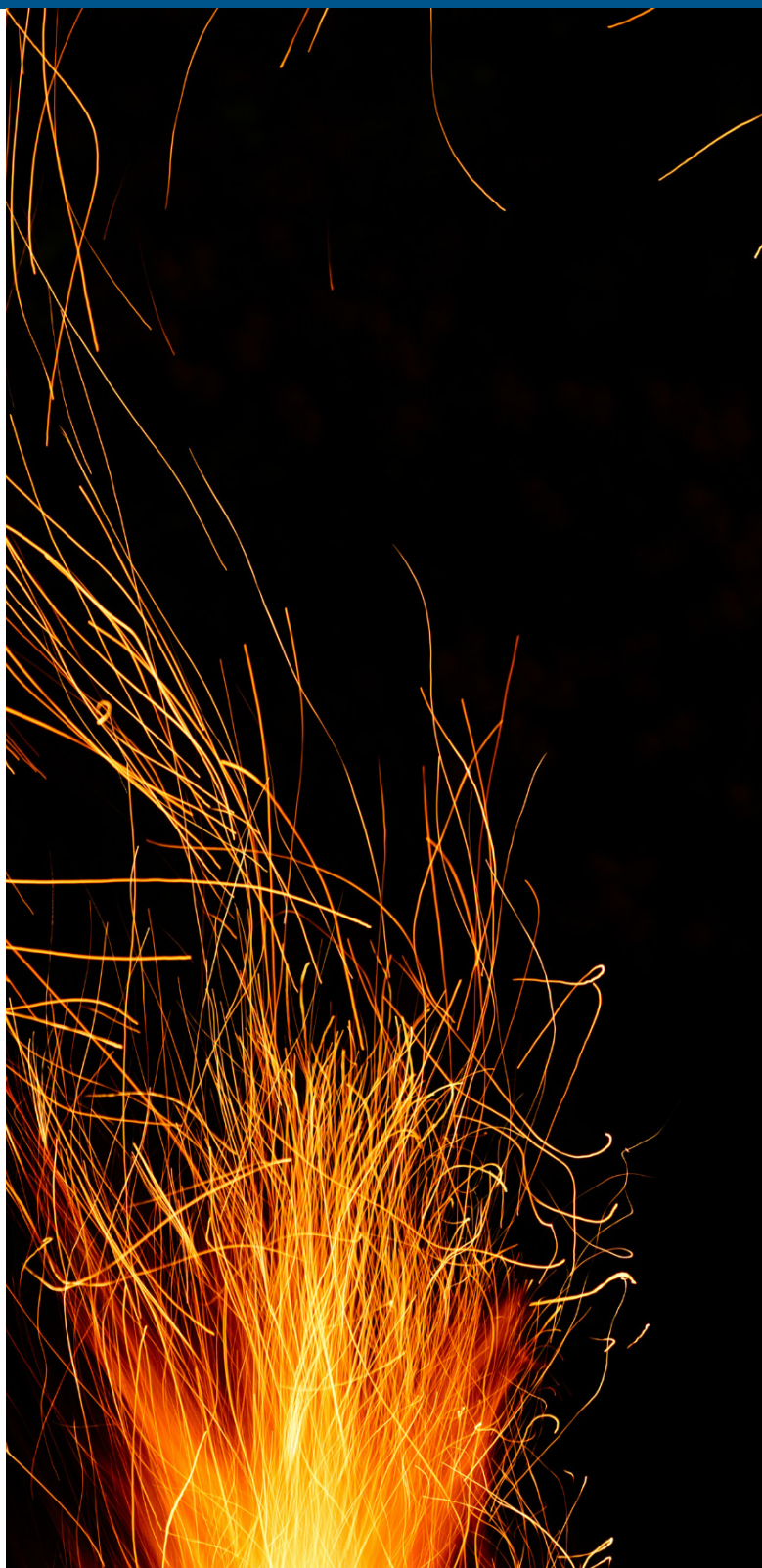


revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

28

v. 9, n. 28, mai., 2025



CONFIABILIDADE METROLÓGICA

Testes periódicos em transformadores de energia

ANOMALIAS CONSTRUTIVAS

Estudo de caso em edificação pública

PROCESSOS INDUSTRIAIS

Estudo comparativo de equipamentos de aglomeração

ipt

INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

ENSINO TECNOLÓGICO



revista **IPT**
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

v.9, n.28, maio, 2025

Quadrimestral

Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado

Andreia Longuinho da Silva

José Maria de Camargo Barros

Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado

Silas Derenzo

Assistentes Editoriais

Denís Martins Lemos

Flavio Sergio Jorge de Freitas

João Antonio Rodrigues Garcia

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

DIAGRAMAÇÃO E ARTE:

Silvia Megumi Mizoguti Padovani

REVISÃO:

Eduardo Luiz Machado

José Maria de Camargo Barros

sapiens.ipt.br

revista@ipt.br

Av. Prof. Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830



na capa
Foto Canva

revista
IPT
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

#28

revista IPT
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

SUMÁRIO

artigos técnicos

06 Estratégias para análise mineralógica de concreto após exposição ao fogo.

Autores: Sérgio Soares de Lima, Fabiano Ferreira Chotoli, Jilson Cardoso, Henrique Almeida Santana

21 Metodologia para Calibração e Verificação Operacional de um Analisador de Resposta em Frequência por Varredura

Autores: Sérgio Soares de Lima, Fabiano Ferreira Chotoli, Jilson Cardoso, Henrique Almeida Santana

34 Estudo comparativo de aglomeração em disco rotativo e peletizadora.

Autores: Samantha Custódio Aquino de Faria, Sandra Lúcia de Moraes

73 Perícia judicial de engenharia para magistratura: um estudo de caso em edificação pública municipal.

Autores: Rodrigo Andrade dos Santos, Valdecir Angelo Quarcioni

COMPARTILHANDO CONHECIMENTO

A vigésima oitava edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' chega aos leitores na esteira da 18ª edição do 'Mestrado Profissional do IPT', no último dia 16 de maio. Desde 1997, são 1602 profissionais formados em quatro áreas: Engenharia da Computação; Processos Industriais; Habitação: Planejamento e Tecnologia; e Computação Aplicada. Exemplo marcante de conhecimento compartilhado.

Quer outro exemplo?

A 'Revista IPT' que, nesta edição, traz quatro artigos muito relevantes nas respectivas áreas, compartilhando conhecimento científico e tecnológico do mais alto nível. Confira a seguir.

Em "Estratégias para análise mineralógica de concreto após exposição ao fogo" os autores procuram compreender as alterações químicas e mineralógicas no concreto após exposição a altas temperaturas, como em incêndios, essencial para definir medidas que garantam estabilidade às estruturas feitas desse material. São eles: Sérgio Soares de Lima e Fabiano Ferreira Chotoli, mestres em Habitação: Planejamento e Tecnologia; Henrique Almeida Santana, doutor em Engenharia Civil; e Jilson Cardoso; todos eles pesquisadores do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção do IPT.

O artigo intitulado "Methodology for Calibrating and Operational Check of a Sweep Frequency Response Analyzer" (somente em inglês), focaliza testes periódicos eficazes em transformadores de energia para detectar possíveis falhas, antecipando-se na mitigação de possíveis problemas. Seus autores são Fabrício Gonçalves Torres; Tiago Lopes Santos; e Ryan Wictory Sallatti, pesquisadores do IPT.

"Estudo comparativo de aglomeração em disco rotativo e peletizadora" é o título do artigo de autoria de Samantha Custódio Aquino de Faria, do Mestrado Profissional em Processos Industriais; e Sandra Lúcia de Moraes, diretora técnica da unidade de Materiais Avançados do IPT. As autoras apresentam dados e aspectos gerais para seleção de equipamentos de aglomeração, comparando processos por tombamento em disco rotativo e o método de baixa compressão utilizando peletizadora.

Fecha esta edição o artigo "Perícia judicial de engenharia para magistratura: um estudo de caso em edificação pública municipal", que coloca em foco o papel do chamado "perito do juízo", um profissional de engenharia nomeado pelo juiz, que investigará causas de eventuais anomalias construtivas para elaborar um laudo técnico que irá auxiliar na decisão judicial. São seus autores: Rodrigo Andrade dos Santos, do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia; e Valdecir Angelo Quarcioni, docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia e pesquisador do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção da unidade Habitação e Edificações do IPT.

Boa leitura!

*Eduardo
L. Machado*

Eduardo Luiz Machado
Diretor Técnico em Ensino Tecnológico



Artigo Técnico

Estratégias para análise mineralógica de concreto após exposição ao fogo

Strategies for mineralogical analysis of concrete after exposure to fire

Sérgio Soares de Lima^{ab*}, Fabiano Ferreira Chotoli^{ab},
Jilson Cardoso^a, Henrique Almeida Santana^{ac}

^a Laboratório de Materiais para Produtos de Construção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

^c Doutor em Engenharia Civil

Palavras-chave: durabilidade, agregado graúdo, desempenho, análise mineralógica, termogravimetria.

Keywords: durability, coarse aggregate, performance, mineralogical analysis, thermogravimetry.

Resumo

Compreender as alterações químicas e mineralógicas que ocorrem no concreto após exposição a altas temperaturas, como em incêndios, é essencial para definir as medidas necessárias para garantir a estabilidade das estruturas construídas com esse material. Com o objetivo de contribuir para este campo de estudo, este trabalho investiga as modificações na mineralogia do concreto exposto a altas temperaturas, propondo uma metodologia simples e consistente para sua análise. A pesquisa abrange três tipos de concreto, produzidos com diferentes agregados (granítico, carbonático e seixo). As análises foram realizadas utilizando as técnicas de Difração de Raios X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG), além da determinação do resíduo insolúvel (RI) por gravimetria. Variáveis como a profundidade do concreto em relação à face exposta ao fogo e o tipo de agregado impactaram os resultados obtidos. A combinação das técnicas DRX e TG/DTG forneceu uma análise mineralógica mais precisa para os concretos deste estudo.

Abstract

Understanding the chemical and mineralogical changes that occur in concrete after exposure to high temperatures, such as during fires, is essential to define the necessary measures to ensure the stability of structures built with this material. Aiming to contribute to this field of study, this work investigates the modifications in the mineralogy of concrete exposed to high temperatures, proposing a simple and consistent methodology for its analysis. The research covers three types of concrete, produced with different aggregates (granite, carbonate, and pebbles). The analyses were carried out using X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetry (TG/DTG) techniques, as well as the determination of insoluble residue (IR) by gravimetry. Variables such as the depth of the concrete in relation to the fire-exposed surface and the type of aggregate impacted the results obtained. The combination of XRD and TG/DTG techniques provided a more precise mineralogical analysis for the concretes in this study.

1 Introdução

Quando o concreto é exposto a temperaturas elevadas, ocorrem diversas alterações físicas e químicas que comprometem suas propriedades mecânicas e capacidade estrutural (HANDOO *et al.*, 2002). A partir de 100 °C até cerca de 150 °C, ocorre a evaporação da água livre e da água capilar, que não está quimicamente ligada à matriz. Entre 150 °C e 200 °C, inicia-se a desidratação parcial do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que compõe a maior parte da fase endurecida do cimento. Na faixa de 200 °C a 400 °C, essa desidratação se intensifica e ocorre também a decomposição da etringita, o que favorece o surgimento de microfissuras. Entre 400 °C e 550 °C, há uma decomposição significativa da portlandita, formando óxido de cálcio e liberando vapor d'água, o que resulta em perda substancial da resistência mecânica. A partir de 500 °C até cerca de 600 °C, ocorre intensa desidratação do C-S-H. Entre 600 °C e 800 °C, inicia-se a decomposição dos carbonatos presentes, principalmente o carbonato de cálcio (CaCO_3), gerando óxido de cálcio e dióxido de carbono (MENÉNDEZ *et al.*, 2012; FERNANDES *et al.*, 2017; MARTÍN-GARRIDO *et al.*, 2020).

A compreensão das alterações na mineralogia da matriz do concreto é fundamental para determinar a estabilidade da estrutura pós incêndio e a técnica de difração de raios X (DRX) é uma das ferramentas utilizadas para este tipo estudo. Nos últimos anos, a difração de raios X tornou-se uma das técnicas mais importantes para caracterizar sistemas de cimento Portland, destacando-se pela precisão dos resultados obtidos. Esta precisão deve-se aos avanços em detectores e softwares para este tipo de análise. As abordagens de quantificação evoluíram, passando de ajustes de picos únicos para métodos que utilizam perfis completos, como o método Rietveld (SNELLINGS *et al.*, 2014).

A caracterização mineralógica por DRX é uma técnica fundamental para analisar a composição mineral de materiais, como rochas, solos, produtos cimentícios e diversos outros compostos que contenham fases cristalinas. A DRX é uma das poucas metodologias capazes de identificar e quantificar com precisão as fases cristalinas presentes em um material. Cada mineral possui uma "assinatura" única de difração, o que permite a diferenciação entre diversos compostos, mesmo quando estão misturados, embora o aumento de diversas fases pode tornar mais complexa a análise. No entanto, é essencial nos seguintes estudos:

- Precisão na identificação e quantificação de fases cristalinas.
- Controle de qualidade e otimização de processos industriais.
- Estudo de transformações químicas e processos de degradação.
- Detecção de impurezas ou fases secundárias críticas para o desempenho do material.
- Desenvolvimento de novos materiais e verificação de propriedades finais.
- Geologia (identificação de minerais em rochas).
- Engenharia de materiais (caracterização de produtos cimentícios).
- Indústria cerâmica (controle de qualidade de matérias-primas).

No estudo de produtos cimentícios, é possível quantificar portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], alita (C_3S), belita (C_2S), entre outros (ARANDA *et al.*, 2012). Esse conhecimento ajuda a prever o comportamento mecânico e a durabilidade de materiais cimentícios, principalmente após condições atípicas, conforme ocorre durante os incêndios. No entanto, quando empregada a análise mineralógica por difração de raios X (DRX) para a análise do concreto, verificam-se duas limitações que impactam na análise desse material: o material quartzoso e a quantificação inadequada da fase amorfa. O material quartzoso presente, proveniente dos agregados graúdo e miúdo, apresenta sinal intenso no difratograma (MIDDENDORF *et al.*, 2005), dificultando a interpretação das demais fases minerais.

A fase amorfa, formada majoritariamente de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), não é identificada totalmente, possivelmente, devido a formação de fase de C-S-H nanocristalina, polimorfos e/ou pela abordagem adotada na quantificação. Logo, resultará em uma superestimação das demais fases mineralógicas (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

Uma análise adequada da mineralogia de concreto produzido com materiais convencionais, não convencionais e/ou acometidos por manifestações patológicas, pode auxiliar, em conjunto com outras técnicas, para uma conclusão mais assertiva.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar os resultados das análises mineralógicas por difração de raios X (DRX) de três diferentes tipos de concreto, produzidos com agregados graúdos distintos (granítico, carbonático e seixo), após um ensaio normatizado de exposição ao fogo. Com o auxílio da análise termogravimétrica (TG/DTG), a determinação do C-S-H do concreto é estimada por meio de cálculo estequiométrico e, em seguida, combinada com os resultados obtidos na análise mineralógica por DRX. Para validação, são comparados os resultados do C-S-H (obtidos pela DRX e TG) com os dados de resíduo insolúvel, ou seja, as fases mineralógicas não solúveis em ácido clorídrico (HCl).

2 Procedimento metodológico

Foram produzidos três traços de concreto, para posterior ensaio de exposição ao fogo e avaliação mineralógica. Os concretos foram produzidos com cimento tipo CP II F 32, agregado miúdo, agregado graúdo e água da rede de abastecimento público. Cada tipo de concreto foi produzido com um agregado graúdo específico, sendo: a) concreto com agregado granítico (CAG); b) concreto com agregado carbonático (CAC) e c) concreto com seixo rolado (CSR). A **TABELA 1** apresenta a proporção dos materiais de cada traço de concreto e a resistência à compressão (RC), aos 28 dias, estabelecida por meio da ABNT NBR 5739:2018.

O teste de resistência ao fogo, conforme a ABNT NBR 16965:2021, foi realizado em amostras de concreto com dimensões de corpos de prova prismáticos de 400 mm x 400 mm x 120 mm. Para este ensaio, as amostras foram posicionadas em um protótipo de alvenaria, com termopares fixados na face externa em três diferentes profundidades (30 mm, 60 mm e 90 mm), enquanto a segunda face estava exposta a um ambiente controlado de exposição ao fogo. A temperatura máxima alcançada pelo concreto aos 180 minutos de exposição foi determinada por meio da curva de temperatura versus tempo das amostras, sendo as medições realizadas em duplicata para as três profundidades do termopar.

Tabela 1 – Proporções dos materiais e resistência à compressão (RC) determinados para os três traços de concreto.

Traço	Consumo de materiais (kg/m³)					RC (MPa)
	Cimento	Brita 1	Brita 0	Areia	Água	
CAG	290	577,1	403,1	878,7	211,7	18,1
CAC	290	577,1	403,1	878,7	211,7	19,8
CSR	290	977,3	-	878,7	211,7	20,8

Fonte: elaborado pelos autores

As análises foram realizadas com amostras de concreto extraídas das três profundidades (30 mm, 60 mm e 90 mm). O resíduo insolúvel foi determinado em ácido clorídrico (RI), conforme o método apresentado em Quarcioni (1998) e em IPT (1940). A análise por difração de raios X foi realizada de acordo com a ASTM C1365:2018, em amostra passante em peneira com abertura de malha de 45 μ m (ABNT n° 325) e posteriormente cominuída em almofariz. Utilizou-se o difratômetro de raios X da Panalytical modelo Empyrean com detector PIXcel3D, operando no Módulo: BraggBretano HD, radiação $K\alpha$ do cobre com 45 kV – 40 mA e varredura (2θ) de 6°/min. A identificação dos compostos foi executada por

meio do software X-pert HighScore Plus da Panalytical e padrões difratométricos e de estruturas fornecidos pelo banco de dados Crystallography Open Database. Foi adicionado a cada uma das amostras 10% de Rutilo (TiO₂) utilizado como padrão para a quantificação de fases pelo método de Rietveld. Para a quantificação de fases no DRX utilizaram-se as fichas relacionadas na TABELA 2.

A análise termogravimétrica (TG/DTG) foi realizada de forma complementar, com o objetivo de permitir uma análise comparativa do teor de C-S-H determinado por DRX e, se necessário, possibilitar correções nas fases cristalinas identificadas. Para esta técnica, foi utilizado um equipamento TA Instruments SDT 2960, empregando-se material pulverizado até passar totalmente através da peneira ABNT N° 200 (75 µm). Utilizou-se no ensaio cadinho de alumina sem tampa, fluxo de gás de 60 mL/min de nitrogênio e taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C.

Tabela 2 – Fases minerais identificadas.

Fase mineralógica	Fórmula Geral	Código ICDD*
Quartzo	SiO ₂	98-009-0145
Albita	Na(AlSi ₃ O ₈)	98-008-7659
Microclíneo	K(AlSi ₃ O ₈)	98-008-3531
Biotita	K(Fe ²⁺ /Mg) ₂ (Al/Fe ³⁺ /Mg/Ti)[(Si/Al/Fe) ₂ Si ₂ O ₁₀](OH/F) ₂	98-016-1232
Calcita	CaCO ₃	98-016-9916
Ortoclássio	K(AlSi ₃ O ₈)	96-900-0305
Hematita	Fe ₂ O ₃	98-016-1291
Hornblenda	(Ca,Na) ₂₋₃ (Mg,Fe,Al) ₅ (Al,Si) ₈ O ₂₂ (OH,F) ₂	98-018-0556
Anortita	Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	98-006-3547
Dolomita	CaMg(CO ₃)	98-017-1524
Chamosita	(Fe ²⁺ ,Mg,Al,Fe ³⁺) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH,O) ₈	98-008-0080
Portlandita	Ca(OH) ₂	98-007-3467
Diópsido	CaMgSi ₂ O ₆	98-007-7185
Rutilo (Adição em 10 % de padrão para a quantificação da fase amorfa)	TiO ₂	98-016-8140

*ICDD: International Center for Diffraction Data

Fonte: elaborado pelos autores.

3 Resultados e discussão

Na TABELA 3 são apresentados os resultados quantificados dos concretos pela DRX com a variação da exposição de temperatura entre 285 °C e 317 °C (Base), 396 °C e 434 °C (Interno), 617 °C e 640 °C (Topo). A transferência de calor no concreto é governada pela condução térmica entre átomos e moléculas do material, da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura. A variação da temperatura para a mesma profundidade foi proporcionada, majoritariamente, pelas diferentes características físicas dos diferentes tipos de agregados graúdos, utilizados em cada concreto. Segundo Sollero *et al.* (2017), dois concretos com resistência mecânica similar, se produzidos com agregados de diferentes coeficientes de dilatação térmica, podem apresentar comportamentos distintos frente ao fogo.

Tabela 3 – Quantificação das fases minerais identificadas.

Concreto	Profundidade	Resultados, em %												
		Quartzo	Albita	Microclínio	Biotita	Calcita	Ortoclásio	Hematita	Hornoblenda	Anortita	Dolomita	Chamosita	Portlandita	Amorfo
CAG	Base (90 mm)	56,2	19,8	14,3	3,0	1,2	0,7	0,2	-	-	-	-	-	4,5
	Inter. (60 mm)	54,7	20,1	14,0	3,7	1,8	0,3	-	-	-	-	-	-	5,2
	Topo (30 mm)	61,3	17,3	14,0	3,8	1,2	-	0,4	-	-	-	-	-	2,0
CAC	Base (90 mm)	53,4	4,9	4,3	3,9	15,6	-	0,7	2,0	-	1,8	1,9	-	11,5
	Inter. (60 mm)	48,6	-	3,1	9,0	12,4	-	-	5,3	11,8	2,7	2,0	-	4,8
	Topo (30 mm)	48,0	3,1	2,7	5,5	20,7	-	-	7,2	-	2,1	5,3	0,1	5,4
CSR	Base (90 mm)	81,9	-	3,7	0,4	5,4	-	0,4	-	-	0,8	-	-	7,4
	Inter. (60 mm)	78,0	-	2,9	0,2	7,4	-	0,4	-	-	0,7	-	-	10,4
	Topo (30 mm)	93,6	-	-	0,6	4,0	-	-	-	-	-	-	0,6	0,3

Fonte: elaborado pelos autores.

Destaca-se o elevado teor da fase mineralógica quartzo, provavelmente proveniente dos agregados graúdos e miúdos. Mesmo após o processo de preparação do material, o quartzo permanece presente na amostra analisada. Verifica-se também o baixo teor de amorfo para todas as amostras, resultado que diverge da literatura, considerando que o C-S-H, principal constituinte da fase amorfa de uma pasta de cimento, ocupa cerca de 60% da pasta (RIBEIRO, 2021). Além da interferência do agregado residual, os baixos teores de amorfo se devem, possivelmente, a formação de fase de C-S-H nanocristalina, polimorfos e/ou pela abordagem adotada na quantificação, resultando em uma superestimação das demais fases mineralógicas, conforme indicado em Scrivener *et al.* (2016). Visando a verificação e posterior correção dos resultados obtidos por DRX, foi determinada a perda de massa associada ao C-S-H por análise termogravimétrica, na faixa entre 25 °C e 225 °C e para apoiar estes resultados, também foi determinado o resíduo insolúvel por gravimetria, conforme apresentados na TABELA 4.

Tabela 4 – Resultados das determinações nas amostras de concreto.

Concreto	Profundidade	Resultados, em %	
		Perda de massa da água do C-S-H [TG/DTG na faixa de (25-225)°C]	Resíduo insolúvel (Gravimetria)
CAG	Base (90 mm)	5,3	77,7
	Inter. (60 mm)	2,7	80,1
	Topo (30 mm)	4,3	78,5
CAC	Base (90 mm)	3,2	65,1
	Inter. (60 mm)	2,7	68,0
	Topo (30 mm)	2,5	61,5
CSR	Base (90 mm)	2,9	77,2
	Inter. (60 mm)	5,0	70,4
	Topo (30 mm)	1,9	78,8

Fonte: elaborado pelos autores.

Com os resultados da perda de massa da água do C-S-H [TG/DTG na faixa de (25-225)°C] foi possível determinar o teor de C-S-H por meio da **Equação 1**.

$$C-S-H_{\text{Estimado}} = P \times 5 \text{ em \%} \quad (1)$$

onde C-S-H estimado é o teor de C-S-H estimado a partir da análise termogravimétrica (TG/DTG/DTA), P é a perda de massa da água do C-S-H e a constante “5” é a relação estequiométrica entre o C-S-H (180 g/mol) pela perda de água do C-S-H (36 g/mol).

