

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XIX



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

19^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

19ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2025

167 f.: il

DOI: 10.37423/2025.edcl1146

ISBN: 978-65-5367-671-8

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2025.edcl1146>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

CAPÍTULO 1	6
O PAPEL DO PROJETISTA DE ESTRUTURAS NO ATENDIMENTO À NORMA DE DESEMPENHO – NBR 15575	
Jucélia Kuchla Vieira	
Humberto Ramos Roman	
Edinei da Rocha Landin Junior	
Giovanna de Souza Miotti	
Milena Gomes de Carvalho	
Yasmin Louise Cruz do Amaral	
DOI 10.37423/250710171	
CAPÍTULO 2	24
O PAPEL DO PROJETISTA DE INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS NO ATENDIMENTO À NORMA DE DESEMPENHO – NBR 15575	
Jucélia Kuchla Vieira	
Humberto Ramos Roman	
Edinei da Rocha Landin Junior	
Giovanna de Souza Miotti	
Milena Gomes de Carvalho	
Yasmin Louise Cruz do Amaral	
DOI 10.37423/250710197	
CAPÍTULO 3	46
ANÁLISE DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS EM ESCOLA PÚBLICA DE MONTES CLAROS-MG: CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	
Everton Felipe Gonçalves Silva	
Sheila Cristina Martins Pereira	
DOI 10.37423/250810242	
CAPÍTULO 4	70
PATOLOGIAS EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE FACHADAS: MEDIDAS PREVENTIVAS	
Ellana Cássia Araújo Dantas de Almeida	
DOI 10.37423/250810252	
CAPÍTULO 5	107
INTEGRATED VALORIZATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: ACID-CATALYZED HYDROLYSIS TO SOLUBLE CARBOHYDRATES FOLLOWED BY RU/C-CATALYZED HYDROGENATION	
JORNANDES DIAS DA SILVA	
Cláudio César Barros de Oliveira	
DOI 10.37423/250810253	

CAPÍTULO 6 120

A SYSTEMATIC EXPERIMENTAL STUDY ON PHYSICAL PARAMETER OPTIMIZATION IN A
THREE-PHASE PACKED BED REACTOR

JORNANDES DIAS DA SILVA

Sérgio Mário Lins Galdino

DOI 10.37423/250810254

CAPÍTULO 7 137

COMPREHENSIVE MODELING AND SIMULATION OF TOLUENE STEAM REFORMING
KINETICS AND HEAT TRANSFER IN SOLAR-POWERED REFORMERS

JORNANDES DIAS DA SILVA

Sérgio Mário Lins Galdino

DOI 10.37423/250810255

CAPÍTULO 8 150

INVESTIGATION OF THE HYDROGEN STORAGE PROCESS VIA ADSORPTION USING A ZSM-
5 CATALYST IN A FIXED BED REACTOR

JORNANDES DIAS DA SILVA

Emanoel Soares Cândido Silva

DOI 10.37423/250810256

Capítulo 1



10.37423/250710171

O PAPEL DO PROJETISTA DE ESTRUTURAS NO ATENDIMENTO À NORMA DE DESEMPENHO – NBR 15575

Jucélia Kuchla Vieira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Humberto Ramos Roman

Universidade Federal de Santa Catarina

Edinei da Rocha Landin Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Giovanna de Souza Miotti

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Milena Gomes de Carvalho

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Yasmin Louise Cruz do Amaral

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Resumo: Em vigor desde 2013, a Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais (ABNT NBR 15575) estabeleceu um novo paradigma na construção civil brasileira ao definir níveis mínimos de desempenho que as edificações devem atender ao longo de sua vida útil. Essas exigências se aplicam independentemente do sistema construtivo, número de pavimentos ou materiais utilizados, impactando diretamente como os projetos são elaborados. No caso específico do projeto estrutural, a norma amplia o papel do engenheiro projetista, exigindo uma abordagem além da segurança estrutural, incluindo aspectos como durabilidade e manutenibilidade. Este artigo visa analisar o papel do projetista de estruturas no atendimento à NBR 15575, por meio de uma pesquisa de campo e análise quali-quantitativa realizada com três construtoras e mais de 50 profissionais da área. Por meio desta análise, identificou-se que dos 173 critérios previstos na norma, 39 apresentam relação direta com o projeto estrutural. Entre os principais pontos observados estão a necessidade de projetos executivos com maior grau de detalhamento, a compatibilização entre projetos e o conhecimento aprofundado das normas técnicas associadas. Portanto, a qualidade do projeto estrutural é fator determinante para o atendimento integral aos requisitos da norma, reforçando a importância da capacidade técnica contínua do profissional projetista.

Palavras-chave: Norma de Desempenho; desempenho de edificações; NBR 15575; projeto estrutural.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor da construção civil tem enfrentado crescentes demandas pela necessidade de elevar o desempenho de suas edificações e seus sistemas, impulsionadas pela busca de seus clientes por edificações de alta qualidade. Segundo Borges (2013), uma edificação pode ter um desempenho considerado satisfatório quando atende as necessidades humanas de seus usuários.

Borges e Sabbatini (2008) afirmam ser um desafio considerável traduzir as necessidades dos usuários das edificações brasileiras em requisitos e critérios, para que possam ser mensurados de maneira objetiva, dentro de condições de exposição e uso determinadas, de forma que seja viável técnica e economicamente dentro das variáveis sociais e regionais de um país, já que as exigências dos usuários são mutáveis, crescentes e subjetivas.

Entretanto, esta sistematização é justamente o que propõe a Associação Brasileira de Normas Técnicas na NBR 15575. Esta norma, intitulada “Edificações Habitacionais – Desempenho”, estabelece parâmetros técnicos de qualidade a fim de assegurar durabilidade e garantia às edificações habitacionais brasileiras. Em sua estrutura a Norma de Desempenho se divide em 6 partes, cada uma delas apresentando os requisitos e seus respectivos critérios para atingir o desempenho necessário para cada sistema construtivo que compõe uma edificação:

- Parte 1 – Requisitos gerais (ABNT, 2024).
- Parte 2 – Requisitos para os sistemas estruturais (ABNT, 2013).
- Parte 3 – Requisitos para os sistemas de pisos (ABNT, 2021a).
- Parte 4 – Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas (ABNT, 2021b).
- Parte 5 – Requisitos para os sistemas de coberturas (ABNT, 2021c).
- Parte 6 – Requisitos para os sistemas hidrossanitários (ABNT, 2021d).

Um avanço trazido com a Norma de desempenho, foi definir as obrigações e responsabilidades de todos os agentes envolvidos na cadeia da construção civil, esclarecendo os deveres de construtores, incorporadores e empreendedores quanto ao cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho das edificações, e reconhecer o usuário final como parte ativa do processo, com direitos e deveres, sendo responsável pela realização das manutenções necessárias para assegurar a vida útil da edificação (ABNT, 2013).

Após sua publicação no ano de 2013, a Norma de Desempenho impôs a necessidade dos projetistas considerarem todos os aspectos apresentados em cada uma das 6 partes que compõe a norma,

demandando uma revisão nos processos de projeto (Hippert; 2020). Isto exigiu uma abordagem mais colaborativa entre estes profissionais, pois essa integração multidisciplinar se tornou essencial para o atingir o nível de desempenho desejado, mas também representou um desafio, demandando maior coordenação e comunicação entre os profissionais (Cotta; Andery, 2017).

A partir das exigências impostas pela norma, houve um impulso para a inovação no setor, com o desenvolvimento de novas soluções construtivas e a adoção de tecnologias para otimizar o processo de projeto (Rubim *et al.*, 2019). Verificou-se também uma influência no mercado imobiliário brasileiro, a partir do momento em que os consumidores passaram a valorizar mais as edificações que atendem plenamente à norma, já que são vistas como mais seguras e duráveis, o que aumentou a competitividade entre as incorporadoras (Repsold; Falcão; 2017).

Entretanto, apesar da Norma de Desempenho representar um recurso essencial na busca por padrões mais elevados de qualidade na construção civil, o que se observa, é uma resistência ao acatamento dos requisitos impostos pela mesma (Santos; Hippert, 2016). Em um estudo realizado por Miranda (2018) que avaliou o nível de conhecimento sobre a norma entre os profissionais de 16 empresas de arquitetura de uma mesma cidade, foi possível concluir através das entrevistas a necessidade de um aprofundamento técnico dos mesmos, cerca de 93,75% dos 42 profissionais entrevistados revelaram não ter conhecimento sobre o conteúdo da mesma e demonstraram a falta de hábito de consultar as Normas Técnicas da ABNT. Segundo Polito (2015), entender as demandas técnicas é fundamental para evitar a criação de projetos irregulares.

Além disso, sabe-se que o não atendimento da norma e os prováveis erros de execução, podem levar a empresa e/ou profissional responsável a uma posição vulnerável legalmente perante os do empreendimento. Tendo conhecimento de seus direitos e lançando mão de ensaios e análises específicas para atestar o nível de desempenho, estes usuários poderão cobrar seus direitos judicialmente a fim de recompensar possíveis prejuízos, por danos morais e até mesmo propaganda enganosa (Souza *et al.*, 2018; Gonçalves *et al.*, 2023).

Conhecendo estas demandas, através de sua experiência em consultorias para implementação da Norma de Desempenho em empresas do setor da construção civil, Gealh (2018) realizou um estudo dos requisitos e critérios da NBR 15575. Desse trabalho, resultou uma tabela detalhada que define as responsabilidades de cada profissional da construção, por setor ou projeto, no cumprimento dos critérios apresentados em toda norma. A eficácia dessa tabela foi comprovada por meio de sua aplicação prática em três construtoras e por discussões com mais de cinquenta especialistas em engenharia e arquitetura.

A análise desse material revelou a importância crucial do projetista de estruturas para atender às exigências da NBR 15575. Diante disso, o presente estudo visa apresentar sistematicamente as principais alterações nos projetos estruturais e os critérios mais relevantes para esse profissional, visando a correta implementação da Norma de Desempenho.

O PROJETO ESTRUTURAL E A NORMA DE DESEMPENHO

Os requisitos são conceituados como condições que expressam qualitativamente os atributos que o edifício habitacional e seus sistemas devem possuir a fim de que possam satisfazer as exigências dos usuários. Já os critérios como especificações quantitativas dos requisitos de desempenho expressos em termos de quantidades mensuráveis, a fim de que possam ser objetivamente determinados (Borges, 2008).

Considerando isso, o projetista estrutural deve estar atento a cada uma das 6 partes que compõe a Norma de Desempenho, porém sua atuação é sobretudo relevante na Parte 2 – Requisitos para os sistemas estruturais. Pois esta enfatiza as diretrizes para o Projeto Estrutural, fundamentando-se a partir de outras Normas de caráter prescritivas que se referem a estrutura das edificações, para estabelecer os critérios máximos e mínimos, por exemplo, a NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto, NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, entre outras (Carvalho, 2022). No contexto do projeto estrutural, um dos principais objetivos é garantir a segurança na utilização dos sistemas e instalações, exigindo que todos os elementos estruturais apresentem resistência adequada às ações previstas, como cargas permanentes, variáveis e acidentais. A estrutura deve atender tanto aos estados-limites últimos, que evitam o colapso, quanto aos estados-limites de serviço, que controlam deformações, fissuras e deslocamentos indesejados (ABNT, 2013).

A NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece que o sistema estrutural deve possuir uma vida útil de projeto (VUP) compatível com a proposta da edificação, sendo imprescindível a elaboração de um manual de uso, operação e manutenção, determinando a necessidade de serem previstas e realizadas manutenções preventivas e/ou de caráter corretivo, conforme a NBR 5674 – Manutenção de Edificações. A durabilidade da estrutura também deve ser garantida, considerando-se as condições de exposição e a resistência a agentes agressivos, impactos e solicitações mecânicas.

Abordando durabilidade do sistema estrutural, a NBR 15575 define que os projetos devem considerar as condições ambientais, os materiais usados e os métodos construtivos para assegurar a resistência ao longo do tempo, minimizando patologias como fissuras e corrosão de armaduras (ABNT, 2013). A depender destas condições, são exigidos concretos com maior resistência à compressão e cobrimentos

de armaduras mais robustos em regiões de alta agressividade ambiental. Tais exigências têm levado à revisão dos métodos de dosagem de concreto e seleção de materiais (Bolina *et al.*, 2019).

Com frequência a durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido debatida, com ênfase na necessidade de estratégias eficazes para diminuir os efeitos da degradação ao longo do tempo. Estudos indicam que a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, como a microssílica, pode melhorar significativamente a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos, reduzindo a vulnerabilidade à corrosão das armaduras. Essas soluções são exemplos de alternativas desenvolvidas para atender aos critérios estabelecidos pela NBR 15575 e garantir maior VUP (Bomfim *et al.*, 2020).

A VUP é definida como um valor teórico que deve ser especificado para cada sistema da edificação, não inferior aos valores mínimos estabelecidos na norma, sua definição é um fator determinante para a escolha dos materiais e para a viabilidade econômica das construções. A durabilidade dos sistemas deve ser compatível com a VUP, garantindo que a edificação atenda às funções para as quais foi projetada ao longo do tempo (ABNT, 2024).

O aumento da VUP exige adaptações nos projetos para atender aos requisitos de durabilidade e segurança. Estudos indicam que este aumento impacta diretamente no consumo de materiais, elevando tanto o volume de concreto quanto a quantidade de aço necessária. Esse acréscimo no consumo de materiais representa desafios tanto em assuntos de sustentabilidade quanto de custos de execução (Bolina *et al.*, 2019).

Para garantir a vida útil da edificação são necessárias as realizações corretas das manutenções, portanto o projetista de estruturas deve fazer recomendações em seu memorial descritivo sobre a manutenção, uso e operação do sistema para constar no Manual de Uso, Operação e Manutenção da unidade e das áreas comuns do edifício (ABNT, 2013)

Assim como todos os outros projetos, o projeto de estruturas deve garantir a segurança dos usuários na utilização dos sistemas e das instalações, para isso precisa atender todas as normas específicas e deve apresentar recomendações em seu memorial descritivo, a fim de evitar a ocorrência de ferimentos ou danos aos usuários, em condições normais de uso (ABNT, 2024). Nas áreas acessíveis das coberturas, deve-se considerar a possibilidade de circulação de pessoas, o que exige resistência a impactos e cargas estáticas, elementos como guarda-corpos e platibandas devem ser dimensionados para resistir a ações horizontais e verticais (ABNT, 2021c).

Em relação a resistência ao fogo, a Norma de desempenho exige que os elementos estruturais atendam a NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações.

Devem ser previstos componentes capazes de resistir à propagação de chamas e manter a estabilidade da edificação em situações de incêndio, minimizando o risco de colapso estrutural da edificação em situação de incêndio (ABNT, 2024, ABNT, 2021b). O projetista deve prever a camada estrutural do sistema de pisos atendendo às classificações apresentadas pela NBR 15575-3 e atendendo às normas específicas para cada tipo de projeto, como as NBR 5628 – Componentes construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo, NBR 14323 – Projetos estruturais de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio e NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (ABNT, 2021a). O projeto estrutural deve calcular corretamente o local para a reserva de água para combate a incêndio conforme estabelecido em projeto arquitetônico, seguindo a legislação vigente e apresentado na NBR 15575, parte 6 (ABNT, 2021d).

Considerando-se a ação dos ventos, em sistemas de vedações verticais externas (paredes de fachadas), para sistemas de alvenaria estrutural devem ser previstos em projeto e memorial descritivo recomendações quanto aos cuidados e procedimentos para a estanqueidade à água das chuvas. Devem ainda ser previstos cuidados e procedimentos para a incidência de água proveniente do uso da edificação em ambiente de áreas molhadas para estes sistemas (ABNT, 2021b).

A NBR 15575 também prevê a viabilidade de ampliação de unidades habitacionais evolutivas, desde que a estrutura original tenha sido concebida para suportar essas alterações sem comprometer a segurança da edificação. Soma-se a isso a ênfase no uso consciente dos recursos naturais, promovendo a aplicação de materiais e sistemas construtivos com menor impacto ambiental, fundamentados na análise do ciclo de vida dos produtos (ABNT, 2024).

Dessa forma, os critérios estruturais estabelecidos pela NBR 15575 evidenciam a necessidade de um projeto estrutural integrado, que contemple a segurança imediata da construção, sua durabilidade, funcionalidade e sustentabilidade ao longo do tempo.

REQUISITOS E CRITÉRIOS RELACIONADOS AO PROJETO ESTRUTURAL

Por meio de uma análise dos 173 critérios apresentados pela Norma de Desempenho a fim determinar o papel do projetista estrutural, foi analisado que em 39 deles estes profissionais desempenham um papel crucial para o atendimento dos mesmos. Todos os 39 critérios são apresentados no Quadro 1 e seguidos de sugestões de como o profissional pode atendê-los.

Quadro 1 - Ações atribuídas ao projetista estrutural para o atendimento dos requisitos e critérios da NBR 15575.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
1	8.6	Segurança estrutural em situação de incêndio	8.6.1.1	Minimizar o risco de colapso estrutural	Desenvolver seus projetos atendendo às normas específicas, como por exemplo as tabelas 6 e 12 da NBR 15200.
	9.2	Segurança na utilização do imóvel	9.2.1	Segurança na utilização dos sistemas	Atender normas técnicas específicas. Apontar características dos materiais e cuidados quanto à segurança, em memorial descritivo.
	9.3	Segurança das instalações	9.3.1	Segurança na utilização das instalações	Atender todas as normas específicas e deve apresentar recomendações em seu memorial descritivo, a fim de evitar a ocorrência de ferimentos ou danos aos usuários, em condições normais de uso.
	14.2	Vida útil de projeto do edifício e dos sistemas que o compõem	14.2.1	Vida útil de projeto	Estimar em seu projeto e/ou memorial descritivo a vida útil conforme as normas específicas.
			14.2.3	Durabilidade	Estimar em seu memorial descritivo a durabilidade conforme as normas específicas. Atender premissas de projeto, item 14.2.5. NBR 15575-1.
	16.4	Possibilidade de ampliação da unidade habitacional	16.4.1	Ampliação de unidades habitacionais evolutivas	Apresentar projeto para a ampliação, caso seja necessário.
	18.3	Seleção e consumo de materiais*	18.3.1	Exploração e consumo racionalizado de recursos naturais	Descrever em memorial a preocupação em priorizar fornecedores locais e na racionalização de recursos naturais.
			18.3.5	Avaliação dos resultados de inventários de ciclo de vida dos produtos, junto aos fabricantes de materiais, componentes e equipamentos	Descrever em memorial o resultado de inventários de ciclo de vida dos produtos, verificadas junto aos fabricantes de materiais, componentes e equipamentos.

Part e	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
2	7.1	Requisitos gerais para a edificação habitacional			Garantir através de decisões de projeto que durante toda a vida útil de projeto (VUP) da edificação esta atenda aos requisitos gerais apresentados no item 7.1 da NBR 15575-2, sob as diversas condições de exposição. Atender as normas NBR 5629, NBR 6122, NBR 8681 e NBR 11682, relativas às interações com o solo e com o entorno da edificação. Atender as normas estruturais relacionadas ao sistema construtivo adotado. Fornecer informações relevantes a serem apresentadas no Manual de Uso, Operação e Manutenção
	7.2	Estabilidade e resistência do sistema estrutural e demais elementos com função estrutural	7.2.1	Estado-limite último	Atender às disposições aplicáveis das normas que abordam a estabilidade e segurança estrutural como as normas NBR 6118, NBR 6120, NBR 6122, NBR 6123, NBR 7190 (Partes 1 a 7), NBR 8681, NBR 8800, NBR 9062 e NBR 16868 (Partes 1 a 3).
	7.3	Deformações ou estados de fissura do sistema estrutural	7.3.1	Estados-limites de serviço	Atender às normas NBR 6118, NBR 6120, NBR 6122, NBR 6123, NBR 7190 (Partes 1 a 7), NBR 8681, NBR 8800, NBR 9062, NBR 14762 e NBR 16868 (Partes 1 a 3).

