenta uma linguagem similar ao *Python*. A vantagem é que os códigos estão disponíveis e podem ser estudados, possibilitando sua adaptação, contribuindo para seu desenvolvimento.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foi utilizado como plataforma o YADE (código aberto). As rotinas para customização da plataforma são desenvolvidas em Python. Quando se trabalha com o YADE a importância do contato com o Python é ainda maior, pois ele foi desenvolvido utilizando a sintaxe padrão do Python para escrita de programas.

Outro ponto importante para o desenvolvimento do trabalho foi a utilização do sistema operacional Linux, em questão o Xubuntu versão 18.04 (bionic), pois a plataforma de simulação YADE necessita desse sistema operacional.

O código teve como abordagem a simulação visível (representação visual) dos materiais simulados, além de amostragem das energias envolvidas no processo. O código foi descrito no tópico seguinte.

3 | DISCUSSÃO

Diversas classes de métodos computacionais podem ser referidas para simular

qualquer processo. A escolha desse método tem mais a ver com a natureza do problema. Por exemplo, for estudar o fluxo de calor em materiais contínuos, ou mesmo a propagação de tensões mecânicas, usa-se um método para solução de equações diferenciais, como o Método dos Elementos Finitos (FEM), por exemplo [1-3,12].

No presente estudo, foi simulado a queda de grãos genéricos (à definir pelo operador) em silos. Para isso, foi utilizada a classe de plataformas que utiliza o Método de Elementos Discretos (DEM) para a solução dos problemas [1-4,13]. Muito similar à abordagem usada na Dinâmica Molecular, esse método define as equações de movimento para um sistema formado por partículas. A cada uma delas é associada uma posição e velocidades, bem como as forças que nela atuam [14,15].

Contudo, a escolha de utilizar uma plataforma DEM, se deve ao fato de que o FEM utiliza métodos finitos com aproximações de resultados tendendo a continuidade, e isso para um sistema consideravelmente grande pode tornar a simulação inviável, já as DEM, apesar de uma maior perda de informações, devido ao truncamento, apresenta bons resultados em tempo de execução extremamente mais viáveis [1,2,15,16].

Como considerações, define-se que a maior parte das interações é de curto alcance e só se produzem pelo contato entre as partículas. No presente caso, têm-se somente as forças elásticas produzidas pela compressão e forças de atrito entre as partículas. Partículas que não se tocam não interagem entre si. Com isso, as interações entre os grãos são dissipativas devido ao atrito estático e à inelasticidade das colisões [17]. Outro fato a ser considerado é o fato da temperatura não ter influência, logo argumentos termodinâmicos não são considerados [17,18].

Nas Figuras 1-3 é apresentado o código da simulação em escala visível utilizando o software YADE, para a visualização da formação de pilha de grãos com possibilidade de variação de parâmetros.

```

14 # loading: utt-0 -#
15
16 from yade import pack, plot
17 import time
18 import random
19 import math
20 from yade import ymport
21
22 utils.readParamsFromTable(descriptionIn = 'noDescription',
23 frIn = 0.7, emIn=0.01, etIn=0.01, tcIn=0.0001,
24 rhoIn = 1200.0,
25 dumpvTKIn = 4000
26 )
27
28 from yade.params.table import *
29
30 import shutil
31
32 try:
33     shutil.rmtree('cpt')
34 except OSError:
35     pass
36 os.mkdir('cpt')
37
38 altura = 0
39 rMed = 0
40 angHepeudo = 0
41 contParticulas = 0
42
43 wall = 0, materials.append(ViscElMat(frictionAngle=frIn, density=rhoIn, tc=tcIn, em=enIn, et=etIn,))
44 0.bodies.append(ympart.gesh('hourglass-mesh', scale=500, color=[1,0,1], mask=0))
45 0.bodies.append(geom.facetBox((0, 0, -9), (10, 30, 0), wallMask=03, color=[1,1,1], wire=False))
46
47
48 sp=pack.SpherePack()
49 sp.toSimulation()
50 sp.makeCloud((-3, -3, 5), (3, 3, 0), rMean=.2, rHolPuzz=.3)
51 sp.toSimulation(color=[ 0, 0, 0])