Considerando que a fase amorfa da pasta de concreto é majoritariamente constituída pelo C-S-H, utilizou-se o C-S-H estimado para recalculá-la cada fase mineral por meio da **Equação 2**. Outras fases podem estar contidas, porém em teores desprezíveis, tais como etringita, mono-carbonato, gipsita, água livre, estratlingita, gibbsita e hidratos de alumínio de cálcio.

$$FMR = FM \cdot \frac{100 - (C - S - H_{estimado})}{(100 - A)} \quad (2)$$

onde FMR é a fase mineral recalculada utilizando o C-S-H estimado em %, FM é a fase mineral (TABELA 2) em % e A é o teor de fase amorfa quantificada (TABELA 2), em %. Na TABELA 5 são apresentados os resultados recalculados.

Tabela 5 – Resultados recalculados da quantificação das fases minerais identificadas.

Concreto	Profundidade	Resultados, em %												
		Quartzo	Albita	Microclínio	Biotita	Calcita	Ortoclásio	Hematita	Hornoblenda	Anortita	Dolomita	Chamosita	Portlandita	Amorfo
CAG	Base (90 mm)	43,3	15,2	11,0	2,3	0,9	0,5	0,2	-	-	-	-	-	26,5
	Inter. (60 mm)	49,9	18,3	12,8	3,4	1,6	0,3	-	-	-	-	-	-	13,5
	Topo (30 mm)	49,1	13,9	11,2	3,0	1,0	-	0,3	-	-	-	-	-	21,5
CAC	Base (90 mm)	50,7	4,7	4,1	3,7	14,8	-	0,7	1,9	-	1,7	1,8	-	16,0
	Inter. (60 mm)	44,2	-	2,8	8,2	11,3	-	-	4,8	10,7	2,5	1,8	-	13,5
	Topo (30 mm)	44,4	2,9	2,5	5,1	19,1	-	-	6,7	-	1,9	4,9	0,1	12,5
CSR	Base (90 mm)	75,6	-	3,4	0,4	5,0	-	0,4	-	-	0,7	-	-	14,5
	Inter. (60 mm)	65,3	-	2,4	0,2	6,2	-	0,3	-	-	0,6	-	-	25,0
	Topo (30 mm)	85,0	-	-	0,5	3,6	-	-	-	-	-	-	0,5	9,5

Fonte: elaborado pelos autores.

Na **TABELA 6** são apresentados os resultados recalculados do teor de amorfo (com e sem correção por TG/DTG) e os resultados de RI obtidos por gravimetria e por DRX (com e sem correção). Estimou-se o resíduo insolúvel pela DRX somando as seguintes fases minerais: quartzo, albita, microclíneo, ortoclásio, hornoblenda, anortita, chamosita e diopsídio.

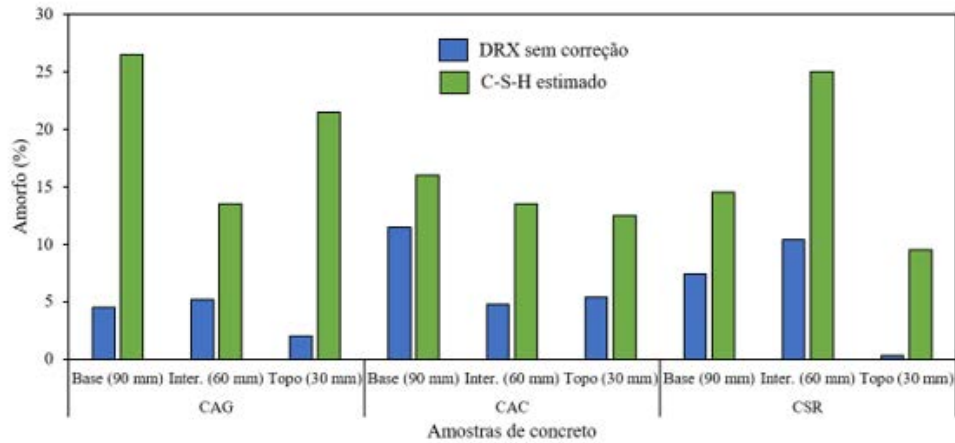
Tabela 6 – Comparação de resultado: teor de amorfo e resíduo insolúvel com e sem correção.

Concreto	Profundidade	Amorfo, em %		Resíduo Insolúvel, em %		
		DRX sem correção	C-S-H estimado	Gravimetria	DRX sem correção	DRX com correção
CAG	Base (90 mm)	4,5	26,5	77,7	94,0	72,3
	Inter. (60 mm)	5,2	13,5	80,1	92,8	84,7
	Topo (30 mm)	2,0	21,5	78,5	96,4	77,2
CAC	Base (90 mm)	11,5	16,0	65,1	70,4	68,7
	Inter. (60 mm)	4,8	13,5	68,0	79,8	77,3
	Topo (30 mm)	5,4	12,5	61,5	71,8	73,1
CSR	Base (90 mm)	7,4	14,5	77,2	86,0	79,4
	Inter. (60 mm)	10,4	25,0	70,4	81,1	67,9
	Topo (30 mm)	0,3	9,5	78,8	94,2	85,5

Fonte: elaborado pelos autores.

Em relação ao teor de fase amorfa (**FIGURA 1**), observa-se que os valores obtidos por análise termogravimétrica são superiores aos resultados determinados por difração de raios X (DRX). Este comportamento ocorre, como já é reconhecido na literatura e também confirmado na quantificação das fases cristalinas por DRX (**TABELA 3**), devido ao elevado teor de quartzo presente, majoritariamente, nas partículas de agregado residual e que não foi possível separar da fração da pasta de cimento analisada. Esse alto teor de quartzo pode induzir valores não reais do teor de fase amorfa da pasta de cimento. Neste sentido, os valores estimados por TG/DTG são mais precisos.

Figura 1 – Teores de amorfo dos concretos determinados por DRX (sem correção) e por C-S-H estimado com base nas análises de TG/DTG das pastas.



Fonte: elaborado pelos autores

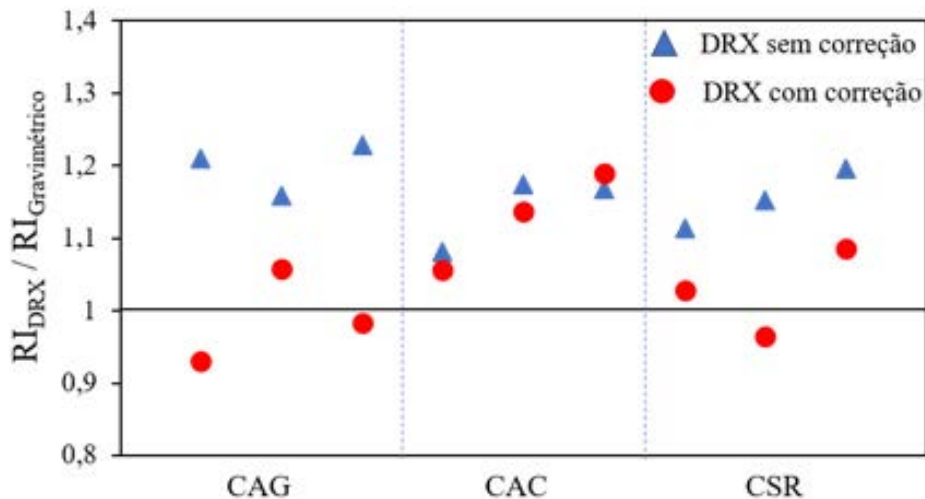
Verificaram-se variações nos resultados mineralógicos entre as diferentes amostras avaliadas. Essas variações ocorrem, possivelmente, por duas razões principais:

i) Os diferentes tipos de agregados graúdos utilizados, que, por apresentarem distintas características físicas — como distribuição granulométrica, porosidade, entre outras —, influenciam os gradientes de temperatura ao longo da seção das amostras. Por exemplo, a propagação do calor no concreto com agregado granítico não ocorre de forma análoga àquela observada no concreto com agregado carbonático ou com seixo rolado.

ii) para cada tipo de concreto, as amostras foram coletadas em profundidades diferentes. Ou seja, as amostras extraídas da região mais próxima do fogo podem apresentar, por exemplo, maior decomposição do C-S-H, em relação às amostras da face oposta, conforme foi constatado.

Em relação ao RI, com o objetivo de avaliar a efetividade da correção dos resultados obtidos por DRX em comparação aos resultados não corrigidos, a **FIGURA 2** apresenta a razão entre esses resultados e o RI determinado por gravimetria. Nessa análise, quanto mais próxima de 1 for a razão, maior a convergência entre as técnicas, evidenciando a efetividade do método.

Figura 2 – Razão entre os resultados de RI determinados pela análise de DRX (sem correção e com correção) e o RI determinado por gravimetria.



Fonte: elaborada pelos autores

Constatou-se então a efetividade da correção dos resultados obtidos por DRX, sendo que, em apenas um dos pontos avaliados, referente ao CAC, o valor do RI por DRX não corrigido se aproxima mais do valor do RI gravimétrico, em relação ao DRX com correção. Provavelmente, pequenas partículas desagregadas do agregado carbonático durante a preparação da amostra podem ter influenciado esse resultado.

4 Conclusões

Foram analisadas amostras de concreto produzidas com diferentes agregados e submetidas a ensaio de simulação de incêndio com o objetivo de determinar um procedimento adequado para a análise mineralógica do cimento hidratado do concreto.

Os diferentes tipos de agregados utilizados e a profundidade da amostra extraída são variáveis que afetam significativamente as quantificações realizadas, devendo ser cuidadosamente consideradas nas análises.

O teor da fase amorfa estimado pelo C-S-H, obtido por meio da análise TG/DTG, é consideravelmente superior ao valor obtido por DRX, sendo mais coerente com os valores conhecidos na literatura para a pasta de cimento.

Em relação ao Resíduo Insolúvel (RI), os valores obtidos pela análise de DRX, após correção com os resultados de TG/DTG, apresentam maior convergência com os valores obtidos por gravimetria, em comparação com os valores sem correção. A precisão da determinação gravimétrica sugere que a correção das fases mineralógicas utilizando TG/DTG é um caminho mais adequado.

Dessa forma, a análise mineralógica por DRX, associada à correção do teor de substâncias amorfas (determinado pelo C-S-H estimado via TG/DTG), representa uma metodologia promissora para a análise de matrizes de concreto após incêndio e também para concretos que não foram submetidos ao fogo.

5 Agradecimentos

Ao IPT pelo financiamento por meio de Projeto de Capacitação, aos colegas Rafael Francisco Cardoso dos Santos, Lucas Clementino do Nascimento, Roberto Ferreira de Lima e Edwin Miranda (definição e obtenção dos concretos), José Francisco de Paula, Daniel Polato Malvestuto e Kauane Silva Coutinho (ensaios químicos nos concretos), Manuel Antônio Pires Castanho e Mauro Kobo (calibração dos instrumentos), e Carlos Metzker e Írio Brogni (pelos ensaios de resistência ao fogo).

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2018, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 16965: Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos - Diretrizes gerais, Rio de Janeiro, 2021, 47p.

ARANDA, M. A. G.; DE LA TORRE, A. G.; LEÓN-REINA, L. Rietveld quantitative phase analysis of OPC clinkers, cements and hydration products. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, n. 1, p. 169-209, 2012.

FERNANDES, B., GIL, A. M., BOLINA, F. L., & TUTIKIAN, B. F. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 10(4), 838-863, 2017.

HANDOO, S. K.; AGARWAL, S.; AGARWAL, S. K. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. **Cement and concrete research**, v. 32, n. 7, p. 1009-1018, 2002.

MARTÍN-GARRIDO, M., MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S., PÉREZ, G., GUERRERO, A. M. Study of C-S-H dehydration due to temperature increase during fires. **Journal of Raman Spectroscopy**, v. 51, n. 11, p. 2318-2327, 2020.

MENÉNDEZ, E., VEGA, L., ANDRADE, C. Use of decomposition of portlandite in concrete fire as indicator of temperature progression into the material: Application to fire-affected builds. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, v. 110, n. 1, p. 203-209, 2012.

MIDDENDORF, B., HUGHES, J. J., CALLEBAUT, K., BARONIO, G., & PAPAYIANNI, I. Investigative methods for the characterisation of historic mortars—part 1: mineralogical characterisation. **Materials and Structures**, v. 38, p. 761-769, 2005.

QUARCIONI, V. A. **Reconstituição de traço de argamassas simples e mistas de cimento Portland e cal hidratada: atualização do método do IPT**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1998, 188p.

RIBEIRO, D. V. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. Editora Appris, 2021.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton: Taylor & Francis Ltd, 2016. 540 p.

SNELLINGS, R.; SALZE, A.; SCRIVENER, K. L. Use of X-ray diffraction to quantify amorphous supplementary cementitious materials in anhydrous and hydrated blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 89-98, 2014.

SOLLERO, M.B.S; PASSOS, L. PERROTTI, S.R. Resistência residual do concreto executado com diferentes tipos de agregado graúdo e exposto às altas temperaturas. **4º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio** Recife, Pernambuco, Brasil, 2017.

10.29327/2152495.9.28-1



Artigo Técnico

¹ Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado
de São Paulo S.A., São
Paulo-SP, Brasil.

Metodologia para Calibração e Verificação Operacional de um Analisador de Resposta em Frequência por Varredura

*Methodology for Calibrating and
Operational Check of a Sweep
Frequency Response Analyzer*

Fabício Gonçalves Torres¹, Tiago Lopes Santos¹,
Ryan Wicthy Sallatti¹

Palavras-chave: transformador, confiabilidade, exatidão.

Keywords: transformer; reliability; accuracy.

Resumo

Transformadores de energia são componentes essenciais para geração, transmissão e distribuição de energia, e sua manutenção e substituição devido a mau funcionamento é altamente complexa e custosa. Por isso, testes periódicos nesses componentes são eficazes em detectar possíveis falhas antecipadamente, dando tempo suficiente para mitigar o problema. O método normalmente adotado para testar transformadores é por meio do Analisador de Resposta de Frequência de Varredura, pois ele possui diversas vantagens, como permitir que o teste seja não destrutivo. Contudo, a confiabilidade metrológica deve ser garantida para que as ações tomadas pela análise dos resultados sejam as mais corretas possíveis, sem a influência da falta de exatidão das medidas do equipamento. Para isso, uma metodologia é proposta, o que envolve a calibração e checagens de operação para esses equipamentos. O método adotado foi aplicado em dois instrumentos de diferentes marcas e os resultados foram analisados.

Abstract

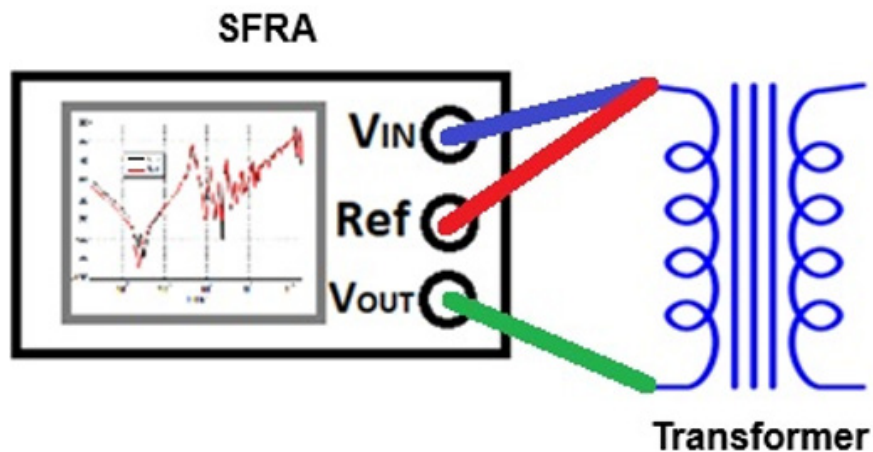
Power transformers are essential components for the generation, transmission and distribution of energy, and their maintenance or replacement due to a malfunction is highly complex and costly. Therefore, periodic tests on these components are effective in detecting possible failures in advance, allowing adequate time to mitigate the problem. The method usually adopted for testing transformers is by means of the Sweep Frequency Response Analyzer, as it has many advantages, such as allowing the test to be non-destructive. However, the metrological reliability must be guaranteed, so that the actions taken resulting from the analysis of its results are as correct as possible, without influence due to the lack of accuracy of the equipment. For this, a methodology is proposed which involves the calibration and operational checks of these equipment. The adopted method was applied in two instruments of different brands and the results were analyzed.

1 Introduction

These days, having an uninterrupted power supply is crucial and transformers are key components of the power system. However, these devices can undergo mechanical deformation due to transport, short-circuit forces or aging. Therefore, it is important to regularly monitor the integrity of transformer windings, as serious deformations that are not detected can cause prolonged damage [1].

To identify mechanical deformations in transformer windings and cores, a powerful technique is Sweep Frequency Response Analysis (SFRA). It is recommended to use the SFRA in a variety of situations, such as after short-circuit testing in the factory, during transport and installation, and after extreme events. To carry out the SFRA measurement, a signal is injected into one of the transformer terminals. The response signal is measured at another terminal and the frequency response is calculated and compared with a reference frequency response curve, and therefore, SFRA is considered to be a kind of digital signature analysis (Figure 1).

Figure 1. Application of the SFRA technique for transformer testing. The VIN, REF and VOUT connectors are generally of the BNC type and the connection cables to the transformer are coaxial.



Source: Prepared by the authors

The measurement by means of SFRA can be done as a voltage ratio between two terminals of a phase or as impedance or admittance of a winding, with the voltage ratio measurement being more common [2].

When measured using the voltage ratio, the frequency response is expressed in terms of Amplitude, which is the ratio of the output voltage (V_{OUT}) to the input voltage (V_{IN}). The frequency response analysis is graphically represented by the amplitude, in decibels (dB), as a function of frequency (1).

$$\textit{Amplitude} = 20\log\left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \quad (1)$$

Where:

V_{out} = output voltage in V

V_{in} = input voltage in V

The inductive (X_L) and capacitive (X_C) reactances of the transformer vary along the frequency, generating a series of resonances, which, added to the resistance (R), according to (2), generate a unique characteristic curve for that transformer.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2)$$

Where:

X_L = inductive reactance in Ω

X_c = Capacitive reactance in Ω

R = Resistance in Ω

1.1 Effects on the measurement accuracy of an SFRA

The aforementioned frequency response curve analysis techniques are only effective if the accuracy of the SFRA measurements is guaranteed. Accuracy is the combination of two factors, which is precision and veracity. Precision represents the degree of dispersion between repeated measurements and veracity represents the degree of agreement between the mean of the measured values and the reference value. Accuracy is inversely proportional to measurement error and can be increased by improving precision and/or veracity.

It is important to note that precision does not indicate how close the measurement is to the reference value, but rather the dispersion between measurements. Standard deviation or variance can be used to estimate this dispersion. To assess the risks of false positives and false negatives, it is essential that the measurement uncertainty is estimated [3].

In the case of the SFRA, the absolute veracity of the amplitude measurement is less relevant, since the analysis of the frequency response curve is performed in a relative way, that is, comparing the values obtained from the measured curve with a reference curve. If there is an absolute error on both curves, it doesn't affect the comparison, as long as the errors are equal on both curves.

On the other hand, the analysis of measurements performed by SFRA is highly impaired if there is not enough stability (precision) in these measurements. According to [4], there are several factors that can significantly affect the accuracy of an SFRA test, such as: the presence or not of the bushing and oil, grounding, magnetization of the core, environmental conditions, mainly, temperature and humidity, applied voltage, quality of the cables and the accuracy of the measuring equipment itself.

One of the parameters related to the measurement equipment that can affect the analysis of frequency response curves is the dynamic range, which is defined by the difference between the lowest signal level that can be measured and the maximum signal level without distortion.

The lowest level is limited by the noise floor of the measurement equipment, which is the amount of noise present when no signal is applied. Depending on the equipment, the internal noise level can be between -90 dB to -130 dB. Some regulatory standards suggest that the SFRA should be able to measure a sufficient dynamic range (+20 dB to -100 dB) to test most transformers. Additionally, to achieve an accuracy of 1 dB ($\pm 13\%$) down to a certain level, such as -100 dB, the internal noise level must be at least 20 dB below that level. For example, if the objective is to obtain a measurement accuracy of 1 dB to -100 dB, the internal noise level must be less than -120 dB [4].

[4] also discusses two simple checks that the SFRA user can adopt to assess the accuracy of the measuring instrument. The first one involves short-circuiting all the equipment terminals and running the test (**Figure 2A**). In this check it is possible to estimate the quality of the measurement cables and the accuracy of the measurement at the point close to 0 dB. The second check involves short-circuiting VIN and REF, keeping VOUT open (Figure 2B). In this way, it is possible to estimate the noise level of the measuring equipment.

Figure 2. Checks to assess the accuracy of SFRA measurements. The VIN, REF and VOUT connectors are generally of the BNC type



Source: Prepared by the authors

2 Methodology

The methodology involves the proposition of operational checking by users before testing transformers and calibration with metrological traceability. The check will consist of checking the frequency response of the SFRA in a predetermined frequency range, following the tests suggested by [4]. The purpose of this check is to identify possible deviations in equipment, cable quality and noise level.

To perform the SFRA calibration, a step attenuator (**Figure 3**) with attenuation range between 0 and 70 dB will be used to create controlled attenuations, in 10 dB steps, with their respective known uncertainties, which will be measured by the SFRA. From the measurements performed by the equipment, it will be possible to calculate the measurement error at each point of the equipment's dynamic range.

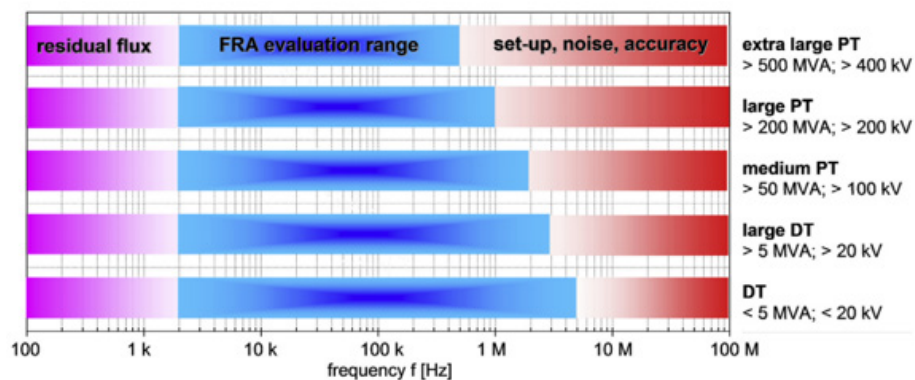
Figure 3. Calibrated step attenuator used as standard to SFRA calibration.



Source: Prepared by the authors

Furthermore, it is recommended that the dynamic range (between 0 and 70 dB, in 10 dB steps) be calibrated at different frequencies, so that a significant frequency range is covered, necessary for transformer tests, i.e., 100 kHz, 1 MHz and 10 MHz. **Figure 4** presents the frequency range variation for different transformer sizes. Certainly, one should take into account how the SFRA is used by users for decision-making, thus being able to change the values of the cited frequencies. **Table 1** below summarizes the suggested points for calibrating the SFRA.

Figure 4. Frequency ranges for different transformer sizes.



Source: [2]

Table 1 – Suggested SFRA calibration points.

Frequency	Attenuation (dB)
100 kHz	0 to 70 dB (10 dB steps)
1 MHz	0 to 70 dB (10 dB steps)
10 MHz	0 to 70 dB (10 dB steps)

Source: Prepared by the authors

The suggested methodology, both for the operational check and for the calibration, was applied in two SFRA of different brands (SFRA_A and SFRA_B) and the results are discussed below.

3 Results

Figures 4 shows the calibration setup of one of the SFRA. For operational checks, the cables were separated from each other to avoid any type of interference and reduce crosstalk.