Part e	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
	7.4	Impactos de corpo mole e corpo duro	7.4.1	Critérios e níveis de desempenho para resistência de corpo mole	Atender aos níveis de desempenho apresentados nas tabelas D.1, D.2 e D.3 da NBR 15575-2 e à NBR 14718 para guarda-corpos.
			7.4.2	Critérios e níveis de desempenho para resistência de corpo duro	Atender aos níveis de desempenho apresentados nas tabelas D.4, D.5 e D.6 da NBR 15575-2 e à NBR 14718 para guarda-corpos.
	14.1	Durabilidade do sistema estrutural	14.1.1	Vida útil de projeto do sistema estrutural	Estimar em seu projeto e/ou memorial descritivo a vida útil conforme as normas específicas. Mencionar as normas aplicáveis às condições ambientais vigentes na época do projeto e a utilização prevista da edificação. Fornecer informações relevantes a serem apresentadas no Manual de Uso, Operação e Manutenção.
	14.2	Manutenção do sistema estrutural	14.2.1	Manual de uso, operação e manutenção do sistema estrutural	Fazer recomendações em seu memorial descritivo sobre a manutenção, uso e operação do sistema. O Manual de Uso, Operação e Manutenção deve apresentar orientações sobre as recomendações gerais para prevenção de falhas e acidentes decorrentes de utilização inadequada e periodicidade, forma de realização e forma de registro de

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
					inspeções e manutenções, de acordo com a NBR 5674 e a NBR 14037.
3	7.2	Estabilidade e resistência estrutural	7.2.1	Assegurar estabilidade e segurança estrutural**	Atender todas as normas específicas. Apresentar em seu memorial descritivo as premissas utilizadas como base de cálculo, incluindo ações de vento e condições de exposição do local, apresentando a justificativa dos fundamentos com base nas NBRs ou na sua ausência com base nos Eurocódigos ou ensaios.
	7.3	Limitação dos deslocamentos verticais	7.3.1	A camada estrutural do sistema de piso deve atender aos critérios da NBR 15575-2	Atender todas as normas específicas. Apresentar em seu memorial descritivo as premissas utilizadas como base de cálculo, incluindo ações de vento e condições de exposição do local, apresentando a justificativa dos fundamentos com base nas NBRs ou na sua ausência com base nos Eurocódigos ou ensaios.
	8.2	Dificultar a ocorrência da inflamação generalizada	8.2.1	Avaliação da reação ao fogo da face inferior do sistema de piso (camada estrutural)	Projetar a camada estrutural do sistema de pisos atendendo às classificações apresentadas pela NBR 15575-3. Atender às normas específicas como as NBR 5628, NBR 14323 e NBR 15200.
	8.3	Dificultar a propagação do incêndio, da fumaça e preservar a estabilidade estrutural da edificação	8.3.1	Resistência ao fogo de elementos de compartimentação entre pavimentos e elementos estruturais associados	Desenvolver seus projetos atendendo às normas específicas como as normas NBR 5628, NBR 14323 e NBR 15200.
4	7.1	Estabilidade e resistência estrutural dos sistemas de vedação internos	7.1.1	Estado-limite último	Projetar atendendo todas as normas específicas. Atender NBR 15575-2 e apresentar em seu memorial descritivo as premissas utilizadas como base de cálculo, incluindo ações de vento e condições de exposição do

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
					local. Indicar vida útil, conforme NBR 15575-1.
	7.2	Deslocamentos, fissuras e ocorrência de falhas nos sistemas de vedações verticais internas e externas	7.2.1	Limitação de deslocamentos, fissuras e descolamentos	Indicar em projeto o atendimento aos limites de deslocamentos instantâneos (dh) e residuais (dhr), indicados na tabela 1 da NBR 15575-4. Para SVVIE com função estrutural, atender Anexo B da NBR 15575-2. Atender todas as normas específicas. Apresentar em seu memorial descritivo as premissas utilizadas como base de cálculo.
	7.3	Solicitações de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos sistemas de vedações internas e externas	7.3.1	Capacidade de suporte para as peças suspensas	Estabelecer a capacidade de suporte para as peças suspensas para SVVIE com função estrutural, indicando as cargas de uso, os dispositivos de fixação e os locais permitidos de fixação. O profissional projeta atendendo todas as normas específicas. Atender NBR 15575-2 e apresentar em seu memorial descritivo as premissas utilizadas como base.
	7.4	Impacto de corpo mole nos sistemas de vedações verticais internas e externas, com ou sem função estrutural	7.4.1	Resistência a impactos de corpo mole	Projetar atendendo todas as normas específicas, para SVVIE com função estrutural. Especificar sistemas de vedação vertical que atendam as condições de impacto de corpo mole, conforme tabelas D.1 e D.2 da NBR 15575-2 e F.2 da NBR 15575-4.
4	7.4.3	Impacto de corpo mole nos sistemas de vedações verticais internas e externas, para casas térreas, com ou sem função estrutural	7.4.3	Resistência a impactos de corpo mole	Projetar atendendo todas as normas específicas, para SVVIE com função estrutural. Especificar sistemas de vedação vertical que atendam as condições de impacto de corpo mole, conforme tabelas F.2, F.3 e F.4 da NBR 15575-4.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
	7.5	Ações transmitidas por portas	7.5.1	Ações transmitidas por portas internas ou externas	Especificar, para SVVIE com função estrutural, sistemas de vedação vertical interno ou externo já ensaiados conforme indicado e/ou exigir ensaio prévio para liberação da execução. Se houver a necessidade da realização de ensaios, seguir diretrizes da NBR 15930-2.
	7.6	Impacto de corpo duro incidente nos SVVIE, com ou sem função estrutural	7.6.1	Resistência a impactos de corpo duro	Projetar atendendo todas as normas específicas, para SVVIE com função estrutural. Especificar sistemas de vedação vertical que atendam as condições de impacto de corpo mole, conforme tabelas F.5 e F.6 da NBR 15575-4.
	7.7	Cargas de ocupação incidentes em guarda-corpos e parapeitos de janelas	7.7.1	Ações estáticas horizontais, estáticas verticais e de impactos incidentes em guarda-corpos e parapeitos	Apresentar cálculo estrutural para casos de guarda-corpos ou parapeitos, quando for solicitado. Projetar atendendo todas as normas específicas
	8.4	Dificultar a propagação do incêndio e preservar a estabilidade estrutural da edificação	8.4.1	Resistência ao fogo de elementos estruturais e de compartimentação	Projetar as paredes estruturais com resistência ao fogo de acordo com normas específicas, como NBR 14432. Para edificações habitacionais de até 5 pavimentos o período mínimo de resistência é de 30 min.
	10.1	Infiltração de água nos sistemas de vedações verticais externas (fachadas)	10.1.1	Estanqueidade à água de chuva, considerando-se a ação dos ventos, em sistemas de vedações verticais externas (fachadas)	Projetar e detalhar os sistemas de paredes em caso de alvenaria estrutural quanto à estanqueidade. Apresentar recomendações para os demais projetistas.
	10.2	Umidade nas VVIE decorrente da	10.2.1	Estanqueidade de VVIE com incidência direta de água	Projetar e detalhar os sistemas de paredes em caso de alvenaria estrutural quanto à estanqueidade.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
		ocupação do imóvel		- Áreas molhadas	Apresentar recomendações para os demais projetistas.
5	7.1	Resistência e deformabilidade	7.1.1	Comportamento estático	Dimensionar estrutura que suportará o sistema de cobertura de acordo com as normas específicas.
5	7.2	Solicitações de montagem ou manutenção	7.2.2	Cargas concentradas em sistemas de cobertura acessíveis aos usuários	Dimensionar estrutura do sistema de cobertura acessível, de acordo com as normas específicas. Apresentar em seu memorial descritivo as premissas utilizadas como base de cálculo. Elaborar o cálculo dos deslocamentos e da resistência com base nas propriedades dos materiais. Observar os limites de ruptura apresentados no item 7.2.2.3 da NBR 15575-5.
	7.3	Solicitações dinâmicas em sistemas de coberturas e em coberturas-terraços acessíveis aos usuários	7.3.1	Impacto de corpo mole em sistemas de cobertura-terraço acessíveis aos usuários	Projetar o sistema de cobertura atendendo a tabela D.3 da NBR 15575-2. Apresentar memória de cálculo. Atender normas específicas.
			7.3.2	Impacto de corpo duro em sistemas de cobertura acessíveis aos usuários	Projetar o sistema de cobertura acessível atendendo a tabela D.6 e o item 7.3.2 da NBR 15575-2. Apresentar memória de cálculo. Atender normas específicas.
	7.4	Solicitações em forros	7.4.1	Peças fixadas em forros	Indicar em projeto a carga máxima a ser suportada pelo elemento ou componente de forro, caso este componha a estrutura da edificação. Informar a carga máxima de projeto em memorial descritivo para que esta informação possa ser colocada no Manual de Uso, Operação e Manutenção.
	9.2	Manutenção e operação	9.2.1	Guarda-corpos em coberturas acessíveis aos usuários	Projetar a estrutura do guarda-corpo de coberturas acessíveis de acordo com a NBR 14718 e normas específicas, caso seja necessário ou solicitado.
			9.2.2	Platibandas	Prever sustentação de andaimes suspensos ou balancins. Especificar o

Part e	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
					binário resistente máximo. Constar em projeto e memorial descritivo, dados que permitam ao incorporador e/ou construtor indicar no manual de uso, operação e manutenção, a possibilidade ou não de fixação de andaimes suspensos por ganchos e as condições de utilização de dispositivos. Apresentar memória de cálculo e esquema de utilização.
			9.2.4	Possibilidade de caminhamento de pessoas sobre o sistema de cobertura	Especificação de caminhamento em lajes de cobertura, quando for o caso.
6	8.1	Combate a incêndio com água	8.1.1	Reserva de água para combate a incêndio	Calcular e prever em projeto local para a reserva de água para combate à incêndio conforme estabelecido em projeto arquitetônico, seguindo a legislação vigente e as normas da ABNT.

Fonte: Adaptado de Gealh, 2018.

CONCLUSÃO

Este material busca esclarecer o papel do projetista estrutural no processo de atendimento à NBR 15575 – Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais. A função desse profissional pode variar conforme as características de cada obra, mas é essencial compreender sua responsabilidade no cumprimento das exigências da norma. Desta forma, este estudo também estimula um debate sobre essas atribuições, para que o projetista estrutural não fique à margem do processo ou acabe sendo responsabilizado futuramente por falhas que poderiam ser evitadas.

Mesmo que a definição de responsabilidades por critério facilite a aplicação da norma, o projetista estrutural ainda enfrenta desafios, como a falta de compatibilidade entre a NBR 15575 e outras normas técnicas e legislações específicas, além da existência de critérios vagos ou com múltiplas

interpretações. Há também lacunas normativas para alguns sistemas construtivos, o que obriga os profissionais a recorrerem a outras normas brasileiras, ou em alguns casos internacionais.

No caso do projeto estrutural, é fundamental lançar mão das normas prescritivas que regem esse sistema construtivo, como a NBR 6118 (para estruturas de concreto armado) e a NBR 8800 (para estruturas de aço e mistas), pois grande parte das exigências da NBR 15575, já são abordadas nas mesmas.

Com a entrada em vigor da Norma de Desempenho, a prática de elaborar apenas projetos básicos perdeu espaço. O que se exige atualmente é um projeto executivo completo e preciso, acompanhado de um memorial descritivo e, no caso do projeto estrutural, de um memorial de cálculo. Essa mudança elevou a qualidade dos projetos e incentivou uma maior integração entre os profissionais.

Um dos grandes entraves na aplicação da norma é a falta de reconhecimento, por parte de alguns profissionais, de suas responsabilidades. Muitos ignoram as consequências legais de um projeto mal elaborado, sem considerar que podem ser responsabilizados judicialmente ao lado da construtora ou incorporadora.

Vale lembrar que muitas das soluções exigidas pela NBR 15575 podem e devem ser adotadas ainda na fase de projeto. As decisões tomadas pelo engenheiro estrutural impactam diretamente o desempenho e a segurança da edificação. Por isso, sua atuação é determinante para garantir a conformidade com a norma e a qualidade do produto final.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-1 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-2 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: requisitos para os sistemas de estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-3 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 3: requisitos para os sistemas de piso. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-4 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-5 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 5: requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-6 - Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 6: requisitos para os sistemas hidrossanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.

BOLINA, F. L.; EHRENBRING, H.; COLLA, K. A. L.; CUNHA, F. S.; TUTIKIAN, B. Estudo de caso: influência dos níveis de desempenho da ABNT NBR 15575 no consumo de materiais utilizados em estruturas de concreto armado. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 965-971, 2019.

BOMFIM, D.S.; LIMA, M.P.; PESSÔA, J.R.C.; RIBEIRO, I.J.S.; RIBEIRO, Y.A.M. Análise da influência da substituição parcial de cimento por microssilica. In: BAUDUCON, 3., Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções, 2020, Salvador, Bahia. Anais [...]. Salvador: UFBA, 2020. p. 100-111.

BORGES, C. A importância da NBR 15575 para melhoria da qualidade das habitações brasileiras. AEC Web, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-1, 15 jul. 2013. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/artigos/a-importancia-da-nbr-15575-para-melhoria-da-qualidade-das-habitacoes-brasileiras/7296>. Acesso em: 25 fev. 2025.

BORGES, Carlos Alberto de Moraes e SABBATINI, Fernando Henrique. O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil. São Paulo: EPUSP. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-25092008-094741/pt-br.php>. Acesso em: 01 jul. 2025.

CARVALHO, N. M. D. Conformidade quanto ao desempenho estrutural: Avaliação do atendimento de prédios públicos à NBR 15575-2. 2022. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/63bb82b1-6439-40eb-8d80-82859577344a>. Acesso em: 13 jun. 2025.

COTTA, A. C.; ANDERY, P. R. P. As alterações no processo de projeto das empresas construtoras e incorporadoras devido à NBR 15575 – Norma de Desempenho. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 133-152, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100213>. Acesso em: 24 mar. 2025.

GEALH, J. K. V. Análise crítica da implantação da NBR 15575 em construtoras e incorporadoras. 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

GONÇALVES, G. B. F. R.; ALVES, M. R. S.; BRANDSTETTER, M. C. G. O; ULHÔA, C. G. Atendimento aos itens da norma de desempenho com foco nos segmentos dos incumbentes – um estudo de caso múltiplo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 13., 2023, Aracaju. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sibragec/article/view/3070/4249>. Acesso em: 17 maio 2025.

GONZÁLES, P. E. V.; MUNIZ, M. B. S.; REAL, M. V.; SARTORI, M. A. P.; SEGURA-CASTILLO, L. Análise experimental da durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com fibras sintéticas submetidas a ensaios de corrosão induzida. In: BAUDUCON, 3º Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções, 2020, Salvador, Bahia. Anais [...]. BAHIA: UFBA, 2020. p. 112-126.

HIPPERT, M. A. S. A norma brasileira de desempenho - ABNT NBR 15575:2013 e o desenvolvimento de projetos de edificações habitacionais. Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis, Petrópolis, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/1839/844>. Acesso em: 25 fev. 2025.

MIRANDA, S. S. A influência da NBR 15575 na prática da arquitetura na cidade de Pelotas, RS. 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/5192>. Acesso em: 24 mar. 2025.

POLITO; G. Gerenciamento de obras: boas práticas para a melhoria da qualidade e da produtividade. São Paulo: Pini, 2015.

REPSOLD, G. G.; FALCÃO, D. F. A NBR 15.575 e o projeto de arquitetura. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DA LARES, 17., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo, 2017. p. 1- 50. Disponível em: https://ideas.repec.org/p/lre/wpaper/lares_2017_paper_38.html. Acesso em: 11 mar. 2025.

RUBIM, D. F.; CARVALHO, A. R.; NUNES, V. D. L.; HIPPERT, M. A. S. A contribuição do BIM para atendimento à norma de desempenho - NBR 15575. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 11., 2019, Londrina. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2019. Disponível em: <https://www.antaceventos.net.br/index.php/sibragec/sibragec2019/paper/view/436>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SANTOS, F. M. A.; HIPPERT, M. A. S. NBR 15.575: desafios e adequações enfrentados pelas empresas de edificações frente à Norma de Desempenho. In: ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto, IV., 2016, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: UFSC, 2016. P. 927- 937. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/222476/ANAIS-ENSUS-COMPLETO%202016-927-937.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SOUZA, J. L. P.; KERN, A. P.; TUTIKIAN, B. F. Análise quantiquantitativa da norma de desempenho (NBR nº 15.575/2013) e principais desafios da implantação do nível superior em edificações residencial de multipavimentos. Gestão de Tecnologias de Projetos. São Carlos, v.13. n.1, p.127-144, 2018. Disponível em: <https://revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/133842/137878>. Acesso em: 17 maio.2025.

Capítulo 2



10.37423/250710197

O PAPEL DO PROJETISTA DE INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS NO ATENDIMENTO À NORMA DE DESEMPENHO – NBR 15575

Jucélia Kuchla Vieira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Humberto Ramos Roman

Universidade Federal de Santa Catarina

Edinei da Rocha Landin Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Giovanna de Souza Miotti

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Milena Gomes de Carvalho

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Yasmin Louise Cruz do Amaral

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Resumo: A publicação da ABNT NBR 15575 - Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais - estabeleceu novos parâmetros técnicos para os sistemas construtivos residenciais, exigindo das edificações um desempenho mínimo ao longo de sua vida útil. No caso dos sistemas hidrossanitários, as exigências ampliam o papel do projetista, que passa a ter responsabilidade direta sobre aspectos como durabilidade, estanqueidade, segurança no uso e na operação, salubridade e facilidade de manutenção. Este capítulo tem como objetivo analisar o papel do projetista hidrossanitário no atendimento à NBR 15575, a partir da sistematização dos critérios normativos e de estudos que evidenciam os principais entraves enfrentados na prática. A análise demonstrou que, dos 173 critérios previstos pela norma, 59 são diretamente relacionados ao projeto hidrossanitário, o que reforça a importância da atuação técnica e estratégica desse profissional. Entre os principais desafios identificados estão a escassez de informações técnicas por parte dos fornecedores, a presença de lacunas normativas, o envolvimento tardio dos projetistas nos empreendimentos e a baixa exigência por parte das construtoras quanto ao nível de detalhamento dos projetos. Assim, o atendimento aos critérios da NBR 15575 representa não apenas um requisito técnico, mas uma oportunidade de melhoria contínua na qualidade dos empreendimentos e na valorização da profissão de projetista hidrossanitário no cenário da construção civil brasileira.

Palavras-chave: projeto hidrossanitário; Norma de Desempenho; NBR 15575.

INTRODUÇÃO

Diante das transformações provocadas pela globalização e do consequente aumento da competitividade no setor da construção civil, tornou-se necessário estabelecer diretrizes que assegurem um padrão mínimo de desempenho para edificações residenciais, abrangendo desde a fase de viabilidade até a manutenção ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento (Batista *et al.*, 2019).

De acordo com Cota e Andery (2018), o mercado imobiliário brasileiro, particularmente no setor habitacional, passou por mudanças expressivas em razão do aumento da competitividade. Nesse cenário, a implementação da NBR 15575, conhecida como “Norma de Desempenho”, foi um marco que trouxe a expectativa de transformações significativas na construção civil.

Publicada inicialmente em 2008, a Norma tinha aplicação restrita a edifícios de até cinco pavimentos. No entanto, devido à resistência do setor e à necessidade de ajustes, passou por revisões e atualizações. Em sua versão de 2013, sua abrangência foi ampliada para todas as edificações habitacionais, consolidando diretrizes mais rigorosas de acordo com a norma (Cordovil, 2013).

A NBR 15575, intitulada “Edificações Habitacionais – Desempenho”, é composta por seis partes. A primeira parte apresenta requisitos gerais aplicáveis aos edifícios, enquanto as cinco partes restantes referem-se especificamente a cada sistema que compõem uma edificação, apresentando seus respectivos critérios para que cada sistema construtivo possa atingir da melhor forma o desempenho necessário. A norma está estruturada de forma a contemplar os diferentes sistemas da edificação, como estruturas, pisos, vedações, coberturas e instalações hidrossanitárias, sendo organizada por critérios de desempenho vinculados às funções que se espera da construção (ABNT, 2024).

Os requisitos e critérios definidos tomam como base as necessidades dos usuários e contemplam aspectos relacionados à segurança (como segurança estrutural, contra incêndios e no uso, operação e manutenção), habitabilidade (como conforto térmico, acústico, lumínico, funcionalidade, acessibilidade, saúde e higiene) e sustentabilidade, incluindo durabilidade, manutenção e impactos ambientais (Nunes *et al.*, 2021).

A Norma de Desempenho representa um avanço significativo para o setor da construção civil, consolidando informações de pesquisas previamente dispersas. Além de enfatizar a relevância da pesquisa para o desenvolvimento tecnológico, a norma reforça a importância de um projeto bem elaborado. Também estabelece direitos e obrigações para usuários, fornecedores de materiais,

construtores e incorporadores, contribuindo para a melhoria da qualidade das edificações. Além disso, define as incumbências de construtores, incorporadores, projetistas e usuários, e aborda aspectos relacionados ao conforto e à segurança na utilização das edificações (Cordovil, 2013).

A complexidade na aplicação da Norma de Desempenho decorre de seu escopo abrangente e da necessidade de alinhamento com outras normas técnicas. Por adotar uma abordagem baseada no desempenho, diferente da tradicional prescritiva, torna-se essencial considerar a interdependência entre os critérios, que variam conforme a função e os sistemas da edificação. Além disso, o desempenho dos sistemas está diretamente vinculado às características dos materiais, às técnicas construtivas adotadas e à qualificação da mão de obra responsável pela execução (Souza; Kern; Tutikian, 2017).

Os projetistas frequentemente enfrentam dificuldades devido à recente implementação das exigências normativas, uma vez que o mercado ainda está se adaptando ao novo contexto. Há também dificuldade em obter dados técnicos sobre os produtos utilizados, tornando a especificação dos materiais um desafio, que causa um impacto direto no desempenho das edificações (Lima; Andery; Veiga, 2016).

De acordo com a NBR 15575-1, a responsabilidade de caracterizar o desempenho dos produtos utilizados na construção cabe aos fornecedores. Caso não existam normas brasileiras específicas ou os produtos ainda não tenham seu desempenho caracterizado, os fabricantes devem apresentar resultados que comprovem a adequação dos produtos com base na norma vigente ou em normas internacionais equivalentes (ABNT, 2024.)

O PROJETO HIDROSSANITÁRIO E A NORMA DE DESEMPENHO

Segundo Cruz *et al.*, (2018), a elaboração de projetos de engenharia é de grande complexidade, pois exige dos profissionais atenção à construtibilidade, às normas técnicas e às legislações vigentes. Além disso, fatores como o surgimento de novos materiais, a evolução dos sistemas construtivos e as constantes mudanças nas normatizações contribuem para ampliar essa complexidade, tornando necessária a atualização contínua tanto por parte dos profissionais quanto das instituições de ensino e pesquisa, que precisam adaptar seus projetos às novas demandas do setor.

O projeto de sistemas hidrossanitários influencia todos os pavimentos de uma edificação. Com o aumento significativo da competitividade e a crescente exigência dos consumidores em relação ao

desempenho e qualidade, fica cada vez mais evidente a importância do planejamento desses sistemas (Batista *et al.*, 2019)

Lima, Andery e Veiga (2016), afirmam que o processo de projeto de sistemas hidrossanitários apresenta deficiências devido ao envolvimento tardio dos projetistas na concepção. Diante dos desafios enfrentados na implementação da NBR 15575 nos projetos hidrossanitários, observa-se que sua adaptação ainda está em andamento. “Apesar da norma de desempenho estar em vigor desde 2013, para as empresas de projetos o cumprimento de seus requisitos ainda é um desafio” (Cotta; Andery, 2018).

Cruz *et al.* (2018) observam que a abordagem sobre a elaboração de projetos hidrossanitários, especialmente considerando a perspectiva da norma de desempenho, ainda é limitada, indicando que se trata de uma área com grande potencial para o desenvolvimento de pesquisas.

A NBR 15575-6 estabelece requisitos e critérios de desempenho para os sistemas hidrossanitários em edificações habitacionais, enfatizando a necessidade de que esses sistemas mantenham sua capacidade funcional ao longo do tempo, desde que submetidos a manutenções adequadas. Diferente da abordagem tradicional prescritiva, centrada em especificações rígidas de materiais e métodos, a norma adota uma perspectiva baseada em desempenho, permitindo maior flexibilidade na escolha de soluções técnicas, desde que os resultados atendam aos parâmetros estabelecidos. Essa mudança de paradigma impõe novos desafios à concepção dos projetos hidrossanitários, que passam a incorporar critérios como durabilidade, manutenibilidade e eficiência no uso da água (ABNT, 2021c).

Além de ser tratado em uma parte específica para sistemas hidrossanitários (Parte 6) na NBR 15575, o projeto hidrossanitário também é aplicado a critérios encontrados em outras partes da norma, pois este projeto está ligado à edificação de forma geral e a outros sistemas que a compõem. Na parte 1, este projeto está ligado a critérios de segurança na utilização dos sistemas e das instalações, de estanqueidade a fontes de umidade externas à edificação, de estabelecimento de vida útil de projeto para os sistemas hidrossanitários, de possibilidade de ampliação da unidade habitacional, de adequação ergonômica, de seleção e consumo adequado de materiais e de utilização e reuso da água na edificação (ABNT, 2024).

Na parte 3 da NBR 15575, o projeto hidrossanitário está ligado às especificações quanto a selagem corta-fogo nas prumadas elétricas e hidráulicas e nas tubulações de materiais poliméricos, por meio de especificações em projeto e memorial descritivo. Além disso, é necessário projetar tubulações de

ventilação dotadas de registro corta-fogo e especificar as prumadas totalmente enclausuradas quanto a necessidade de selagens (ABNT, 2021a).