```

Figura 1: Código para simulação de escoamento de grão em silo – YADE (1).

```

45 for b in 0.bodies:
46     if not isinstance(b.shape, Sphere): continue
47     contParticulas=contParticulas+1
48
49 0.engines=[
50     ForceResetter(),
51     InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
52     InteractionLoop(
53         [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(),Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
54         [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
55         [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]
56     ),
57     NewtonIntegrator(gravity=(0,0,-9.81),damping=.75),
58     PyRunner(command='checkUnbalanced()',realPeriod=2),
59     PyRunner(command='addPlotData()',iterPeriod=100)
60 ]
61
62 0.dt=1*PWaveTimeStep()
63
64 0.trackEnergy=True
65
66

```

Figura 2: Código para simulação de escoamento de grão em silo – YADE (2).

```

67 def checkUnbalanced():
68     if unbalancedForce() < 0:
69         0.pause()
70         plot.saveDataTxt('bbb.txt.txt2')
71     for b in B.bodies:
72         if not isinstance(b,shape.Sphere): continue
73         if b.speed > vMax:
74             b.speed = vMax
75
76         print(round(b.state.refPos[0], 2), round(b.state.refPos[1], 2), round(b.state.refPos[2], 2))
77
78         if round(b.state.refPos[2], 2) < altura:
79             altura = round(b.state.refPos[2], 2)
80             rMed = sqrt(round(b.state.refPos[0], 2)**2 + round(b.state.refPos[1], 2)**2)
81
82             rMed /= contParticulas
83             angReposo = math.atan(altura/rMed)
84
85             print("")
86             print('Pilha com ' + str(contParticulas) + ' particulas')
87             print('Altura da pilha: ' + str(round(altura, 2)))
88             print('Razo media da pilha: ' + str(round(rMed, 2)))
89             print('Angulo de repouso da pilha: ' + str(round(angReposo, 2)))
90
91 def addPlotData():
92     plot.addData([0, iter, unbalanced-unbalancedForce(), "E.energy"])
93
94 plot.plots=["i": "unbalanced", "name", "E.energy", "keys"]
95 yade.plot.live = True
96 yade.plot.autosave = True
97
98 plot.plot()
99
100 B.saveTag()
101
102 yade.plot.saveDataTxt('teste.txt', save=0, time)
103
104 from yade import qt
105 qt.View()
106 qt.Renderer()

```

Figura 3: Código para simulação de escoamento de grão em silo – YADE (3).

Após a execução do código no YADE, se tem a geração de três janelas. A primeira é referente a interface de interação do próprio YADE, onde tem-se a possibilidade de acessar comandos da execução, tais como começar, pausar, retroceder, visualizar, mudar o ponto de vista, entre outros mais avançados, representado pela Figura 4. A segunda janela visualizada é a do gráfico onde serão apresentadas as energias internas do sistema, apresentado na Figura 5. A última é a janela da visualização do próprio sistema de grãos, Figura 6, apresentando o comportamento visual dos grãos escoando no silo.



Figura 4: Janela de comandos do YADE.

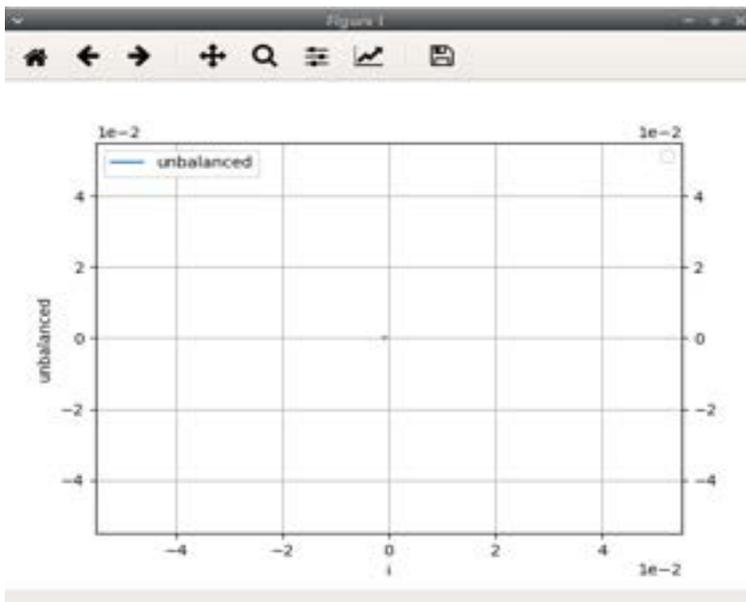


Figura 5: Gráfico de energias internas do sistema.