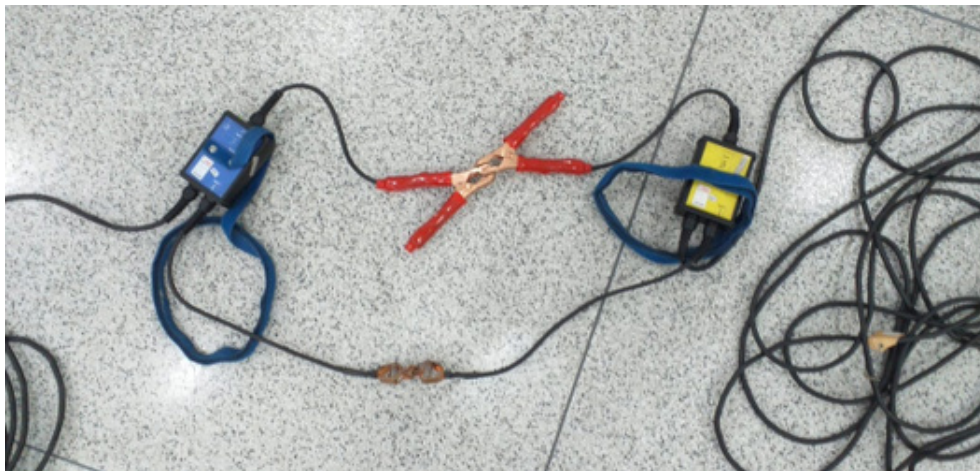
Figure 4. Calibration setup of one of the SFRA.



Source: Prepared by the authors

Figure 5 shows part of the connection made to perform the operational check with the short-circuited terminals, as shown in Figure 2A. To perform the check as shown in Figure 2B, the VOUT terminals were disconnected and removed from the circuit.

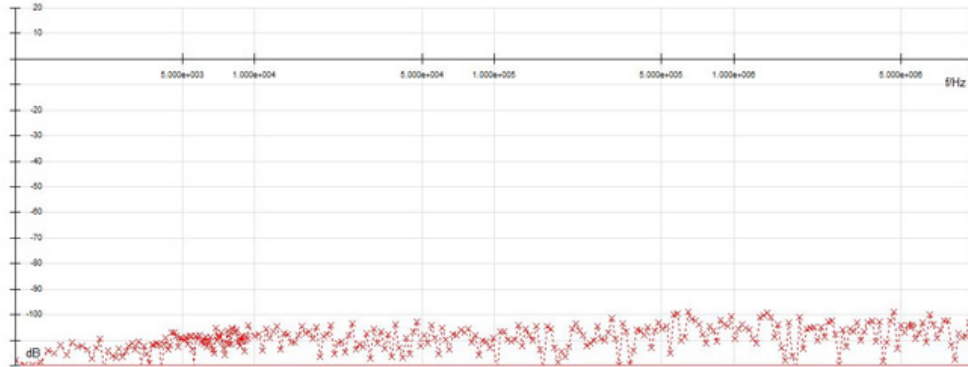
Figure 4. Figure 5. Calibration setup of one of the SFRA. setup of one of the SFRA.



Source: Prepared by the authors

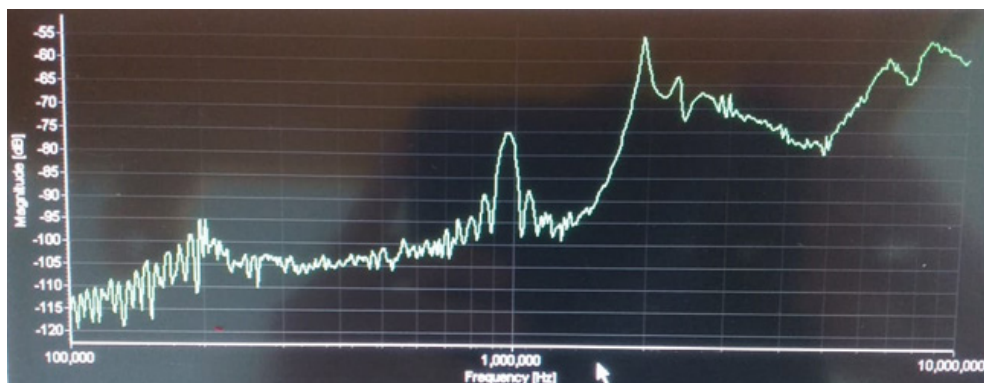
Figures 6 and 7 show the results obtained from the operational check as shown in Figure 2B, where the purpose of this check is to assess the noise level present in the SFRA tested. Both figures were obtained directly from the checked instruments.

Figure 6. Operational check of the SFRA_A in order to assess the noise level. The horizontal scale is logarithmic and is truncated to a frequency of 10 MHz.



Source: Prepared by the authors

Figure 7. Operational check of the SFRA_B in order to assess the noise level. The horizontal scale is logarithmic and is truncated to a frequency of 10 MHz.



Source: Prepared by the authors

It is essential to highlight that the calibration process and the performance test process are different and equally necessary steps. Calibration, although it is a necessary tool to ensure the metrological reliability of measurements, -has the limitation of requiring a reference standard, with metrological traceability, which allows comparison between the measurements of the item under calibration and those of the standard.

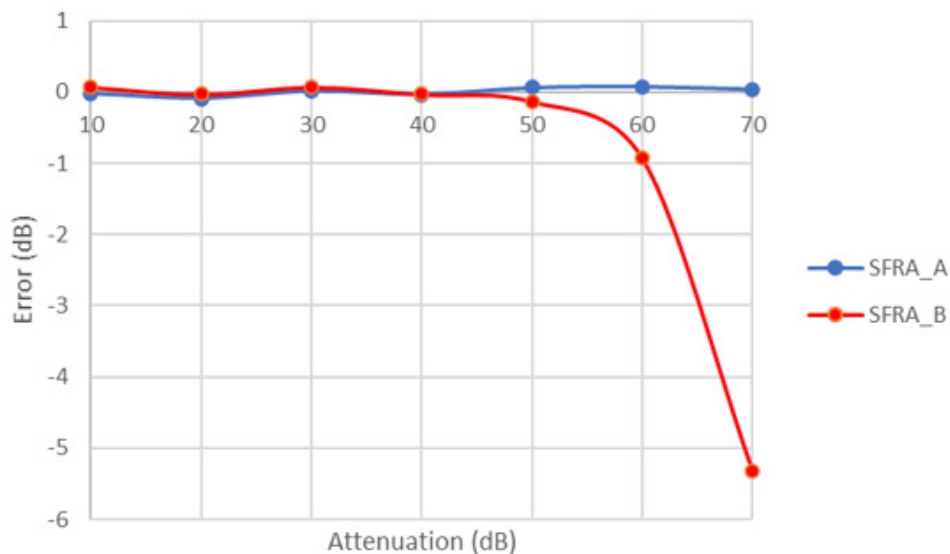
In the case of SFRA, it would be necessary to have a standard, with adequate accuracy, that could offer metrological traceability for attenuation values above 100 dB, in the range between 100 Hz and 100 MHz, something quite difficult to find in calibration laboratories accredited by the Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE) [5].

Additionally, the complete calibration, considering the entire range of level, frequency and settings of an SFRA, may be impracticable to be carried out due to the huge number of possible points and, therefore, it is recommended that the calibrated points be sampled, and that these points can adequately represent a significant portion of the SFRA measurements.

The operational check was tested in both SFRA and it was found that the noise level presented by SFRA_A was below 100 dB in practically the entire frequency range (**Figure 6**). On the other hand, SFRA_B presented very high noise levels, mainly at higher frequencies (**Figure 7**), reaching values close to 55 dB of attenuation.

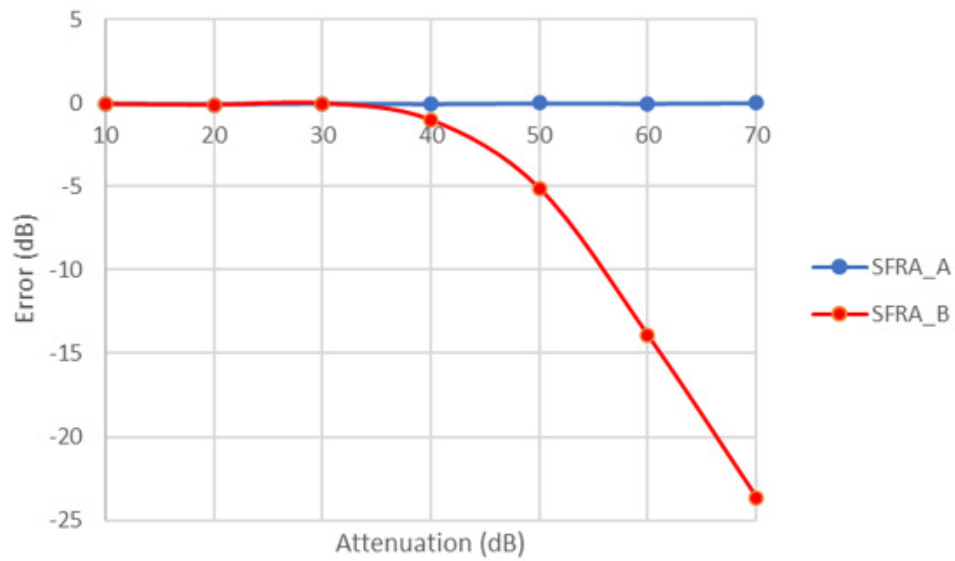
From **Figures 8, 9 and 10**, it was possible to see how much the noise floor influences the calibration results. While SFRA_A has low measurement errors over the entire frequency range, SFRA_B, due to the high noise, resulted in very high measurement errors at the highest attenuation values and at the highest frequencies. These measurement errors can significantly influence the ranges in which the SFRA is used for testing transformers whose anomalies are presented in the higher frequency bands.

Figure 8. Calibration at 100 kHz.



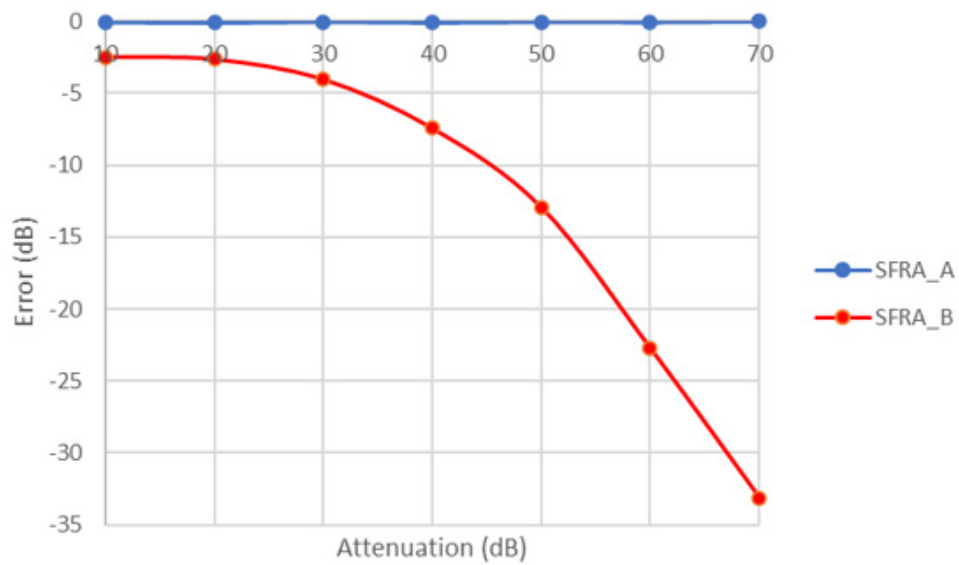
Source: Prepared by the authors

Figure 9. Calibration at 1 MHz.



Source: Prepared by the authors

Figure 10. Calibration at 10 MHz.



Source: Prepared by the authors

4 Conclusions

The proposed methodology involving calibration and operational checks is critical in guaranteeing the metrological reliability of SFRA measurements, allowing correct and accurate actions to be taken based on the analysis of results. By addressing noise-related challenges and ensuring accurate calibration, the SFRA remains a valuable tool for detecting transformer faults in a timely and efficient manner, thus contributing to the overall stability and reliability of power systems.

Operational checks were conducted on two SFRA instruments of different brands, SFRA_A and SFRA_B. SFRA_A demonstrated low noise levels across the frequency range, while SFRA_B exhibited high noise levels, particularly at higher frequencies. This noise floor greatly influenced the calibration results, resulting in high measurement errors for SFRA_B at higher attenuation values and frequencies. The presence of high noise levels in SFRA_B can significantly impact the accurate testing of transformers with anomalies in higher frequency bands.

5 References

- [1] AJUDIYA, Y. V. **Classical Review of Frequency Response Analysis of Transformer. International Conference on Trends in Electronics and Informatics.** Tirunelveli: 2017, p. 459-464.
- [2] SENOBARI, R. K.; SADEH, J.; BORSI, H. **Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review. Electric Power Systems Research.** v. 155, p. 172-183, 2018.
- [3] KAWAKITA, K. **Zé Pacel segue apresentando sua série sobre a ciência das medições.** Revista O Papel, São Paulo, v. 7, p. 38-39, July, 2021b.
- [4] JAHORMI, A. N.; BOCHENSKI, B. M.; FUJIMOTO, N. **Effect of Dynamic Range in SFRA Measurement. Electrical Insulation Conference,** Pennsylvania: 2014, p. 189-192.
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Rede Brasileira de Calibração - RBC.** Available in: < <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/>>. Access on: July 18, 2024.

10.29327/2152495.9.28-2



Artigo Técnico

Estudo comparativo de aglomeração em disco rotativo e peletizadora.

Comparative study of agglomeration in rotating disk and pellet mill

Samantha Custódio Aquino de Faria^a, Sandra Lúcia de Moraes^b

^a Mestrado Profissional em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Diretora Técnica do centro de Materiais Avançados, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

Palavras-chave: aglomeração; peletização; compressão; estudo comparativo; disco rotativo.

Keywords: agglomeration; pelletizing; compaction; comparative study; rotating disc.

Resumo

O tema aglomeração é pouco pesquisado de forma aberta em universidades ou instituições de pesquisa, ocasionando uma relativa dificuldade de se encontrar dados gerais sobre os processos existentes. Desta forma, buscando contribuir com o avanço desta área do conhecimento, foram levantados dados e aspectos gerais para a seleção de equipamentos de aglomeração, comparando-se os processos por tombamento em disco rotativo e o método de baixa compressão utilizando peletizadora, utilizando areia 100% passante em 75 µm, para minimizar as variáveis de composição, que pudessem interferir na comparação dos resultados proporcionados pelos equipamentos. Dentre as comparações de formulações de aglomerantes, foi selecionado 1% de bentonita na composição da mistura e 10% de umidade inicial. No disco, foi adicionada água durante o processo, atingindo 19,5% de umidade (base úmida); já na peletizadora a umidade final foi 13%. Os resultados comparativos mostraram que para o disco rotativo a mistura não pode apresentar plasticidade que possa deformar as pelotas durante a operação; outro fator é que este processo utilizou 6,5% a mais de umidade, gerando maior custo energético de secagem. Por outro lado, o gasto de energia apenas do disco foi 10 vezes menor ao gasto de energia obtido na peletizadora. O rendimento do processo foi menor, chegando à razão de reciclo de 1:3 e promovendo maior porosidade no produto. Já a peletização mostrou maior aceitação de misturas plásticas, o produto obteve maior resistência mecânica, mas apresentou baixa porosidade. O rendimento do processo também foi melhor, chegando a 50,5% e a produtividade foi 10 vezes maior que a do disco rotativo.

Abstract

The subject of agglomeration is rarely studied openly within academic or research institutions, creating a relative difficulty of finding general data about existing processes. In this way, seeking to contribute to the progress of this field of knowledge, data and general aspects were collected for the selection of agglomeration equipment, comparing the rotating disc tumbling processes and the low compression method using a pelletizing equipment, with silica sand, 100% passing through 75µm sieve, to reduce the composition variations that could interfere in the comparison of the agglomeration methods provided by the equipment. Among the comparisons of binder formulations, bentonite was employed at 1% in the composition and 10% initial moisture. In the case of the disc, water added during the process reached 19,5% of moisture (wet base).

In the pelletizer, the moisture reached 13%. The comparative results demonstrated that for the rotating disc process the mixture mustn't have plasticity that can deform the pellets during the operation; besides, this process used 6,5% more water, causing a larger energy expenditure for drying. On the other hand, the energy expenditure for only the disc machine was 10 times lower than the energy expenditure of the pellet mill. The process yield was lower, reaching a recycle ratio of 1:3 and promoting greater porosity in the product. The pelleting showed greater acceptance of plastic mixtures. The product had greater mechanical strength, but showed lower porosity. The process yield was better, reaching 50.5% and the productivity was 10 times higher than that of the rotating disc.

1 Introdução

As indústrias de forma geral lidam com insumos em seus processos. Por mais variados que sejam esses insumos ou até mesmo produtos acabados, muitas vezes se encontram na forma de pequenas partículas sólidas. Desta forma, devido às suas características de fluidez, o manuseio e transporte destes não são tão simples. Os materiais podem apresentar características de alta fluidez, com partículas soltas umas das outras, assemelhando-se ao manuseio de um líquido, fluindo por equipamentos e pequenas frestas deles, formando uma nuvem de pó no ambiente em que são manuseados. Este pó pode trazer riscos, tanto para as pessoas que estão no entorno, como até mesmo ao meio ambiente. Pós muito finos também apresentam riscos de geração de cargas eletrostáticas, e devem sempre ser processados em equipamentos de forma adequada.

Outros materiais podem apresentar características de baixa fluidez, formação de pontes, causando empedramento, absorção de umidade e dificultando o processo ao qual será submetido. Estes problemas de manuseio podem ser mitigados de diversas formas, com alterações nos equipamentos, como o formato de um silo, por exemplo incluindo vibradores pneumáticos para forçar o escoamento do material, ou incluir algum tipo de agitação mecânica, dentre outras opções. No entanto, estas opções quase sempre não resolvem o problema por completo. Outra opção é alterar a característica das partículas, aumentando o tamanho delas (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002).

Exemplos do aumento de tamanho das partículas para facilitar o manuseio estão presentes na vida de todos, como no caso dos comprimidos de remédios, onde há uma massa de finas partículas adensadas e comprimidas. Outro exemplo é o caso de alguns tipos de

fertilizantes, formados por pequenos grânulos para aplicação no campo, em substituição à aplicação direta na forma de pó muito fino que provavelmente seria levado pelo vento. Neste caso, os nutrientes são aglomerados em grânulos esféricos para facilitar a aplicação e homogeneização do produto na área. O adensamento de biomassa também vem ganhando mercado; este processo tem o objetivo compactar fontes de biomassa como pinus, cascas de arroz, por exemplo, para melhorar o seu manuseio e estocagem e/ou para uso energético. (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002; SILVA *et al.*, 2021).

Além disso, a aglomeração em pesquisas abertas ainda é um tema pouco divulgado, ficando mais restrito em pesquisas dentro das indústrias para melhoria dos processos internos. Esses fatores dificultam o acesso a dados mais genéricos sobre a aglomeração propriamente dita, como forma de novas aplicações. Ainda, industrialmente, cada área nomeia as tecnologias de forma diferente, como o disco rotativo, que também é chamado de prato rotativo ou prato granulador; são peculiaridades de cada área que acabam dificultando as pesquisas (PIETSCH, 2002).

Dessa forma, neste trabalho, foram levantadas informações gerais, teóricas e práticas, tanto de mecanismo de aglomeração quanto de técnicas empregadas, visando subsidiar a etapa de seleção desses métodos, independente da área de atuação. Optou-se por utilizar a areia como um material padrão para ser aglomerado, uma vez que não possui composição muito variada, com mínimo de 98,5% de SiO₂, podendo ser facilmente classificada quanto as suas características que eventualmente possam vir a interferir como mais uma variável no estudo, como reações na mistura por exemplo. Com isso, buscou-se levantar os resultados que são mais impactados pelos equipamentos utilizados. Além disso, a areia é utilizada em diversos estudos fundamentais sobre efeitos da distribuição granulométrica na aglomeração, estudos sobre mecanismos de aglomeração, como o realizado por Iveson and Listster (1998), ou estudos de mecanismos de crescimento, como os realizados por Nagayashi *et al.* (2018) e Capes (1967).

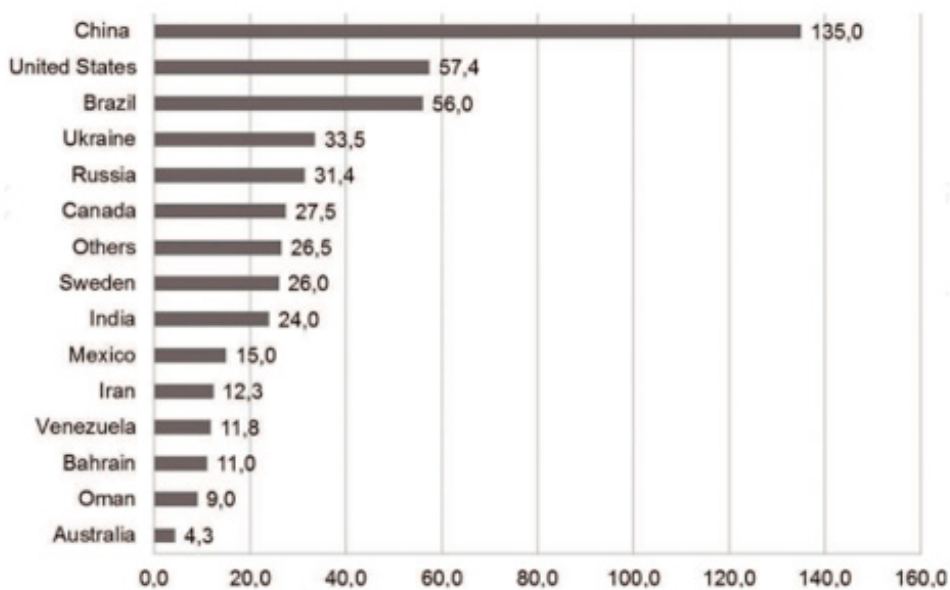
1.1 A evolução da aglomeração como estudo

Os processos de aglomeração são tão antigos quanto a formação das rochas, por exemplo, no solo o processo de aglomeração sempre ocorreu. Na natureza, algumas espécies de pássaros fazem seus ninhos com alguns artifícios para aglomerar materiais; os cupins também usam desta técnica para construir os cupinzeiros. Estes e outros exemplos só mostram o quanto essa técnica está presente no dia a dia. Apesar de ser uma técnica antiga e necessária, como estudo e desenvolvimento é relativamente recente. A primeira patente registrada foi a de briquetagem, no ano de 1848 nos EUA, intitulada “Um método

de conversão de carvão moído”, registrada em nome de William Easby. A partir disso, e com as dificuldades encontradas no manuseio de produtos, a busca por soluções foi crescendo na área da aglomeração. Em 1912, na Suécia, foi publicada uma nova patente do processo de aglomeração de minério de ferro pelo processo úmido em tambor rotativo, por A. G. Anderson, mas essa técnica só se tornou comercial em 1950 (MORAES; LIMA; RIBEIRO, 2018; SAMPAIO; COSTA; ANDRADE, 2007).

Uma publicação de Tuck and Virta (2011 apud Moraes, Lima e Ribeiro, 2018) indica a capacidade instalada no mundo para pelotização na área de mineração de minério de ferro que é da ordem de 491 milhões de toneladas por ano, mostrando o quanto este processo é importante nessa área. O gráfico da **FIGURA 1** mostra as capacidades por país.

Figura 1 - Capacidade instalada no mundo para pelotização de minérios, em milhões de toneladas por ano



Fonte: Tuck and Virta (2011 apud Moraes, Lima e Ribeiro, 2018)

Com o avanço do uso da técnica em diversos segmentos industriais, diferentes tecnologias foram desenvolvidas, sejam na linha de aglomeração por tombamento de partículas ou por compressão. Com isto, a disponibilidade de publicações sobre o tema acaba se dispersando em áreas específicas como mineração, fertilizantes, fármacos, biomassa, dificultando o estudo para novas aplicações de equipamentos em outras áreas que poderiam se beneficiar da técnica.

1.2 Aglomeração e seus mecanismos

A aglomeração consiste na união de partículas menores formando partículas maiores. Esse fenômeno pode ocorrer por diversos mecanismos que foram analisados e distribuídos dentre cinco grupos distintos e estão apresentados na **TABELA 1**, conforme descrito por Pietsch (2002).