Em relação ao sistema de coberturas, o projeto hidrossanitário precisa apresentar especificações quanto aos cálculos e detalhamentos das calhas e projetar o sistema de escoamento de águas pluviais com capacidade adequada. O projetista deve atender a NBR 10844 – Instalações prediais de água pluviais – Procedimento, orientando as atividades de manutenção, instalação e desinstalação de equipamentos e dispositivos em seu memorial descritivo (ABNT, 2021b).

Diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de avaliar a aplicação da NBR 15575-6 em projetos hidrossanitários e identificar os principais entraves enfrentados pelos profissionais do setor. Um desses trabalhos, conduzido na cidade de Porto Alegre, analisou o nível de conformidade à norma por parte de construtoras e projetistas. Os resultados indicaram que, enquanto as construtoras apresentaram baixo percentual de adequação, os projetistas demonstraram maior alinhamento com as exigências normativas. O estudo também revelou que apenas 10% dos fabricantes e fornecedores disponibilizam dados técnicos precisos sobre a durabilidade dos produtos, o que dificulta a correta especificação dos materiais durante o desenvolvimento dos projetos (Bottega; Pilz; Costella, 2022).

O atendimento à NBR 15575 ainda é escasso devido ao pouco conhecimento aprofundado da norma por parte dos projetistas e da direção da construtora. Para melhorar esse cenário, é essencial um maior envolvimento de engenheiros, arquitetos e gestores, buscando um conhecimento mais detalhado da norma. Além disso, é necessário que as construtoras exijam dos projetistas maior detalhamento nos projetos, incluindo a especificação adequada de materiais desde as etapas iniciais, bem como a citação das referências normativas como parte fundamental do processo (Alves; Lima; Bertini, 2019).

Ainda que os desafios sejam expressivos, é inegável que o cumprimento dos critérios de desempenho previstos na norma favorece diretamente a elevação da qualidade das construções, tornando-as mais eficientes, duráveis e alinhadas às necessidades dos usuários finais, o que gera benefícios concretos para o setor habitacional (Viana *et al.*, 2018).

O cumprimento da NBR 15575 por todos os agentes envolvidos no processo construtivo pode gerar benefícios significativos para o setor da construção civil e para a sociedade como um todo. Além de contribuir para a preservação ambiental e para o atendimento às demandas dos usuários, a aplicação do conceito de desempenho representa uma oportunidade estratégica para a melhoria da qualidade das habitações no país e para a racionalização dos investimentos públicos, uma vez que promove uma

perspectiva de longo prazo na concepção e execução dos empreendimentos (Kern; Silva; Kazmierczak, 2014).

REQUISITOS E CRITÉRIOS RELACIONADOS AO PROJETO HIDROSSANITÁRIO.

Este conteúdo apresenta uma compilação do estudo de Gealh (2018), onde foi analisada a implementação do atendimento à NBR 15575 em casos reais de 3 construtoras e produzida uma planilha de requisitos e critérios relacionados a cada projetista, com uma discussão realizada com o auxílio de cerca de 50 profissionais. A partir da análise dos 173 critérios estabelecidos pela Norma de Desempenho, foi possível identificar que o projetista hidrossanitário desempenha um papel fundamental no atendimento de 59 deles. Esses critérios estão sistematizados no Quadro 1, acompanhados de propostas que orientam a atuação do profissional no sentido de garantir sua conformidade com as exigências normativas. Além de estabelecer cada critério diretamente ligado ao projeto hidrossanitário, a análise sugere como este profissional pode proceder para alcançar este atendimento.

Nesta análise foi considerado que, além do projetista de instalações hidrossanitárias, existem pelo menos os projetistas de arquitetura, estruturas, instalações elétricas, instalações de gás, prevenção contra pânico e incêndio, impermeabilização e coberturas atuando no empreendimento. Caso não haja projetista de cobertura e impermeabilização essa função pode ser atribuída ao projetista de arquitetura.

Quadro 1 - Ações atribuídas ao projetista de instalações hidrossanitárias para o atendimento dos requisitos e critérios da NBR 15575.

Parte	Item	Requisitos	Item	Críticos	Atendimento
1	9.2	Segurança na utilização do imóvel	9.2.1	Segurança na utilização dos sistemas	Atender normas técnicas específicas. Apontar características dos materiais e cuidados quanto à segurança, em memorial descritivo.
	9.3	Segurança das instalações	9.3.1	Segurança na utilização das instalações	Atender às normas e à legislação vigente. Apresentar os cuidados necessários a utilização em memorial descritivo.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
1	10.2	Estanqueidade a fontes de umidade externas à edificação	10.2.1	Estanqueidade à água de chuva e à umidade do solo e do lençol freático	Atender à NBR 10844 quanto à capacidade do sistema de captação e drenagem de águas pluviais.
	14.2	Vida útil de projeto do edifício e dos sistemas que o compõem	14.2.1	Vida útil de projeto	Estimar em seu projeto e/ou memorial descritivo a vida útil de acordo com as normas específicas.
			14.2.3	Durabilidade	Estimar em seu memorial descritivo a durabilidade de acordo com as normas específicas. Atender premissas de projeto, item 14.2.5. NBR 15575-1.
	16.4	Possibilidade de ampliação da unidade habitacional	16.4.1	Ampliação de unidades habitacionais evolutivas	Elaborar projeto hidrossanitário para ampliação prevista, quando for o caso.
	17.2	Conforto tátil e adaptação ergonômica	17.2.1	Adequação ergonômica de dispositivos de manobra	Recomendar a escolha dos materiais de acabamento, de acordo com NBR 15575-6. Obs: Recomendação de uso de todos os dispositivos de manobra em todos os projetos relacionados.
	18.3	Seleção e consumo de materiais*	18.3.1	Exploração e consumo racionalizado de recursos naturais**	Descrever em memorial a preocupação em priorizar fornecedores locais e na racionalização de recursos naturais.
	18.3	Seleção e consumo de materiais*	18.3.5	Avaliação dos resultados de inventários de ciclo de vida dos produtos, junto aos fabricantes de materiais, componentes e equipamentos**	Descrever em memorial o resultado de inventários de ciclo de vida dos produtos, verificadas junto aos fabricantes de materiais, componentes e equipamentos.

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
	18.4.1	Utilização e reuso de água	18.4.2	Atender parâmetros estabelecidos para reuso de água para destinação não potável**	Especificar em projeto e memorial descritivo a destinação das águas servidas e se haverá adoção de reuso da água, atendendo os parâmetros apresentados na tabela 8 da NBR 15575-1. Solicitar ensaios quando for necessário.
* Texto de requisito adotado por Gealh (2018) e não estabelecido claramente no texto da NBR 15575-1.					
**Texto de critério adotado por Gealh (2018) e não estabelecido claramente no texto da NBR 15575-1.					
3	8.3	Dificultar a propagação do incêndio, da fumaça e preservar a estabilidade estrutural da edificação	8.3.3	Selagem corta-fogo nas prumadas elétricas e hidráulicas	Especificar em projeto e memorial descritivo os pontos onde serão necessários o uso de selagem corta-fogo.
			8.3.5	Selagem corta-fogo de tubulações de materiais poliméricos	Especificar em projeto e memorial descritivo os pontos entre pisos onde passam tubulações com diâmetro superior a 40 mm e especificar o uso de selagem corta-fogo.
			8.3.7	Registros corta-fogo nas tubulações de ventilação	Projetar tubulações de ventilação dotadas de registro corta-fogo.
			8.3.9	Prumadas enclausuradas	Verificar se as tubulações dispensam selagem corta-fogo por estarem passando por prumadas totalmente enclausuradas.
5	8.2	Reação ao fogo dos materiais de revestimento e acabamento	8.2.1	Avaliação da reação ao fogo da face interna do sistema de cobertura das edificações	Especificar adequadamente em relação à classificação de reação ao fogo os materiais incorporados ao sistema de cobertura.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
5	10	Condições de salubridade no ambiente habitável	10.2	Estanqueidade do SC	Apresentar detalhamento e cálculo de calhas, caso seja sua atribuição de projeto.
			10.4	Captação e escoamento de água pluviais	Projetar o sistema de escoamento das águas pluviais com capacidade adequada. Apresentar soluções para captação de água de chuva ou informações sempre que for solicitado.
	16.2	Manutenção dos equipamentos e dispositivos ou componentes constituintes e integrantes do SC	16.2.1	Instalação, manutenção e desinstalação de equipamentos e dispositivos da cobertura	Atender NBR 10844 e orientar as atividades de manutenção, instalação e desinstalação de equipamentos e dispositivos de modo que não prejudiquem o sistema de drenagem de águas pluviais.
6	7.1	Resistência mecânica dos sistemas hidrossanitários e das instalações	7.1.1	Tubulações suspensas	Especificar tubulações, fixadores ou suportes das tubulações de modo a resistir a cinco vezes o peso próprio das tubulações cheias de água para tubulações fixas no teto ou em outro elemento estrutural. Estes elementos não podem apresentar deformações que excedam a 0,5% do vão. Solicitar ensaio em laboratório ou em campo.
			7.1.2	Tubulações enterradas	Especificar em projeto e memorial descritivo a existência de berços e/ou envelopamentos dimensionados para garantir a estabilidade da instalação ou conforme literatura especializada, no caso de tubulações enterradas. A exigência estrutural deverá ser comprovada pelo calculista estrutural ou por literatura especializada.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
6	7.2	Solicitações dinâmicas dos sistemas hidrossanitários	7.1.3	Tubulações embutidas	Especificar em projeto e memorial descritivo a existência de dispositivos que assegurem a não transmissão de esforços para a tubulação nos pontos de transição entre elementos (parede x piso, parede x pilar, e outros), para tubulações embutidas. Obs: Caso seja necessário o transpasse em vigas e pilares, o projetista de estruturas deve ser consultado.
			7.2.1	Sobrepessão máxima no fechamento de válvulas de descarga	Estabelecer em projeto e memorial descritivo que as válvulas de descarga, metais de fechamento rápido e do tipo monocomando não podem provocar sobrepressão no fechamento superiores a 0,2MPa. Orientar a especificação de válvula de descarga que atenda à NBR 15857.
			7.2.2	Pressão estática máxima	Projetar sistema hidrossanitário que atenda à pressão estática máxima estabelecida na NBR 5626. Apresentar memorial de cálculo.
			7.2.3	Sobrepessão máxima quando da parada de bombas de recalque	Especificar em projeto a velocidade do fluido prevista, sendo que esta deve ser inferior a 10 m/s. Para velocidades acima de 10 m/s deve ser previsto dispositivo redutor.
			7.2.4	Resistência a impactos de tubulações aparentes	Especificar a existência de tubulações aparentes com altura até 1,5 m acima do piso. Solicitar realização de ensaios de corpo mole e corpo duro, conforme item 7.2.4.1 da NBR 15575-6.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
	8.1	Combate a incêndio com água	8.1.1	Reserva de água para combate a incêndio	Projetar reserva de água para combate à incêndio conforme estabelecido pela legislação vigente e pelas normas da ABNT.
	8.3	Evitar propagação de chamas entre pavimentos	8.3.1	Evitar propagação de chamas entre pavimentos	Projetar as prumadas de esgoto sanitário e ventilação que estiverem instaladas aparentes, fixadas em alvenaria ou no interior de dutos verticais (shafts), fabricadas com materiais não propagantes de chamas.
	9.1	Risco de choques elétricos e queimaduras em sistemas de equipamentos de aquecimento e em eletrodomésticos ou eletroeletrônicos	9.1.1	Aterramento das instalações, dos aparelhos aquecedores, dos eletrodomésticos e eletroeletrônicos	Especificar e solicitar que todas as tubulações, equipamentos e acessórios do sistema hidrossanitárias sejam direta ou indiretamente aterrados.
			9.1.2	Corrente de fuga em equipamentos	Especificar equipamentos com corrente de fuga conforme NBR 12090 e NBR 14016 ou limitada à 15 mA, para os demais casos.
			9.1.3	Dispositivos de segurança em aquecedores de acumulação	Solicitar projeto de instalação elétrica para aquecedores elétricos de acumulação.
	9.2	Risco de explosão, queimadura ou intoxicação por gás	9.2.1	Dispositivos de segurança em aquecedores de acumulação a gás	Solicitar projeto de instalação elétrica e projeto de instalação de gás, para aquecedores de acumulação a gás.
	9.3	Permitir utilização segura aos usuários	9.3.1	Prevenção de ferimentos	Apresentar ao projetista de arquitetura recomendações de especificação de peças de utilização e demais componentes.
			9.3.2	Resistência mecânica de peças e aparelhos sanitários	Apresentar ao projetista de arquitetura recomendações de especificação de peças de

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
6					utilização e demais componentes.
	9.4	Temperatura de utilização da água	9.4.1	Temperatura de aquecimento	Especificar materiais que comprovem o atendimento às NBR 7198, NBR 12090, NBR 14011 e NBR 14016. No caso de uso de válvula de descarga, deve haver coluna exclusiva para abastecê-la, saindo diretamente do reservatório, não podendo ser ligado a qualquer outro ramal nesta coluna.
	10.1	Estanqueidade das instalações dos sistemas hidrossanitários de água fria e água quente	10.1.1	Estanqueidade à água dos sistemas de água	Projetar o sistema predial de água fria de modo que as tubulações não apresentem vazamento quando submetidas à pressões previstas pelas NBR 5626 e NBR 8160.
			10.1.2	Estanqueidade à água de peças de utilização	Adotar soluções adequadas em seu projeto e especificar peças de utilização que não apresentem vazamento quando submetidas à pressão hidrostática máxima previstas na NBR 5626. Projetar os reservatórios e os metais sanitários que apresentem estanqueidade conforme as normas específicas aplicáveis.
	10.2	Estanqueidade das instalações de esgoto e de águas pluviais	10.2.1	Estanqueidade das instalações de esgoto e de águas pluviais	Projetar os sistemas de esgoto sanitário e de águas pluviais não apresentem vazamento quando submetidas à pressão estática previstas pelas NBR 8160 e NBR 10844.
			10.2.2	Estanqueidade à água das calhas	Projetar as calhas e todos os componentes do sistema predial de águas pluviais, garantindo sua estanqueidade. Solicitar ou

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
					realizar ensaio conforme item 10.2.2.1 da NBR 15575-6.
	12	Desempenho acústico (não obrigatório)		ver anexo B (caráter informativo)	Especificar tipo de tratamento acústico em tubulações para atendimento aos parâmetros aceitáveis de ruído, conforme Anexo B da NBR 15575-6. Informar a necessidade de realização de ensaios, conforme Anexo B da NBR 15575-6.
	14.1	Vida útil de projeto das instalações hidrossanitárias	14.1.1	Vida útil de projeto	Especificar VUP do sistema hidrossanitário projetado, conforme os períodos especificados no Anexo C da NBR 15575-1. Especificar em projeto e memorial descritivo as informações de substituições e manutenções periódicas para que o sistema mantenha sua capacidade funcional durante a VUP. Apresentar em memorial descritivo as informações de cuidados no uso e operação dos equipamentos e elementos que compõem o sistema e de manutenções necessárias, que devem constar no Manual de Uso, Operação e Manutenção das edificações.
			14.1.2	Projeto e execução das instalações hidrossanitárias	Assegurar a qualidade do projeto e da execução dos sistemas hidrossanitários e o atendimento às Normas Brasileiras pertinentes. Atender Anexo A da NBR 15575-6.

Parte	Item	Requisitos	Item	Crítérios	Atendimento
6			14.1.3	Durabilidade dos sistemas, elementos, componentes e instalação	Projetar o sistema hidrossanitário com elementos e componentes que apresentem durabilidade compatível com VUP. Apresentar cuidados e orientações de instalação dos sistemas hidrossanitários para que estes apresentem durabilidade compatível com VUP.
	14.2	Manutenibilidade das instalações hidráulicas, de esgotos e de águas pluviais	14.2.1	Inspeções em tubulações de esgoto e águas pluviais	Prever dispositivos de inspeção nas tubulações de esgoto e águas pluviais, conforme NBR 8160 e NBR 10844.
			14.2.2	Manual de uso, operação e manutenção das instalações hidrossanitárias	Especificar fornecedores de produtos e elementos do sistema hidrossanitário que apresentem todas as condições de uso, operação e manutenção, inclusive o "como construído".
	15.1	Contaminação da água a partir dos componentes das instalações	15.1.1	Independência do sistema de água	Projetar o sistema de água potável separado fisicamente de qualquer outra instalação que conduza água não potável de qualidade insatisfatória, desconhecida ou questionável. Assegurar-se que os componentes da instalação do sistema de água fria não podem substâncias tóxicas a água ou contaminá-la por meio de metais pesados e mencionar em projeto a sua utilização. Atender às NBR 5626, NBR 5648, NBR 5688, NBR 7542, NBR 13206, NBR 15813-1, NBR 15813-2, NBR 15813-3, NBR 15884-1, NBR 15584-2, NBR 15884-3, NBR 15939-1, NBR 15939-2, NBR

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
					15939-3, NBR 7198, NBR 15704-1 e NBR 15705-1.
			15.2.1	Risco de contaminação biológica das tubulações	Projetar e especificar que a superfície interna de todos os componentes que ficam em contato com a água potável deve ser lisa e fabricada de material lavável para evitar formação e aderência de biofilme.
	15.2	Contaminação biológica da água no sistema de água potável	15.2.2	Risco de estagnação da água	Projetar de forma que os componentes da instalação não possam permitir o empoçamento de água e nem sua estagnação causada pela insuficiência de renovação. Garantir que tanques, pias de cozinha e válvulas de escoamento atendam às NBR 12450, NBR 12451, NBR 15097-1, NBR 11778 e NBR 15423.
	15.3	Contaminação de água potável do sistema predial	15.3.1	Tubulações e componentes de água potável enterrados	Projetar atendendo a legislação e NBRs vigentes, de forma que os componentes enterrados sejam protegidos contra entrada de animais ou corpos estranhos, bem como de líquidos que possam contaminar a água potável, conforme NBR 5626 e NBR 8160.
	15.4	Contaminação por refluxo de água	15.4.1	Separação atmosférica	Projetar de modo a não permitir o refluxo ou

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
6					retrossifonagem, conforme NBR 5626.
	15.5	Ausência de odores provenientes da instalação de esgoto	15.5.1	Estanqueidade aos gases	Projetar de forma que o sistema de esgoto não permita a retrossifonagem ou quebra do fecho hídrico. Atender NBR 8160.
	15.6	Contaminação do ar ambiente pelos equipamentos	15.6.1	Teor de poluentes	Projetar levando em consideração que os ambientes não podem apresentar teor de CO ₂ superior a 0,5%, e de CO superior a 30 ppm. Atender em projeto a legislação e a NBR 13013. Mencionar em projeto ou memorial descritivo a necessidade de inspeção in loco dos ambientes.
	16.1	Funcionamento das instalações de água	16.1.1	Dimensionamento da instalação de água fria e quente	Projetar o sistema predial de água fria e quente de forma a fornecer água na pressão, vazão e volume compatíveis com o uso, associado a cada ponto de utilização, considerando a possibilidade de uso simultâneo.
	16.1	Funcionamento das instalações de água	16.1.2	Funcionamento de dispositivos de descarga	Projetar as caixas e válvulas de descarga de forma a atender a NBR 15491 e a NBR 15857, no que se refere à vazão e volume de descarga.
	16.2	Funcionamento das instalações de esgoto	16.2.1	Dimensionamento da instalação de esgoto	Projetar o sistema predial de esgoto para coletar e afastar nas vazões com que normalmente são descarregados os aparelhos sem que haja transbordamento, acúmulo na instalação, contaminação do solo ou retorno a aparelhos não utilizados. Atender NBR 8160, NBR 7229 e NBR 13969.

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
	16.3	Funcionamento das instalações de águas pluviais	16.3.1	Dimensionamento de calhas e condutores	Projetar as calhas e condutores suportando a vazão do projeto, calculada a partir da intensidade de chuva adotada para a localidade e para um certo período de retorno. Atender à NBR 10844.
	17.1	Conforto na operação dos sistemas prediais	17.2	Adaptação ergonômica dos equipamentos	Projetar as peças de utilização, inclusive registros de manobra, com volantes ou dispositivos com formato e dimensões que proporcionem torque ou força de acionamento conforme normas brasileiras, e isentos de rebarbas, rugosidades ou ressaltos que possam causar ferimentos. Atender às normas NBR 10281, NBR 11535, NBR 11778, NBR 11815, NBR 13713, NBR 14390, NBR 14877, NBR 15267, NBR 15491, NBR 15704-1 e NBR 15705.
	18.1	Uso racional da água	18.1.1	Consumo de água em bacias sanitárias	Projetar bacias sanitárias com volume de descarga de acordo com as especificações da NBR 15097-1.
			18.1.2	Fluxo de água em peças de utilização	Projetar peças de utilização que possuam vazões que permitam tornar o mais eficiente possível o uso da água nela utilizada, o que implica a redução do consumo de água a valores mínimos necessários e suficientes para um bom funcionamento destas peças e para o atendimento dos requisitos do usuário.
	18.2	Contaminação do solo e do lençol freático	18.2.1	Tratamento e disposição de efluentes	Projetar os sistemas prediais de esgoto ligados à rede pública ou a um sistema

Parte	Item	Requisitos	Item	Critérios	Atendimento
					localizado de tratamento e disposição de efluentes, conforme NBR 8160, NBR 7229 e NBR 13969.

Fonte: Adaptado de Gealh, 2018.

CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo deste estudo evidencia a importância do projetista de instalações hidrossanitárias no atendimento à NBR 15575 – Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais, especialmente no que diz respeito à parte 6 da norma, voltada aos sistemas hidrossanitários. A análise detalhada dos 173 critérios permitiu identificar 59 nos quais o projetista hidrossanitário exerce uma atuação direta, demonstrando que esse profissional é um dos responsáveis por garantir a funcionalidade, durabilidade, segurança e eficiência das instalações ao longo de toda a vida útil da edificação.

Ficou evidente que o cumprimento da Norma de Desempenho exige mais do que o simples atendimento às normas técnicas, é necessário um envolvimento profundo com as diretrizes de durabilidade, estanqueidade, manutenibilidade, sustentabilidade, segurança e salubridade. Nesse contexto, a atuação do projetista deve ser cada vez mais propositiva e estratégica, exigindo domínio técnico, atualização constante e maior integração com os demais agentes do processo construtivo. Dessa forma, contribuindo para elevar o padrão de qualidade das edificações e garantir que os sistemas atendam às necessidades dos usuários durante toda a vida útil da construção.

Entre os principais desafios enfrentados estão a falta de informações técnicas fornecidas por fabricantes, a adaptação gradual do mercado às exigências normativas e a necessidade de maior integração entre os agentes envolvidos no processo construtivo. Neste cenário, a atuação do projetista de instalações hidrossanitárias deve ser cada vez mais pautada por decisões fundamentadas em critérios normativos e sustentadas por memoriais descritivos que demonstrem a aderência do projeto às exigências da NBR 15575. Além disso, sua participação ativa desde as fases iniciais do empreendimento é fundamental para antecipar soluções, evitar conflitos e assegurar que os sistemas projetados atendam aos requisitos de desempenho estabelecidos pela norma.