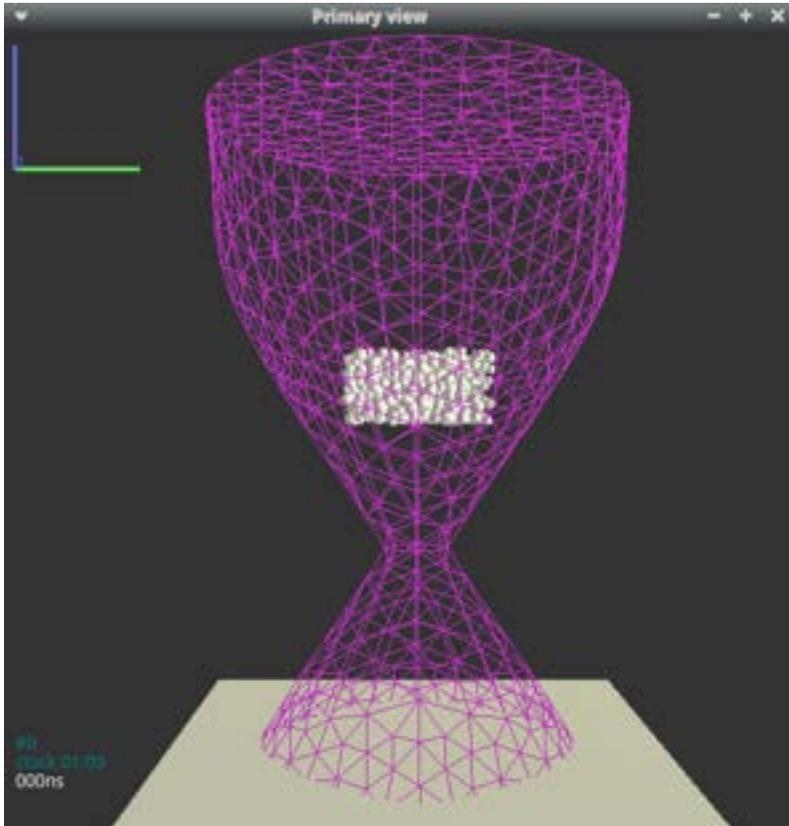


Figura 6: Representação visual dos grãos escoando no silo (momento inicial).

Percebe-se que a geometria escolhida para o silo em questão foi a de um corpo com base cônica, contendo um engargantamento por onde os grãos gerados irão escoar naturalmente devido à ação da gravidade, além das interações entre os próprios grãos em si e com as paredes do silo.

Após a saída, tem-se paredes da parte inferior do cone, criando um limite, pois caso algum destes grãos escape, eles cairão infinitamente, gerando resultados indesejados (dica para evitar outliers).

Após iniciada a simulação, pode-se ver a primeira ação de queda dos grãos na Figura 7.