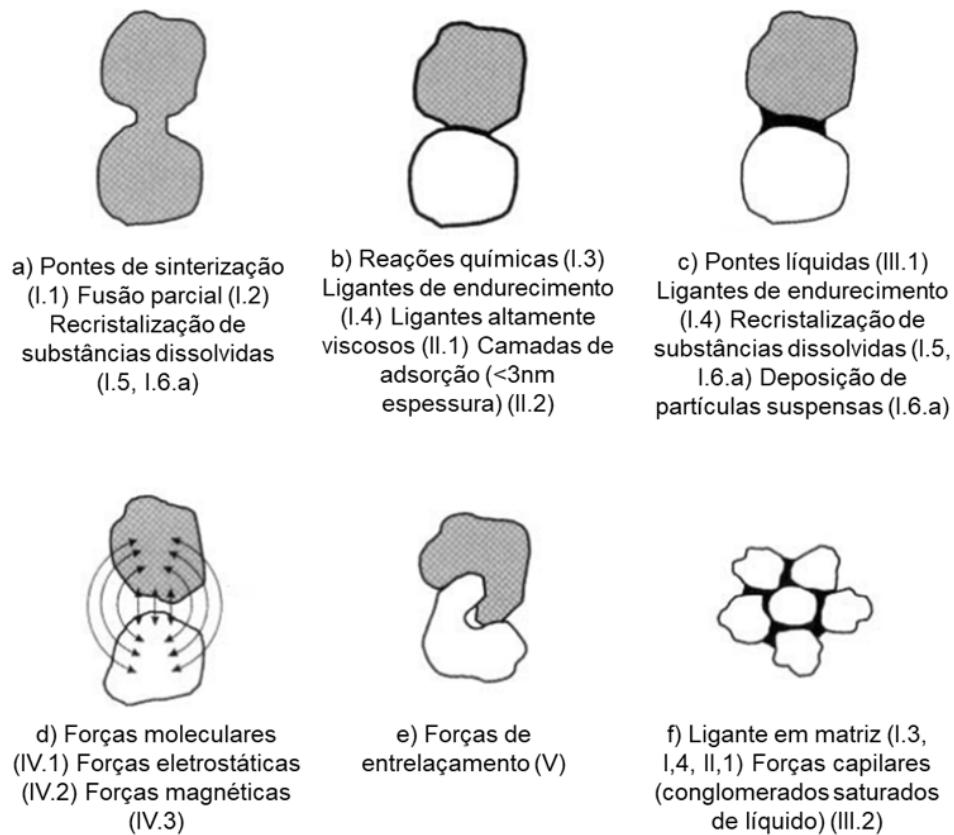
Tabela 1 - Mecanismos de ligações

I - Pontes sólidas
1. Sinterização
2. Fusão parcial
3. Reações químicas
4. Ligantes de endurecimento
5. Recristalização
6. Durante a secagem
a) Recristalização (substâncias dissolvidas)
b) Deposição (partículas suspensas)
II - Força de adesão e coesão
1. Ligantes altamente viscosos
2. Camadas de adsorção (< 3nm de espessura)
III - Tensão superficial e pressão capilar
1. Pontes líquidas
2. Forças capilares
IV - Forças de atração entre sólidos
1. Forças moleculares
a) Forças de van der Waals
b) Ligações químicas livres (forças de valência)
c) Associações (não-valência); pontes de hidrogênio
2. Forças elétricas (eletrostática, dupla camada elétrica, excesso de carga)
3. Forças magnéticas
V - Ligações de entrelaçamento

Fonte: Traduzido de Pietsch (2002)

A FIGURA 2 ilustra esquematicamente o modelo de como esses fenômenos acontecem fisicamente.

Figura 2 - Representação dos mecanismos de aglomeração



Fonte: Traduzido de Pietsch (2002)

Vale ressaltar que num sistema de aglomeração, sejam de partículas mais arredondadas ou mais alongadas, é improvável que esteja ocorrendo apenas um mecanismo de ligação. São vastas as possibilidades de aglomeração em cada ponto microscópico do sistema que envolve partículas, aglomerantes e agentes externos, podendo ocorrer uma situação diferente em cada ponto de contato (PIETSCH, 2002).

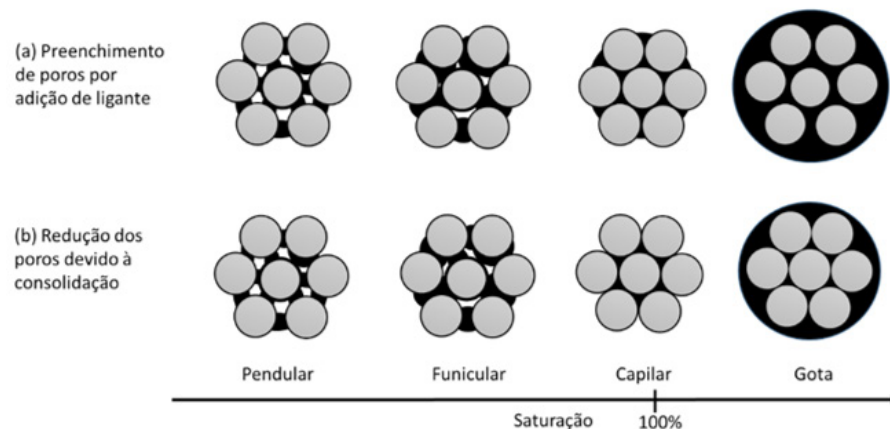
Além dos mecanismos de aglomeração, há também mecanismos de formação dos grânulos. No sistema de aglomeração há diversas fases ocorrendo, sendo elas:

a. Saturação dos poros

Conforme o líquido ligante é adicionado, e a proximidade entre partículas diminui, a saturação do grânulo que está sendo formado é elevada. Ocorre também a diminuição dos poros dentro do grânulo à medida que o líquido preenche esses vazios. A taxa de saturação pode ser elevada também com colisões entre partículas quando estas se aproximam, e após algum tempo, elas precisam ficar aderidas umas às outras para o efeito ser satisfatório.

Quando mais ligante é adicionado, os grânulos tendem a crescer mais, entretanto, se a quantidade for excessiva e o grânulo obtiver saturação próxima a 100%, uma massa poderá ser formada e a granulação perderá suas características. Na prática, é comum a expressão “over” granulação quando ocorre o excesso de líquido e a massa fica com aspecto de pasta. A Figura 3 representa como ocorre a saturação nos grânulos em formação.

Figura 3 - Representação do aumento de saturação



Fonte: Rodrigues (2012)

Legenda: a) adição de ligante e b) aproximação das partículas

Segundo estudos realizados por Saleh et. al., (2005 apud Rodrigues, 2012), definiu-se que o grau de saturação pode ser calculado conforme a Equação 1, a seguir:

$$S = \left(\frac{c+1}{mw-md-c} \right) \frac{\rho g}{\rho 1X} \quad (1)$$

Onde:

- ρ_l (kg/m³) é a densidade do líquido utilizado,
- X é a fração de espaços dentro da própria partícula, dada por:
- $X=1-\rho_g/\rho_s$,
- ρ_s (kg/m³) é a densidade real da partícula, determinada por picnômetro a gás,
- ρ_g (kg/m³) é a densidade do grânulo,
- m_w (kg) é a massa da amostra em base úmida,
- m_d (kg) é a massa da amostra em base seca,
- S é um adimensional representando o grau de saturação do líquido contido no grânulo,
- c é a fração mássica de material seco contida no ligante.

b. Formação de núcleos

No início da aglomeração, há o crescimento de pequenos grânulos, denominados núcleos, onde as partículas se unem devido à tensão superficial do ligante por dois mecanismos principalmente, como a dispersão e a imersão. (RODRIGUES, 2012).

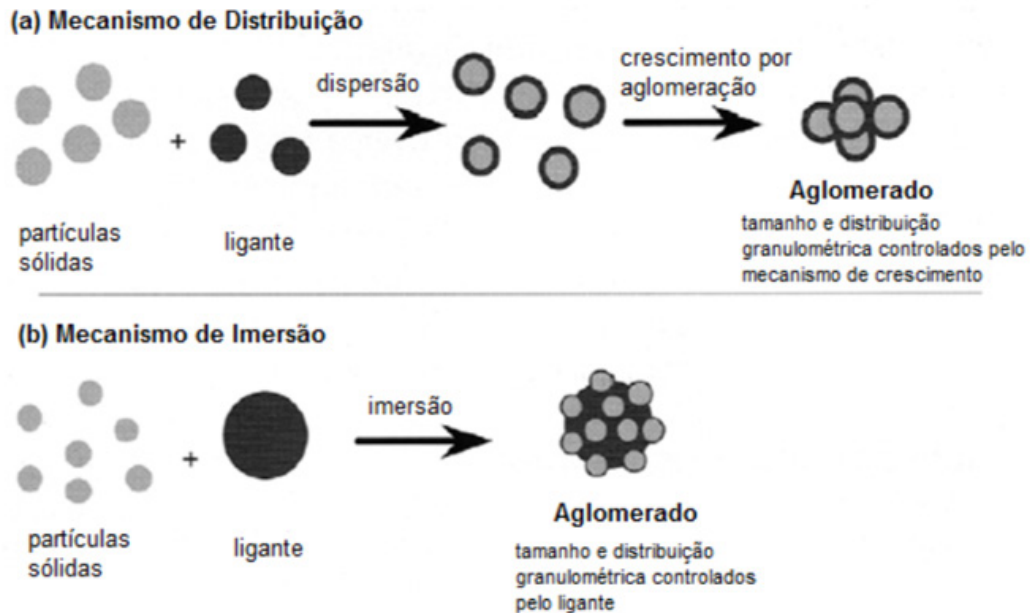
No mecanismo de dispersão, as partículas ficam totalmente cobertas pelo líquido ligante, disperso no meio. Assim, as partículas podem colidir e se manter unidas por pontes líquidas ocasionadas pelo ligante. Este mecanismo ocorre normalmente se as gotas de líquido forem maiores que o tamanho das partículas secas, **FIGURA 4a**.

No mecanismo da imersão, as partículas ficam ao redor da gota de ligante e o líquido concentrado no centro do núcleo, podendo ser controlado na forma de adição do ligante no processo. Neste caso, o mecanismo ocorrerá quando o tamanho das gotas do líquido for menor que o tamanho das partículas sólidas, **FIGURA 4b**.

$$\frac{D_{gota}}{D_{particula}} \gg 1 \rightarrow \text{Mecanismo de Dispersão é dominante}$$

$$\frac{D_{gota}}{D_{particula}} \ll 1 \rightarrow \text{Mecanismo de Imersão é dominante}$$

Figura 4 - Mecanismos de nucleação



Fonte: Rodrigues (2012)

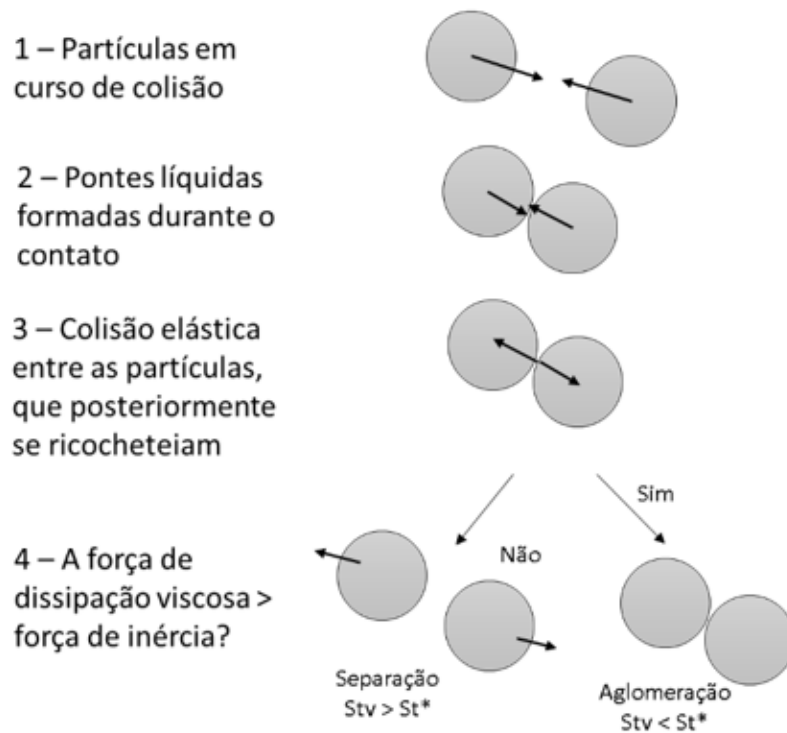
Legenda: a) distribuição e b) imersão

c. Formação de aglomerados

Um dos principais mecanismos para a formação de grânulos é a colisão das partículas que, com as forças envolvidas como as capilares e as viscosas, afetam e corroboram o mecanismo de união destas (ENNIS et. al, 1991).

Na **FIGURA 5** pode-se observar a representação do processo de colisões entre duas partículas. No regime não inercial, a probabilidade de que todas as colisões sejam efetivas é muito alta. É nesta fase que se inicia a formação dos grânulos e o crescimento deles, ocorrendo o processo de coalescência aleatória. Ainda neste estágio, há baixa umidade e o equilíbrio da distribuição granulométrica é atingido. No estágio inercial, o crescimento dos grânulos é o fenômeno predominante e maior umidade é requerida para obter maior número de colisões bem-sucedidas e, assim, ocorrer o crescimento. Como muitas colisões não são efetivas, a distribuição granulométrica fica bastante distinta, com a formação de grânulos maiores, que cresceram preferencialmente com partículas maiores por coalescência e partículas menores, formando a porção de finos no processo.

Figura 5 - Representação da colisão entre duas partículas durante o processo de aglomeração segundo critério de Stokes



Fonte: adaptado de Rodrigues (2012)

d. Coalescência

A coalescência ocorre após o mecanismo de nucleação, onde já foram formados pequenos aglomerados com excesso de líquido na superfície, permitindo maior deformação plástica. Quando outras partículas colidem com os núcleos, é causada uma deformação parcial aumentando assim a área superficial, auxiliando na união das partículas. A taxa de coalescência depende da deformação e, de outros aspectos, como tamanho das partículas, energia cinética do grânulo e características físicas da mistura, que afetam o crescimento do grânulo também. Quando os núcleos são bem menores, os grânulos formados podem ser mais resistentes, e por isto, podem apresentar menor deformação, ocasionando um crescimento demorado. Outros fatores, como a rotação do tambor interferem na energia cinética envolvida nos grânulos maiores, proporcionando maior deformação. As características dos materiais também são fatores importantes (LITSTER; ENNIS, 2004).

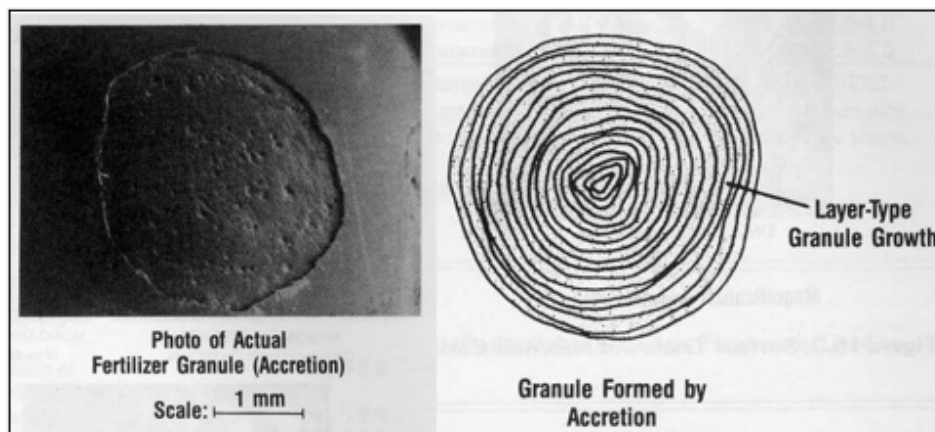
e. Crescimento

A granulação via úmida ocorre por diversos mecanismos e, se se observar de forma macro, serão encontrados dois mecanismos de crescimento, por camadas e por matriz (BERNARDES, 2006; SNOW, *et al.*, 1999).

O crescimento por camadas ou *layering*, normalmente ocorre quando já há um núcleo maior pré-formado, como em casos de reciclo de material grosseiro que passa por moagem e retorna para a aglomeração. Uma desvantagem são as altas taxas de reciclo; por outro lado, os grânulos possuem menor tendência ao empedramento em relação aos grânulos formados por aglomeração “sem padrão”, considerando mesma umidade e podem gerar distribuições granulométricas mais estreitas durante o processo. As durezas dos materiais também tendem a ser maiores; um estudo realizado pelo Centro Internacional de Desenvolvimento de Fertilizantes (IFDC) mostrou um aumento significativo na resistência à compressão dos fertilizantes produzidos pelo método de crescimento em camadas, comparativamente ao processo de aglomeração sem a formação das camadas (FERTILIZER MANUAL, 1998; SINDEN, 2010).

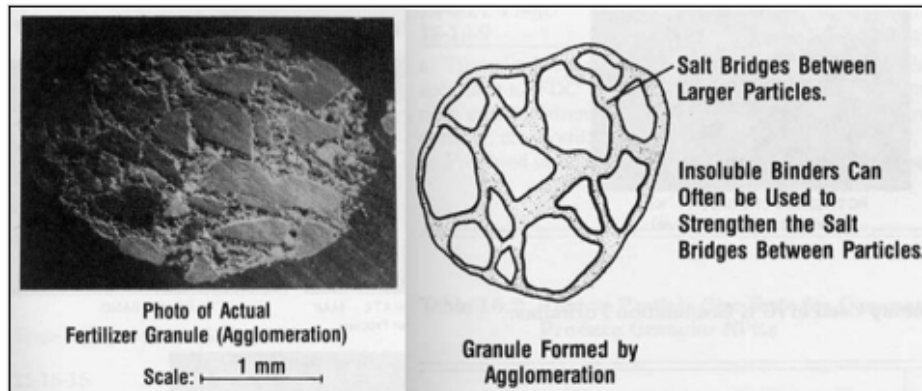
Segundo Kiiski (2011), estes mecanismos de crescimento dependem dos equipamentos utilizados que auxiliam o crescimento do grânulo, seja por *layering*, FIGURA 6, ou em aglomeração sem padrão, FIGURA 7 (GRIFFIN, 2015).

Figura 6 - Aglomeração por “layering”



Fonte: Griffin (2015)

Figura 7 - Processo de aglomeração (sem padrão)



Fonte: Griffin (2015)

Benes e Dortmund (1991) propuseram uma relação entre o diâmetro médio do granulado ($d_{\text{granulado}}$) (m) e o diâmetro médio das partículas de alimentação ($d_{\text{alimentação}}$) (m), conforme Equação 2.

$$k = \frac{d_{\text{granulado}}}{d_{\text{alimentação}}} \quad (2)$$

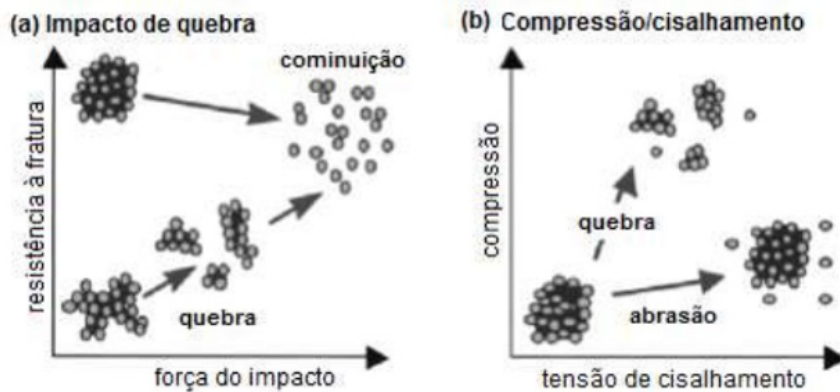
A obtenção do fator “k” em valores abaixo de 2 indica que a aglomeração ocorrerá. Já no caso de se obter valores próximos a 4,2, o processo de formação de camadas será favorecido.

f. Atrito e Quebra

Alguns autores como Capes e Danckwerts (1965) e Sastry *et al.* (1977) (apud Rodrigues, 2012) realizaram estudos sobre atrito e quebra em leito de granulação, onde os grânulos de maior diâmetro tendem a moer os de menores diâmetros durante as quedas dentro do equipamento. Assim, as partículas mais finas, resultantes das quebras, eram aderidas com maior probabilidade às partículas maiores. Van den Dries *et al.* (2003) sugerem que este comportamento mecânico traz maior homogeneidade e maior dureza ao produto, promovendo maior consolidação dos grânulos. Os grânulos podem sofrer vários tipos de efeitos mecânicos, como a quebra, fratura, erosão, abrasão. Estes efeitos estão ligados ao processo e às características do material; os grânulos podem se desfazer completamente ou

em partes, mantendo aglomerados. A FIGURA 8 representa como os grânulos podem se quebrar a partir do impacto, FIGURA 8a, e a partir de compressão ou cisalhamento, FIGURA 8b.

Figura 8 - Efeito da deformação dos grânulos na formação de pontes



Fonte: Rodrigues (2012)

g. Consolidação

A consolidação do grânulo consiste em sua compactação. Para tal, as partículas dos grânulos vão se aproximando e diminuindo os espaços entre elas, podendo aumentar a saturação de líquido ligante na superfície. Este efeito pode gerar a coalescência, caso a saturação exceda o ponto crítico, formando uma gota. Autores como Wildeboer et. al. (2005) consideram que quando o grânulo inicia sua consolidação, os finos no processo podem ser agregados pelo ligante que migrou para a superfície.

1.3 Aglomerantes

Os aglomerantes são, portanto, qualquer aditivo capaz de aglutinar partículas. A seleção destes irá depender do material que se deseja aglomerar. Os tipos de aglomerantes foram categorizados conforme sua forma de atuação. Cada uma das categorias está descrita a seguir (EISELE; KAWATRA, 2003):

Filme inativo: os aglomerantes que formam um filme inativo são aqueles que formam uma camada sobre as partículas e aglomeram por forças capilares, ou por adesão ou coesão e são normalmente reversíveis.

Filme químico: este tipo de aglomerante sofre uma reação química na superfície das partículas e enrijece, assim este tipo de aglomeração é normalmente irreversível.

Matriz inativa: as ligações deste tipo de aglomerante são normalmente reversíveis com aquecimento. São formadas por uma película não contínua em contato com as partículas, podendo ser alcatrão, ou piche ou cera que formam emulsões líquidas e após resfriamento ou secagem se tornam sólidos. Muitas vezes, necessitam de alta concentração de aglomerante e altas pressões para compactação.

Matriz química: este tipo normalmente possui ligações irreversíveis; estes aglomerantes formam uma película nas partículas e sofrem reação química, enrijecendo as ligações.

Reação química: o aglomerante neste caso também sofre uma reação química, mas com as partículas que estão sendo aglomeradas, formando ligações bem fortes.

Durante os processos de aglomeração, o aditivo aglomerante pode ser classificado em mais de uma categoria a depender de suas dosagens e suas características.

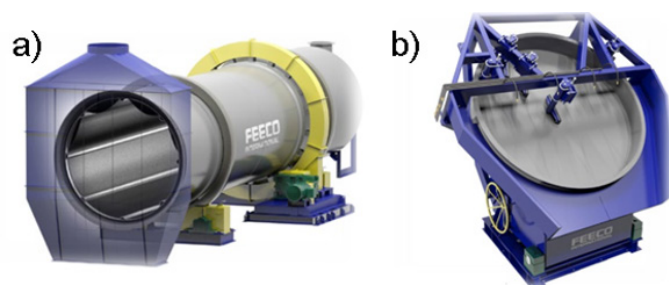
1.4 Processos de aglomeração

As tecnologias para aumento de tamanho ou “*size enlargement*”, do inglês, incluem vários processos que unem propositalmente pequenas partículas em grandes massas permanentes, nas quais as unidades primárias iniciais ainda são identificáveis. Durante um processo de aglomeração, vários aspectos devem ser levados em consideração, sejam relativos à tecnologia utilizada, como também em relação aos materiais que se deseja aglomerar. Os métodos são classificados em granulação por tombamento, granulação por mistura, por fluidização, por centrifugação, por spray, por compactação, por processos térmicos, sistemas líquidos e floculação. Cada método possui alguns tipos de equipamentos que operam por estes modos (RICHARDSON *et al.*, 2002; SNOW *et al.*, 1999; TUMURULU *et al.*, 2010).

1.4.1 Disco rotativo

Esta técnica consiste no “tombamento” ou mistura das partículas que são alimentadas no equipamento e com elas o aglomerante e a água, para a formação dos grânulos ou pelotas. A **FIGURA 9** apresenta exemplos de equipamentos de tombamento, tais como o tambor rotativo na **FIGURA 9a**, o disco rotativo na **FIGURA 9b**, equipamentos muito utilizados nas indústrias mineral e fertilizantes (FEECO INTERNATIONAL, 2018).