Por fim, o fortalecimento da cultura do desempenho no setor da construção civil demanda não apenas o cumprimento normativo, mas também um reposicionamento da engenharia de projetos como etapa

essencial e estratégica no ciclo de vida da edificação. Ao incorporar os princípios da NBR 15575 de forma efetiva, o projetista hidrossanitário contribui para a qualificação do ambiente construído, a valorização da profissão e a entrega de habitações mais seguras, eficientes e sustentáveis à sociedade.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – desempenho – parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-3: Edificações Habitacionais – desempenho – parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-5: Edificações Habitacionais – desempenho – parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-6: Edificações Habitacionais – desempenho – parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ALVES, B. T. Q.; LIMA, M. G. P. N.; BERTINI, A. A. Análise crítica de atendimento da norma ABNT NBR 15575:2013 de um estudo de caso em construtora no estado do Ceará. In: TECSIC 2019 – Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos, 2., 2019, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: UFC, 2019.

Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/363> Acesso em: 11 jul. 2025.

BATISTA, K. J. M.; FIALHO, M. T. V.; LORDSLEEM JÚNIOR, A. C.; MELHADO, S. B.; MORAIS, S. C.; SILVA, S. R. Gestão de projetos para atendimento à NBR 15575 em instalações hidrossanitárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2019, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia, 2019 Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbqp/article/view/3225>. Acesso em: 07 jun. 2025.

BOTTEGA, G. S. de S.; PILZ, S. E.; COSTELLA, M. F. Subsídios para cumprimento dos critérios de desempenho de sistemas hidrossanitários conforme a NBR 15575-6. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 87-105, abr./jun. 2022. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/4gBP5g8MPRdw96FCJfJVvgM/?lang=pt>. Acesso em: 11 jul. 2025.

CORDOVIL, L. A. B. L. Estudo da ABNT NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho e possíveis impactos no setor da construção civil na cidade do Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) –Escola Politécnica, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9572>. Acesso em: 07 jun. 2025.

COTTA, A. C.; ANDERY, P. R. P. As alterações no processo de projeto das empresas construtoras e incorporadoras devido à NBR 15575 – Norma de Desempenho. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 133-152, jan./mar. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/QX88JwvVhnHNFvpNGGh5rqd/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 10 jun. 2025

CRUZ, H.; ALMEIDA, L. S.; VIANA, M. R.; MICHELAN, D. G. S.; SANTOS, D. G. Ferramenta auxiliar para a elaboração de projeto residencial de água fria. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 2548–2555.

Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1654> Acesso em: 11 jul. 2025

GEALH, Jucélia Kuchla Vieira. Análise crítica da implantação da NBR 15575 em construtoras e incorporadoras. 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

KERN, A. P.; SILVA, A.; KAZMIERCZAK, C. S. O processo de implantação de normas de desempenho na construção: um comparativo entre a Espanha (CTE) e Brasil (NBR 15575/2013). *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 89–101, jan./jun. 2014. Disponível em: <https://revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/89989/92778>. Acesso em: 09 jul. 2025.

LIMA, C. F. M.; ANDERY, P. R. P.; VEIGA, A. C. R. Análise do processo de projeto de sistemas hidrossanitários prediais. *Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 102-113, jun. 2016. ISSN 1980-6809. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8645049>.

Acesso em: 10 jun. 2025.

NUNES, V. D. L.; HIPPERT, M. A. S.; CARVALHO, A. R. de; RUBIM, D. F. A implantação da norma NBR 15575 e seu impacto no setor de construção civil. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 12, n. 00, p. e021010, 2021. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8656159>. Acesso em: 07 jun. 2025.

SOUZA, J. L. P.; KERN, A. P.; TUTIKIAN, B. F. Análise quali-quantitativa da norma de desempenho (NBR nº 15.575/2013) e principais desafios da implantação do nível superior em edificação residencial de multipavimentos. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 13, n. 1, p. 127–144, 2018. Disponível em: <https://revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/133842>. Acesso em: 09 jul. 2025.

VIANA, M. R.; SANTOS, P. R. R.; MICHELAN, D. C. G. S.; SANTOS, D. G. Aplicabilidade da Norma de Desempenho em habitação popular: estudo de caso. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 17., 2018. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 1616–1623.

Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1510> Acesso em: 11 jul. 2025.

Capítulo 3



10.37423/250810242

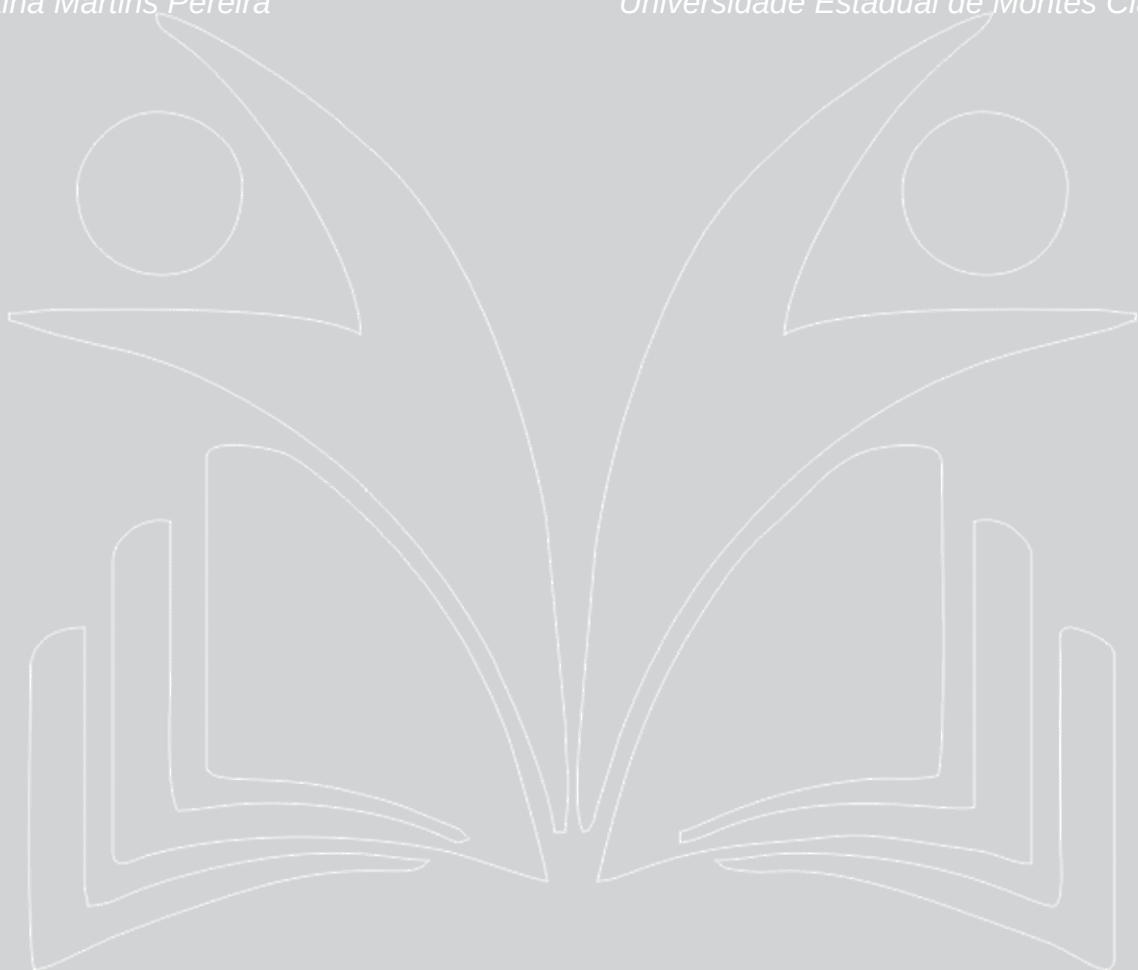
ANÁLISE DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS EM ESCOLA PÚBLICA DE MONTES CLAROS-MG: CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Everton Felipe Gonçalves Silva

Universidade Estadual de Montes Claros

Sheila Cristina Martins Pereira

Universidade Estadual de Montes Claros



Resumo: As instituições educacionais desempenham um papel importante na conscientização ambiental, promovendo a sustentabilidade por meio de práticas que reduzem impactos ambientais e estimulam a formação de cidadãos responsáveis. Diante disso, este trabalho analisa a implementação de práticas sustentáveis em uma escola pública de Montes Claros, com foco na captação de água de chuva e no gerenciamento de resíduos sólidos. O sistema de captação de água proposto foi dimensionado para atender às necessidades de rega do jardim, calculando o volume necessário de água para o cultivo das plantas. Para o gerenciamento de resíduos sólidos, a abordagem adotada incluiu uma análise quantitativa e gravimétrica, que avaliou a composição e a quantidade de resíduos gerados na escola. A partir dos dados obtidos, foram sugeridas soluções como coleta seletiva, compostagem e um sistema de destinação adequada para reduzir o volume de resíduos destinados a aterros e promover o reaproveitamento de materiais dentro da instituição. O programa de educação ambiental envolve alunos, professores e funcionários, com ações que visam fortalecer o compromisso ambiental e criar uma cultura de sustentabilidade na escola. Além disso, a parceria com cooperativas de catadores de materiais recicláveis, muitas das quais envolvem colaboradores em situações de vulnerabilidade social, contribui para uma gestão eficiente dos resíduos e fortalece a inclusão social, proporcionando novas oportunidades para essas comunidades. A viabilidade econômica dessas soluções é analisada com base nos custos iniciais de implementação, considerando o retorno financeiro gerado pela economia de recursos, a redução de custos e os benefícios ambientais, assegurando que as ações propostas contribuam para um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: educação ambiental; sustentabilidade; gestão de recursos; eficiência hídrica.

1. INTRODUÇÃO

A implementação de práticas sustentáveis em instituições educacionais é uma resposta direta à necessidade urgente de promover a conscientização e a ação em relação aos desafios ambientais globais. Como destacado por Ferreira *et al.* (2019), a Educação Ambiental desempenha um papel fundamental nesse processo, estimulando a conscientização dos indivíduos sobre os problemas ambientais e fornecendo diretrizes para combatê-los. Busca-se compreender não apenas a eficácia dessas práticas na promoção da sustentabilidade ambiental, mas também seu impacto no ambiente escolar e na formação dos estudantes, alinhando-se aos princípios fundamentais da Educação Ambiental.

As instituições de ensino têm evoluído para se tornarem não apenas locais de aprendizado acadêmico, mas também espaços onde a ecopedagogia e a produção de conhecimento sobre sustentabilidade são valorizadas. Como salientado por Soares, Abdala e Cezarino (2017), essas instituições são fundamentais na preparação dos estudantes não apenas para o mercado de trabalho, mas também para se tornarem cidadãos conscientes de sua responsabilidade socioambiental. Ao implementar iniciativas sustentáveis, as escolas além de cumprirem seu papel educacional, inspiram toda a comunidade escolar a adotar práticas mais sustentáveis, criando um impacto positivo que se estende para além dos seus muros.

No contexto atual, onde a preocupação com a sustentabilidade está em constante ascensão, é importante reconhecer a longa trajetória da expressão "desenvolvimento sustentável", que ganhou popularidade a partir da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) em 1992, conforme destacado por Barbieri *et al.* (2010). Neste cenário, as instituições educacionais enfrentam desafios significativos, como o crescente volume de resíduos sólidos, a necessidade de redução do consumo energético e a escassez de recursos hídricos. Diante desses desafios, torna-se imperativo compreender como as práticas sustentáveis podem ser implementadas de forma eficaz e integrada ao ambiente escolar, não apenas para promover a preservação do meio ambiente, mas também para cultivar uma educação mais responsável e consciente.

A implementação de práticas sustentáveis em instituições educacionais surge como uma resposta estratégica aos desafios ambientais da sociedade atual. Segundo Engelman, Guisso e Fracasso (2009), a preocupação com o meio ambiente e com os aspectos econômicos e sociais exige uma mudança de comportamento em direção ao desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305:2010) estabelece diretrizes para a gestão e gerenciamento de resíduos, definindo princípios e objetivos que visam reduzir a geração de resíduos, incentivar a reutilização e

promover práticas de reciclagem, com o intuito de contribuir para uma gestão ambientalmente adequada e sustentável.

O presente estudo tem como objetivo geral propor a implantação de práticas sustentáveis em uma escola, visando aprimorar a gestão ambiental no local. Para alcançar esse propósito, foram estabelecidos objetivos específicos que incluem: avaliar o sistema atual de gerenciamento de resíduos sólidos da instituição, examinando os processos de coleta, armazenamento, transporte e destinação final; realizar a quantificação e caracterização dos resíduos sólidos gerados, com análise detalhada da composição gravimétrica e da geração *per capita*; e investigar o potencial de captação e aproveitamento da água de chuva, por meio da análise da pluviometria local e cálculo do volume acumulado mensalmente.

2. METODOLOGIA

A Escola Estadual Secundino Tavares, localizada em Montes Claros, Minas Gerais, atende a 233 alunos e conta com 32 funcionários, ocupando uma área de 6.669,45 m². A instituição possui diversas instalações, incluindo salas de aula, biblioteca, refeitório, cozinha, área de serviço, banheiros, quadra poliesportiva e área administrativa.

Para o desenvolvimento do sistema de captação de águas pluviais, adotou-se a ABNT NBR 10844:1989, que regulamenta os procedimentos para coleta, condução e descarte de águas de chuva, garantindo a prevenção de infiltrações e alagamentos. Além disso, a ABNT NBR 15527:2019 foi utilizada como referência para o dimensionamento e uso não potável da água captada. O processo incluiu a análise das precipitações regionais, realizada com base em dados pluviométricos históricos, para calcular a capacidade de armazenamento necessária.

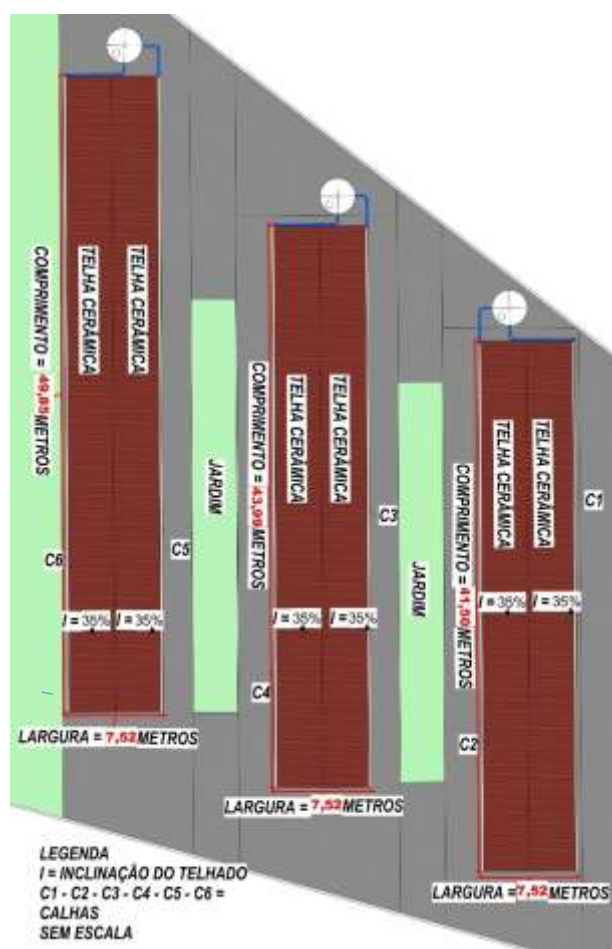
A metodologia aplicada ao gerenciamento de resíduos sólidos na escola foi desenvolvida em etapas que incluíram a coleta de dados sobre a geração de resíduos, a caracterização detalhada dos materiais descartados e a análise das práticas de segregação e destinação final. Essas etapas permitiram identificar os principais desafios enfrentados pela escola, fornecendo base para a implementação de ações práticas, como a coleta seletiva e o reaproveitamento de resíduos orgânicos, além de estratégias de educação ambiental.

2.1 SISTEMA DE CAPTAÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

2.1.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA

O dimensionamento do sistema de captação de água pluvial foi realizado a partir da análise dos componentes hidráulicos do telhado. Foram considerados: a área de coleta, calhas, condutores verticais e horizontais. Na Figura 1 consta a vista superior do local de estudo, indicando a cobertura e áreas específicas para análise.

Figura 1 – Vista superior da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com base nas orientações da norma ABNT NBR 10.844:1989 – Instalação Predial de Águas Pluviais, as vazões de projeto foram calculadas utilizando a fórmula recomendada pela norma, apresentada na Equação pelo método racional.

$$Q = \frac{C.I.A}{60} \quad (1)$$

Onde:

Q = Vazão máxima (l/min);

I = Índice de precipitação pluviométrica (mm/h);

A = Área de contribuição (m²);

C = Coeficiente de escoamento (adimensional).

A equação de chuvas intensas, conforme apresentada por Righetto (1998), tem a seguinte forma geral:

$$I = \frac{K \cdot TR^a}{(t + b)^c} \quad (2)$$

Onde:

I = intensidade pluviométrica (mm/h);

t = duração da precipitação (em minutos);

TR = período de retorno (em anos);

K, a, b, e c = parâmetros de ajuste que dependem de dados pluviométricos locais.

Para o dimensionamento, foi considerada uma duração de precipitação (t) de 5 minutos e um período de retorno (TR) de 25 anos, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma. Os parâmetros de ajuste K, a, b e c, necessários para calcular a intensidade pluviométrica, foram obtidos por meio do software Plúvio, que utiliza dados pluviométricos locais para garantir precisão nos resultados.

De acordo com a norma, a área de contribuição é definida como a soma das superfícies que, ao interceptar a chuva, direcionam as águas pluviais para um ponto específico da instalação, incluindo o cálculo de superfícies inclinadas conforme especificado na norma.

De acordo com Tomaz (2011), o coeficiente de escoamento para telhas cerâmicas varia entre 0,80 e 0,90. Dessa forma, foi adotado um valor médio de 0,85, equilibrando os limites e proporcionando uma margem de segurança adicional nos cálculos.

O dimensionamento das calhas foi realizado com base na NBR 10.844:1989, que define os diâmetros das calhas semicirculares, utilizando a equação de Manning-Strickler. O coeficiente de rugosidade (n) foi ajustado conforme o material da calha, optando-se pelo PVC, com valor de n=0,011. A declividade das calhas foi definida com inclinação uniforme de 0,5%, ou 0,005 m/m.

O condutor vertical, responsável por conectar a calha ao condutor horizontal, foi determinado por meio do ábaco para calhas com saída em aresta viva, conforme especificado na norma. Considerando a vazão de projeto, foi traçada uma reta vertical até atingir a curva correspondente ao comprimento da tubulação, e uma linha horizontal foi desenhada para interceptar o eixo das ordenadas, indicando o diâmetro necessário do condutor.

Os condutores horizontais têm a função de direcionar as vazões acumuladas até o reservatório. Para seu dimensionamento, conforme a norma ABNT NBR 10844:1989, foram utilizadas as equações 3 e 4, adotando-se os seguintes parâmetros: seção máxima de escoamento limitada a 67% da seção do tubo, velocidade de escoamento entre 0,60 m/s e 2,00 m/s, e declividade mínima de 0,5%, com a velocidade verificada pelas fórmulas de Manning-Strickler e da Continuidade.

$$V = \frac{1}{n} \cdot RH^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$Q = V \cdot A \quad (4)$$

Onde:

Q = Vazão a escoar em (m³/s);

n = Coeficiente de rugosidade do tubo = 0,011 (PVC);

RH = Raio hidráulico (m);

I = Declividade (m/m);

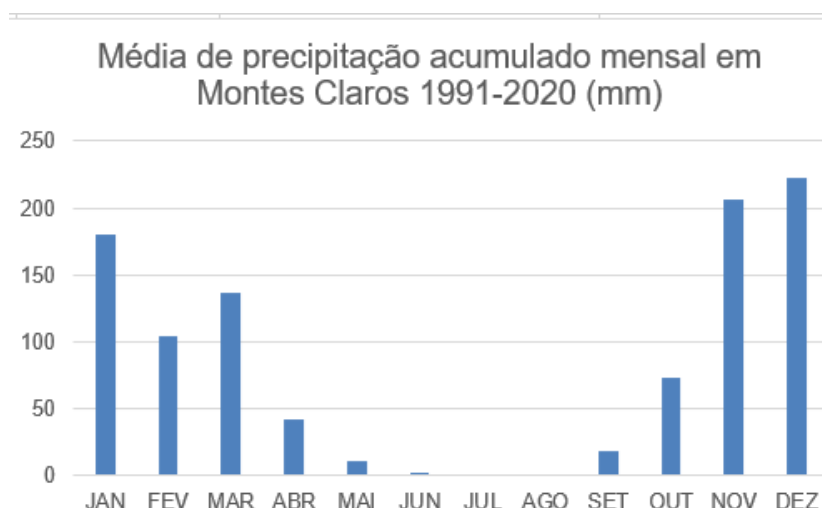
A = Área molhada da seção (m²);

V = velocidade (m/s).

2.1.2 RESERVATÓRIO

O reservatório para o armazenamento da água pluvial foi dimensionado com base nos dados de precipitação média anual obtidos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram coletados da estação meteorológica de Montes Claros, localizada na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Os valores considerados são referentes às médias históricas entre os anos de 1991 e 2020. Na Figura 2, apresenta-se a média de precipitação acumulada mensal para o período de 1991 a 2020, com base nos dados da estação meteorológica mencionada.

Figura 2 – Média de precipitação acumulado mensal em Montes Claros 1991-2020.



Fonte: INMET, 2024.

O cálculo do volume de armazenamento considerou taxas de consumo de água comumente adotadas na prática, como 2 litros por metro quadrado por dia para rega de jardim, conforme descrito por Tomaz (2011). Essas taxas foram a base para o dimensionamento do sistema de captação.

O coeficiente de escoamento superficial (C), varia de acordo com o material do telhado. O valor do coeficiente sugerido por Tomaz (2011) um coeficiente de escoamento médio de 0,85, como um valor intermediário entre os limites de 0,8 e 0,9. Esse valor garante uma margem de segurança adicional nos cálculos de captação.

O volume de água de chuva captado foi calculado com base na fórmula indicada pela ABNT NBR 15527:2019 para o dimensionamento de reservatórios.

$$V = P . A . C . \eta \quad (4)$$

Sendo:

V = volume mensal da água de chuva aproveitado;

P = precipitação média mensal (mm);

C = coeficiente de escoamento superficial;

η (fator captação) = eficiência do sistema de captação de água 0,8; e

A = área do telhado em projeção (m²).

2.1.3 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

Para o dimensionamento do reservatório, foram seguidas as diretrizes apresentadas na ABNT NBR 15527:2019. Utilizou-se o Método de Rippl, que considera o balanço entre o volume de água captado e a demanda ao longo do tempo, permitindo estimar a capacidade ideal do reservatório para atender às necessidades de consumo sem desperdício excessivo.