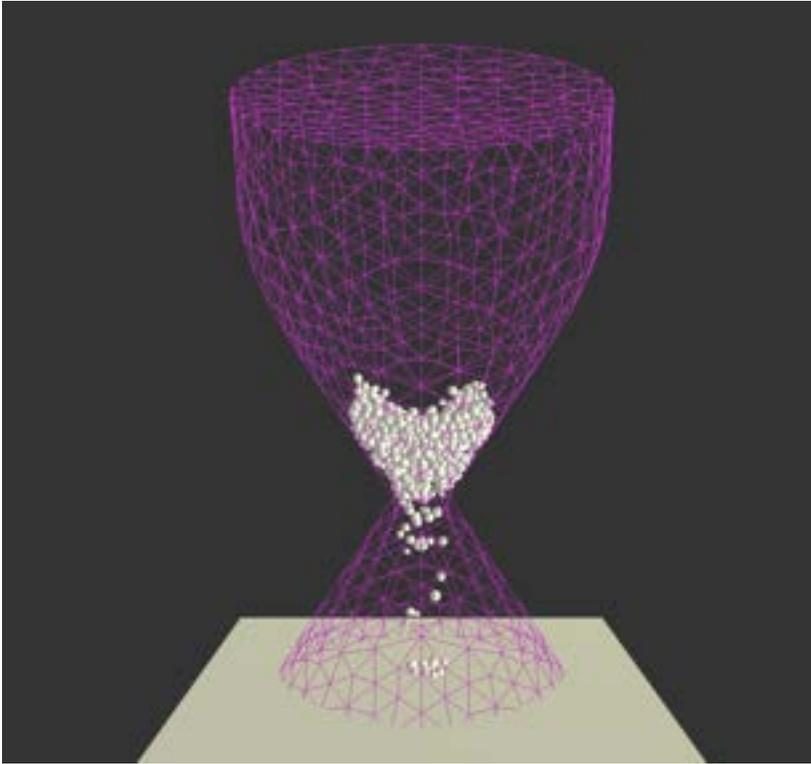


Figura 7: Início do movimento de queda dos grãos em colisão com paredes do silo.

Conforme o tempo da simulação passa, o movimento dos grãos continua, até que seja formada uma pilha sobre o plano e todos os grãos caírem, conforme a Figura 8.

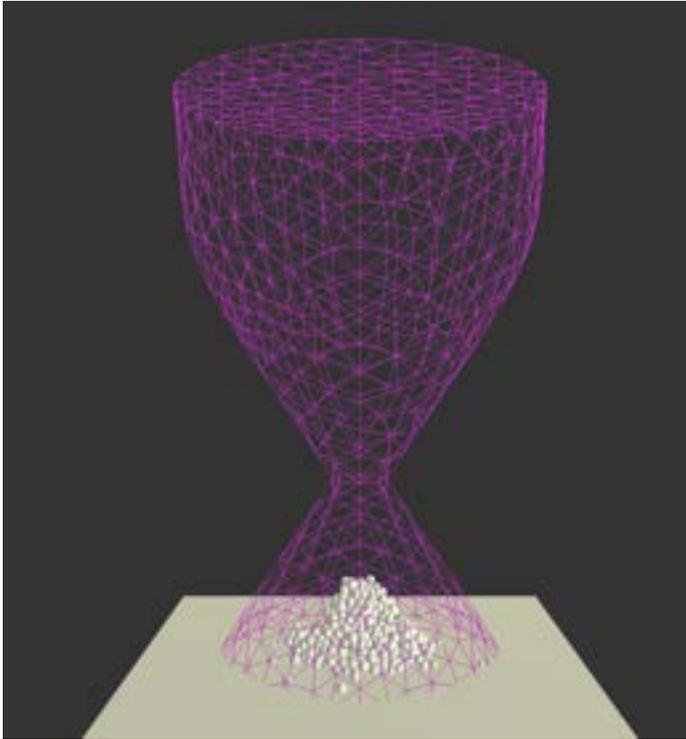


Figura 8: pilha formada após o escoamento dos grãos pelo orifício do silo.

Neste ponto da execução da simulação, finaliza-se a etapa de coleta dos dados, resultando no gráfico com a amostragem das energias finalizadas, plotado conforme a Figura 9.

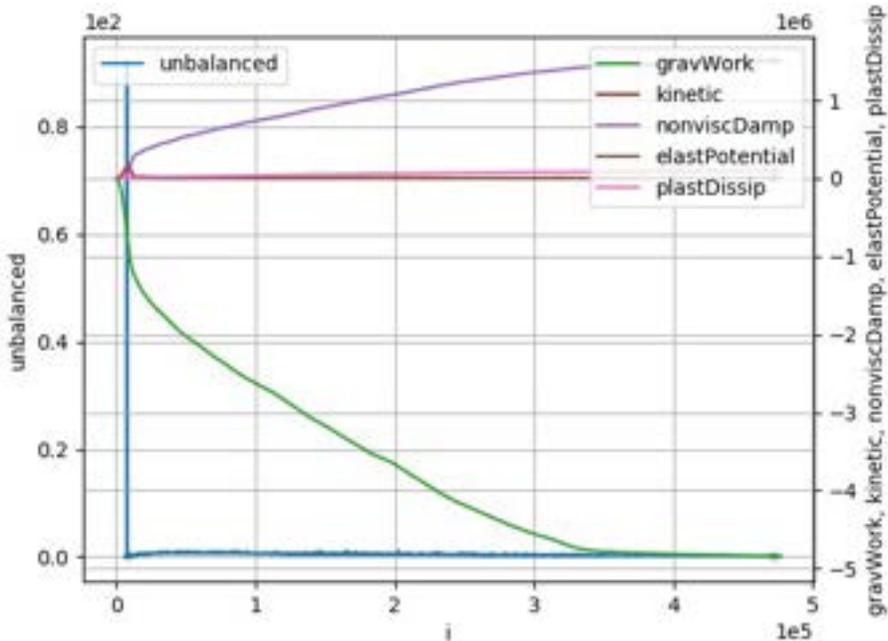


Figura 9: Gráfico com demonstração das energias após a execução da simulação.