Figura 9 - Equipamentos de granulação



Fonte: FEECO International (2018)

Legenda: a) Tambor rotativo e b) Disco rotativo

Equipamentos como tambor e disco rotativos proporcionam o crescimento do grânulo por meio da equalização das forças centrífugas e da gravidade. A aplicação é vasta, podendo ser utilizado por empresas de diferentes ramos, como por exemplo, indústrias farmacêuticas, indústria de minério de ferro, indústria de fins agrícolas, dentre outros. Os grânulos produzidos ficam na faixa de 1 mm a 20 mm de diâmetro. São equipamentos que operam em regime contínuo de alimentação de matérias-primas sólidas e líquidas, podendo trabalhar com altas capacidades de produção. Para uma produção de 100 t/h, um tambor poderá ter 4 m de diâmetro, por exemplo. (SNOW *et al.*, 1999).

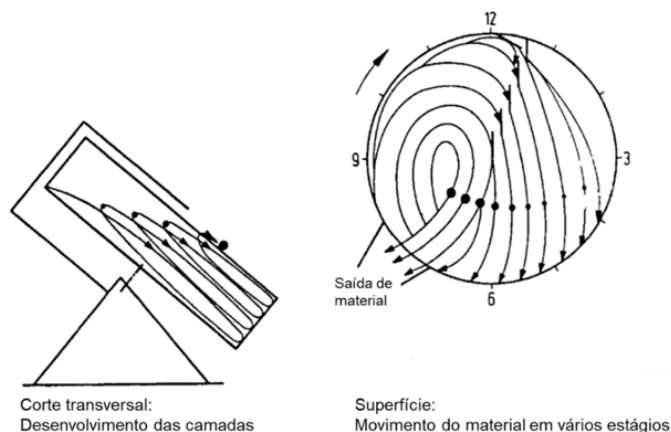
O produto produzido em tambor ou disco possui maior esfericidade quando comparado aos produtos produzidos por misturadores intensivos, por exemplo. Isto porque a rotação do equipamento promove a elevação das partículas e em seguida elas caem formando uma cortina. Este movimento ocorre de forma contínua no interior do equipamento, permitindo a formação de partículas com maior esfericidade (KIRK-OTHMER, 1997; SNOW *et al.*, 1999).

Os discos rotativos são chapas planas inclinadas, que possuem profundidade para reter os aglomerados em suas bordas laterais e, também, possuem raspadores para retirar a camada de material que fica aderida à superfície do equipamento, conforme a alimentação de matérias-primas é realizada. Este processo é conhecido também como aglomeração por tombamento, devido ao padrão de fluxo do material dentro do equipamento. A **FIGURA 10** mostra como o fluxo se comporta durante o processo. Conforme os grânulos vão crescendo, os mais pesados sobem até o topo do disco e saem do equipamento para seguir o fluxo do processo; é uma segregação natural do tamanho de partículas. A eficiência deste processo também se deve ao local de aplicação do líquido aglomerante. Se, por exemplo, o líquido for aplicado na posição das 3 horas (conforme **FIGURA 10**), e a alimentação de

pó for realizada próximo à posição das 5 horas, o pó seco irá aglomerar nas sementes já formadas e as fará descer. Ao caminhar para a região das 6 horas, as sementes que ganharam mais massa com as novas partículas aderidas serão compactadas no fundo do leito ou serão divididas por atrito, e assim causando o crescimento. Com as alimentações desta forma, os aglomerados formados serão relativamente pequenos, dependendo da aplicação. Se a alimentação de líquidos for realizada próximo à posição de 11 horas e os sólidos alimentados próximo à posição de 6 horas, com turbulência, os aglomerados terão maior granulometria (PIETSCH, 2002; SNOW *et al.*, 1999).

A técnica de aglomeração de minério de ferro começou no Brasil, na década de 60, através da Companhia Vale do Rio Doce, atualmente Vale S.A., que, junto com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, sob orientação do professor Carlos Dias Brosch, estudaram e desenvolveram este método que resultou no projeto da usina de pelotização, localizada em Vitória, ES, posta em operação no ano de 1969 (LIMA, 1991)

Figura 10 - Esquema do padrão de fluxo do material durante processo no disco rotativo



Fonte: Pietsch (2002) traduzido

A velocidade de rotação destes equipamentos precisa ser avaliada calculando a velocidade crítica, que corresponde à velocidade na qual uma partícula é mantida estacionária no equipamento pela ação da força centrípeta. Para este cálculo, a Equação 3 é utilizada (SNOW *et al.*, 1999).

$$N_c = \sqrt{\frac{g \sin\theta}{2\pi^2 D}} \quad (3)$$

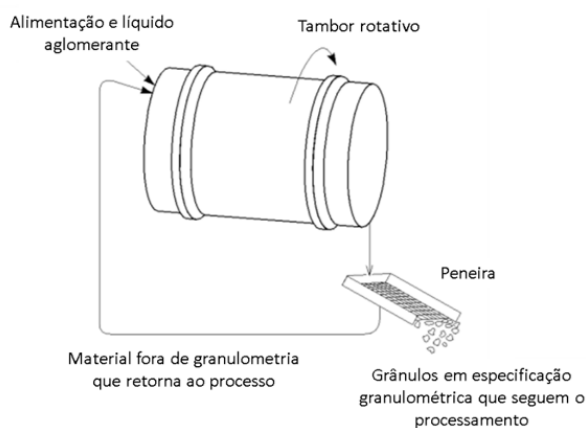
Sendo:

- N_c a velocidade crítica,
- g é a aceleração da gravidade,
- \varnothing é o ângulo de inclinação do equipamento,
- D é o diâmetro do disco.

Valores típicos ficam na faixa de 50% a 75% da velocidade crítica, utilizando ângulos de inclinação de 45° a 55° . Caso a velocidade esteja alta demais, os grânulos serão jogados para fora do equipamento e, se for muito baixa, o material irá deslizar pelo equipamento. Enquanto os sólidos são adicionados no disco com o equipamento em rotação, as partículas menos úmidas vão para o fundo do disco. Com a adição de água, essas partículas menos úmidas vão sendo umedecidas e, ao entrar em contato com outras partículas, se iniciam os processos de nucleação e crescimento. Com mais partículas se unindo a esses núcleos, os grânulos vão se formando, aumentando de diâmetro e assumindo formas mais esféricas a partir do tempo em que ficam no equipamento em rotação. Com o aumento de tamanho dos grânulos, o coeficiente de atrito vai diminuindo e a força centrífuga eleva as partículas para o topo do disco, fazendo um trajeto maior dentro do equipamento, até que saiam, indo para a sequência do processo (MORAES; LIMA; RIBEIRO, 2018; SNOW *et al.*, 1999).

A **FIGURA 11** mostra o esquema de reciclo, válido tanto para tambor rotativo como para disco rotativo. Nestes equipamentos, o crescimento dos grânulos em camadas é favorecido, muito devido a esse reciclo gerado no sistema que retorna partículas de aglomerados menores, as quais são úteis como sementes, e à adição de matéria-prima nova em pó fino e de aglomerantes, formam as cascas do grânulo (KIRK-OTHMER, 1997; SCHERER *et al.*, 2000).

Figura 11 - Esquema de processo em tambor rotativo

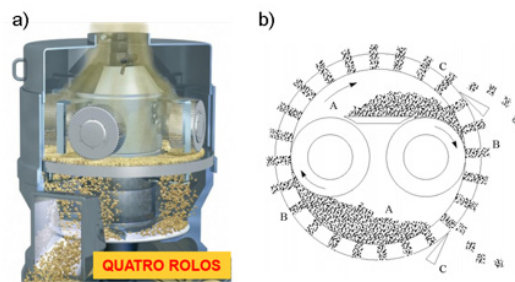


Fonte: traduzido de Kirk-Othmer (1997)

1.4.2 Peletizadora

Equipamentos que utilizam a compressão produzem aglomerados de partículas aplicando forças ao material em um espaço confinado. Entre as diferentes tecnologias de compressão, estão as peletizadoras. Estas são compostas basicamente por um silo, uma rosca de alimentação que também desempenha a função de pré-compactação e a câmara de peletização propriamente dita. Na câmara de compactação há uma matriz perfurada e rolos que giram sobre o material que será pressionado contra os orifícios da matriz. Após a matriz, há uma faca de corte para ajustar o comprimento do pellet desejado. Na **FIGURA 12**, podem ser observados os tipos de matrizes, sendo que os dois principais são o de placa horizontal, **FIGURA 12a**, e de matriz circular, **FIGURA 12b**. A matriz de placa plana é fixa e perfurada, com rolos atuando em sua superfície, pressionando o material contra os orifícios. Já a matriz circular tem forma de um anel, onde os rolos ficam na parte interna, compactando o material através dessa matriz. Neste caso, a matriz é rotativa (KIRK-OTHMER, 1997; PIETSCH, 2003).

Figura 12 - Ilustração dos tipos de peletizadoras



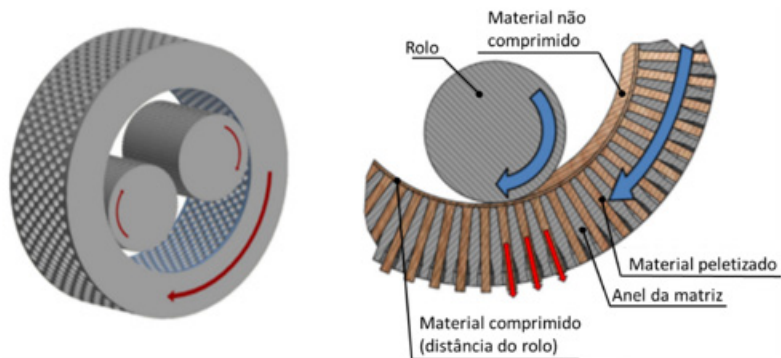
Fonte: a) Soffioni (2015), b) Kirk-Othmer (1997)

Legenda: a) peletizadora de matriz plana e b) peletizadora de matriz cilíndrica

Na **FIGURA 12b**, é possível observar a matriz com os orifícios pelos quais o material será moldado por compressão contra essa peça. Logo após a matriz, há uma faca de corte, para que os pellets saiam no tamanho desejado (SOFFIONI, 2015).

A matéria-prima ao ser alimentada à câmara de peletização acaba sendo distribuída no interior onde os rolos irão comprimir o material contra a matriz. No caso da matriz em anel, a própria matriz gira com o motor dela, assim, o atrito gerado entre a matriz, as matérias-primas e os rolos ocasiona o giro também dos rolos, sem que haja necessidade de motor adicional para este equipamento, conforme as setas vermelhas indicam na **FIGURA 13**. Neste processo, durante a compressão, a fricção de todos os itens que compõem o sistema gera calor e a temperatura do material pode ultrapassar os 100°C. Esta temperatura também auxilia na diminuição da umidade dos pellets, com a evaporação da água (NIELSEN *et al.*, 2020).

Figura 13 - Sentido de rotação da matriz e dos rolos compressores

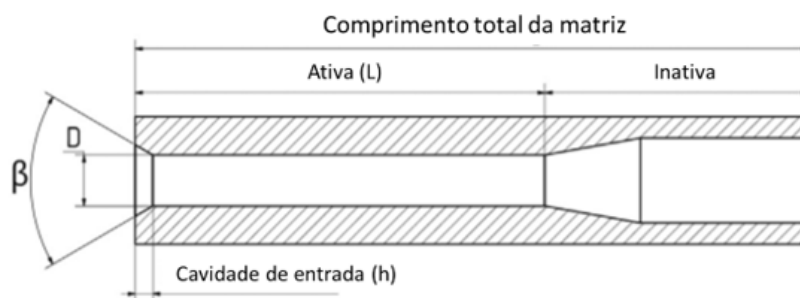


Fonte: Nielsen *et al.*, (2020) traduzido pelas autoras

A resistência à compressão também pode ser denominada de contrapressão, e é causada por dois diferentes mecanismos. O primeiro é a fricção interna, que é a energia requerida pela resistência do atrito interno ocasionado pela quebra de ligações entre partículas da matéria-prima. O atrito interno ocorre quando há compressão ou cisalhamento. O outro mecanismo é o atrito externo, localizado na região onde a matéria-prima está deslizando contra a superfície da matriz (NIELSEN *et al.*, 2020).

A pressão de peletização não é medida diretamente, devido às características do equipamento, sendo sua avaliação realizada pelo consumo de energia. Dando como referência a biomassa, é usual a faixa de 210 MPa a 450 MPa para a compressão deste tipo de material. O *design* dos canais da matriz possui diferentes medidas que podem gerar diferentes razões de compressão. A FIGURA 14 exemplifica como é o design interno desses canais.

Figura 14 - Vista em corte de um canal de compressão de matriz



Fonte: Nielsen *et al.*, (2020), traduzido pelas autoras

Os canais possuem uma área ativa, onde há a entrada em um trecho de canal cilíndrico e uma contração cônica com certo ângulo, β , e profundidade, h . O canal possui comprimento, L , e diâmetro, D ; esta é a área que define o diâmetro dos pellets e a taxa de compressão é medida pela razão entre o comprimento e o diâmetro, sendo L/D . A área inativa é a região ligeiramente maior em diâmetro que a área ativa, a qual adiciona resistência a matriz frente às tensões de compressão (NIELSEN *et al.*, 2020).

As capacidades deste tipo de equipamento variam até 75 t/h com rotação de 75 rpm a 300 rpm. A potência de transmissão pode chegar a 592 kW (KIRK-OTHMER, 1997, SNOW *et al.*, 1999).

O grau de compactação depende das características de transmissão eficaz de forças que são aplicadas ao material e, depende também, das propriedades físicas das matérias-primas. Por se tratar de métodos que aplicam forças aos materiais contra uma matriz, há muito atrito gerado no processo. Para minimizar tais efeitos na máquina, alguns aditivos são utilizados, como aglomerantes ou até mesmo nível variado de umidade, visando promover plasticidade na mistura, os quais acabam operando como lubrificantes internos. Os tipos de materiais que podem ser processados são inúmeros, como por exemplo, ração animal, fármacos, biomassa, catalisadores, migalhas de borracha, dentre muitos outros. (KIRK-OTHMER, 1997, SNOW *et al.*, 1999)

O custo operacional deste tipo de equipamento é devido ao consumo de energia e do desgaste de peças, como os rolos e as matrizes. O consumo de energia é afetado pelas características das matérias-primas em processamento, pelo tipo de matriz, parâmetros operacionais, tamanho de partícula, umidade, entre outros. O custo operacional está muito relacionado com a qualidade final produto desejado, que, dependendo do consumo de energia requerido, vai demandar muito mais do equipamento, que poderá sofrer muito com o atrito e ter sua durabilidade reduzida. Por outro lado, reduzir o consumo de energia, por diferentes formas, pode levar à baixa qualidade do pellet produzido. Este é um ponto que deve ser avaliado caso a caso (NIELSEN *et al.*, 2020).

O consumo de energia, P_T (kW), pode ser medido pela Equação 4, onde V_L é a tensão (V) e I_L é a corrente (A), (JACKSON *et al.*, 2016).

$$P_T = \frac{\sqrt{3} \times V_L (V) \times I_L (A)}{1000} \quad (4)$$

Para o cálculo da energia específica consumida (SEC em inglês, sendo “*specific energy consumption*”) na produção de um produto específico, pode-se utilizar a Equação 5 (JACKSON *et al.*, 2016).

$$SEC = \frac{P_{Tavg} \times \frac{120 \text{ s}}{3600 \text{ s/h}}}{M_P \times \frac{1 \text{ Mg}}{1000 \text{ kg}}} \quad (5)$$

Onde:

- P_{Tavg} (kW) é o consumo de energia calculado pela equação 14, acima,
- M_P (kg) é a massa dos pellets produzidos em uma faixa de tempo, podendo utilizar o tempo de 120 s, e
- SEC é calculada em kWh/Mg

O mecanismo de aglomeração predominante neste tipo de equipamento é o entrelaçamento mecânico, ocasionado pelo processo que envolve a aplicação de pressão sobre o material contra a matriz. Outros efeitos de aglomeração também ocorrem, a depender das matérias-primas e dos aglomerantes aplicados nas misturas a serem processadas. Para a peletização, é necessário que a massa de produto tenha certa plasticidade para fluir e se moldar no processo, podendo ser utilizados aditivos de aglomeração ou de plastificação (BERNARDES, 2006; SNOW, *et al.* 1999; SOFFIONI, 2015).

2 Procedimento metodológico

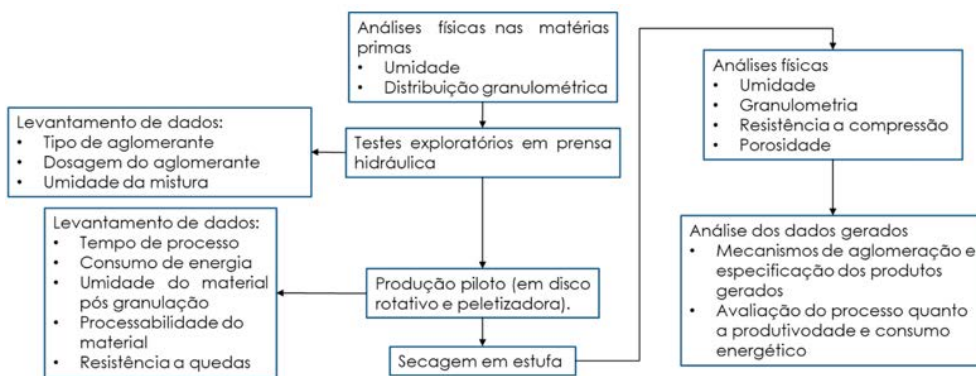
Previamente aos experimentos pilotos, a areia utilizada foi submetida a testes exploratórios de aglomeração em prensa hidráulica de bancada, da marca Ciola, com três aglomerantes definidos, a bentonita, o amido e o silicato de sódio, variando os teores em 1% e 2% e as umidades (base úmida) em 10% e 13%, sendo realizados no total 12 testes. Esta etapa visou selecionar o melhor aglomerante para a areia. Após a definição do aglomerante, as matérias-primas foram misturadas em maior quantidade em um misturador intensivo de forma a obter uma mistura homogênea.

Na etapa seguinte, os testes foram realizados nos equipamentos selecionados, disco rotativo e peletizadora. Durante os testes, foram levantados dados de operação, como corrente dos equipamentos, aspectos de processabilidade do material, produtividade, ou seja, quantidade de produto por tempo, mecanismos de aglomeração. Após os experimentos,

amostras foram analisadas quanto ao aspecto de aglomeração, resistência mecânica à compressão e a quedas sucessivas, distribuição granulométrica e umidade dos aglomerados finais em cada um dos processos.

Em seguida, os aglomerados foram levados para estufa a 105°C por 24 h a fim de realizar uma secagem próxima ao que se espera em um processo industrial (HALT, 2017). Após a secagem, foram realizadas novamente análises de granulometria, determinação da resistência à compressão, umidade e porosidade. A **FIGURA 15** ilustra o fluxo de blocos com o resumo do plano de experimentos:

Figura 15 - Resumo dos experimentos



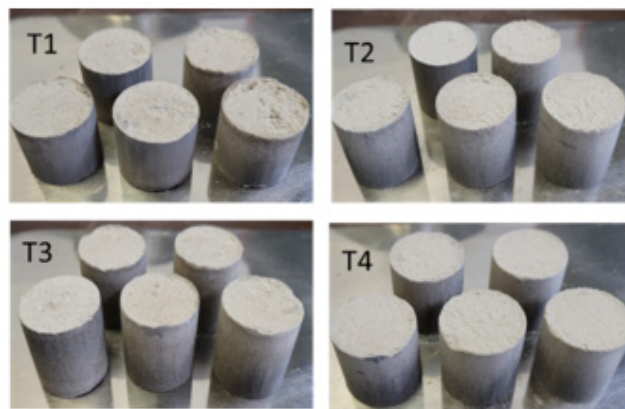
Fonte: elaborado pelas autoras

As variáveis de processo, como vazão de alimentação e adição de umidade para ajuste do processo, são aspectos que foram determinados durante os testes, avaliando a melhor especificação para o produto desejado. Tendo sido definidos, os parâmetros se mantiveram constantes para a coleta de amostras para análise.

3 Resultados e discussão

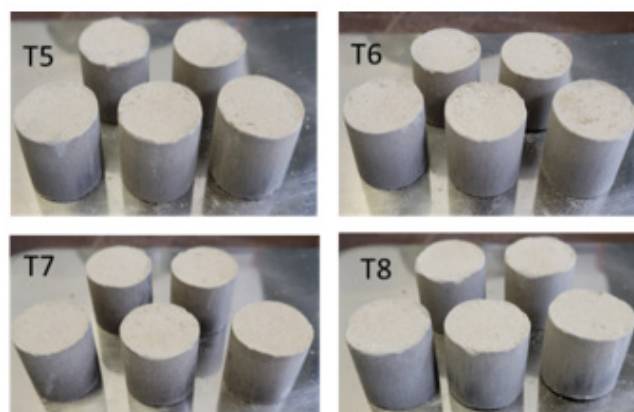
Os testes exploratórios foram realizados com os três aglomerantes e variação da umidade como já mencionado. Em avaliação visual, as **Figuras 16, 17 e 18** mostram o aspecto dos briquetes nos diferentes testes. Os testes de “T1” a “T4” são referentes aos testes com amido de milho, de “T5” a “T8” são referentes aos testes com bentonita e de “T9” a “T12” são referentes aos testes com silicato de sódio.

Figura 16 - Aspecto dos briquetes com amido de milho após secagem



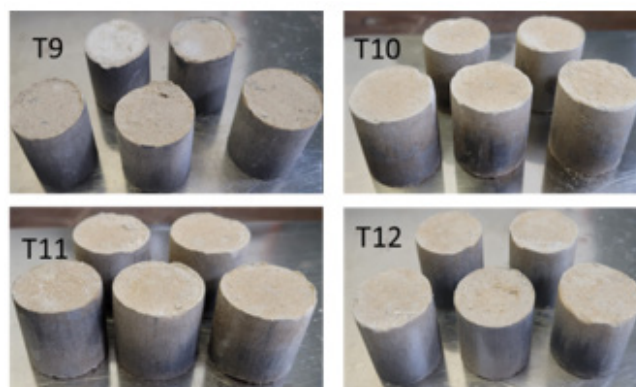
Fonte: Fotos tiradas pelas autoras durante os testes

Figura 17 - Aspecto dos briquetes com bentonita após secagem



Fonte: pelas autoras

Figura 18 - Aspecto dos briquetes com silicato de sódio após secagem

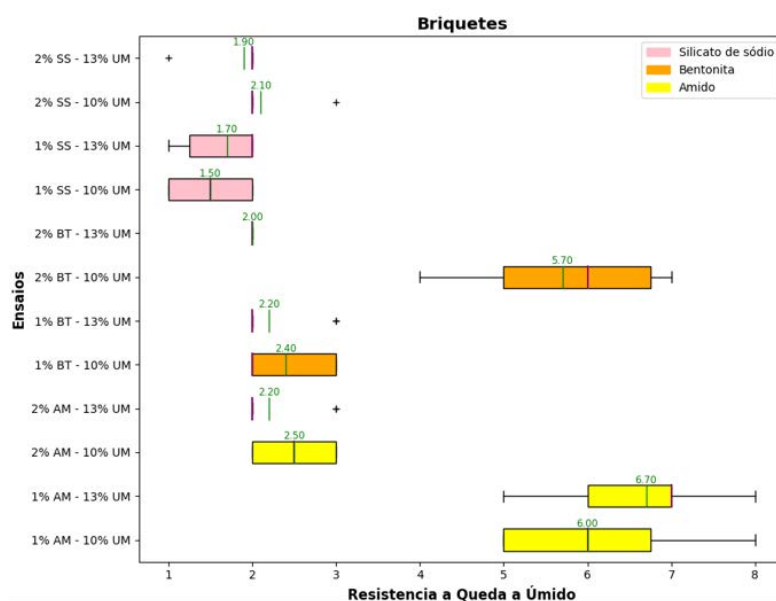


Fonte: pelas autoras

Conforme as a imagens, os briquetes visualmente não apresentaram diferenças significativas, apenas coloração um pouco mais amarelada quando utilizado o silicato de sódio como aglomerante.

Os resultados dos testes de compressão a úmido e a seco, quedas sucessivas e umidade após a secagem encontram-se na **FIGURA 19**, onde a identificação dos ensaios são as abreviações dos aglomerantes utilizados, sendo: SS para Silicato de Sódio, BT para Bentonita, AM para Amido de Milho e UM para umidade.