2.1.4 MÉTODO DE RIPPL

O Método de Rippl, conforme descrito na NBR 15527:2019, foi empregado para avaliar a demanda mensal e as séries históricas de precipitações mensais. Esse método busca garantir o abastecimento contínuo de água durante os períodos chuvosos e secos.

$$S(t) = D(t) - Q(t); \quad 5)$$

$$Q(t) = C \times \text{precipitação da chuva}(t) \times \text{área de captação}; \quad 6)$$

$$V = \sum S(t), \text{ somente para valores } S(t) > 0 \text{ sendo que } \sum D(t) < \sum Q(t). \quad 7)$$

Onde:

$S(t)$ = volume de água no reservatório no tempo t ;

$Q(t)$ = volume de chuva aproveitável no tempo t ;

$D(t)$ = demanda ou consumo no tempo t ;

V = volume do reservatório, em metros cúbicos; e

C = coeficiente de escoamento superficial.

2.1.5 ECONOMIA NO CONSUMO DE ÁGUA FORNECIDA PELA COPASA

A economia gerada na tarifa de água foi calculada multiplicando-se o valor cobrado por metro cúbico (m^3) pela Copasa-MG pelo volume de água captado.

2.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Para avaliar o sistema de gestão e coleta de resíduos sólidos na instituição, foi realizada uma análise qualitativa e quantitativa. O foco foi compreender quais tipos de resíduos são gerados nas atividades

diárias, como ocorre a coleta e se existe alguma prática de segregação e reaproveitamento dos resíduos dentro da escola.

2.3 QUANTIFICAÇÃO E GERAÇÃO *PER CAPITA* DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Para quantificar os resíduos gerados na escola, foi realizada uma coleta durante um período de 5 dias úteis, abrangendo desde quarta-feira de uma semana até terça-feira da semana seguinte, de forma a cobrir um intervalo de dias letivos. A massa total de resíduos coletada nesse período foi dividida por 5 para obter a média diária de geração de resíduos. A geração *per capita* foi então calculada, considerando a população total da escola, incluindo alunos, professores e funcionários, conforme a seguinte equação::

$$GP = \frac{Qr}{P} \quad (8)$$

Onde:

GP= geração *per capita* de resíduos sólidos (Kg.hab⁻¹.dia⁻¹)

Qr = quantidade total de resíduos sólidos (Kg/dia)

P = número de alunos (habitantes)

Essa abordagem permitiu obter a quantidade média de resíduos gerados por pessoa por dia, refletindo a contribuição de todos os grupos presentes na instituição.

2.4 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS

A caracterização dos resíduos foi feita por meio da análise gravimétrica, utilizando uma balança comercial para determinar a massa dos materiais separados. Logo, foi possível determinar a composição dos resíduos, identificando a proporção de cada tipo de material gerado. Esses dados são essenciais para implementar estratégias de segregação e destinação mais eficientes.

Os resíduos foram classificados quanto ao tipo em: papel/papelão, plástico, rejeitos sanitários, resíduos orgânicos e outros, permitindo uma análise detalhada da composição gravimétrica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA

3.1.1 CÁLCULO DA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DO TELHADO

As áreas utilizadas para o cálculo da vazão do telhado estão ilustradas na Figura 2, e os resultados obtidos no cálculo são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Vazão de contribuição

Calha	Local	Área (m²)	Vazão de projeto (L/min)
C1	A1	172,640	511,809
C2	A2	172,640	511,809
C3	A3	182,998	542,517
C4	A4	182,998	542,517
C5	A5	207,376	614,787
C6	A6	207,376	614,787

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.1.2 DIMENSIONAMENTO DAS CALHAS

Com base nos valores de vazão de projeto calculados para cada calha e na declividade considerada, foram determinados os diâmetros internos necessários para as calhas, apresentada no Tabela 2.

Tabela 2 – Vazão das calhas

Calha	Vazão de projeto (L/min)	Diâmetro interno da calha (mm) – NBR 10.844:1989	Diâmetro interno adotado (mm)
C1	511,809	200	200
C2	511,809	200	200
C3	542,517	200	200
C4	542,517	200	200

C5	614,787	200	200
C6	614,787	200	200

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.1.3 DIMENSIONAMENTO CONDUTOR VERTICAL

Para o dimensionamento dos condutores verticais, foi considerada a maior vazão de projeto, que é de 614,79 L/min. De acordo com o ábaco para calhas com saída em aresta viva da NBR 10.844:1989, essa vazão resulta em um condutor com diâmetro inferior ao mínimo estabelecido pela norma, que é de 70 mm. Optou-se por utilizar um condutor de diâmetro comercial de 150 mm para todos os condutores verticais das coberturas.

3.1.4 DIMENSIONAMENTO CONDUTOR HORIZONTAL

Os resultados do dimensionamento e da verificação hidráulica dos trechos estão apresentados no Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensionamento dos condutores horizontais

Calha	Vazão de Projeto (L/min)	Diâmetro calculado (mm)	Diâmetro necessário - NBR 10844	Diâmetro comercial adotado	Velocidade (m/s)
C1	511,809	124,206	125	150	0,994
C2	511,809	124,206	125	150	0,994
C3	542,517	126,950	150	150	1,009
C4	542,517	126,950	150	150	1,009
C5	614,787	133,045	150	150	0,0387
C6	614,787	133,045	150	150	0,0387

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.1.6 VOLUME MÉDIO MENSAL GASTO NA REGA DE JARDIM

Considerando a demanda de 2L/m².dia para o jardim, conforme consultado na Tabela 2, que apresenta as Taxas de Consumo de Água, e com uma área total de 241,75 m², o consumo diário total de água para a rega é de 483,5 litros. Em um mês de 20 dias letivos, isso resulta em um volume de 9,67 m³ de água utilizado para a manutenção do jardim.

3.1.7 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO PELO MÉTODO DE RIPPL

Os resultados do dimensionamento do reservatório, utilizando o método de Rippl, estão apresentados na Tabela 4. O volume máximo do reservatório foi determinado a partir da análise da coluna 7, onde o valor máximo registrado é de 25,95 m³. Quando os valores da coluna 6 são positivos, isso indica que o nível da água no reservatório está em declínio, o que nos meses de junho, julho e agosto.

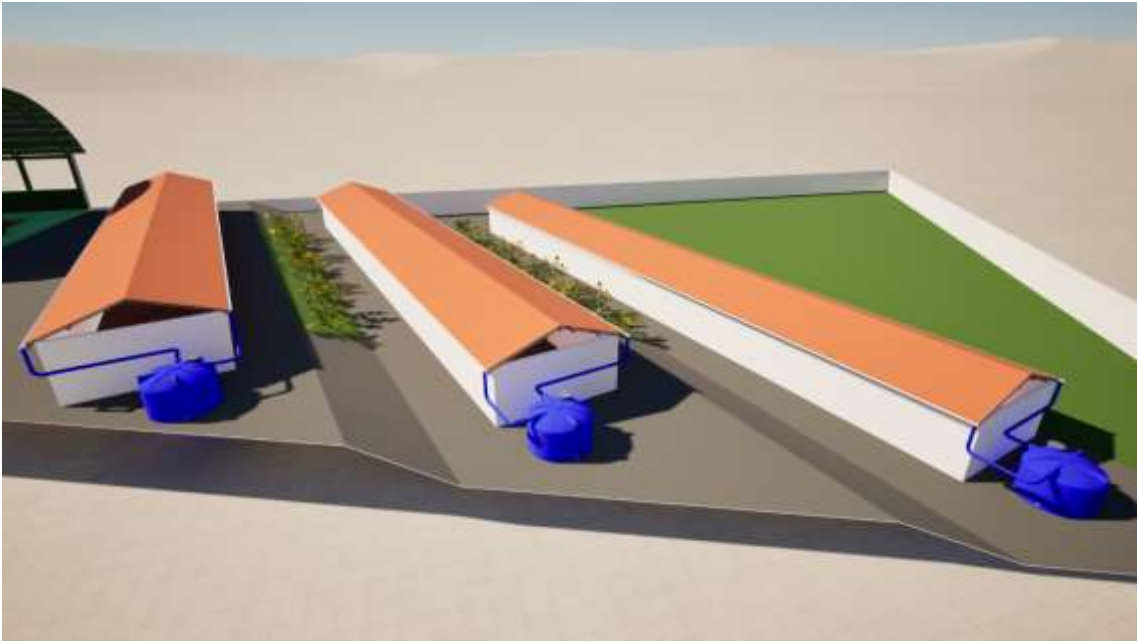
Tabela 4 - Dimensionamento do reservatório pelo método de Rippl

Meses	Chuva média (mm)	Demanda mensal (m³)	Área de captação (m²)	Volume de chuva mensal (m³)	Diferença entre a demanda e o volume mensal de chuva (m³)	Diferença acumulada da coluna 6 do valores positivos (m³)	Comportamento do reservatório
JAN	179,8	9,67	1126,03	145,77	-136,10	-	Escoando
FEV	104,5	9,67	1126,03	84,72	-75,05	-	Escoando
MAR	137	9,67	1126,03	111,07	-101,40	-	Escoando
ABR	41,5	9,67	1126,03	33,65	-23,98	-	Escoando
MAI	11,5	9,67	1126,03	9,32	0,35	0,35	Baixando
JUN	2	9,67	1126,03	1,62	8,05	8,39	Baixando
JUL	0,6	9,67	1126,03	0,49	9,18	17,58	Baixando
AGO	1,6	9,67	1126,03	1,30	8,37	25,95	Baixando
SET	18,5	9,67	1126,03	15,00	-5,33	-	Subindo
OUT	73,3	9,67	1126,03	59,43	-49,76	-	Escoando
NOV	205,8	9,67	1126,03	166,85	-157,18	-	Escoando
DEZ	222,5	9,67	1126,03	180,39	-170,72	-	Escoando
Total						25,95	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A escolha de três reservatórios de 10.000 litros, totalizando 30.000 litros de capacidade, garante a disponibilidade dos 25,95 m³ calculados pelo método de Rippl. Essa solução atende ao volume máximo necessário para suprir o consumo estimado, assegurando que o armazenamento de água seja suficiente mesmo nos períodos críticos de menor captação. Com um reservatório dedicado a cada prédio, o sistema se torna mais eficiente e confiável, distribuindo o volume de forma estratégica para otimizar a utilização da água da chuva em cada edificação. A seguir, a Figura 3 mostra a distribuição dos reservatórios no local, ilustrando como será feita a alocação dos reservatórios no terreno.

Figura 3 - Distribuição dos Reservatórios no Local



Fonte: Elaborador pelo autor, 2024.

3.1.8 ECONOMIA DO CONSUMO DE ÁGUA FORNECIDA PELA COPASA

O preço do metro cúbico de água varia conforme o consumo mensal, com valores diferenciados para cada faixa de gasto, o que incentiva o uso consciente e evita desperdícios. Considerando a categoria "Pública" e a faixa de consumo mensal entre 10 e 20 m³, a captação de 116,04 m³ ao longo de um ano resultaria em uma economia significativa, com R\$ 1.054,80 economizados na taxa de água e R\$ 780,94 na taxa de esgoto, totalizando R\$ 1.830,74 por ano.

3.1.9 ESTIMATIVA DE CUSTOS

Com base no dimensionamento do projeto, foi realizada uma estimativa dos custos para a implementação do sistema de captação e armazenamento de água da chuva. A Tabela 5 apresenta os valores estimados para os materiais e serviços necessários, abrangendo os itens essenciais para a instalação e operação do sistema. Os preços das composições foram obtidos com base na tabela do SINAPI-MG de setembro de 2024. A Figura 4 detalha os principais componentes do projeto, como calhas, tubulações e reservatório de armazenamento.

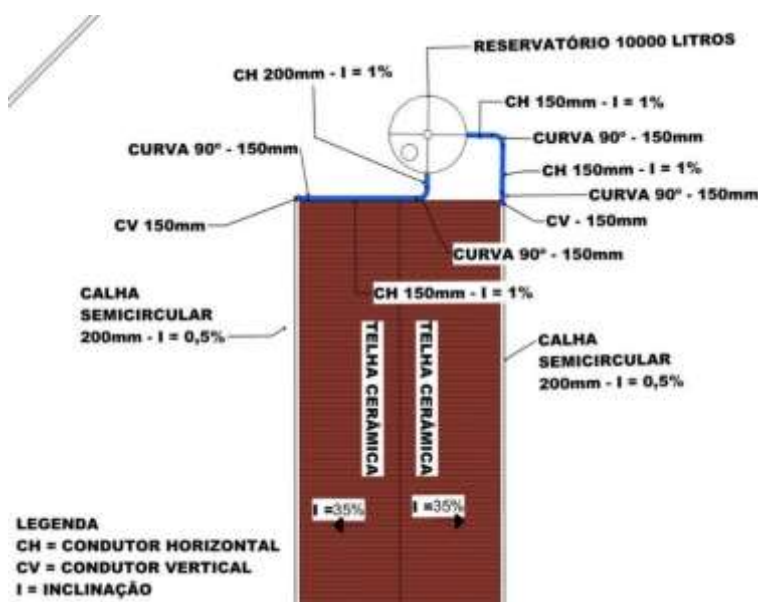
Tabela 5 - Estimativa de Custos para Implantação do Sistema de Captação e Armazenamento de Água da Chuva (Baseado no SINAPI-MG, 09/2024).

Composições	Unidade	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
		e		

Curva 90º PVC 150mm	UN.	12	R\$ 58,68	R\$ 704,16
Caixa d'água / Reservatório em poliéster reforçado com fibra de vidro, 10000 litros, com tampa	UN.	3	R\$ 5.211,27	R\$ 15.633,81
Tubo PVC 150 mm para esgoto ou águas pluviais predial	m	24,24	R\$ 57,68	R\$ 1.398,16
Calha semicircular PVC 200mm	m	270,69	R\$ 63,23	R\$ 17.115,73
Tela para calha anti folha	m²	54,14	R\$ 134,95	R\$ 7.306,19
Total				R\$ 42.157,99

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 4 – Detalhamento do sistema de captação de água da chuva



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

3.1.10 PAYBACK

Com base no investimento estimado de R\$ 42.157,99 para a implementação do sistema de captação e armazenamento de água da chuva, foi calculado o *payback* do investimento considerando uma economia anual de R\$ 1.830,74. A economia será ajustada anualmente pela taxa de juros da SELIC, atualmente em 10,75% a.a. Com esse ajuste, o tempo estimado para o retorno do investimento é de cerca de 13 anos.

3.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A escola enfrenta desafios na gestão de resíduos sólidos devido à ausência de práticas adequadas de separação, o que compromete a eficiência do processo. A limpeza dos setores ocorre nos turnos da

manhã e da tarde. Os resíduos são acondicionados em grandes lixeiras até a coleta pública, realizada três vezes por semana. No entanto, grande parte dos resíduos é considerada rejeitos pela instituição, não tendo o seu aproveitamento ou reciclagem. A falta de orientações regulares para a separação correta evidencia a necessidade de ações educativas mais consistentes e de um sistema estruturado para a segregação eficiente.

3.3 QUANTIFICAÇÃO E GERAÇÃO *PER CAPITA* DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A geração *per capita* foi calculada para avaliar a quantidade de resíduos gerados na escola por aluno, por dia. Esse indicador fornece uma análise detalhada da produção de resíduos em relação à população escolar. Os resultados, tanto da massa total de resíduos quanto da geração per capita, estão apresentados na Tabela 6, permitindo uma avaliação mais precisa da gestão de resíduos na instituição.

Tabela 6 - Quantificação e Geração *Per Capita* de Resíduos Sólidos na Escola

Massa Total 5 dias (Kg)	75,760
Média de massa/dia (Kg/dia)	15,152
Geração per capta (Kg * População ⁻¹ * Dia ⁻¹)	0,057

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.4 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS

Em relação à composição gravimétrica dos resíduos gerados, observa-se que a maior parte da massa é composta por resíduos orgânicos, como sobras de lanche e restos de alimentos provenientes da produção alimentícia, totalizando 50,749 kg em 5 dias, o que resulta em uma média de 10,150 kg por dia. Esse alto volume pode ser atribuído ao grande número de alimentos preparados para os alunos, embora nem todos consumam o lanche fornecido pela escola, o que leva a uma quantidade significativa de desperdício. Esses dados são detalhados na Tabela 7, que apresenta a composição dos resíduos e suas respectivas quantidades, auxiliando na análise e planejamento de estratégias para a redução de desperdício e melhor aproveitamento.

Tabela 7 - Composição Gravimétrica dos Resíduos da Escola

Tipo	Massa Total (kg)	Média/Dia (kg/dia)	Porcentagem (%)
Papel/Papelão	12,901	2,580	17,03%
Resíduos Sanitários	5,311	1,062	7,01%

Plástico	4,521	0,904	5,97%
Resíduos Orgânicos	50,749	10,150	66,98%
Materiais de difícil classificação	2,278	0,456	3,01%
Total	75,760	15,152	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A segunda maior categoria de resíduos gerados foi a de papel e papelão, com uma média de 2,580 kg/dia. Em seguida, os resíduos sanitários e o plástico, que apresentam uma geração menor, devido à limitada demanda por embalagens de alimentos, já que o lanche é preparado internamente pela escola e poucos alunos trazem alimentos embalados de casa.

A análise dos resíduos na escola revela que os orgânicos estão presentes em maior quantidade na geração de resíduos, representando 66,98% do total, principalmente devido ao desperdício de alimentos preparados. Embora os funcionários reaproveitem parte desses resíduos para alimentar animais, é essencial adotar práticas como a compostagem para reduzir o desperdício. Resíduos de papel/papelão e plástico têm menor volume, mas ainda há oportunidade de melhorar a separação e reciclagem. A falta de orientação para uma separação eficiente dos resíduos destaca a necessidade de ações educativas mais eficazes na escola.

Os materiais de difícil classificação totalizaram 2,278 kg, com média de 0,456 kg/dia, correspondendo a 3,01% do total de resíduos gerados na escola. Essa categoria inclui resíduos de varrição (poeira e pequenos detritos), restos de materiais de limpeza (esponjas usadas), resíduos de atividades escolares (retalhos de EVA e fitas adesivas) e itens descartáveis como luvas de látex. A presença desses resíduos reforça a importância de práticas adequadas de descarte, visto que muitos desses itens não são recicláveis e podem demandar tratamento especial para minimizar impactos ambientais. Esses materiais, juntamente com os resíduos sanitários, são classificados como rejeitos e devem ser destinados ao aterro sanitário.

3.5 PROGRAMA DE COLETA SELETIVA

A ausência de um programa de coleta seletiva na escola impacta diretamente na segregação e destinação correta dos resíduos. Os resultados indicam que a maioria dos resíduos gerados acaba sendo classificada como rejeito, o que reduz significativamente o potencial de reciclagem e aumenta o volume enviado para o aterro sanitário. Implementar um Programa de Coleta Seletiva permitiria uma separação adequada dos resíduos na fonte, reduzindo o desperdício e aumentando a eficiência da gestão.

O projeto “Recicla aos Montes” é uma iniciativa da Prefeitura de Montes Claros, criada para incentivar a coleta seletiva e reduzir o volume de resíduos destinados ao aterro sanitário. O programa inclui parcerias com cinco organizações de catadores de materiais recicláveis que prestam serviços de coleta seletiva na área urbana do município. Entre elas, está a ECOGALPÃO – Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis da Região do Grande Santos Reis, que atende a área onde a escola está situada. Essa parceria facilita a integração do gerenciamento de resíduos da escola ao sistema de coleta seletiva já existente, permitindo que os materiais recicláveis sejam corretamente encaminhados e promovendo a inclusão social dos catadores, além de fortalecer a cultura de sustentabilidade na comunidade escolar. Sendo viável que os materiais potencialmente recicláveis da escola sejam enviados para essa cooperativa.

3.6 PROGRAMA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL

A falta de separação adequada dos resíduos evidencia a necessidade de um Programa de Educação Ambiental contínuo na escola. Este programa deve incluir atividades educativas, como palestras, oficinas e campanhas de conscientização, para ensinar alunos e funcionários sobre a importância da separação correta e os impactos dos resíduos no meio ambiente. A inserção de temas relacionados à gestão de resíduos sólidos no currículo escolar e a realização de projetos de reciclagem e compostagem podem promover o engajamento e a sensibilização da comunidade escolar, transformando os alunos em agentes multiplicadores de boas práticas ambientais. Essa prática está em conformidade com a Política Nacional de Educação Ambiental, estabelecida pela Lei nº 9.795:1999, que determina a inclusão da educação ambiental em todos os níveis de ensino como um processo contínuo e permanente.

3.7 ANÁLISE DE CUSTOS E VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise de custos e viabilidade econômica para a implementação de práticas sustentáveis de gestão de resíduos sólidos na escola considera os investimentos necessários para a separação adequada dos resíduos, além das parcerias com cooperativas de reciclagem.

3.7.1 INVESTIMENTO INICIAL NA SEPARAÇÃO DE RESÍDUOS

Para implementar o sistema de coleta seletiva na escola, o investimento inicial será destinado à aquisição de lixeiras específicas para a separação de resíduos, que serão classificadas em três

categorias: materiais secos recicláveis, orgânicos e rejeitos. As lixeiras para materiais secos recicláveis serão destinadas ao descarte de papel/papelão, plásticos, metais e vidros, materiais que podem ser reciclados. As lixeiras para **resíduos** orgânicos serão utilizadas para resíduos biodegradáveis, como restos de alimentos, cascas de frutas e outros materiais que poderão ser compostados. Já as lixeiras para **rejeitos** serão destinadas aos resíduos não recicláveis ou contaminados, que devem ser descartados adequadamente.

Essas lixeiras serão posicionadas em pontos estratégicos da escola, como salas de aula, biblioteca, pátio, quadra e cantina, facilitando a segregação dos resíduos. Além da compra desses recipientes, será necessário investir em treinamentos e capacitações para funcionários e alunos, assegurando que todos estejam aptos a realizar a separação correta dos resíduos e contribuir para a eficiência do sistema.

3.7.2 PARCERIAS COM COOPERATIVAS DE RECICLAGEM

Para otimizar a gestão de resíduos e reduzir custos, a escola pode firmar uma parceria com a ECOGALPÃO – Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis da Região do Grande Santos Reis, responsável pela coleta seletiva na área onde a escola está localizada. Essa parceria permitiria a coleta dos materiais recicláveis e a destinação adequada desses materiais, garantindo seu reaproveitamento e redução do volume de resíduos enviados ao aterro sanitário.

Essa parceria não só beneficia a escola, mas também tem um impacto social significativo ao apoiar os catadores de materiais recicláveis. Muitas vezes, esses profissionais estão em situação de vulnerabilidade social e econômica, e a colaboração com a cooperativa oferece uma fonte de trabalho e renda para essas pessoas, contribuindo diretamente para a inclusão e melhoria das condições de vida. Ao colaborar com a cooperativa, a escola fortalece o retorno social da gestão de resíduos, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico local.