Para analisar, a lista das energias contidas no sistema, representado no gráfico da Figura 9, são:

- Potencial gravitacional (verde);
- Cinética (vermelho);
- Amortecimento não viscoso (roxo);
- Potencial elástica (marrom);
- Dissipação plástica (rosa);
- Energia não balanceada (azul).

A energia potencial gravitacional é a energia inicial do sistema, estando armazenada nas partículas no momento inicial da simulação [18]. Após iniciar a simulação, essa energia foi gradativamente convertida em energia cinética [1-3,19]. Nesse momento observa-se uma elevação da energia cinética e uma suavização no decremento da energia potencial gravitacional, como observado no gráfico da Figura 9. Isso pode ser explicado pela desaceleração devido ao contato das partículas com a parede do silo [2,20].

Por causa desse contato das partículas e a parede do silo, observa-se um incremento abrupto das energias dissipativas, pois tais colisões geram dois problemas: a dissipação de energia plástica e a energia de dissipação por amortecimento.

A dissipação de energia plástica é proveniente dos choques com deformações plásticas, representando pequena parcela dos problemas, como observado na Figura 9, pois os grãos apresentam alta resistência (parâmetro configurado) [6,21]. Já a dissipação de energia por amortecimento, que representa sem dúvidas a maior parcela de energia ao final da simulação, é proveniente da dissipação de energia ligada ao choque entre os grãos (perda de calor, absorção de energia pela estrutura), demonstrando a importância desse parâmetro para as simulações, considerando aplicações reais [9,12,18].

Nota-se também que ao longo do processo a energia potencial elástica permanece constante, pois a configuração dos grãos faz com que os mesmos não deformam a ponto de conseguir devolver qualquer energia para o sistema.

Agora o ponto chave dessa simulação é compreender do que se trata a energia não balanceada, e o porquê ela é utilizada como critério de parada da simulação, como observado no código. A energia não balanceada, na realidade é uma compensação de energias de um sistema feito por simulação [3,8]. Isso é devido à conservação da energia total em um sistema fechado, no qual a energia apenas é alterada, mas sempre conservada. Mas no mundo computacional tem-se algo importante a ser levado em consideração, o truncamento [8,13,21].

O truncamento nada mais é do que a incapacidade de um computador carregar todas as informações de um sistema real [3,4]. Longe disso, o computador na realidade tende a ter seu limite de casas decimais bem curto, quando comparado com um sistema real. Logo, erros de arredondamento quanto à posição real das partículas, bordas para sua colisão, velocidades aproximadas, entre outras variáveis, fazem com que o somatório das energias internas do sistema não se mantenham constantes e oscilem [21]. Por isso a necessidade da energia não balanceada.

Ainda sobre a Figura 9, percebe-se na curva da energia não balanceada (azul) uma oscilação maior no instante inicial da simulação. Isso pode ser explicado pela geração das partículas em si e a sua anexação na simulação, contudo, vai decrescendo ao longo do tempo, tendendo a zero num instante final [1,5,6]. Quando essa energia alcança um valor suficientemente pequeno (depende da precisão da simulação), indica que essa simulação alcançou seu propósito, ou seja, os parâmetros estão próximos aos reais. Com isso, justificasse esse parâmetro ser o critério de parada da simulação.

Por fim, a última análise a ser realizada é a do retorno dos resultados finais. Após a execução do problema, teremos três valores a serem analisados: Altura final da pilha, raio médio da pilha e ângulo de repouso da pilha. Isso é gerado após a execução do código, apresentado na Figura 10.

```
Pilha com 1714 particulas
Altura da pilha: 1.04
Raio medio da pilha: 0.56
Angulo de repouso da pilha: 30.87
```

Figura 10: valores dos parâmetros finais da pilha de grãos após a execução da simulação.