Figura 19 - Box Plot com os resultados de resistência a quedas sucessivas

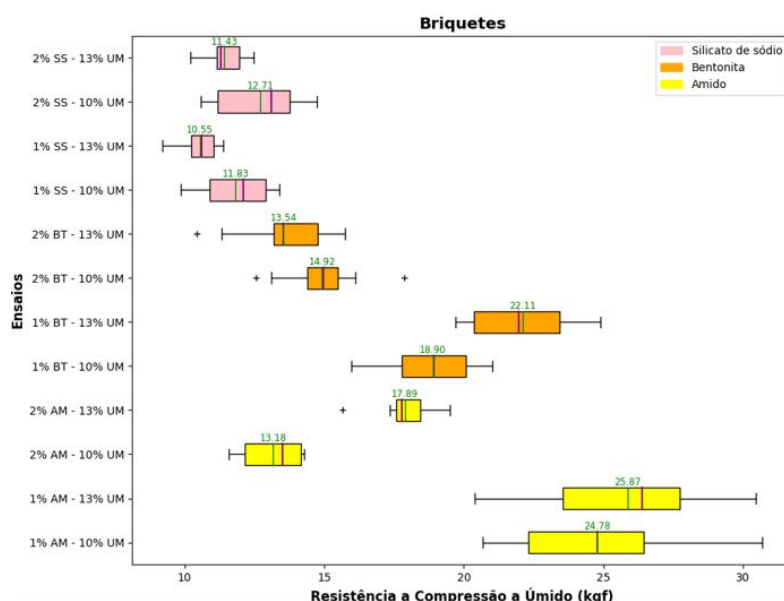


Fonte: pelas autoras

Os resultados de quedas dos briquetes a verde (úmido), ou seja, logo após a sua confecção, indicam a plasticidade que o aglomerado terá logo após o processo de aglomeração. Este resultado tem influência no percurso que o material terá até o final do processo, passando por outros equipamentos de transporte, secagem e peneiramento, dentre outros. Pelo blox pot das quedas (**FIGURA 19**), pode-se observar que os testes com silicato de sódio atingiram resultados mais baixos e o amido com 2% nas duas umidades e a bentonita 1% com 10% de umidade obtiveram os maiores resultados.

As amostras também foram submetidas a testes de resistência à compressão a verde e os resultados estão apresentados na **FIGURA 20**.

Figura 20 - Box Plot com os resultados de resistência à compressão a verde



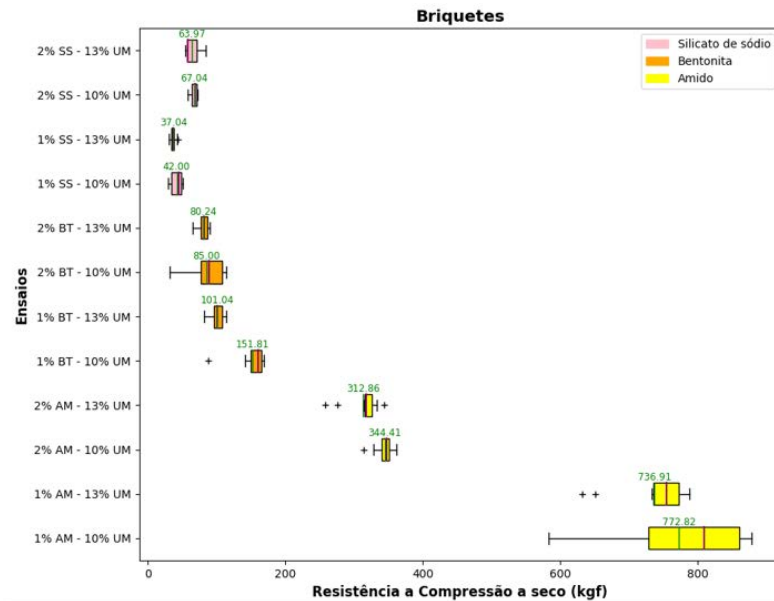
Fonte: pelas autoras

Dentre os resultados obtidos com as amostras com silicato de sódio, as médias ficaram entre 10,55 kgf/briquete a 12,71 kgf/briquete, sendo os resultados mais baixos comparativamente aos demais aglomerantes. Os resultados de resistência à compressão das amostras contendo bentonita ficaram com médias de 13,54 kgf/briquete e 14,92 kgf/briquete com o teor de 2% e umidades de 13% e 10%, respectivamente. Esses valores são mais baixos quando comparados com a bentonita na dosagem de 1%, que apresentaram valores de 22,11 kgf/briquete com umidade de 13% e 18,90 kgf/briquete, com umidade de 10%.

Em relação ao amido, os resultados também foram superiores nos testes com teores de 1% em relação aos teores de 2%. Neste caso, as médias com teores de 2% ficaram em 17,89 kgf/briquete com umidade de 13% e 13,18 kgf/briquete na umidade de 10%, contra médias de 25,87 kgf/briquete com umidade de 13% e 24,78 kgf/briquete com umidade de 10%, nas concentrações de 1% de amido.

Os resultados de resistência à compressão a verde indicam o comportamento do produto durante o processo até a sua secagem, no qual pode sofrer alteração de suas características de resistência mecânica. Na **FIGURA 21**, encontram-se os resultados do teste após a secagem dos briquetes.

Figura 21 - Box Plot com os resultados de resistência à compressão a seco



Fonte: pelas autoras

Os resultados dos testes a seco seguem uma analogia similar entre os tipos de aglomerantes quanto ao teste a verde, sendo que com 1% de amido foram obtidos resultados discrepantes em relação aos demais, atingindo médias de 736,91 kgf/briquete, com umidade de 13%, e 772,82 kgf/briquete com a umidade de 10%. Esse resultado é cerca de 20 vezes superior ao menor resultado obtido com o silicato de sódio (37,04 kgf/briquete), por exemplo.

Os resultados obtidos indicam que, para a aglomeração da areia, o amido é a melhor opção dentre os três aglomerantes avaliados, no que diz respeito aos maiores resultados de resistência à compressão. Por outro lado, o resultado de quedas sucessivas mostrou que o produto apresenta maior plasticidade quando utilizado amido como aglomerante. Este pode ser um fator de desvantagem quando são avaliadas as demais etapas do processo industrial ao qual o material será submetido, podendo perder sua forma ao longo do processo e algumas características. Entretanto, esta plasticidade pode ser favorável em processos que envolvam a compressão, promovendo melhor processabilidade no equipamento e auxiliando na redução do atrito.

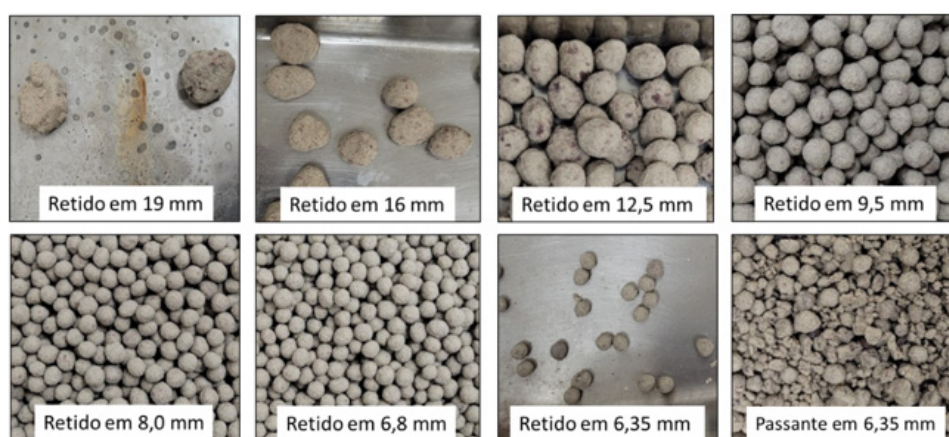
Em relação aos resultados, uma segunda opção de aglomerante que se mostrou favorável foi a 1% de bentonita na umidade de 10%. Esta formulação apresentou resistência média a quedas a verde de 2,4 quedas, ficando entre os resultados do amido e do silicato de sódio. Os resultados de resistência à compressão também foram intermediários em relação aos demais. Quanto à resistência à compressão a verde, apresentou média de 18 kgf/briquete e 151,81 kgf/briquete a seco. Esta foi a segunda opção de aglomerante para os testes.

3.1 Testes Piloto em Disco Rotativo e Peletizadora

Os testes iniciaram no disco rotativo utilizando o amido de milho como aglomerante, mas como visto nos resultados dos testes exploratórios, a massa de material ficou plástica a ponto de deformar o material e dificultar o crescimento dos grânulos. Desta forma, o teste foi repetido, mas desta vez utilizando a bentonita a 1% na massa como aglomerante e 10% de umidade inicial.

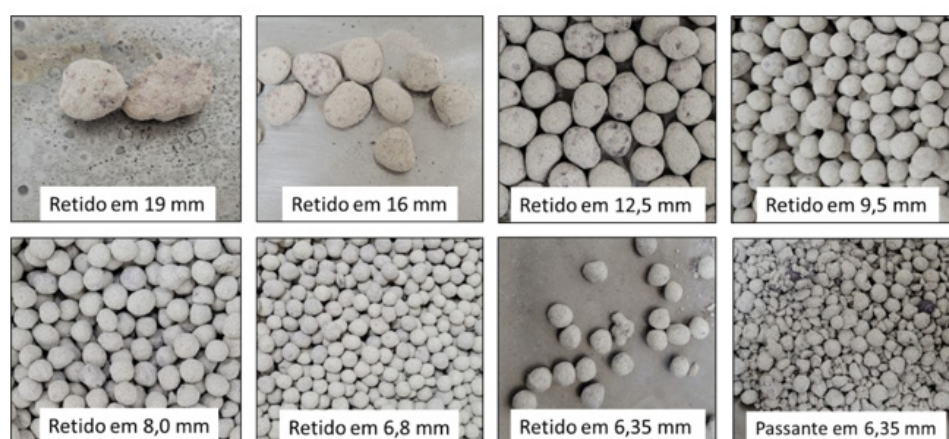
Neste caso, a aglomeração se deu com maior facilidade e melhor controle no tamanho dos grânulos. Nas **Figuras 22 e 23** pode-se observar o aspecto dos aglomerados formados.

Figura 22 - Aspecto visual das frações do teste com 1% bentonita, a verde



Fonte: pelas autoras

Figura 23 - Aspecto visual das frações do teste com 1% bentonita, a seco

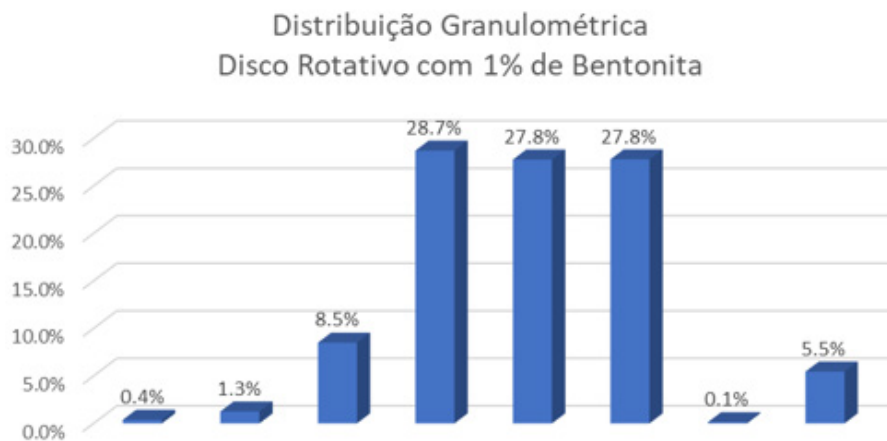


Fonte: pelas autoras

O consumo de energia ficou na faixa de 0,096 kWh, devido ao tempo menor de processo em relação a medição obtida com amido. Em 1086 s, que foi o tempo de processo, a energia consumida foi de 0,02896 kWh. Utilizando-se a equação 5, tem-se 0,00506 kWh/kg. Ou se for considerado o gasto energético em relação apenas a massa de produto acabado, considerando 27,8% de produto dentro da faixa granulométrica, tem-se 1,58 kg e o consumo aumenta para 0,01803 kWh/kg.

A umidade total ficou na ordem de 19,7%, considerando os 10% de umidade inicial da mistura, mais 9,7% de umidade adicional durante o processo. Na **FIGURA 24** pode-se observar a distribuição granulométrica obtida neste teste. Foi possível obter 84,3% dos aglomerados na faixa entre 6,8 mm e 16 mm, sendo que a quantidade de material abaixo de 6,35 mm ficou baixa (5,5%).

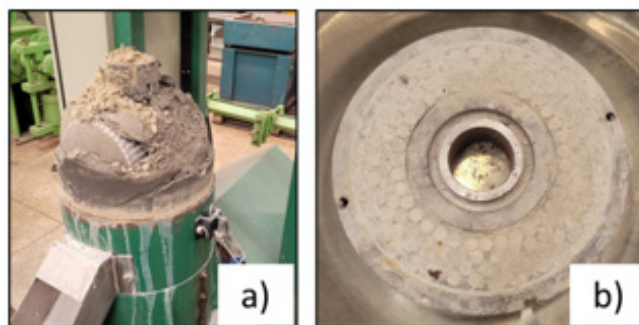
Figura 24 - Distribuição granulométrica do teste com 1% de bentonita em disco rotativo



Fonte: pelas autoras

Na sequência, foram realizados os testes na peletizadora já com a mistura de 1% de bentonita com umidade de 10%. O teste foi iniciado, mas ao longo da adição de material foram encontradas algumas dificuldades, a primeira foi a umidade que estava baixa para o processo e, a segunda foi a adição de muito material de uma única vez. Neste primeiro teste, o material ficou muito seco dentro dos furos da matriz e foi necessário interromper o teste para limpeza. Também foi observada evaporação de água, muito provavelmente devido a alteração na pressão de vapor da água dentro dos furos com a pressão dentro do equipamento. Foi observada também a elevação da temperatura dos peletes que foram gerados; a temperatura do material dentro do equipamento ficou na faixa de 80°C. A **FIGURA 25a** mostra como ficou o interior da peletizadora com a obstrução dos furos por falta de umidade e travamento dos rolos com a quantidade de material. A **FIGURA 25b** mostra como ficaram os furos da matriz com a obstrução com material.

Figura 25 - Aspecto visual da peletizadora e matriz após obstrução



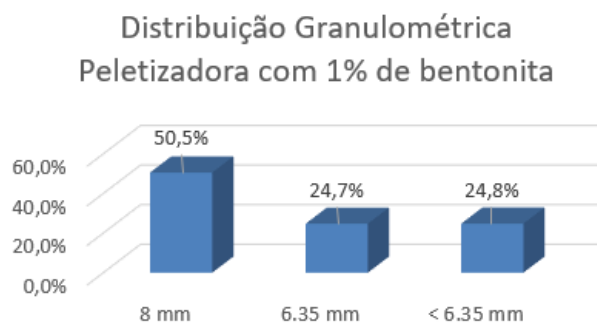
Fonte: pelas autoras

Nos testes seguintes, a umidade da mistura foi ajustada para 13%, sendo esta a umidade ideal identificada para a peletização da areia com 1% de bentonita.

Durante o processo, foi anotada a corrente elétrica do motor para o cálculo da potência consumida, ficando a corrente em torno de 15 A, com alguns picos momentâneos durante a adição de material dentro da câmara. Com base na equação 4, o consumo de energia ficou em 0,053 kWh/kg ou se for considerado apenas o produto acabado, sendo a massa total de 5,9 kg, considerando 50,5% de produto dentro da faixa granulométrica, tem-se 0,105 kWh/kg.

Como os peletes são obtidos com diâmetro constante, o peneiramento para avaliação de distribuição granulométrica foi mais restrito, utilizando 3 faixas granulométricas, sendo as de 8,0 mm, 6,35 mm e abaixo de 6,35 mm, para separar o pó que poderia voltar como reciclo ao processo e os cilindros mais longos, já que o equipamento utilizado não possui faca de corte. Desta forma, a distribuição granulométrica encontra-se na **FIGURA 26**, mostrando que 24,8% do material era menor que 6,35 mm.

Figura 26 - Distribuição granulométrica do teste com 1% de bentonita em peletizadora



Fonte: pelas autoras

Para a realização das caracterizações, os peletes foram cortados manualmente, logo após o processo, de forma a ficarem com aproximadamente 8 mm de comprimento, conforme mostra a FIGURA 27. A umidade final do produto após secagem ficou em 2,8%. No teste de quedas sucessivas, o valor médio ficou em 11,5 quedas. Observou-se que o pelete ficou bem coeso, sendo que os pontos que quebravam eram as extremidades que ficaram mais frágeis.

Figura 27 - Aspecto visual das amostras cortadas manualmente



Fonte: pelas autoras

3.1.1 Comparativos de resultados dos testes

A TABELA 2 mostra um resumo dos resultados obtidos nos testes nos dois equipamentos, disco rotativo e peletizadora, com o uso do aglomerante bentonita na dosagem de 1%.

Tabela 2 - Resumo dos resultados dos produtos nos dois equipamentos

Parâmetro - Produto	Disco Rotativo	Peletizadora
Quedas (úmido)	2,4	11,5
Resistência à compressão (úmido) (kgf/pelota ou pelete)	0,2	1,2
Resistência à compressão (seco) (kgf/pelota ou pelete)	1,7	4,1
Porosidade (úmido) (%)	37,5	24,0
Porosidade (seco) (%)	47,4	33,3
Umidade inicial (%)	19,5	13
Umidade pós secagem (%)	2,6	2,8
Distribuição granulométrica (>9,5, <8,0 mm) (%)	28,7	50,5

Fonte: pelas autoras

Avaliando os resultados obtidos nas caracterizações dos produtos nos dois processos, pode-se inferir alguns pontos para cada processo:

Disco rotativo:

A característica principal do produto em relação a este processo é a porosidade. Quando se busca como resultado um produto com porosidade alta, este processo de tombamento se mostra superior em relação ao processo de peletização. Como a porosidade do produto foi mais alta, é muito provável que tenha colaborado para um menor valor de resistência à compressão, aumentando a fragilidade das pontes e estruturas formadas no aglomerado.

Outra característica é a resistência a quedas sucessivas, comparando também ao teste utilizando amido como aglomerante, foi possível verificar que a mistura para este processo pode não apresentar plasticidade suficiente para que o produto sofra deformações durante o processamento, que podem ser indesejadas ao produto.

Como já é conhecido, é comum este processo apresentar grande razão de reciclo, a qual no teste foi de aproximadamente 1:3. Este parâmetro irá depender muito da característica dos materiais que estiverem sendo processados e podem contribuir para tamanho de equipamentos maiores devido a capacidade de carga circulante ser 3 vezes maior que a vazão de produto acabado.

A umidade é outra característica do processo de aglomeração por tombamento, no qual a demanda é maior em relação ao processo por compressão, o que acaba resultando em maior energia gasta para a secagem deste material. Comparativamente, neste teste, a umidade requerida para o processo de tombamento foi 50% superior a umidade necessária para o processo de compressão em peletizadora.

Peletizadora:

O valor de porosidade do aglomerado obtido no processo foi 42% inferior ao obtido no disco.

Por outro lado, a resistência à compressão foi 2,4 vezes superior, sendo um fator relevante para a maioria das indústrias, uma vez que os produtos passam por processos de transporte e manuseio que requerem resistência mecânica elevada. A resistência a quedas também foi outro fator com valores superiores, sendo fraturadas apenas as extremidades onde há maior fragilidade no pelete.

Avaliando a distribuição granulométrica, e a possível fração de reciclo, ficou praticamente em razão 1:1, mas neste caso, estes valores podem ser melhorados com a inserção da faca de corte no equipamento para ajustar o tamanho dos peletes de saída. Como no equipamento utilizado não havia faca de corte, muitos peletes saíram muito compridos e foram se quebrando e fragilizando durante o manuseio, contribuindo para a uma maior geração de finos. Neste processo, a umidade requerida foi inferior ao processo do disco rotativo, necessitando de um tempo menor de secagem.

Para comparação da operação dos processos, a **TABELA 3** mostra os resultados de parâmetros obtidos em cada um dos processos.

Tabela 3 - Resultados de parâmetros dos processos

Parâmetro - Processo	Disco Rotativo	Peletizadora
Tempo de estabilização	2 min 42 s	32 s
Tempo de processo total	18 min 06 s	3 min 46 s
Quantidade de material processada	5,7 kg	11,7 kg
Vazão de processo	18,9 kg/h	186,4 kg/h
Rendimento do processo (produto acabado)	27,8%	50,5%
Massa de produto acabado	1,58 kg	5,9 kg
Consumo de energia por kg de produto acabado	0,01803 kWh/kg	0,105 kWh/kg
Operacionalidade	Necessita do olhar do operador	Boa e automatizável

Fonte: pelas autoras

Em relação à vazão de processo, a peletizadora atingiu uma vazão 10 vezes maior que a do disco rotativo, com um rendimento de processo também superior, sendo que poderia ser ainda maior, caso a peletizadora tivesse um sistema de corte para padronizar o comprimento dos peletes.

Outro ponto de destaque é o consumo de energia, especificamente no equipamento disco rotativo. Sem avaliar os equipamentos que fazem parte do restante do processo, este equi-

pamento consumiu cerca de 10 vezes menos energia no caso estudado. Vale ressaltar que pode haver variações em consumo de energia dependendo da marca do equipamento e das capacidades de cada um. Este é um ponto já esperado pelo tipo de equipamento, pois a peletizadora precisa de um motor maior para conseguir imprimir pressão no produto, enquanto o disco rotativo não precisa imprimir força no produto e sim, manter o disco em rotação com a massa de material que estiver sendo processada.

Sobre a operacionalidade, a peletizadora possui uma maior facilidade de processamento, uma vez que o material já é previamente misturado, com a umidade adequada e apenas adicionado ao processo de peletização, o que pode ser completamente automatizado. Já no disco rotativo, é necessário maior controle de umidade no processo, em que em escala industrial, e havendo variação de umidade da matéria-prima de entrada, esta precisará ser corrigida no disco. Este é um ponto que pode ser automatizado, mas dependerá de mais instrumentos para se obter o controle. Por outro lado, do ponto de vista de manutenção e limpeza, no disco rotativo é muito mais simples de realizar tais tarefas, além de já possuir raspadores que vão retirando o material que pode se acumular. No caso da peletizadora, foi observado no teste que estava com baixa umidade do material, a necessidade de um esforço maior para realizar a limpeza, sendo que no teste em escala laboratorial, foi necessário utilizar furadeira para desobstruir os furos da matriz. Porém, este é um caso atípico de um produto ainda em teste, no entanto, industrialmente, há a chance de ocorrer algum erro de operação e ser necessária a limpeza e desobstrução dos furos também. Outro ponto crítico na peletizadora é o desgaste devido ao atrito com o material, que tanto a matriz, quanto os rolos podem sofrer ao longo do tempo.

4 Conclusões

Com os dados apresentados e as comparações entre os dois métodos estudados, tombamento em disco rotativo e baixa compressão em peletizadora, foi possível a construção da **TABELA 4**, que traz a comparação e o levantamento de informações para cada técnica em relação às características das matérias-primas e do produto que se deseja obter. Os sinais (+) e (-) em cada item apenas ilustram qual método aceita melhor a característica em questão. Se os métodos serão bons ou ruins vai depender dos materiais, das características que se deseja obter no produto e qual será sua aplicação.

Tabela 4 - Tabela comparativa das características dos materiais com os processos

Características – Matéria prima e Produto	Disco Rotativo	Peletizadora
Umidade da mistura	(-) Necessita de mais umidade para realizar a aglomeração durante o processo de tombamento.	(+) Utiliza menor umidade em comparação ao disco, porém é necessário avaliar de acordo com o material que será processado.
Plasticidade da mistura	(-) Não aceita que a mistura seja muito plástica, podendo causar deformação dos aglomerados.	(+) Aceita materiais mais plásticos, podendo auxiliar na lubrificação do equipamento.
Resistência à compressão	(-) Este método proporciona menor resistência à compressão. No teste estudado, cerca de 4 vezes menor.	(+) Este método proporciona maior resistência à compressão, podendo estar ligada também a porosidade que é menor neste método.
Porosidade	(+) Comparativamente à peletizadora, proporciona maior porosidade ao aglomerado final.	(-) Com o processo de compressão, diminui a distância entre as partículas e resulta numa menor porosidade comparativamente ao método de tombamento.
Distribuição granulométrica	(-) Possui grande variação de distribuição granulométrica, mas todo o material fora de especificação granulométrica retorna ao processo como reciclo.	(+) É um método que a distribuição granulométrica é mais controlada pelo diâmetro da matriz e por facas de corte.
Temperatura	(+) O método por si só não aquece o produto.	(-) Neste método, por haver atrito e pressão, pode ocorrer fusão ou evaporação de algum constituinte da mistura.