3.7.3 COMPOSTAGEM DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS

A compostagem dos resíduos orgânicos gerados na escola é uma prática sustentável que transforma materiais como restos de alimentos e folhas em composto rico em nutrientes. Essa prática contribui para a redução da quantidade de resíduos enviados para aterros e promove uma gestão mais eficiente dos resíduos orgânicos da instituição.

Uma possível melhoria seria a integração da escola ao projeto “Composto aos Montes”, uma iniciativa da Prefeitura de Montes Claros, por meio das secretarias municipais de Serviços Urbanos (SSU) e de

Agricultura e Abastecimento. O projeto tem como objetivo reduzir e melhor gerir os resíduos orgânicos gerados na Central de Abastecimento do Norte de Minas (Ceanorte) e no Mercado Municipal Christo Raeff. A compostagem dos resíduos orgânicos da escola poderia ser incorporada a essa iniciativa, permitindo que o material gerado na instituição fosse tratado no mesmo processo. O composto resultante seria destinado ao uso nas áreas verdes municipais e na agricultura familiar de Montes Claros. O custeio do projeto é garantido por recursos que seriam destinados ao envio de resíduos ao aterro sanitário, tornando a integração financeiramente viável e benéfica para a cidade.

3.7.4 VIABILIDADE ECONÔMICA A LONGO PRAZO

A implementação do sistema de separação de resíduos e a parceria com a cooperativa apresentam potencial de viabilidade econômica a longo prazo. A gestão adequada dos materiais recicláveis, por meio da coleta seletiva e da colaboração com a cooperativa de catadores, traz benefícios tanto para a escola quanto para a comunidade local. A cooperativa realiza a destinação correta dos materiais recicláveis e conta, frequentemente, com pessoas que estão em situação de vulnerabilidade social, oferecendo a essas famílias uma fonte de renda e contribuindo para a economia local.

A compostagem dos resíduos orgânicos gerados na escola, em parceria com o projeto “Composto aos Montes”, permitirá que o material seja tratado adequadamente, resultando em um composto rico em nutrientes. Esse composto pode ser utilizado nas áreas verdes da escola, melhorando o ambiente escolar e reduzindo a necessidade de insumos externos.

3.8 SUSTENTABILIDADE NA ESCOLA: BENEFÍCIOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS

A implementação de práticas sustentáveis, como a captação de água da chuva e o gerenciamento de resíduos sólidos, traz benefícios nos três pilares da sustentabilidade. Ambientalmente, a captação de água da chuva reduz a demanda por água potável e contribui para a preservação dos recursos naturais. Além disso, a separação e compostagem de resíduos sólidos ajudam a diminuir o volume de resíduos enviados ao aterro sanitário, promovendo a reciclagem e a reutilização, aumentando a vida útil do aterro, com uma posterior ampliação da prática na cidade. No aspecto econômico, a utilização da água da chuva diminui os custos com o consumo de água potável. A gestão dos materiais recicláveis, por meio da parceria com cooperativas de catadores, contribui para a inclusão social, proporcionando uma fonte de renda para muitas pessoas que, frequentemente, estão em situação de vulnerabilidade. Socialmente, o envolvimento da comunidade escolar, por meio de ações educativas e parcerias com

cooperativas de reciclagem, fortalece a conscientização ambiental e fomenta um ciclo de benefícios sustentáveis para a escola.

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a implementação de práticas sustentáveis na Escola Estadual Secundino Tavares, com foco na captação de água da chuva e na gestão de resíduos sólidos. A análise revelou que a escola possui condições favoráveis para adotar essas práticas, como a pluviometria local e a área disponível para a instalação do sistema de captação. A implementação dessas soluções pode contribuir para a redução do consumo de água potável e melhorar a gestão de resíduos, beneficiando tanto o meio ambiente quanto a conscientização da comunidade escolar.

A captação de água da chuva apresenta grande potencial, com a possibilidade de reduzir significativamente o uso de água potável, especialmente durante períodos de seca. Embora o payback estimado de 13 anos seja relativamente longo, esse retorno é justificado não apenas pela economia gerada, mas também pelos benefícios educacionais e pelo fortalecimento da cultura de sustentabilidade na escola. Além disso, o sistema pode funcionar como um recurso pedagógico valioso, promovendo a educação ambiental de maneira prática e envolvendo os alunos em ações de preservação.

No gerenciamento de resíduos sólidos, foi identificada uma predominância de resíduos orgânicos, em grande parte devido ao desperdício de alimentos. A adoção de práticas como a compostagem e a segregação adequada dos materiais recicláveis são essenciais para a eficiência do sistema. No entanto, antes de implementar essas práticas, é fundamental avaliar o sistema atual de gerenciamento de resíduos sólidos da instituição. Uma análise detalhada permitirá identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria, possibilitando a adequação das práticas existentes e a integração de novas medidas de gestão ambiental. A implementação de um programa de coleta seletiva, junto a um programa educativo contínuo para alunos e funcionários, ajudará a melhorar a separação e destinação dos resíduos. A viabilidade dessas práticas depende de um investimento inicial em infraestrutura e na capacitação da comunidade escolar, resultando em uma gestão ambiental mais eficiente e na formação de cidadãos conscientes.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.527: Água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10844: instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro, 1989
- ARSAE-MG - Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais. Tarifas. Disponível em: <https://www.arsae.mg.gov.br/tarifas/>. Acesso em: 04 set. 2024.
- BARBIERI, J. C. et al. Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. Revista de administração de empresas, v. 50, p. 146-154, 2010.
- BRASIL. Lei n. 12.305 – 2 abr. 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 2 de agosto de 2010.
- BRASIL. Lei nº 9.795 – 27 abr. 1999. Institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 28 abr. 1999.
- BRASIL. Banco Central do Brasil. Taxa Selic – Sistema Especial de Liquidação e Custódia. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br>. Acesso em: 01 nov. 2024
- ENGELMAN, R.; GUISSO, R. M.; FRACASSO, E. M. Ações de Gestão Ambiental nas Instituições de Ensino Superior: o que têm sido feito por elas? Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 3, n. 1, p. 22-33, 2009.
- FERREIRA, L. C. et al. Educação ambiental e sustentabilidade na prática escolar. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 14, n. 2, p. 201-214, 2019.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 27 abr. 2024.
- PREFEITURA DE MONTES CLAROS. Geografia. Disponível em: <https://portal.montesclaros.mg.gov.br/cidade/geografia>. Acesso em: 04 set. 2024.
- RIGHETTO, A.M. Hidrologia e recursos hídricos. São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.
- SECRETARIA DE SERVIÇOS URBANOS DE MONTES CLAROS. Projeto Composto aos Montes. Disponível em: <https://ssu.montesclaros.mg.gov.br/residometro/composto-aos-montes>. Acesso em: 01 nov. 2024.
- SECRETARIA DE SERVIÇOS URBANOS DE MONTES CLAROS. Projeto Recicla aos Montes. Disponível em: <https://ssu.montesclaros.mg.gov.br/residometro/projeto-recicla-aos-montes>. Acesso em: 01 nov. 2024.

SINAPI-MG - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_648. Acesso em: 01 nov. 2024.

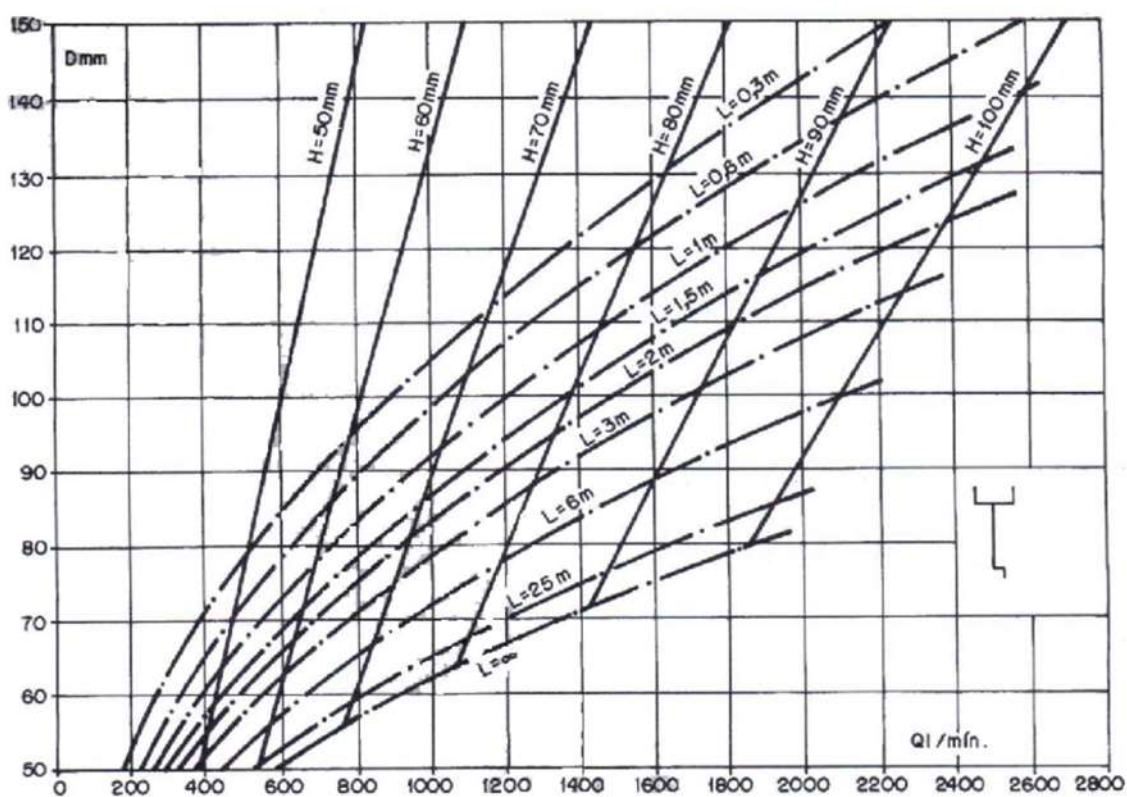
SOARES, W. H. S.; ABDALA, E. C.; CEZARINO, L. O. Engajamento e conhecimento de estudantes sobre sustentabilidade à luz dos princípios do PRME. Anais do Encontro Internacional sobre Gestão Ambiental e Meio Ambiente (ENGEMA), São Paulo, Brasil, 2017.

TOMAZ, P. Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras. 2 ed. São Paulo: Navegar, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Plúvio 2.1: chuvas intensas para o Brasil [software]. Viçosa: Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos, 2024.

ANEXOS

Anexo 1 - Ábaco de Dimensionamento - Calha com Saída em Aresta Viva.



Fonte: ABNT NBR 10844 (1989)

Capítulo 4



10.37423/250810252

PATOLOGIAS EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE FACHADAS: MEDIDAS PREVENTIVAS

Ellana Cássia Araújo Dantas de Almeida

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE
SANTANA



1. INTRODUÇÃO

O setor da Construção Civil vem passando por um processo de evolução através de programas de aceleração de crescimento, buscando meios de melhoria no desempenho perante o mercado competitivo e exigente, em termos de qualidade, motivando as empresas pela busca do aprimoramento dos processos de produção aliado a redução de custos e prazos de execução, com ganhos na qualidade dos produtos e segurança da obra, através da racionalização da produção.

No entanto, a mão de obra pouco qualificada e com baixos salários ainda é um problema que norteia o setor da construção civil, gerando serviços que não acompanham a evolução tecnológica como os revestimentos empregados na construção das edificações onde, por muitas vezes, são desconsideradas as técnicas de aplicação e a forma de produção, acarretando em espessuras de revestimento acima da recomendada, bem como o desrespeito ao intervalo mínimo de aplicação entre as camadas, o uso de cimento inadequado e a falta de cuidado tanto na produção de argamassa como no preparo do substrato.

Todos esses fatores geram desperdício de material e, conseqüentemente, um aumento do custo do revestimento, contribuindo para o aparecimento de manifestações patológicas, além de agredirem o meio ambiente, quando da sua correção, uma vez que geram resíduos. Estudos apontam ainda que a falta de um planejamento também é um dos fatores causadores das patologias em revestimentos argamassados, bem como a inexistência de projeto, a não conformidade dos materiais e a falta de manutenção preventiva nas edificações.

Dentre as patologias mais comuns encontradas nas argamassas de revestimentos das fachadas podem ser citadas os descolamentos, vesículas, fissuras, eflorescências, falhas relacionadas à umidade, manchas e bolor, contaminação atmosférica e contaminação ambiental por substâncias agressivas (COSTA, 2005).

De acordo com Segat (2005) os problemas com as argamassas de revestimentos, principalmente de fachadas, causam grande insatisfação entre os usuários, uma vez que, após a conclusão de uma construção, apenas a camada de revestimento permanece exposta de modo a proporcionar conforto funcional e estético, além dessa camada representar bem um formador da imagem do imóvel, sugestionando o que se deve encontrar em seu interior.

Nesse contexto, a adoção de medidas preventivas tem como objetivo minimizar ou eliminar as patologias oriundas das argamassas de revestimentos argamassados, tais como o projeto de revestimento da fachada que determina os materiais utilizados, geometria, juntas, reforços, pré-

moldados, acabamentos, os procedimentos de execução e controle, bem como diretrizes para manutenção, específicos para uma determinada obra, de forma a se obter um desempenho satisfatório do revestimento ao longo do tempo.

2. ARGAMASSAS

Argamassa é um material de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais (CARASEK, 2007).

A NBR 13.281 (ABNT, 2005) define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

De acordo com a NBR 13.749 (ABNT, 2013), as espessuras admissíveis para os ambientes internos e externos, são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – Espessuras admissíveis de revestimentos internos e externos (mm)

Revestimento	Espessura
Parede interna	$5 \leq e \leq 20$
Parede externa	$20 \leq e \leq 30$
Tetos interno e externo	$e \leq 20$

FONTE: NBR 13.749 (ABNT, 2013)

“Além da desvalorização natural do imóvel devido aos aspectos visuais, a base dos revestimentos (alvenaria ou concreto), sem o adequado acabamento final, torna-se vulnerável às infiltrações de água e gases, o que consequentemente conduz a sérias deteriorações no interior dos edifícios, podendo ser as mesmas de ordem estética ou até mesmo estrutural” (CARVALHO JR. et al., 1999).

Maciel et al. (1998) preconizam que o revestimento de argamassa pode ser uma das partes integrantes das vedações de um edifício, devendo apresentar um conjunto de propriedades que permitam o cumprimento das suas funções, auxiliando a obtenção do adequado comportamento das vedações e, consequentemente, do edifício considerado como um todo.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

De uma forma geral, os revestimentos podem ser classificados de acordo com o tipo de vedação a revestir, o ambiente de exposição, o mecanismo de fixação à base e a continuidade, conforme o Quadro 1 a seguir. Devendo, cada revestimento, apresentar um conjunto de características próprias.

QUADRO 1– Classificação geral dos revestimentos de argamassa

Critério de Classificação	Tipo
tipo de vedação a revestir	vedação horizontal inferior vedação horizontal superior vedação vertical
ambiente de exposição	internos: áreas secas ou áreas molhadas exteriores (fachada)
mecanismo de fixação à base	aderentes fixados por dispositivos não aderentes
continuidade	monolíticos ou contínuos modulares

Fonte: Maciel et al. (1998)

2.1.1 DE ACORDO COM A FUNÇÃO

As argamassas apresentam diversas funções, dentre elas, revestimento de fachada e revestimentos internos, fixação de telhas, assentamento de blocos de alvenaria, argamassas de concreto, apresentando a característica da durabilidade como de relevada importância, em especial para as argamassas de revestimentos de fachadas, por estarem diretamente ligadas às agressões ambientais (METALSSI, et al., 2012).

As argamassas de revestimento de fachada ainda possuem as funções de proteger os elementos de vedação dos edifícios da ação direta dos agentes agressivos, auxiliar as vedações no cumprimento das suas funções (isolamento termo-acústico e estanqueidade à água e aos gases), regularizar a superfície dos elementos de vedação, servindo de base regular e adequada ao recebimento de outros revestimentos ou constituir-se no acabamento final, além de contribuir para a estética da fachada (MACIEL et al., 1998), conforme apresentado no Quadro 2. No entanto, não se caracteriza como função da argamassa de revestimento o fato de ocultar imperfeições oriundas da falta de cuidado na execução da estrutura e da alvenaria. [

QUADRO 2 - Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção

TIPOS DE ARGAMASSAS	FUNÇÃO	PROPRIEDADES
Argamassa de assentamento de alvenaria (elevação)	Unir as unidade de alvenaria e ajudá-las a resistir aos esforços laterais; Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos; Absorver deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita; Selar as juntas	Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e retenção de água); Aderência; Capacidade de absorver deformações; Resistência mecânica
Chapisco	Garantir aderência entre a base e o revestimento de argamassa; Contribuir com a estanqueidade da vedação	Aderência
Emboço e camada única	Proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo; Integrar o sistema de vedação dos edifícios contribuindo com diversas funções (estanqueidade, etc.); Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos.	Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e adesão inicial); Baixa retração; Aderência; Baixa permeabilidade à água; Capacidade de absorver deformações; Resistência mecânica
Contrapiso	Regularizar a superfície para receber acabamento (piso)	Aderência; Resistência mecânica
Argamassa colante (assentamento de revestimento cerâmico)	“Colar” a peça cerâmica ao substrato; Absorver deformações naturais a que o sistema de revestimento cerâmico estiver sujeito.	Trabalhabilidade (retenção de água, tempo em aberto, deslizamento e adesão inicial); Aderência; Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) – principalmente para fachadas.
Argamassa de rejuntamento (das juntas de assentamento das peças cerâmicas)	Vedar as juntas; Permitir a substituição das peças cerâmicas; Ajustar os defeitos de alinhamento; Absorver pequenas deformações do sistema	Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e adesão inicial); Baixa retração; Aderência; Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) – principalmente para fachadas
Argamassa de reparo de estruturas de concreto	Reconstituição geométrica de elementos estruturais em processo de recuperação	Trabalhabilidade; Aderência ao concreto e armadura originais; Baixa retração; Resistência mecânica; Baixa permeabilidade e absorção de água (durabilidade).

Fonte: CARASEK (2007), adaptado pela autora

2.1.2 DE ACORDO COM O MATERIAL UTILIZADO

Segundo Fiorito (2009), as argamassas podem ser classificadas de acordo com o tipo de material utilizado, conforme descrição abaixo:

a) Argamassa de cimento-As argamassas de cimento são utilizadas em alvenarias de alicerces pela resistência exigível, pela difícil trabalhabilidade e, especialmente, pela condição favorável de endurecimento, também usada para chapisco pela sua resistência em curto prazo, nos revestimentos onde as condições de impermeabilidade são exigíveis, como por exemplo no interior de reservatórios de água e outras obras hidráulicas ou em pisos cimentados onde se exige resistência mecânica e ao desgaste. Quando utilizada como emboço, pode apresentar fissuras e deslocamento quando a espessura da camada for maior de 2 cm;

b) Argamassa de cal - Esse tipo de argamassa é utilizada para emboço e reboco, devido a

sua plasticidade, elasticidade e as condições favoráveis de endurecimento e proporcionar o acabamento esmerado, plano e regular, além de também ser utilizado no assentamento de alvenarias de vedação;

c) Argamassa mista – Adiciona-se cal à argamassa de cimento para torná-la mais plásticas e de fácil acabamento, sendo denominada de argamassa mista de cimento e cal. São utilizadas nas alvenarias estruturais ou não, de tijolos ou blocos, nos contra pisos, no assentamento de revestimentos cerâmicos em pisos ou paredes pelo método convencional, no preparo de paredes e pisos para receberem revestimentos cerâmicos aplicados com argamassa colante, e, especialmente, nos emboços de forros e paredes.

2.1.3 DE ACORDO COM A FORMA DE PREPARO

Segundo Carvalho Jr. (2005), as argamassas podem ser classificadas quanto à forma de preparo: preparadas em obra, dosadas em central ou industrializadas (que são comercializadas ensacadas ou em silos), conforme apresentado no Quadro 3. No entanto, cada um desses tipos de argamassa interfere nas atividades de produção e no seu sequenciamento, na escolha das ferramentas e equipamentos necessários para a produção, bem como na organização adequada do próprio canteiro de obras (MACIEL et al., 1998).

QUADRO 3 – Classificação das argamassas, de acordo com a produção

ARGAMASSAS	ATIVIDADES	EQUIPAMENTOS
PREPARADA EM OBRA	Medição, em massa ou em volume, das quantidades de todos os materiais constituintes; transporte desses materiais até o equipamento de mistura; colocação dos materiais no equipamento.	Equipamento de mistura (betoneira ou argamassadeira); recipientes para a medição dos materiais (carrinhos-de-mão ou padiolas); pás; peneiras para eliminar torrões e materiais estranhos ao agregado.
INDUSTRIALIZADA (FORNECIDA EM SACOS)	Colocação da quantidade especificada do material em pó no equipamento de mistura, seguida da adição da água.	Argamassadeira e os recipientes para a colocação da água.
FORNECIDA EM SILOS	Medição mecanizada. Um equipamento de mistura pode ser acoplado no próprio silo, ou outro equipamento de mistura específico, localizado nos pavimentos do edifício, efetua a mistura.	Equipamento de mistura específico.

Fonte: Maciel et al. (1998), adaptado pela autora (2018).

As argamassas preparadas na obra (canteiro) necessitam de uma central de produção para fabricá-las, assim como ocupam um grande espaço para a estocagem individual de cada material que será utilizado para a confecção da mesma.

De acordo com a NBR 7200 (ABNT, 1998), as argamassas dosadas em central devem ser armazenadas em recipientes impermeáveis e protegidas de aeração e incidência de raios solares, com tempo máximo de validade a ser definido pelo fornecedor.

As argamassas industrializadas, assim como as argamassas preparadas na obra, também necessitam de uma central de produção, porém, utilizando um espaço menor para a fabricação, tendo em vista que as argamassas estarão ensacadas, o que causa uma diminuição das áreas de estocagem.

Já as argamassas fornecidas em silos, apresentam diversas vantagens, com relação as demais, uma vez que dispensam a organização de uma central de produção, necessitando apenas de um local para a instalação do silo, além de que todos os materiais constituintes da argamassa ficam armazenados no próprio silo, acarretando na diminuição das áreas de estocagem. Outra vantagem é que a mistura dos materiais é feita no equipamento acoplado ao silo, eliminando a interferência do transporte.

De acordo com Maciel et al. (1998), os equipamentos para o transporte da argamassa até o local de aplicação são variáveis. No caso da argamassa dosada na obra ou da industrializada produzida em uma central no canteiro, o transporte pode ser feito pelo elevador, pelo guincho de coluna externo (velox) ou pela grua. Existe, também, a possibilidade de se produzir a argamassa industrializada no próprio pavimento onde está sendo executado o revestimento. Dessa forma, não é preciso fazer o transporte vertical da argamassa pronta. Enquanto que para a argamassa fornecida em silos, o transporte desse material em pó pode ser feito por meio de mangueiras até o equipamento de mistura específico, localizado no próprio pavimento em que está sendo executado o revestimento.