Com base nesses parâmetros, os operadores poderão tomar decisões em relação à alteração de algum parâmetro do processo.

4 | CONCLUSÕES

A implementação do código realizada software YADE foi feita com sucesso. Isso vale ser ressaltado, pois esse software utiliza a linguagem do Python e é de livre acesso.

O código compilado tem-se a possibilidade de variar o fluxo de grãos e em diferentes geometrias, visualizando os resultados dessas variações de parâmetros e também sua simulação gráfica. Além disso, o código possibilita a visualização das energias envolvidas no sistema, podendo assim realizar uma avaliação criteriosa do processo.

REFERÊNCIAS

- [1] WANG, Shuai; SHEN, Yansong. Coarse-grained CFD-DEM modelling of dense gas-solid reacting flow. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, [S.L.], v. 184, p. 122302, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122302>.
- [2] NAPOLITANO, Erasmo S.; RENZO, Alberto di; MAIO, Francesco P. di. Coarse-grain DEM-CFD modelling of dense particle flow in Gas-Solid cyclone. *Separation And Purification Technology*, [S.L.], v. 287, p. 120591, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120591>.
- [3] BYŁKA, Rafał; MOLENDĄ, Marek; HORABIŁ, Józef. DEM simulation of the pressure distribution and flow pattern in a model grain silo with an annular segment attached to the wall. *Biosystems Engineering*, [S.L.], v. 193, p. 75-89, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.013>.
- [4] WEINHART, Thomas; LABRA, Carlos; LUDING, Stefan; OOI, Jin Y.. Influence of coarse-graining parameters on the analysis of DEM simulations of silo flow. *Powder Technology*, [S.L.], v. 293, p. 138-148, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.052>.
- [5] TEJCHMAN, J. *Confined Granular Flow in Silos: Experimental and Numerical Investigations* (Springer, 2013).
- [6] ALVES, Felipe Inácio Cunha, *Produção de Coque Metalúrgico a Partir de Carvão Densificado por brocompactação em Forno de Soleira Aquecida*, 2017. Dissertação (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- [7] BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. Self-Organized Criticality. An explanation of $1/f$ noise. *Phys, Rev Lett*, 59, p. 381 (1987).

- [8] CALAZANS, Leonardo Ferreira *et al.* Termodinâmica de estados estacionários: entropia, equivalência de ensembles e independência de reservatórios. 2020.
- [9] DA SILVA, T. M. Simulação de Segregação e Ondulações em Estradas Não Pavimentadas. 2016. Dissertação (Ciências - Física dos Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- [10] DA SILVA, T. M.; BERNARDES, A. T. Ripples and Grains Segregation on Unpaved Road. *International Journal Of Modern Physics C*, v.29, p.1850120 - 2018.
- [11] FULLARD LA *et al.* 2019 The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings. *Proc. R. Soc. A* 475: 20180462. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0462>.
- [12] HANSEN, A.; BIDEAU, D. (eds.) *Disorder and Granular Media*, North-Holland: Amsterdam, 1992
JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R.; *Science* 255, 1523 (1992).
- [13] JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R.; BEHRINGER, R. P. *Rev. Mod. Phys.* 68, 1259 (1996). LIAN, G.; THORNTON, C.; ADAMS, M. J., *J. Coll. Int. Sci.* 161, 138 (1993).
- [14] LOPES, P. F. T.; *Modelagem de Fluxo em Meios Granulares: Uma abordagem Física, Matemática e Numérica*. 2015. Dissertação (Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- [15] NEVES, C. E.V.; 2009. *Comportamento de Materiais Granulares usando o Método dos elementos discretos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação Universidade de Brasília. Brasília, 2009.
- [16] PINTO, S. F.; COUTO, M. S.; ATMAN, A.; ALVES, S. G.; BERNARDES, A. T.; REZENDE, H. F. V.; SOUZA, E. C. Granular fingers on jammed systems: new fluid-like patterns arising in grain-grain invasion experiments. *Physical Review Letters*, v.99, p.e068001 – 2007.
- [17] RESENDE, Hélio Fernando Verona de. *Formação de Padrões em meios Granulares Densos*. 2008. Tese (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- [18] SILVA, A. C. Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos.
- [19] MIDREX. 2010. Tese (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- [20] SILVA, A. C.; BERNARDES, A. T.; *Iron Ore Direct Reduction: Simulation of In: Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. 1 ed. : CRC Press, 2016, p. 1903-1909.
- [21] SILVA, A. C.; BERNARDES, A. T. Simulação computacional do escoamento de grãos em silos. *Exacta* (São Paulo. Impresso), v.8, p.45 - 53, 2010.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Alvenaria 1, 2, 4, 5, 8, 10
Aplicação aeroespacial 19, 24, 25, 26, 28, 30
Aplicação nuclear 19, 23, 25, 26, 30, 31
Aplicação petrolífera 24, 25, 26, 28, 30
Aquecimento 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
Arcos de tensão 33