Fonte: pelas autoras

Quanto aos aspectos dos equipamentos e da operacionalidade, a TABELA 5 traz as comparações entre os métodos.

Parâmetros - Processo / Equipamento	Disco Rotativo	Peletizadora
Tempo de estabilização	(-) A estabilização depende do controle de processo, da umidade das matérias-primas e da adição de umidade durante o processamento, mas pode levar mais tempo comparativamente a peletizadora.	(+) Possui estabilização mais rápida do processo.
Consumo de energia específica	(+) O gasto de energia é menor avaliando apenas o disco. (-) O gasto de energia pode ser maior dependendo da umidade necessária ao processo que deverá passar por posterior secagem.	(-) O consumo de energia é maior, visto que é necessário aplicação de forças maiores para ocorrer a compressão no material.
Rendimento de processo	(-) Este é um fator que o disco sai perdendo, pois os equipamentos precisam ser maiores do que a capacidade produtiva, devido a razão de reciclo no processo.	(+) O rendimento de processo é maior que o do disco e pode ser controlado. O material fora de especificação também pode retornar como reciclo.
Operacionalidade	(-) A operação do disco depende muito das características das matérias-primas, a automatização pode ser mais difícil que a da peletizadora.	(+) A operação é simples e facilmente automatizada com equipamentos de alimentação e dosagem no processo.
Manutenção	(+) A manutenção e limpeza do disco é simples, o equipamento é aberto e possui raspadores que fazem uma certa limpeza contínua. Pouco desgaste do equipamento.	(-) A manutenção e limpeza da peletizadora é mais trabalhosa, podendo obstruir os furos da matriz e ser difícil a remoção. O equipamento é fechado, e pode dificultar a identificação de obstrução no equipamento. Alto desgaste de matriz e rolos.

Fonte: pelas autoras

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Mestrado Profissional do IPT pela disponibilização de equipamentos e materiais para a realização do estudo, aos profissionais do Centro de Materiais Avançados do IPT e a todos de contribuíram diretamente ou indiretamente, como familiares, empresas e banca avaliadora.

6 Referências

- BENES, J. A., DORTMUND, U., **Granulation**, Omnia Fertilizers Limited, 1991.
- BERNARDES, Laudo José Landi. A Granulação de Materiais. **Cerâmica Industrial**: A revista do técnico cerâmico brasileiro, [S.l.], p.17-22, maio 2006. Trimestral.
- CAPES, C. E.. Mechanism of Pellet Growth in Wet Pelletization. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design And Development**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 390-392, jul. 1967. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/i260023a023>.
- EISELE, T. C.; KAWATRA, S. K.. A review of binders in iron ore pelletization. **Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review**, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 1-90, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/O8827500306896>.
- FEECO INTERNATIONAL, 2018, Green Bay. **The Agglomeration Handbook**: An Overview of agglomeration. Green Bay, Wi: Feeco, 2018. 50 p.
- GRIFFIN, Curtis. **History of Granulation and the State of Art Granulation Techniques**. Tampa, Fl: Pegasus Tsi Inc, 2015. 11 p.
- HALT, Joseph A. **Controlling Properties of Agglomerates for Chemical Processes**. 2017. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Philosophy in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 2017.
- IVESON, S., LITSTER, J., Liquid-bound granule impact deformation and coeficiente of restitution, **Powder Technology**, v. 99, p. 234-242, 1998.
- JACKSON, Joshua *et al.* Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill. **Fuel Processing Technology**, [S.L.], v. 148, p. 43-49, jul. 2016.
- KIRK-OTHMER (EUA) (ed.). **Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology**. 4. ed. New York: Wiley, 1997. 22 v.
- LIMA, José Renato Baptista de. **Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotização**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

LITSTER, Jim; ENNIS, Bryan. **The science and engineering of granulation processes**. Brisbane: Kluwer Academic Publishers, 2004. 258 p.

MORAES, Sandra Lúcia de; LIMA, José Renato Baptista de; RIBEIRO, Tiago Ramos. Iron Ore Pelletizing Process: an overview. **Iron Ores And Iron Oxide Materials**, [S.L.], p. 41-59, 11 jul. 2018. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73164>.

NIELSEN, Simon Klinge *et al.* Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. **Powder Technology**, [S.L.], v. 364, p. 971-985, mar. 2020.

PIETSCH, Wolfgang. An interdisciplinary approach to size enlargement by agglomeration. **Powder Technology**, [S.L.], v. 130, n. 1-3, p. 8-13, fev. 2003.

PIETSCH, Wolfgang. **Agglomeration Processes: phenomena, technologies, equipment**. Weinheim: Wiley-Vhc Verlag GmbH, 2002. 617 p.

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R.. **Chemical Engineering: particle technology and separation processes**. 5. ed. [S.l.]: Butterworth Heinemann, 2002. 2 v.

RODRIGUES, Rafaella da Fonseca. **Influência das condições de processo na granulação de super simples em tambor rotativo**. 2012. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.

SALEH, K.; VIALATTE, L.; GUIGON, P.. Wet granulation in a batch high shear mixer. **Chemical Engineering Science**, [S.L.], v. 60, n. 14, p. 3763-3775, jul. 2005.

SAMPAIO, J. A.; COSTA, L. S.; ANDRADE, M. C. de. Ensaios contínuos de briquetagem em bancada e piloto - Aglomeração. Part. IV. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Cap. 22. p. 379.

SCHERER, Heinrich W. *et al.* Fertilizer Granulation. **Ullmann'S Encyclopedia Of Industrial Chemistry**, [S.L.], p. 70-86, 15 jun. 2000. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. http://dx.doi.org/10.1002/14356007.a10_323.

SILVA, Dafne Pereira da *et al.* Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética. **Revista IPT Tecnologia e Inovação**, [S.L.], v. 5, n. 16, p. 6-37, 16 abr. 2021. Revista IPT: Tecnologia e Informacao. <http://dx.doi.org/10.34033/2526-5830-v5n16-1>

SNOW, Richard H. *et al.* Size reduction and size enlargement. In: PERRY, Robert H.; GREEN, Don H.; MALONEY, James O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1999. Cap. 20. p. 1-90.

SOFFIONI, E. (Brasil). **Peletização**. Curitiba: Andritz Feed And Biofuel Brazil, 2015. 34 slides, color.

TUMURULU, J. S.; WRIGHT, C. T.; KENNY, K. L.; HESS, J. R. A review on biomass densification technologies for energy application. Idaho National Laboratory of U. S. Department of Energy. 2010.

VAN DEN DRIES, K., DE VEGT, O., GIRARD, V., VROMANS, H., Granule breakage phenomena in a high shear mixer; influence of process and formulation variables and consequences on granule homogeneity, **Powder Technology**, v. 133, p. 228-236, 2003.

WILDEBOER, W.J.; LITSTER, J.D.; CAMERON, I.T.. Modelling nucleation in wet granulation. **Chemical Engineering Science**, [S.L.], v. 60, n. 14, p. 3751-3761, jul. 2005.

10.29327/2152495.9.28-3



Artigo Técnico

Perícia judicial de engenharia para magistratura: um estudo de caso em edificação pública municipal.

Judicial engineering expertise for the judiciary: a case study in a municipal public building.

Rodrigo Andrade dos Santos ^{a*}, Valdecir Angelo Quarcioni^{bc**}

^a Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

^b Docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

^c Pesquisador do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção da Unidade de Negócios Habitação e Edificações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

Palavras-chave: anomalia construtiva; ausência de manutenção; concreto; durabilidade; perícia de engenharia.

Keywords: *construction anomaly; lack of maintenance; concrete; durability; judicial expertise.*

* e-mail: sarodrigoandrade@gmail.com

** e-mail: quarciva@ipt.br

Resumo

Durante a concepção de uma edificação podem ocorrer falhas desde o estudo preliminar até a sua execução. Identificá-las precocemente facilita a solução nas etapas subsequentes. Para Oliveira, Sousa e Moraes (2024), a falta de supervisão por engenheiros qualificados e a busca excessiva por economia por empresas construtoras, que contratam muitas vezes mão de obra sem conhecimento técnico satisfatório e utilizam materiais de qualidade questionável, aumentam o risco de anomalias na edificação. Negligenciar esses cuidados pode levar à deterioração das estruturas, resultando em prejuízos materiais, colapsos e até perda de vidas. Nesses casos, as pessoas recorrem ao Poder Judiciário para proteção de seus direitos e pedir compensações financeiras. É nesse cenário que surge o perito do juízo, sendo um profissional de engenharia nomeado pelo juiz, que investigará causas de anomalias construtivas e elaborará um laudo técnico para auxiliar na decisão judicial. A perícia de engenharia padroniza procedimentos técnicos, aumentando a eficiência na coleta de evidências e elaboração de laudos. Esse enfoque técnico fortalece as decisões judiciais, promove segurança jurídica e confiança na engenharia e no sistema judiciário brasileiro. Neste artigo é apresentado um estudo de caso que ilustra a perícia judicial de engenharia para magistratura no âmbito de uma ação judicial, em que a prefeitura local processou uma construtora que venceu a licitação para a construção de uma escola infantil, uma vez que não executou o serviço conforme estabeleceu o contrato firmado entre as partes. Durante a construção, a municipalidade constatou que os materiais utilizados na obra apresentavam baixa qualidade e os valores pagos mensalmente não correspondiam ao volume real da construção. O Departamento de Obras do Município vistoriou o local, quando o engenheiro municipal elaborou um Parecer Técnico de Vistoria e apontou diversas irregularidades na execução dos serviços. O perito judicial designado pela magistratura emitiu um Laudo Pericial, após um acurado levantamento de dados documentais e inspeção técnica na obra, subsidiando, dessa forma, o julgamento do litígio no âmbito do Poder Judiciário.

Abstract

During the design of a building, failures can occur from the preliminary study through to execution. Early identification of these issues facilitates their resolution in subsequent stages. According to Oliveira, Sousa, and Moraes (2024), the lack

of supervision by qualified engineers and the excessive pursuit of cost savings by construction companies—who often hire unskilled labor and use low-quality materials—increase the risk of problems in the building. Neglecting these precautions can lead to structural deterioration, resulting in material damage, collapses, and even loss of life. In such cases, individuals turn to the Judiciary to protect their rights and seek financial compensation. It is in this context that the court-appointed expert emerges—a professional engineer designated by the judge to investigate the causes of construction anomalies and prepare a technical report to support the judicial decision. Engineering expertise standardizes technical procedures, improving the efficiency of evidence collection and report preparation. This technical approach strengthens judicial decisions, promotes legal certainty, and reinforces public trust in both engineering and the Brazilian judicial system. This article presents a case study that illustrates the judicial engineering expertise for the judiciary in a lawsuit in which the local city government sued the construction company that won the bid to build a kindergarten, since it did not perform the service as established in the contract signed between the parties. During the construction, the municipality found that the materials used in the work were of low quality and the monthly amounts paid did not correspond to the actual volume of the construction. The Municipal Public Works Department inspected the site, where the municipal engineer prepared a Technical Inspection Report and pointed out several irregularities in the execution of the services. The judicial expert appointed by the judiciary issued an expert report, after an accurate survey of documentary data and technical inspection of the work, thus supporting the judgment of the dispute within the scope of the Judiciary.

1 Introdução

O concreto é um material compósito amplamente utilizado na construção civil em nível mundial para atender as demandas crescentes da sociedade na construção de estruturas cada vez mais complexas, com inovações significativas demandadas para responder às exigências da engenharia moderna. Devido à sua capacidade de suportar grandes estruturas e vencer vãos mais extensos com menos pilares, juntamente com sua flexibilidade e facilidade de moldagem, o concreto armado permitiu a viabilização de obras de edificações com múltiplos formatos e características.

Desde o início do processo construtivo de uma edificação e/ou estrutura, é possível que ocorram erros que comprometam as condições de desempenho, durabilidade e estabilidade das edificações. Imperfeições na fase de projeto, seleção inadequada de materiais utilizados na obra e falhas durante o processo construtivo representam potenciais fatores desencadeadores de manifestações patológicas (BORBA JUNIOR, 2011).

A análise e compreensão dessas anomalias são de significativa importância, uma vez que evidenciam a viabilidade de medidas preventivas, contribuindo assim para a extensão da vida útil da estrutura e a diminuição dos custos associados a intervenções corretivas. As manifestações patológicas, conforme discutido por Fonseca *et al.* (2016), representam uma variedade de problemas na estrutura, indo além do desconforto estético, as quais podem acarretar riscos significativos para a segurança e saúde de transeuntes e, especialmente, dos usuários.

A prevenção se apresenta como a abordagem mais apropriada e econômica para evitar tanto o surgimento quanto a progressão das manifestações patológicas, conforme destacado por Souza *et al.* (2016). Caso essas medidas sejam negligenciadas, as edificações estão sujeitas à degradação, podendo chegar a um estado crítico de colapso total ou parcial. Tal situação gera desconforto, prejuízos materiais e até perdas de vidas humanas.

Dessa forma, é natural que a pessoa que se sinta prejudicada peça auxílio ao Poder Judiciário para preservar seus direitos e buscar indenizações pecuniárias. É nessa seara que surge o perito judicial, que por sua vez é um profissional legalmente habilitado, detentor de conhecimentos específicos, sendo sua nomeação uma prerrogativa do juiz de direito. A função do perito é identificar e dimensionar o dano alegado pelas partes no processo e assistir o Juiz quando a prova do fato depender de conhecimento técnico ou científico, conforme preconiza o artigo 156 do Código de Processo Civil, (CPC), (BRASIL, 2015).

A atuação do perito judicial é ampla e abrangente, por atuar em diversas áreas do conhecimento. Oliveira (2009) elenca as modalidades de perícia, incluindo a perícia grafotécnica, a perícia médica, a perícia contábil, a perícia econômica, a perícia psicológica, a perícia administrativa, a perícia de tradução e interpretação, a perícia veterinária, a perícia de engenharia e a perícia em informática.

Soares e Magri (2022) destacam que a estimativa de honorários é a primeira oportunidade que o perito tem de compreender o que se discute no processo e a finalidade da perícia, isto deve ser considerado para fundamentar o valor dos honorários. É agora que o perito pode informar ao Juízo quaisquer restrições e observações sobre o desenvolvimento da perícia, ou escusar-se da designação pericial, conforme o artigo nº 467 do CPC, (BRASIL, 2015).

A perícia judicial de engenharia civil, para a magistratura, tem o objetivo de identificar, dimensionar e eventualmente atribuir valor a danos relacionados a questões complexas da engenharia civil no âmbito judicial. Além de proporcionar maior eficiência na coleta de evidências, na análise das anomalias construtivas e na elaboração do laudo pericial, esse enfoque técnico fortalece as decisões judiciais, promove a segurança jurídica, proporciona confiança na engenharia e no sistema judiciário brasileiro.

Este trabalho discute a prática da atividade pericial por demanda judicial e apresenta um estudo de caso, em uma edificação pública municipal situada no Estado de São Paulo.

2 Procedimento metodológico

Os dados que compõem a estrutura de redação do artigo, bem como o levantamento de dados, estão embasados em revisão bibliográfica em livros, artigos científicos, teses, dissertações e consultas nos autos do Tribunal de Justiça de São Paulo, focando-se em processo judicial que envolve realização de perícia dada a ocorrências de anomalias em obra civil. O conjunto completo de dados da pesquisa de Mestrado de Santos (2024) constitui a fonte bibliográfica de referência para este artigo.

Elaborou-se também a adaptação de um fluxograma com base nos artigos do Código de Processo Civil, mostrando a atuação do perito judicial em realização de uma perícia técnica. Procedeu-se a pesquisa no site do Tribunal de Justiça de São Paulo, em busca de processo judicial, onde houve a necessidade de realização de perícia relacionada às patologias de construção civil em região litorânea.

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foram contatados representantes da prefeitura municipal na região do Vale do Ribeira, obtendo-se anuências para uso de imagens, do laudo pericial, dados de projetos das estruturas e dados das características ambientais do local da edificação.

3 A prática da atividade pericial por demanda judicial

A engenharia e o direito estão em constante evolução para atender às crescentes demandas da sociedade. Ambas as áreas desempenham papéis essenciais na resolução de problemas complexos e na promoção da justiça, com constante aprimoramento, com o desenvolvimento de normas e regulamentos mais rigorosos para garantir a segurança e

estabilidade das estruturas. A coleta e análise de dados desempenha um papel crescente na engenharia e no direito, permitindo a tomada de decisão mais precisa, manutenção proativa de infraestruturas e salvaguardando direitos individual e coletivo.

Medeiros e Fiker (2013) afirmam que quando duas ou mais pessoas demonstram interesse em relação ao mesmo bem, ou utilidade, isso resulta em um conflito de interesses entre elas. Esse conflito pode levar a uma situação em que uma das partes busca sua vontade, exigindo que o interesse da outra parte seja subordinado ao seu próprio, o que é conhecido como “pretensão”. Caso a outra parte resista a essa pretensão, gera uma animosidade conhecida como litígio ou lide. A responsabilidade de resolver essa lide recai sobre um terceiro indivíduo, que deve ser imparcial e desinteressado na questão. Esse terceiro sujeito é representado pelo Estado por meio de seus órgãos jurisdicionais.

De acordo com as diretrizes da ABNT NBR 13752:2024, a atuação de peritos de engenharia inclui a necessidade da imparcialidade, ética profissional e competência técnica. Define perícia como uma atividade que envolve a verificação das causas que motivaram determinado evento ou a afirmação de direitos relacionados à construção civil.

Assim, a perícia de engenharia é uma investigação técnica realizada por profissionais para determinar as causas de um evento, como um acidente, uma falha estrutural, um problema de construção, para avaliar a conformidade com direitos contratuais, regulamentares ou legais. O objetivo da perícia é fornecer informações precisas e imparciais que possam ser usadas em processos judiciais, de forma autônoma, para auxiliar o juiz em sua decisão.

3.1 O perito judicial

Nos processos judiciais, especialmente em casos que envolvem questões técnicas complexas que vão além do conhecimento do magistrado, é natural que o juiz faça a nomeação de um profissional com conhecimentos específicos, para auxiliá-lo na análise da problemática. Esses profissionais são os peritos judiciais, que por sua vez são profissionais especializados em uma área técnica específica, como engenharia, medicina, contabilidade, psicologia, entre outras, e são legalmente habilitados a fornecer informações técnicas e imparciais para auxiliar o juiz na tomada de decisão (VITÓRIO, 2003).

Segundo o artigo nº 149 do Novo Código de Processo Civil – (NCPC), o perito é um auxiliar da justiça; sua presença é exigência quando a prova do fato depender de conhecimento técnico ou científico de acordo com o artigo nº 156 (BRASIL, 2015).

As perícias de engenharia na construção civil devem ser realizadas apenas por profissionais habilitados, devidamente registrados no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) ou no Conselho de Arquitetura e Urbanismo (CAU), nas respectivas atribuições profissionais contempladas na legislação vigente.

3.2 O assistente técnico

Para a norma brasileira ABNT NBR 13752:2024, que define o assistente técnico como um profissional legalmente habilitado pelo conselho de classe, este profissional é indicado e contratado por uma das partes envolvidas em um processo judicial para prestar assistência técnica. O papel do assistente técnico é orientar e apoiar a parte que o contratou e prestar assistência ao perito judicial, quando necessário, além de emitir seu próprio parecer técnico sobre questões em disputa.

Vitório (2003) contribui dizendo que o assistente técnico deve: analisar tecnicamente o processo em que está atuando, procurando enumerar os itens que poderá ir adiantando quando se iniciarem as diligências; formular quesitos iniciais e complementares, que poderão ocorrer ao longo da realização da perícia; informar ao perito do juízo sobre o andamento do processo, facilitando seu acesso aos imóveis, documentos e informações úteis à perícia; analisar o laudo elaborado pelo perito do juízo, explicando as conclusões dele ao advogado e ao cliente que o indicou. E, em caso de divergência com o laudo do perito judicial, elaborar seu laudo pericial de contestação em separado, apresentando suas divergências técnicas com justificativas e bem fundamentadas.

3.3 Conceito de laudo pericial

O laudo técnico pericial é uma peça na qual o perito expõe sua análise e fundamentação, expostas de forma clara, objetiva, inteligível, devendo contemplar tudo quanto necessário para o perfeito entendimento da matéria, apoiadas em referências técnicas pertinentes, dentre outras: normas técnicas, bibliografia, projetos, especificações, memoriais, regulamentos, manuais, legislação, contratos, cronogramas, orçamentos, pareceres especializados, ensaios, testes e procedimentos técnicos consagrados. Deve constar do laudo, quando for cabível, a anamnese do caso, apresentada cronologicamente, identificando as datas de ocorrência dos eventos, relatório fotográfico e desenhos elucidativos. (VITÓRIO, 2003).

A clareza e a objetividade são essenciais na elaboração de um laudo, além de apresentar linguagem técnica adequada, com disposição racional dos textos e ilustrações. Deve conter apenas considerações que não fomentem nenhuma dúvida de natureza técnica, evitando parágrafos longos de difícil compreensão e que sejam inconclusivos (VITÓRIO, 2003).

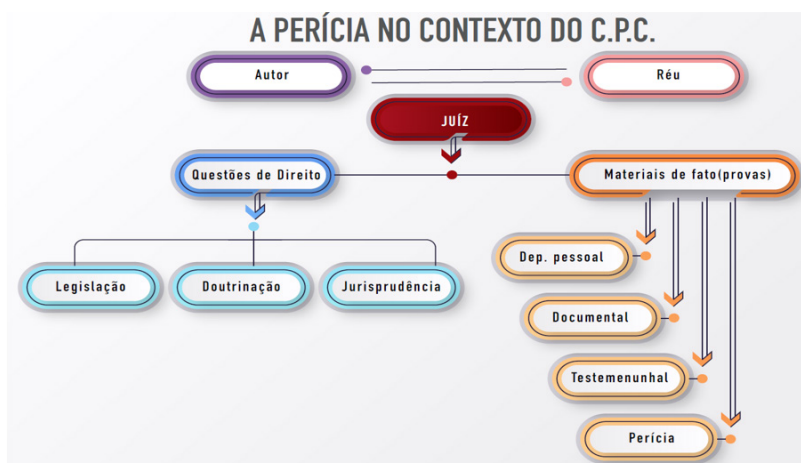
3.4 Desencadeamento da prova pericial

A importância de uma prova pericial em um processo judicial é amplamente reconhecida no Brasil, uma vez que, por meio dela, permite-se sustentar de forma sólida as descrições pela parte envolvida. A prova pericial no contexto jurídico é conhecida como a “rainha das provas”, devido ao seu elevado nível de seleção. Isso ocorre porque considera-se elaborada por peritos que possuem capacidade técnica e intelectual necessária para analisar diversos tipos de cenários, recriando os eventos ocorridos e simulando-os com o objetivo.

O ciclo da perícia no Código de Processo Civil (CPC) visa garantir a imparcialidade, a objetividade e a qualidade das informações técnicas apresentadas na Justiça para auxiliar na tomada de decisões justas e fundamentadas.

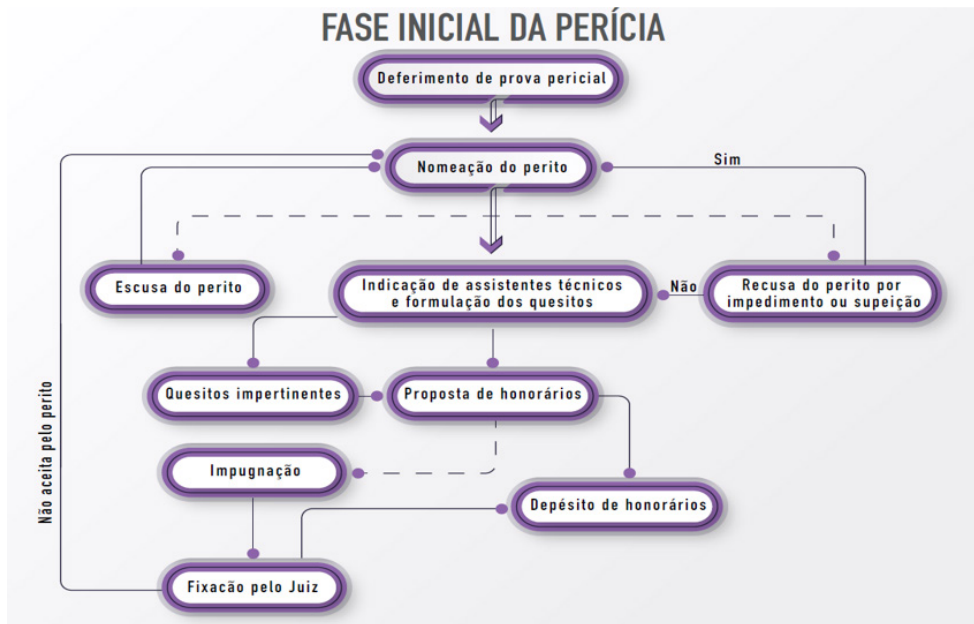
Após o ingresso da petição judicial (Figuras 1 a 5), o juiz dará início a uma sequência de etapas processuais que envolvem: a análise da petição inicial, a citação da parte contrária, o exame da contestação, a avaliação das provas documentais, a prolação de decisões interlocutórias, a realização de audiências, a produção de outras provas e, por fim, a sentença (MAIA NETO, 2019).