2.1.4 DE ACORDO COM A FORMA DE APLICAÇÃO

Segundo Cavani (2004), as argamassas de chapisco podem ser classificadas quanto à forma de aplicação: aplicadas sobre a base manualmente (lançamento manual da argamassa através de colher), através de rolo para textura ou desempenadeira metálica, ou ainda, através de projeção mecânica (lançamento mecânico através de bombas com mangote na ponta ou através de jateador a ar comprimido), conforme mostrado na Figura 1.

FIGURA 1 – Formas de aplicação do chapisco



FONTE: Google (2018)

A NBR 7200 (ABNT, 1998) preconiza que a argamassa de chapisco deve ser aplicada por lançamento, com o cuidado de não cobrir completamente a base, apresentando uma consistência fluida, para assegurar maior facilidade de penetração da pasta de cimento na base a ser revestida e melhorando a aderência na interface revestimento-base.

Quanto ao emboço (muitas vezes confundido com o reboco), este consiste em cobrir e regularizar a superfície do substrato ou chapisco, além de propiciar uma superfície que permite receber outra camada, de reboco, de revestimento cerâmico, ou outro procedimento, ou ainda um tratamento decorativo (que se constitua no acabamento final).

Candia (1998) define emboço como sendo uma camada de argamassa aplicada que possui aderência ao substrato, apresenta textura adequada à aplicação de outra camada subsequente, apresentando granulometria um pouco mais grossa do que as demais argamassas (camada única e reboco, por exemplo), e o acabamento deve ser somente sarrafeado (com textura áspera para melhorar a aderência quando da aplicação dos outros materiais, como por exemplo, argamassa colante no assentamento de peças cerâmicas).

Na sequência vem o reboco, que representa a camada de revestimento utilizada para cobrir o emboço, propiciando uma superfície que permite receber o revestimento decorativo ou se constitua no acabamento final, com espessura fina para constituir uma superfície lisa, contínua e íntegra.

Bauer (2005), em seus estudos, afirma que o revestimento de camada única deve ser executado diretamente sobre os substratos, sem a necessidade da aplicação anterior do emboço, uma vez que a camada única tem função dupla, devendo atender as exigências do emboço e da camada de acabamento (reboco), sendo necessárias operações específicas de execução, como corte, sarrafeamento e acabamento, realizadas momentos após a aplicação. É importante ressaltar que a argamassa para ser sarrafeada deve perder a plasticidade inicial (necessária à operação de aplicação), e uma vez executado o sarrafeamento, a argamassa deve “esfarelar” pelo corte da régua. O momento para execução do sarrafeamento é feito por avaliação tátil do pedreiro. Sarrafeamento precoce induz ao surgimento de fissuração, e sarrafeamento retardado exige grande esforço para o corte da argamassa. Portanto, deve-se cuidar quando da definição da extensão dos panos a revestir, dimensionando equipes com produtividade adequada à execução do revestimento. As operações de acabamento (desempeno, camurça, outras) ocorrem em momentos subsequentes, e dependem das características que se desejam para o revestimento final.

2.1.5 DE ACORDO COM AS PROPRIEDADES

Os revestimentos de argamassa devem apresentar um conjunto de propriedades específicas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, para poderem cumprir as funções corretamente em diferentes situações de uso.

Para Maciel e Melhado (1999), no estado fresco, o conjunto das propriedades da argamassa plástica deve facilitar a aplicação da argamassa sobre a base, além de proporcionar boa aderência inicial e um adequado processo de endurecimento, enquanto que no estado endurecido, as propriedades da argamassa devem diminuir a formação de fissuras no revestimento, mantendo aderência à base, absorvendo pequenas deformações, resistindo às ações externas e proporcionando durabilidade ao revestimento. Tais propriedades estão demonstradas na Figura 2 e detalhadas abaixo, conforme Maciel et al. (1998):

- **Trabalhabilidade** - Uma argamassa é considerada trabalhável quando a colher de pedreiro deixa penetrar facilmente, sem ser fluida, quando se mantém coesa ao ser transportada, mas não adere à colher ao ser lançada, distribui-se facilmente, preenchendo todas as reentrâncias da base e não endurece rapidamente quando aplicada;
- **Plasticidade** - É a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a redução das tensões de deformação;

- **Retenção de água** - Representa a capacidade da argamassa reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativas, promovendo a adequada hidratação do cimento e consequente ganho de resistência;
- **Aderência inicial** - Depende das outras propriedades da argamassa no estado fresco, das características da base de aplicação, como a porosidade, rugosidade, condições de limpeza da superfície de contato efetivo entre a argamassa e a base. Para se obter uma adequada aderência inicial, a argamassa deve apresentar a trabalhabilidade e retenção de água adequada à sucção da base e às condições de exposição, e ainda ser comprimida após a sua aplicação para promover o maior contato com a base que deve estar limpa, com rugosidade adequada e sem oleosidade;
- **Retração na secagem** - Ocorre em função da evaporação da água de amassamento da argamassa e, também, pelas reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes, podendo causar a formação de fissuras no revestimento;
- **Aderência no estado endurecido** – É a propriedade do revestimento manter-se fixo ao substrato, através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-revestimento. É resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa. A aderência no estado endurecido depende das propriedades da argamassa no estado fresco, dos procedimentos de execução do revestimento, da natureza e características da base e da sua limpeza superficial;
- **Permeabilidade** – Propriedade muito relacionada ao conjunto base-revestimento, representada pela passagem de água pela argamassa, que permite a percolação da água tanto no estado líquido, como de vapor, e depende da natureza da base, da composição e dosagem da argamassa, da técnica de execução, da espessura da camada de revestimento e do acabamento final. Quando existem fissuras no revestimento, o caminho para percolação da água é direto até a base e, com isso, a estanqueidade da vedação fica comprometida;
- **Durabilidade** - Propriedade do período de uso do revestimento, resultante das propriedades do revestimento no estado endurecido e que reflete o desempenho do revestimento frente as ações do meio externo ao longo do tempo. Alguns fatores prejudicam a durabilidade do revestimento, como a fissuração; a espessura excessiva; a proliferação de microorganismos, a qualidade das argamassas e a falta de manutenção;
- **Elasticidade** - Capacidade que a argamassa, no estado endurecido, tem de se deformar sem apresentar ruptura, quando sujeita a solicitações diversas, e de retornar à dimensão original inicial, quando cessam estas solicitações, sendo, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, dessa forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa à base e,

consequentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade (MACIEL et al., 1998):

FIGURA 2 – Propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido



FONTE: Baía; Sabbatini (2001), adaptado pela Autora

Para Maciel et al. (1998), no estado fresco, uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar, apresenta melhor trabalhabilidade. Já no estado endurecido, as propriedades da argamassa equivalem às propriedades do próprio revestimento.

3. SISTEMAS DE REVESTIMENTOS

Costa (2005) define o sistema de revestimento de argamassa como um conjunto de técnicas para a produção de revestimentos argamassados que resultam na combinação de especificações dos materiais e dos procedimentos, além dos métodos para a execução que conduza ao desempenho desejado, com a indicação do número de camadas do revestimento, espessuras das camadas, o tipo de argamassa a ser utilizado, as especificações dos traços e dos materiais, a técnica de execução e o tipo de acabamento superficial, entre outros.

De acordo com a NBR 13.749 (ABNT, 2013), os revestimentos de paredes e tetos podem ser constituídos por chapisco e emboço, como revestimento de camada única, ou por chapisco, emboço e reboco.

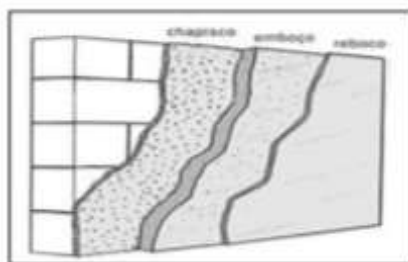
Em se tratando das camadas do revestimento, pode-se afirmar que é compreendido por três camadas: chapisco, emboço e reboco como mostra a Figura 3, no entanto o reboco é uma técnica que pode substituir a aplicação de emboço, feito com areia grossa, com função de preencher e corrigir imperfeições antes do revestimento argamassado (ABCP, 2013).

Para Baía e Sabbatini (2001), no caso dos revestimentos formados por duas camadas (emboço e reboco), cada uma delas cumpre funções específicas, sendo o emboço representado pela camada de regularização da base e o reboco uma camada de acabamento, enquanto que nos revestimentos

formados por uma única camada, esta cumpre as duas funções de regularização da base e de acabamento.

Tanto a camada de emboço e reboco, como a camada de massa única, podem ser aplicados sobre uma camada de base, denominado de chapisco, e podem receber sobre a sua superfície uma camada de acabamento decorativo, como por exemplo, pintura, textura acrílica ou, até mesmo, revestimentos cerâmicos (BAÍA; SABBATINI, 2001).

FIGURA 3 - Camadas de revestimento (anterior)



FONTE: (ABCP, 2002).

Carasek (2007) define chapisco, emboço, reboco, camada única e monocapa, como especificados abaixo:

Chapisco - Camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento.

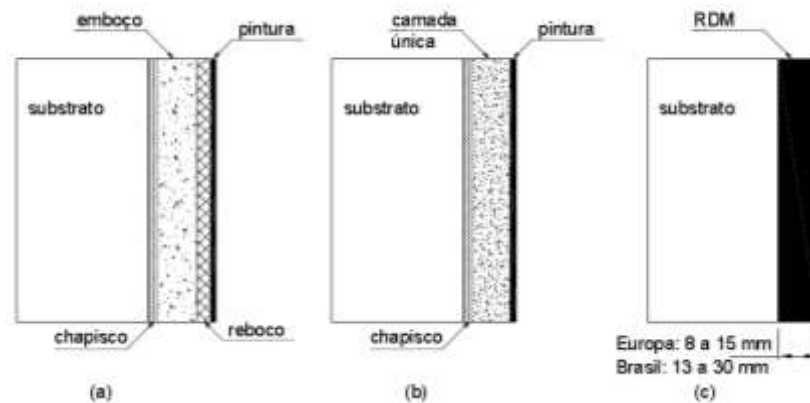
Emboço - Camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo (por exemplo, cerâmica).

Reboco - Camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber o revestimento decorativo (por exemplo, pintura) ou que se constitua no acabamento final.

Camada única - Revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como, por exemplo, a pintura; também chamado popularmente de “massa única” ou “reboco paulista” é atualmente a alternativa mais empregada no Brasil.

Revestimento decorativo monocamada (RDM) ou monocapa - Trata-se de um revestimento aplicado em uma única camada, que faz, simultaneamente, a função de regularização e decorativa, muito utilizado na Europa; A argamassa de RDM é um produto industrializado, ainda não normalizado no Brasil, com composição variável de acordo com o fabricante, contendo geralmente: cimento branco, cal hidratada, agregados de várias naturezas, pigmentos inorgânicos, fungicidas, além de vários aditivos (CARASEK, 2007).

FIGURA 4 - Camadas de revestimento (atual)



FONTE: Carasek (2007)

A Figura 4 apresenta diversas formas de revestimento de parede, sendo a letra (a) composto por um sistema de revestimento antigo e pouco utilizado atualmente, formado pelas camadas de emboço e reboco. Na letra (b) o sistema de revestimento é composto apenas por camada única, sendo mais usual nas construções brasileiras, e a letra (c) refere-se a um sistema de revestimento decorativo monocamada (RDM) ou comumente denominado de monocapa. Em todas as situações, a pintura é aplicada após a última camada de revestimento.

Em particular, o revestimento de argamassa de fachada, quando submetido diretamente a ação dos agentes agressivos, deve cumprir as suas funções para auxiliar o adequado comportamento da vedação exterior e, conseqüentemente, do edifício (MACIEL; MELHADO, 1999).

Maciel e Melhado (1999) ainda afirmam que o revestimento de argamassa de fachada é visto, muitas vezes, apenas como uma forma de esconder as imperfeições da base (estrutura e vedações), não sendo valorizadas as suas importantes funções. Sendo este fato evidenciado pelas decisões tomadas na própria obra, com conhecimento adquirido na prática.

As bases de aplicação das argamassas de revestimentos para uma estrutura de edifício podem ser de concreto armado e alvenaria de vedação, como mostrado no Quadro 4.

Com relação à alvenaria de vedação, esta pode ser constituída por tijolos ou blocos, dos quais os mais utilizados são os blocos cerâmicos, os blocos de concreto e de concreto celular e os blocos de sílico-calcário, cada um deles apresentando suas características próprias que influenciam no comportamento da alvenaria como um todo (BAÍÁ; SABBATINI, 2001).

QUADRO 4 – Características das bases de aplicação do revestimento

BASES	CARACTERÍSTICAS
Alvenaria (diferentes componentes) Estrutura (concreto)	Absorção de água
	Porosidade
	Resistência mecânica
	Movimentações higroscópicas
	Rugosidade
	Homogeneidade

FONTE: Baía; Sabbatini (2001), adaptado pela autora

Baía e Sabbatini (2001) ainda afirmam que as características diferentes das bases de aplicação afetam, significativamente, as propriedades dos revestimentos das argamassas, devendo ser consideradas desde o momento da definição do tipo da argamassa a ser utilizado, como é o caso da absorção da água, da prosidade e da rugosidade da base que influenciam na aderência da argamassa.

4. PROJETO DE REVESTIMENTO DE FACHADA

O projeto de revestimento de argamassa é essencial para a obtenção de um bom desempenho do revestimento da fachada, com o aumento da qualidade e produtividade, além da diminuição das falhas, desperdícios e custos.

Massetto et al. (1998) preconizam que o projeto de revestimento de fachada, composto pelo projeto do produto e projeto do processo, determina qual tecnologia será empregada na execução do revestimento, especificando os materiais e as técnicas que serão adotadas, além de determinar o controle de qualidade a ser utilizado e fornecer os detalhes construtivos que atendam aos requisitos necessários para o revestimento desempenhar sua função, respeitando custo, prazo e vida útil.

Projeto do produto - é a definição do traço em função dos critérios de desempenho como, por exemplo, as condições de exposição e execução, as características da base e a definição das características geométricas do revestimento, como número e espessura das camadas e juntas de trabalho;

Projeto do processo - inclui o planejamento da execução e o projeto para a produção do revestimento, envolvendo o cronograma de atividades, quantificação dos serviços, previsão de suprimentos, procedimentos para preparo da argamassa, métodos e técnicas construtivas a serem adotadas na aplicação do revestimento, disposição e sequência de atividades e uso e características dos equipamentos (MASSETTO et al., 1998).

De acordo com Baía e Sabbatini (2001), o projeto deve definir o tipo de revestimento que será utilizado, o tipo de argamassa que será utilizada, as espessuras das camadas, os detalhes

arquitetônicos e construtivos, as técnicas adequadas para a execução e o padrão de qualidade dos serviços.

Nakamura (2004), afirma que o projeto de revestimento de fachada tem como primeiro passo fornecer toda a discriminação das atividades necessárias, a fim de que as decisões sejam planejadas anteriormente, em vez de serem adotadas no canteiro. O segundo passo consiste na elaboração de um memorial descritivo, orientando o pessoal quanto à especificação e compra de materiais e equipamentos, incluindo desde a escolha da argamassa e definição dos ensaios necessários, até a estocagem, manuseio, transporte e aplicação.

O projeto de revestimento apresenta uma característica evolutiva, quando comparado com os demais projetos de uma obra, uma vez que alguns parâmetros utilizados são aferidos em um determinado instante da obra, como por exemplo, o desaprumo da estrutura, as propriedades reais dos componentes da vedação e as propriedades reais das argamassas de mercado ou dos traços das argamassas produzidas em obra, ficando a conclusão do projeto efetivada somente após a aferição de todos esses parâmetros (CEOTTO et al., 2005).

Alievi e Foppa (2016), afirmam que existem três momentos durante os quais um projeto de revestimento de fachada pode ser elaborado:

(a) Antes do início da obra, juntamente com a elaboração dos outros projetos (arquitetura, estrutura, vedação, etc): a adoção desta escolha permite a integração do projeto com a concepção da obra;

(b) No início da obra, após a conclusão dos projetos da edificação: nesta situação o projeto de revestimento de fachada complementa os demais projetos e define o processo construtivo, limitado pelo orçamento da obra, além do projetista de revestimento ter condições de interagir com os demais projetistas, reduzindo as incompatibilidades entre os projetos.

(c) Durante a obra, após a conclusão da estrutura e final da execução da alvenaria: com esta escolha o projeto de revestimento adapta-se ao processo construtivo definido e pode-se interferir apenas no preparo e aplicação do revestimento.

Para Ceotto et al. (2005), quando o projeto é iniciado com a obra já em andamento, a interação do projetista de revestimento com os demais projetistas da edificação é praticamente nula, sendo que todas as decisões tomadas nos projetos anteriores terão que ser aceitas como condicionantes, podendo, dessa forma, aumentar o risco de desempenho insatisfatório.

Neste sentido, Maciel e Melhado (1999) defendem que a elaboração do projeto de revestimento deve ser feita juntamente e coordenadamente com os projetos das demais partes do edifício, tais como a

estrutura, a alvenaria e as instalações, o que significa tomar decisões relativas ao revestimento antes do início da sua execução, considerando as possíveis interferências entre essas diversas partes do edifício.

O projeto de revestimento externo em argamassa tem como referências os projetos de estrutura, arquitetura, instalações e vedação, as normas técnicas brasileiras (ABNT), as recomendações dos fabricantes de argamassas e dos outros componentes da fachada, e, por fim, os processos de execução e os controles adotados pela construtora (CEOTTO et al., 2005).

Em linhas gerais, Ceotto et al. (2005), afirma que a seqüência de desenvolvimento do projeto de revestimento pode ser realizada da seguinte forma:

- a) Projeto inicial – finalizado antes do início da execução da alvenaria: o projetista apresenta em linhas gerais o partido do projeto, bem como as especificações básicas de desempenho dos materiais;
- b) Verificação de parâmetros – iniciada após o início da alvenaria: deverão ser testados e ensaiados os parâmetros definidos no projeto inicial nas condições de obra (painéis), para definição dos produtos e sistemas com as suas respectivas marcas a serem utilizados. Deve se atentar que esta é a etapa mais demorada do processo, demandando no mínimo 60 a 90 dias para a sua conclusão;
- c) Verificação de desvios geométricos da estrutura, definição da mão-de-obra e equipamentos – executada logo após a conclusão da estrutura;
- d) projeto final – concluído antes do início dos trabalhos de revestimento de fachada (CEOTTO et al., 2005).

A NBR 7200 (ABNT, 1998) sugere que as especificações de projeto para execução do sistema de revestimento de argamassa devem conter pelo menos informações sobre os tipos de argamassa e respectivos parâmetros para definição dos traços; número de camadas; espessura de cada camada; acabamento superficial e tipo de acabamento decorativo. Essa recomendação da norma ainda é bastante simplificada e considera aspectos gerais do sistema de revestimento.

De acordo com os estudos de Maciel e Melhado (1999) sugere-se que um projeto de revestimento de argamassa de fachada deve conter as especificações e informações para a adequada execução do revestimento, conforme exposto na Figura 5, evidenciando informações do projeto do produto e do projeto do processo.

FIGURA 5 – Projeto de revestimento de fachada


FONTE: Costa (2005)

Ceotto et al. (2005) preconizam que a realização de um bom projeto depende da qualidade e disponibilidade dos dados para auxiliar nas decisões do projetista, sendo necessário considerar os seguintes fatores:

a) Condições ambientais - condições de insolação, regime de chuvas, umidade relativa do ar, temperatura, ventos predominantes, poluentes na atmosfera, etc. Tais variáveis são importantes para a formulação das argamassas (retenção de água, permeabilidade), condições e períodos de aplicação, textura da camada decorativa, juntas;

b) Arquitetura - projeto arquitetônico, cores e elementos decorativos. Tais variáveis são importantes para paginação da fachada, elaboração dos reforços e juntas, definição dos pré-moldados;

c) Estrutura - geometria, rigidez e previsão de deformações. Tais variáveis são importantes para definição de juntas, detalhes construtivos das ligações das alvenarias com pilares, vigas ou lajes, preparação da base, definição do chapisco. Estes detalhes condicionam a viabilidade do uso de revestimento de argamassa;

d) Instalações - interferência nas fachadas, como rasgos e aberturas. Tais variáveis são importantes para a definição dos enchimentos e reforços;

e) Vedação - detalhes do projeto, materiais utilizados e suas interferências nos revestimentos de fachada. Tais variáveis são importantes para a definição de juntas e reforços no revestimento de fachada, bem como a definição do chapisco e preparação da base;

f) Processos construtivos - estrutura (sistema de fôrma, velocidade de desfôrma, resistência do concreto, tipologia de protensão), alvenaria (tipo e dimensão dos componentes de vedação), equipamentos (andaime fachadeiro, balancim, elétrico ou não) e mão-de-obra (nível de qualificação) previstos inicial e preferencialmente serão empregados. Estas variáveis são importantes para definições geométricas do projeto, especificação dos materiais da fachada e definição do processo de aplicação da argamassa;

g) Prazos - o cronograma das atividades é importante para a elaboração do planejamento e para a definição de toda a logística de produção.

5. PATOLOGIAS DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS

Os revestimentos apresentam diversas falhas que podem ser originadas por várias causas como deficiências de projeto, falta de conhecimento das características dos materiais empregados e/ou emprego de materiais inadequados, erros de execução (por deficiência de mão-de-obra, desconhecimento ou não observância das Normas Técnicas) ou problemas de manutenção (BAUER, 1994).

As patologias dos revestimentos comprometem a imagem da Engenharia e Arquitetura do País, sendo uma agressão às vistas da população, à integridade das edificações e ferindo o conceito de habitabilidade, direito básico dos proprietários das unidades imobiliárias (CARVALHO JR. et al., 1999).

5.1 ORIGENS DAS PATOLOGIAS

As origens das patologias nos revestimentos de argamassas de fachada associam-se às fases de elaboração de projetos, execução e utilização do revestimento ao longo do tempo.

Na fase de projeto, as patologias podem ocorrer pela ausência do projeto do revestimento ou pela má concepção, pelos detalhes insuficientes ou deficientes dos elementos construtivos, pela seleção inadequada dos materiais ou das técnicas construtivas, visando apenas diminuir os custos e tempo, não levando em consideração o desempenho do revestimento (MACIEL et al., 1998).

Durante a fase de execução, as patologias podem ocorrer em função da não conformidade entre o projetado e o executado, das alterações inadequadas das especificações de projeto, da má qualidade dos materiais, das técnicas inadequadas de produção e controle da argamassa e do revestimento, da mão-de-obra inadequada ou da atuação de agentes não previstos sobre o edifício (MACIEL et al., 1998).

Quanto à fase de utilização, as patologias podem estar associadas à remodelação e/ou alteração mal estudadas, à degradação dos materiais por má utilização dos usuários, bem como ausência ou insuficiência de manutenção.