B

Blocos cerâmicos 1, 4, 9, 10, 11, 12

C

Concreto 1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 55
Conforto térmico 1, 2, 4
Construção civil 1, 2, 55

D

Desempenho térmico 1, 2, 3, 13, 14
Dureza 15, 21, 22, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32

E

Edificação 1, 2, 3, 13
Energia 2, 3, 12, 43, 44, 47, 49, 52, 53, 54
Energia interna 49, 54
Envelhecimento 15, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
Escoamento 33, 34, 35, 37, 38, 42, 46, 47, 48

G

Grãos 21, 29, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 54

I

Inconel 718 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 32
Interação 34, 38, 47, 48, 49, 51

M

Materiais granulares 34, 46, 48, 54
Mecânica 15, 16, 29, 31, 32, 33, 48

Método de elementos discretos (DEM) 33, 35, 36

Microestrutura 15, 17, 20, 22, 23, 25, 32

N

NBR 15575 1, 2

Níquel 15, 16, 17

O

Otimização 34, 35, 47, 49, 54

P

Partículas 17, 20, 23, 30, 34, 35, 36, 43, 44, 47, 48, 49, 51, 52, 53

Poço de potencial 47, 48, 49, 52, 53

Potencial de Lennard-Jones 47, 48, 49

Python 33, 34, 35, 45, 47, 48, 49, 51

R

Resistência 2, 15, 16, 17, 25, 29, 30, 31, 44

S

Silo flow 45, 47, 48

Silos 33, 34, 35, 36, 45, 46, 47, 54

Simulação 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 53, 54

Simulação em Yade 33

Sistemas de vedações verticais 1

Sistemas granulares 33, 34, 47, 48, 49

Solubilização 15, 17, 19, 20, 22, 25, 29, 31, 32

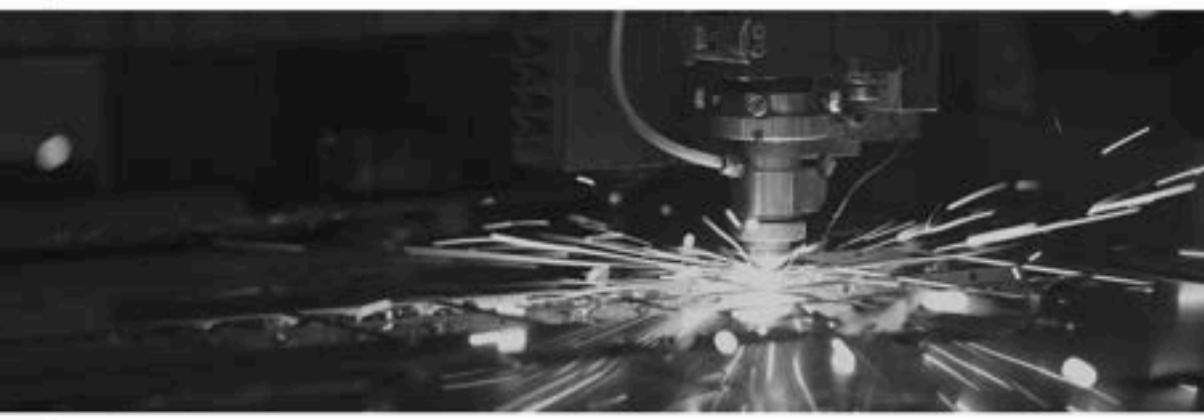
Superligas 15, 16, 17

T

Temperatura 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 24, 36

Termografia infravermelha 1, 2, 3

Tratamento térmico 17, 23, 25, 26, 30



DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS DE MATERIAIS E METALÚRGICA

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br



DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS **DE MATERIAIS E METALÚRGICA**

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br