Figura 1 – Estrutura contextual da perícia judicial conforme o Código de Processo Civil



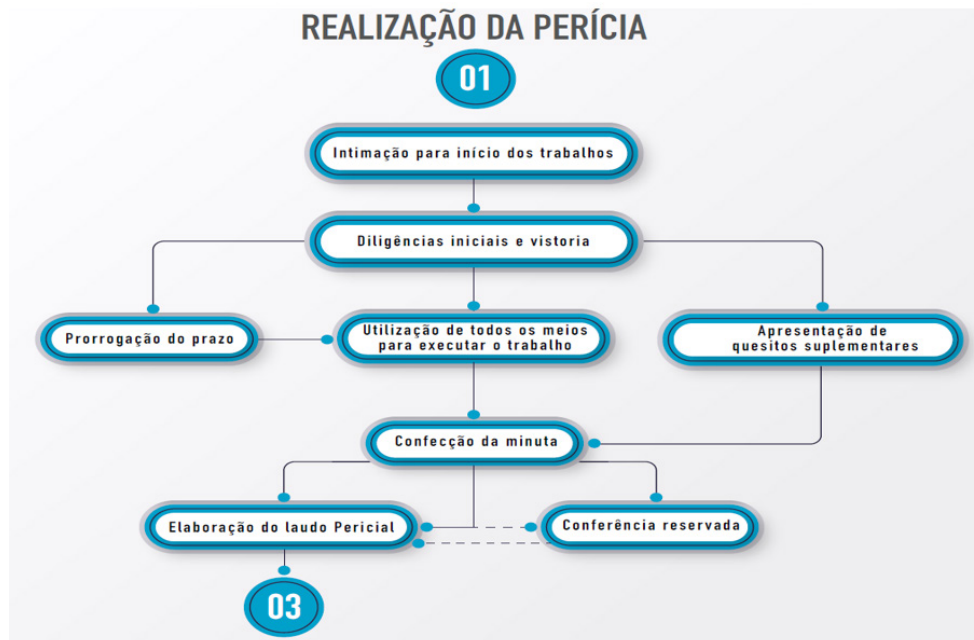
Fonte: Maia Neto (2019).

Figura 2 – Fase inicial da demanda judicial conforme o Código de Processo Civil



Fonte: Maia Neto (2019).

Figura 3 – Realização da perícia conforme o Código de Processo Civil



Fonte: Maia Neto (2019).

Figura 4 - Entrega do laudo conforme o Código de Processo Civil



Fonte: Maia Neto (2019).

Figura 5 - Esclarecimentos, segunda perícia e inspeção judicial



Fonte: Maia Neto (2019).

Conforme a complexidade do caso, o juiz pode designar audiências para ouvir testemunhas, colher depoimentos das partes e realizar a produção de provas. Essas etapas ajudam a esclarecer os fatos e fundamentar a decisão. Por fim, o juiz analisa as questões legais, combinando uma análise minuciosa das alegações das partes com a aplicação da legislação, doutrina e jurisprudência relevantes, além da análise de prova pericial para tomar uma decisão justa e fundamentada.

4 Estudo de caso de uma edificação pública municipal

Este estudo de caso aborda um processo judicial no qual o primeiro autor desempenhou a função de perito judicial. É uma situação que envolve uma ação judicial onde uma prefeitura da região do Vale Ribeira, no Estado de São Paulo, processou a construtora que venceu uma licitação para a construção de uma escola infantil de 990m² de área construída em um terreno com área total de 2800m². Além disso, o terreno possui topografia plana, aparenta ser seco e firme, podendo receber construções de qualquer porte, desde que obedecidas às diretrizes municipais e normas técnicas vigentes no país.

O valor do contrato foi de R\$ 1.480.000,00 (um milhão, quatrocentos e oitenta mil reais), onde seriam fornecidos mão de obra especializada e todos os materiais necessários para a construção da creche municipal. O contrato também estipulava que a construtora era a única responsável pela qualidade dos serviços, sendo obrigada a refazê-los, às suas próprias custas.

Após o início da implementação da construção, a Municipalidade constatou que os materiais utilizados na obra apresentavam baixa qualidade. Além disso, verificou-se que os valores pagos mensalmente não correspondiam ao volume real da construção. Ou seja, os pagamentos deveriam refletir as medições dos serviços efetivamente executados.

O Departamento de Obras do Município foi requisitado para realizar vistorias no local. Como resultado, o engenheiro municipal elaborou um Laudo Técnico de Vistoria, no qual foram identificadas diversas irregularidades na execução dos serviços.

A Municipalidade instaurou dois processos administrativos, nos quais foram apontadas diversas irregularidades, tanto na contratação quanto na execução dos serviços, tais como: pagamento de medições por serviços não executados e sem a devida vistoria por parte do Departamento Municipal de Obras, utilização de material reaproveitado, paralisação dos serviços, execução parcial dos serviços e materiais incompatíveis com os descritos no memorial descritivo. A **FIGURA 6** registra a planta baixa e vista aérea do local periciado.

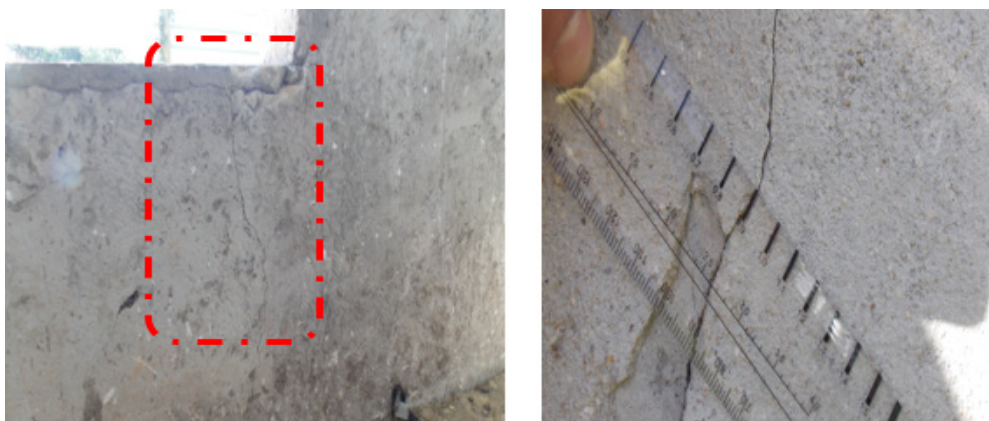
Figura 6 – Vista aérea da construção da creche municipal



Fonte: Santos (2021).

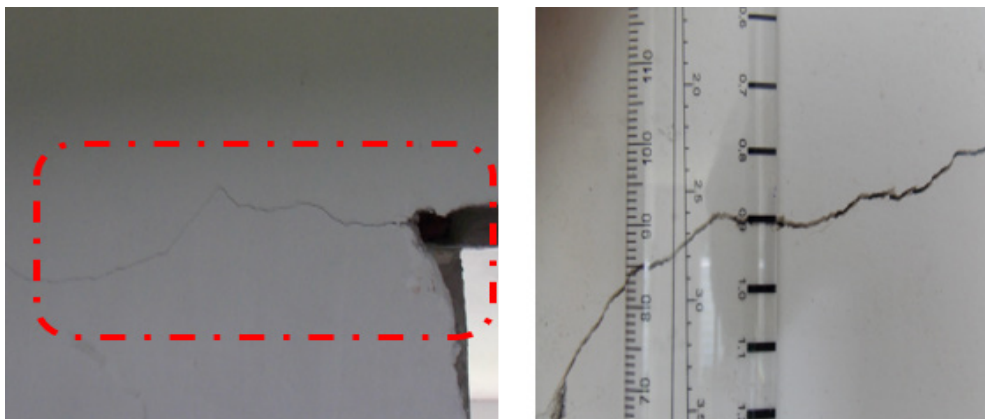
As **Figuras 7 e 8** registram fissuras e trincas nas alvenarias devido à ausência ou ineficiência de vergas e contravergas, além de vigas de concreto armado com cobrimento inadequado da armadura, em desacordo com a ABNT NBR 6118:2024.

Figura 7 – Trinca em alvenaria com 0,9mm causada por ausência de contraverga em janela



Fonte: Santos (2021).

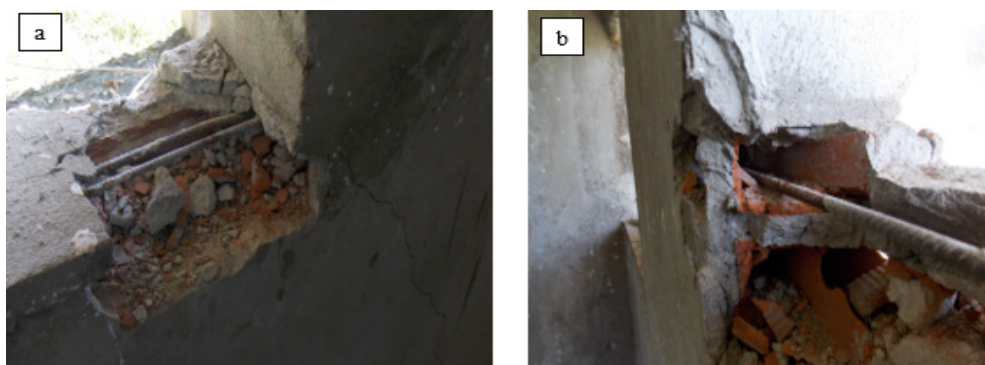
Figura 8 – Trinca em alvenaria com 0,9mm causada por ausência de verga em porta



Fonte: Santos (2021).

Na FIGURA 9, observa-se uma trinca no peitoril da janela, decorrente da instalação inadequada de uma barra de aço nos furos dos blocos. Essa instalação não atende aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2024.

Figura 9 – (a) Trinca na alvenaria devido ineficiência da contraverga. (b) Vista da instalação inadequada da barra de aço no furo do tijolo



Fonte: Santos (2021).

O memorial descritivo especificava que várias áreas, como cozinha, lactário, lavanderia e demais espaços semelhantes, deveriam receber revestimento em cerâmica branca de 20x20cm, cobrindo desde o piso até o teto, com rejunte branco gelo. Outras áreas, como vestiários e sanitários, deveriam ter o mesmo tipo de cerâmica até 1,70m de altura. As paredes internas dessas áreas deveriam ser revestidas com cerâmica branca de 20x20cm até 1,10m de altura, também com rejunte branco gelo, portanto, estas paredes foram revestidas parcialmente. Além disso, a construtora iniciou as instalações hidráulicas e hidrossanitárias, mas tinham sido concluídas por ocasião da perícia técnica (FIGURA 10).

Figura 10 - (a) Ilustração de completa ausência de revestimento cerâmico. (b) Ausência de instalações hidráulicas e hidrossanitárias



Fonte: Santos (2021).

Consta no projeto executivo da calha de captação de água pluvial que seria aplicada uma manta asfáltica impermeabilizante. No entanto, esse serviço não foi executado. Como pode ser observado na **FIGURA 11**, a ausência dessa impermeabilização causou infiltrações, lixiviações, bolores e eflorescências, com formação de estalactites no fundo da laje e em diversas regiões da fachada.

Figura 11 - Marquise com infiltrações, lixiviações e eflorescências com formação de estalactites



Fonte: Santos (2021).

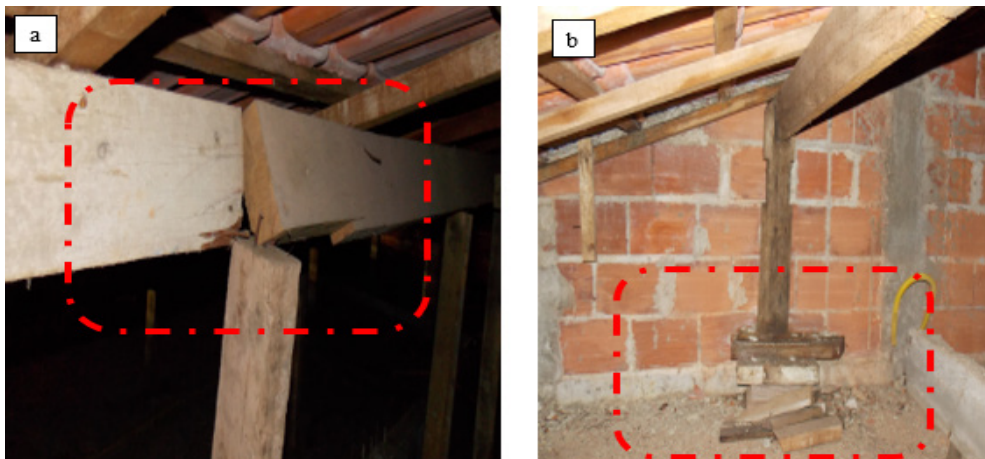
No contrato da construtora constava a construção de um telhado do tipo colonial, empregando telhas cerâmicas. Ademais, era requisitado que todas as diretrizes presentes nos projetos fossem rigorosamente seguidas, incluindo a utilização de madeiramento novo. No entanto, as **Figuras 12, 13 e 14** evidenciam que essas diretrizes não foram devidamente atendidas.

Figura 12 - Irregularidade no espaçamento entre caibros de 69,50cm em desconformidade com o projeto



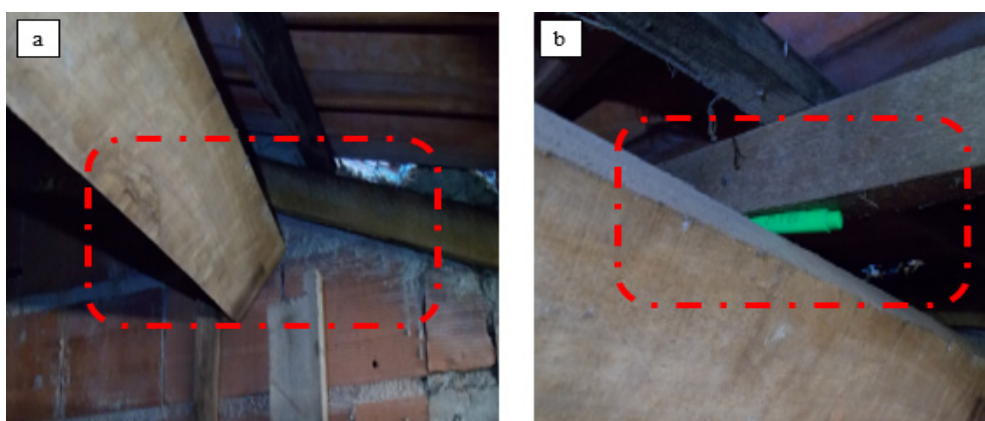
Fonte: Santos (2021).

Figura 13 - (a) Ausência de emenda entre as terças. (b) Pontaletes com apoio irregular dos calços



Fonte: Santos (2021).

Figura 14 - (a) Vista de uma terça desencaixada do seu pontaletes de apoio. (b) Vista de caibro não solidário em uma terça (destaque em verde).



Fonte: Santos (2021).

5 Reconhecimento do laudo pericial do estudo de caso pelo CREA-SP

A construtora tentou desqualificar o laudo pericial, alegando que a perícia foi conduzida com vícios e que os projetos fornecidos ao perito estavam desatualizados. Além disso, denunciou o perito judicial e a engenheira da prefeitura ao Conselho de Ética do CREA-SP, na busca de anular o laudo pericial, argumentando que apenas o CREA-SP teria competência para avaliar o laudo pericial e os procedimentos adotados pelo perito judicial.

A denúncia foi então analisada pela Câmara Especializada de Engenharia Civil do CREA-SP, que, por unanimidade, decidiu por indeferir, confirmando que tanto o perito quanto a engenheira atuaram conforme os princípios legais da Lei Federal nº 5.194 (BRASIL, 1966). Após uma análise cuidadosa, o magistrado concluiu que não havia evidências suficientes para comprovar os supostos vícios na perícia. Verificou-se que todos os projetos fornecidos estavam adequados para a análise pericial, como: fundação, instalações hidrossanitárias, alvenaria, telhado, instalações elétricas e acabamento, além do projeto de implantação do reservatório de água em material metálico. Dessa forma, todas as alegações da construtora foram refutadas.

Diante disso, todas as alegações feitas pela construtora foram rejeitadas e o laudo pericial aceito integralmente, qualificando-o como documento base para a decisão do juiz. Com isso, ficou claro que a perícia técnica realizada foi conduzida com rigor técnico e imparcialidade, e uma contribuição para uma sentença fundamentada em fatos comprovados.

6 Conclusão

Durante o processo de concepção de uma estrutura de concreto, é possível a ocorrência de falhas desde o estudo preliminar, durante a etapa de desenvolvimento do projeto, até a fase de execução em obra. Identificar essas falhas precocemente é importante, pois quanto mais cedo são detectadas, mais fácil será a solução nas etapas subsequentes do projeto.

A essa temática, associa-se ausência de uma supervisão eficaz da obra por um engenheiro civil qualificado e habilitado, por vezes associada à prática de excessiva economia das construtoras durante a execução da obra civil. Ainda, têm-se casos de empresas que acabam contratando mão de obra sem o devido conhecimento técnico

ou mesmo opção por materiais de qualidade duvidosa. Esses fatores elevam consideravelmente o risco de surgir anomalias em uma dada edificação.

É fundamental que as construtoras projetem e executem suas obras com o máximo de atenção às normas técnicas, realizando o controle tecnológico de qualidade em todas as fases do processo de construção. Devem ainda, adotar precauções necessárias para assegurar que as estruturas sejam resilientes aos desafios específicos dos ambientes em que estão inseridas, seja em áreas com atmosfera marítima ou em regiões urbanas. Além disso, o usuário deve se atentar a essas características ambientais e implementar adequadamente as recomendações de manutenções preditivas, preventivas e corretivas a uma dada edificação.

A manutenção e o cuidado adequado das edificações são essenciais para evitar prejuízos materiais, colapsos e mesmo a perda de vidas. Negligenciar esses aspectos pode levar à intervenção do Poder Judiciário, em que pessoas buscam proteger seus direitos e obter compensações. Nesse contexto, o perito do juiz, um engenheiro imparcial, investiga as anomalias construtivas e elabora um laudo técnico pericial detalhado, determinante para subsidiar o magistrado em sua decisão. Esse ciclo processual enfatiza a atuação do perito judicial no sistema judiciário brasileiro e assim questões complexas de engenharia são abordadas com maior precisão e fundamentadas em evidências técnicas, em prol da busca incessante pela verdade e justiça.

A perícia judicial de engenharia para a magistratura marca um avanço notável no campo da engenharia no contexto judicial. Assim, os procedimentos técnicos são sistematizados e padronizados, com ganho na eficiência da coleta de evidências, análise de anomalias construtivas e elaboração de laudos periciais consistentes.

O enfoque técnico fornecido pelo laudo de engenharia fortalece as decisões judiciais com a base sólida de evidências e análises técnicas. Esta prática promove a segurança jurídica, uma vez que as decisões dos magistrados são respaldadas por uma prática que busca oferecer um laudo o mais completo possível, imparcial e assertivo. Em decorrência, verifica-se também ganho de confiança na engenharia uma vez que os problemas construtivos são avaliados com rigor técnico, parâmetro que coopera para a manutenção da credibilidade do sistema judiciário nacional, fundamental para o equilíbrio da sociedade civil.

7 Agradecimento

Registramos o agradecimento à professora Edna Baptista dos Santos Gubitoso, veterana bibliotecária do IPT, pela dedicação e generosidade em compartilhar o seu tempo e profissionalismo na revisão deste artigo.

8 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13752**: Perícias de engenharia na construção - Procedimento civil. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2024** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BORBA JÚNIOR., J. C. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha**: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

BRASIL. Lei nº 13105, de 16 de março de 2015. Novo Código do Processo Civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 mar. 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13105.htm. Acesso em: 10 jul. 2023.

BRASIL. Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966. Regula o exercício das profissões de Engenheiro, Arquiteto e Engenheiro-Agrônomo. **Diário Oficial da União**, Brasília, 27 dez. 1966. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5194.htm. Acesso em: 25 jul. 2023.

FONSECA, J.; OLIVEIRA, A.; CAVALCANTI, M.; SILVA, D. Investigação das Manifestações Patológicas de uma residência zoneada na região metropolitana do Recife. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL, 1., 2016, Recife. **Anais [...]**. Recife: Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, 2016.

MAIA NETO, F. **A Prova Pericial na orientação de processos judiciais**. Curitiba: CREA-PR, 2019. 24 p. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2019/10/01-Francisco-Maia-Neto-A-Prova-Pericial-na-orienta%C3%A7%C3%A3o-de-processos-j....pdf>. Acesso em: 7 abr. 2023.

MEDEIROS, J. R.; FIKER, J. A **Perícia Judicial**: como redigir laudos e argumentar dialeticamente. São Paulo: Leud, 2013.

OLIVEIRA, G. N.; SOUSA, F. B.; MORAES, G. C. **Efeitos Causados no Planejamento e Controle de Obras Pela Ausência de Contratação de um Profissional Técnico e Qualificado**. 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/efeitos-causados-no-planejamento-e-controle-de-obras-pela-ausencia-de-contratacao-de-um-profissional-tecnico-e-qualificado-%c2%b9/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

OLIVEIRA, R. F. **Engenharia legal**: interface direito - engenharia conceitos, procedimentos, atribuições e competências do profissional de engenharia legal. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SANTOS, R. A. Perito Judicial na 4ª Vara Cível do Foro de Itapeçerica da Serra. **Produção Antecipada de Provas** – Provas. Itapeçerica da Serra: 4ª Vara Cível do Foro, 2021.

SANTOS, R. A. **Protocolo de perícia judicial técnica para magistratura civil**: aplicação em estudos de caso de obras com patologias em edifício multipavimentos em concreto e em edificação pública municipal. 2024. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de em Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2024.

SOARES, A. C. K. M.; MAGRI, P. P. **Perícias judiciais de engenharia e arquitetura**. São Paulo: BAPE/SP, 2022. 56 p. Disponível em: <https://www.ibape-sp.org.br/adm/upload/uploads/1682014593-CARTILHA%20-%20Pericias%20Judiciais%20de%20Engenharia%20e%20Arquitetura%20-%202022.pdf>. Acesso em: 25 set. 2023.

SOUZA, L.; SILVA, D.; FONSECA, J., SILVA, D.; MONTEIRO, E. **Levantamento de manifestações patológicas das edificações de uma instituição de ensino superior da região metropolitana do Recife/PE**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 12., 2016, Porto, Portugal. Atas [...]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

VITÓRIO, A. **Fundamentos da patologia das estruturas nas perícias de engenharia**. Recife: IBAPE-PE, 2003. 58p.

10.29327/2152495.9.28-4



Para obter mais informações
sobre os mestrados profissionais

Entre em contato com Adilson ou Mary pelo e-mail
mestrado@ipt.br
ou ligue para (11) 3767.4673

Sobre os cursos de especialização,
curta duração e educação corporativa


Entre em contato com Andrea pelo e-mail
cursos@ipt.br
ou ligue para (11) 3767-4226

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - São Paulo - SP
CEP 05508-901 - Brasil


Central de Relacionamento com o Cliente
(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

Ensino Tecnológico
(11) 3767-4673 | mestrado@ipt.br

 <https://www.instagram.com/iptensinotecnologico/>

 <https://bit.ly/FacebookEnsinoTecnologicoIPT>

 <https://bit.ly/LinkedinEnsinoTecnologicoIPT>

 <https://www.youtube.com/@cursosipt>



sapiens.ipt.br

revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Confira em nosso site todas as edições da revista

<https://bit.ly/revistaIPT>



ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS
ENSINO TECNOLÓGICO