Vale salientar que todos esses fatores influenciam as propriedades do revestimento de argamassa, afetando o desempenho dessa argamassa ao longo da vida útil esperada, sendo necessário um planejamento prévio que englobe a definição da argamassa como um todo, definição das espessuras das camadas do revestimento, bem como dos detalhes construtivos e dos procedimentos de execução e controle, com o propósito de minimizar a ocorrência dos problemas patológicos no revestimento de argamassa de fachada.

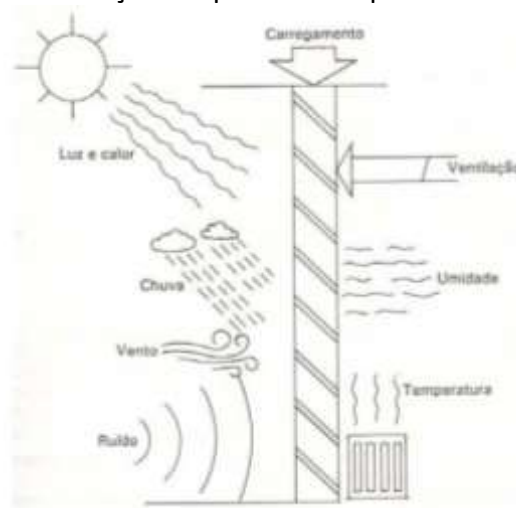
Os estudos de Ceotto et al. (2005) informam que as principais patologias observadas nos revestimentos de fachada são o aparecimento de fissuras e trincas, descolamentos do revestimento e alteração precoce no aspecto original do material, como, por exemplo, a perda da coloração, baixo desempenho e a baixa durabilidade dos materiais empregados.

A patologia nos revestimentos argamassados ocorre devido à qualidade dos materiais utilizados na execução, do traço da argamassa de cimento, da espessura do revestimento, da aplicação desse revestimento, do tipo de pintura, da umidade e da expansão da argamassa de assentamento.

De acordo com a NBR 7200 (ABNT, 1998), a etapa de execução do revestimento é a principal responsável por fenômenos patológicos, motivo pelo qual a norma objetiva o procedimento de execução de revestimento de paredes e tetos, realizados através de um controle da qualidade na construção, por meio de métodos e técnicas adotadas por projetistas e construtores.

Cincotto et al. (1995) afirma que as condições de desempenho de um revestimento de argamassa são afetadas por diversos fatores extrínsecos (agentes climáticos, carregamentos, ação do fogo, poeira, fuligem, microorganismos, gases, movimento de água sobre a superfície, exigências de segurança, habitabilidade, durabilidade e economia) e intrínsecos (a natureza, a granulometria e a proporção dos materiais constituintes, procedimentos de preparação dos substratos de aplicação, propriedades destes substratos, qualidade de execução, espessura final dos revestimentos). A Figura 6 apresenta os elementos externos que atuam sobre as paredes e fachadas dos edifícios.

FIGURA 6 – Solicitações impostas às superfícies das edificações



FONTE: Cincotto et al. (1995)

Em suma, o problema patológico ocorre quando o desempenho do produto ultrapassa o seu limite mínimo de desempenho desejado, sendo as patologias mais comuns nos revestimentos argamassados, de acordo com a norma NBR 13.749 (ABNT, 1996), as fissuras na superfície do revestimento, manchas de umidade e mofo, descolamento da argamassa de revestimento da alvenaria, vesículas na superfície do revestimento, causando o descolamento da pintura, descolamento entre o reboco e o emboço, perda de aderência ou desagregação do revestimento, além dos defeitos decorrentes da execução.

- a) Fissuras – as possíveis causas geradoras podem ser recalque (acomodação do solo, da fundação ou do aterro); retração (fissuração da argamassa de revestimento); movimentação (da estrutura de concreto, do madeiramento do telhado ou da laje mista); amarração (falta de amarração nos cantos de paredes ou no encontro da laje com as paredes); diversos (concentração de esforços, impacto de portas, etc.);
- b) Vesículas - as principais causas do surgimento de vesículas são hidratação retardada do óxido de cálcio não hidratado presente na cal (o interior da vesícula é branco), presença de concreções ferruginosas no agregado miúdo (o interior da vesícula é vermelho), presença de matéria orgânica ou pirita no agregado miúdo (o interior da vesícula é preto);
- c) Pulverulência - pode ser causada por excesso de finos no agregado miúdo, traço pobre em aglomerantes, carbonatação insuficiente da cal, em argamassa de cal, dificultada por clima seco e temperatura elevada ou por ação do vento;

- d) Empolas pequenas - oxidação da pirita presente como impureza no agregado, resultando na formação de gipsita, acompanhada de expansão (o agregado apresenta pontos pretos).

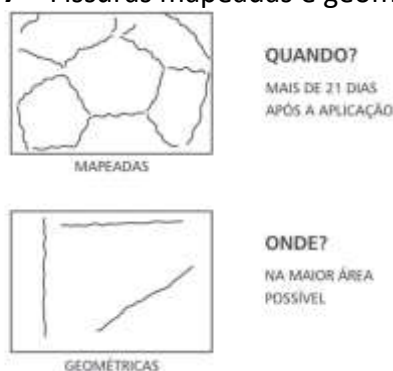
5.2 FISSURAS E TRINCAS

Consideram-se fissuras que podem provocar patologias aquelas que são visíveis a olho nu, quando observadas a uma distância maior que um metro, ou aquelas que, independentemente da sua abertura, estejam provocando penetração de umidade para dentro das edificações (CEOTTO et al., 2005).

A problemática de trincas e fissuras nos edifícios revela sinais do comprometimento da segurança da estrutura e do desempenho da vedação quanto à estanqueidade, durabilidade e isolamento acústica, além de causar um constrangimento psicológico aos usuários, cabendo à equipe responsável pela obra, realizar uma inspeção minuciosa em toda a fachada, com a finalidade de verificar a ocorrência de fissuras (mapeadas ou geométricas), manchas, eflorescências e deposições.

A Norma NBR 13749 (ABNT, 1996) estabelece que as fissuras mapeadas podem se formar por retração da argamassa, por excesso de finos no traço, quer sejam de aglomerantes, quer sejam de finos no agregado, ou por excesso de desempenamento, além de se apresentarem em forma de mapa. Enquanto que as fissuras geométricas, podem ser devidas à retração da argamassa de assentamento, bem como devidas à retração higrotérmica do componente, interfaces da base constituída de materiais diferentes (locais onde deveriam ter sido previstas juntas de dilatação), podendo se apresentar nos sentidos vertical, horizontal ou diagonal, conforme apresentado na Figura 7.

FIGURA 7 – Fissuras mapeadas e geométricas



Fonte: Ceotto et al. (2005)

Em uma argamassa composta por alto teor de finos ocorre a retração por secagem com o surgimento de fissuras no revestimento, devido a evaporação da água de amassamento da argamassa e, caso o revestimento não seja executado corretamente, podem aparecer fissuras na forma de “mapas” por todo o revestimento.

Segundo Bauer (1996), a fim de evitar fissuras em regiões onde a umidade relativa do ar é baixa, a temperatura é alta e os ventos são predominantes, não deve ser realizado molhagem abundante. Ao contrário das fissuras por retração hidráulica, que de um modo geral não são visíveis, devem ser molhadas, já que a água irá penetrar por capilaridade e identificará a trajetória das fissuras, pois quando os umedecimentos são sucessivos geram mudanças na tonalidade, ficando com cor esbranquiçada, ou então, as fissuras podem ficar escurecidas devido à deposição de fuligem.

De acordo com Maciel et al. (1998), as fissuras podem ser prejudiciais ou não (micro fissuras), no entanto, as fissuras prejudiciais permitem a percolação da água pelo revestimento no estado endurecido, comprometendo a sua estanqueidade à água, e os fatores que influenciam essa propriedade são as características e o proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa, a espessura e o intervalo de aplicação das camadas, o respeito ao tempo de sarrafeamento e desempenho. Os autores ainda afirmam que as argamassas com um alto teor de cimento, ou “fortes”, são mais sujeitas às tensões que causarão o aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem, além das trincas e possíveis descolamentos da argamassa no estado endurecido, enquanto que as argamassas “fracas”, são menos sujeitas ao aparecimento das fissuras prejudiciais.

Com o aparecimento das fissuras patológicas, deverá ser feito o mapeamento completo de todas as regiões afetadas, complementando com informações sobre a ocorrência de som cavo na região fissurada, a fim de identificar a causa geradora.

5.3 UMIDADE

A infiltração de água através de alicerces, lajes cobertura mal impermeabilizadas ou argamassas de assentamento magras manifesta-se por manchas de umidade, acompanhada ou não da formação de eflorescência ou de vesículas, sendo que a infiltração constante provoca a desagregação do revestimento, com pulverulência ou formação de bolor em pontos onde não há incidência de sol (CINCOTTO et al., 1995).

5.4 EFLORESCÊNCIAS

Denomina-se eflorescência o aparecimento de manchas esbranquiçadas e afloramentos nos revestimentos argamassados, com a presença determinante e ação dissolvente da água, ou seja, sem água não existe eflorescência.

De acordo com Fiorito (2009), no interior do concreto, da argamassa e do material cerâmico existem cavidades, vazios, bolhas, poros abertos e fechados, bem como uma rede de canais com dimensões variadas, originados tanto da água utilizada no preparo da argamassa a fim de se obter uma trabalhabilidade desejável, como da água necessária às reações de hidratação, para os casos da argamassa e do concreto. Essas operações de mistura e amassamento são responsáveis pela inclusão de ar e, conseqüentemente, pelo aparecimento de espaços vazios. Quando o fluxo de água ocorre no interior destes materiais por capilaridade, chamamos de absorção, e quando ocorre por pressão, chamamos de permeabilidade.

Fiorito (2009) ainda afirma que se esse fluxo de água poderá introduzir substâncias agressivas do solo na rede capilar do concreto e argamassa, ou dissolver e transportar certos sais solúveis que podem estar presentes no concreto, na argamassa e no material cerâmico. Trazidos à superfície, tais sais podem se apresentar como depósitos esbranquiçados nos poros abertos mais superficiais e na superfície do revestimento, caso as condições ambientais proporcionem uma excelente evaporação. Resumidamente, a eflorescência é originada pela presença de umidade no substrato, de tal forma que a falha acontece devido à falta de drenagem e à falta de impermeabilização correta sob o revestimento.

5.5 ALTERAÇÃO NO ASPECTO ORIGINAL DO REVESTIMENTO

Com o propósito de identificar as patologias de alteração de coloração e alteração da resistência superficial do revestimento, inicialmente, deve ser efetuada uma inspeção visual em toda a fachada, observando-se alterações como descoloração e perda do brilho, manchas, descascamentos, esfarelamentos, eflorescências, gretamentos, entre outros, e as anomalias encontradas devem ser mapeadas, registradas e analisadas, confrontando com todas as informações obtidas sobre o processo de execução do revestimento.

5.6 PERDA DE ADERÊNCIA OU DESAGREGAÇÃO DO REVESTIMENTO

A perda de aderência pode ser entendida como um processo em que ocorrem falhas ou ruptura na interface das camadas que constituem o revestimento ou na interface com a base ou substrato, devido às tensões surgidas ultrapassarem a capacidade de aderência das ligações (BARROS et al., 1997).

As anomalias relacionadas com a perda de aderência entre a argamassa e a base de assentamento podem decorrer de situações de destacamento entre as duas superfícies ou por perda de coesão da argamassa que, deste modo, se solta da fachada. Quando a argamassa perde a sua capacidade de aderência ao suporte, dá-se o seu descolamento em relação à base de assentamento, numa primeira fase, geralmente seguido pelo empolamento do reboco, ate atingir a fase de desprendimento (MAGALHÃES; HENRIQUES et al., 2002; 2004).

Define-se descolamento como sendo o afastamento do reboco em relação ao suporte, passível de ser identificado através do som cavo que emite quando percutido. Bauer (1997) afirma que os descolamentos, que são causados pela perda de aderência, podem ocorrer de diversas maneiras:

- **Descolamento por empolamento** – para as argamassas com cal parcialmente hidratada, ocorre o aumento de volume, produzindo expansão, uma vez que a hidratação do óxido de magnésio presente é muito lenta. No caso de argamassas mistas (cimento e cal), o fenómeno da expansão aumenta, causando desagregação da argamassa devido as causas mecânicas, pois as argamassas contendo cimento Portland são muito rígidas, enquanto que nas argamassas menos rígidas parte da expansão é passível de acomodação;
- **Descolamento em placas** - ocorre quando há deficiência de aderência entre as camadas do revestimento ou das mesmas com a base, causados por diversos fatores, tais como a preparação inadequada e molhagem deficiente da base, ausência de chapisco ou chapisco preparado com areia fina, argamassas ricas em cimento ou com espessura excessiva (maior que 2 cm, causando retração natural e tensões elevadas de tração entre a base e o chapisco), além de grandes variações de temperatura, gerando tensões de cisalhamento na interface argamassa-base, provocando o descolamento do revestimento;
- **Descolamento por pulverulência** - ocorre desagregação e esfarelamento da argamassa ao ser pressionada manualmente e a argamassa torna-se friável, causada pelo proporcionamento inadequado de aglomerante e agregado utilizados no preparo da

argamassa. O descolamento por pulverulência também ocorre quando a pintura é executada antes de ocorrer a carbonatação da cal da argamassa, ou quando se utiliza adições substitutas da cal hidratada, sem propriedades de aglomerante, também quando a hidratação do cimento é inadequada, nos casos de argamassa pobre em aglomerantes ou utilizada após o tempo de pega do cimento.

Já a perda de coesão corresponde à desunião ou desagregação dos componentes da argamassa, seguida pela perda das partículas que a compõem, sendo esse fenômeno mais frequente nas argamassas antigas, por oposição às argamassas de cimento, sobretudo após o destacamento da camada superficial do reboco (mais endurecida e que, ao desaparecer, deixa expostas ao ambiente as camadas interiores do reboco). De acordo com Henriques et al. (2004), a perda de coesão manifesta-se, geralmente, por três tipos de fenômenos:

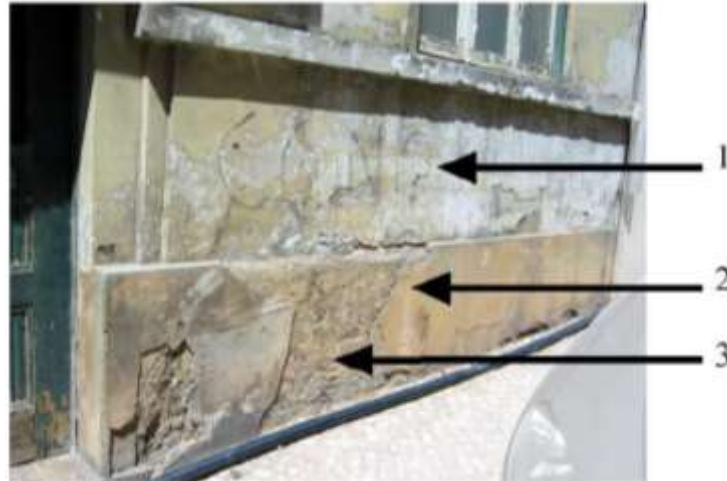
- **Pulverização** - desagregação dos vários componentes da argamassa, que se esfarela e conduz ao desprendimento de material sob a forma de pó ou de grânulos;
- **Arenização ou desagregação granular** - perda ou lavagem das partículas finas da argamassa caracterizada pelo fácil destaque de partículas de dimensão da areia mesmo com esforços mecânicos de fraca intensidade;
- **Erosão** - corresponde a perda localizada de massa de superfície do material por ação dos elementos atmosféricos, podendo originar um efeito localizado de escavação da argamassa; este fenômeno, embora raro, regista-se no caso de argamassas antigas, muito espessas e com perda de ligante, geralmente após a perda da camada exterior de proteção (como a cal).

Ao contrário do que acontece no caso das fissurações ou das manchas, verifica-se que os destacamentos raramente ocorrem de forma isolada, mas resultam de estados patológicos (conjunto de anomalias e de agentes de degradação) por vezes complexas.

Para Gaspar et al. (2015), nas argamassas a base de cal, o processo de degradação por perda de aderência pode ser precedido de fendilhação na zona afetada. Nestas situações, verifica-se frequentemente o destacamento da camada de acabamento do reboco mais rígida do que as camadas precedentes devido a uma carbonatação mais prolongada dos seus constituintes. A perda desta camada deixa exposta aos agentes atmosféricos a camada de emboço, geralmente de maior espessura e menos rígida, logo mais susceptível a degradação por perda de coesão, como se ilustra na Figura 8, onde nas argamassas de cal ou pouco ricas em cimento, inicialmente, ocorre a fissuração da argamassa

(1), causando o descolamento e desprendimento da camada de acabamento mais rígida ou mais carbonatada (2), deixando as camadas interiores do reboco mais expostas e sujeitas a fenômenos de perda de coesão e de lavagem dos constituintes da argamassa (3).

FIGURA 8 - Fases de degradação por perda de material em argamassas de cal



Fonte: Gaspar et al. (2002)

No caso dos rebocos a base de cimento, mais rígidos e de menor espessura, a perda de aderência decorre da existência dos esforços de corte entre a argamassa e o suporte, podendo ou não ser precedidos de fendilhação, ocorrendo o descolamento e queda das porções do reboco, deixando exposta tanto a base de assentamento como a camada de chapisco (KUS e NYGREN, 2002).

6. MEDIDAS PREVENTIVAS

Como medidas preventivas para a manutenção do revestimento de fachada, devem ser seguidas as recomendações técnicas necessárias, de acordo com os sistemas construtivos e materiais empregados, visando alcançar a vida útil prevista do revestimento. Tais recomendações técnicas contemplam os seguintes tópicos:

- Inspeção rotineira das fachadas;
- Conservação e limpeza;
- Restaurações das condições originais;
- Validades e garantias.

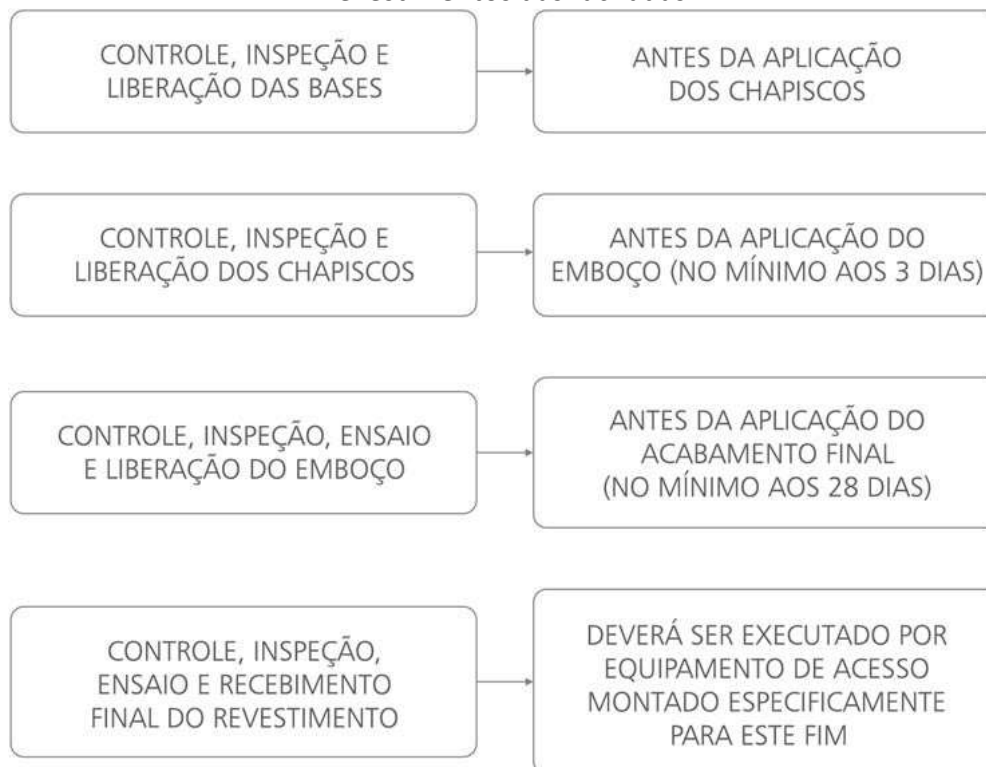
Nakamura (2004) afirma que existem medidas preventivas, quando da execução da argamassa, que devem ser tomadas:

- A argamassa de revestimento não deve ser aplicada em ambientes com temperatura inferior a 5°C. Quando a temperatura for superior a 30°C, devem ser tomados cuidados especiais para a cura do revestimento, mantendo-o úmido pelo menos nas 24 horas iniciais. Esse mesmo procedimento deve ser adotado em situações de baixa umidade relativa do ar, ventos fortes ou insolação forte e direta sobre os planos revestidos.
- As superfícies a revestir deverão ser limpas e molhadas antes de qualquer revestimento ser aplicado. A presença de limo, fuligem, poeira e óleo, por exemplo, pode acarretar o desprendimento futuro da argamassa.
- Quando for necessário emboço com mais de 2,5 cm, deverão ser executados em camadas, respeitando a espessura de 1,5 cm cada.
- A cal hidratada usada deve ser peneirada para eliminar os grãos que podem retardar a hidratação higroscópica.
- Para executar o emboço é necessário ter decorrido pelo menos três dias desde a aplicação do chapisco. Tubulações hidráulicas e elétricas devem ter sido executadas, os rasgos devidamente preenchidos, os batentes das portas colocados, assim como os tacos dos batentes devem estar assentados e os contramarcos dos caixilhos instalados.

É de suma importância que, sempre que surgirem danos na edificação, sejam feitos os reparos necessários a fim de evitar que esse dano se alastre, progressivamente, de modo a exigir um reparo constante.

Ceotto et al. (2005), criaram uma seqüência de procedimentos a serem realizados, no tocante aos controles, inspeções, ensaios e liberações das etapas de execução dos revestimentos das fachadas, com o propósito de evitar possíveis patologias, conforme mostrado na Figura 9.

FIGURA 9 – Seqüência dos controles, inspeções, ensaios e liberação das etapas de execução dos revestimentos das fachadas



Fonte: Ceotto et al. (2005)

6.1 SUPERFÍCIES DE BASES DE APLICAÇÃO PARA REVESTIMENTOS

As superfícies das bases de concreto e alvenaria devem ser inspecionadas e registradas nos controles de execução das fachadas, antes da aplicação dos chapiscos, e devem ser ásperas, apresentar porosidade aberta, sem quaisquer impurezas de pó, óleo, gordura, tinta, fungos e salinidade, não devem apresentar segregação, tampouco armaduras expostas (CEOTTO, et al., 2005).

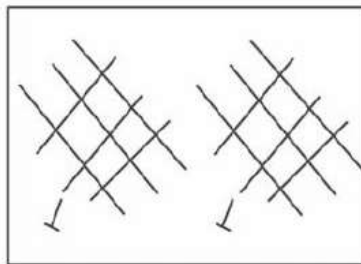
6.2 CHAPISCO

O chapisco deve ser inspecionado, diariamente, durante a sua execução, e antes da aplicação do emboço, a fim de verificar a espessura, rugosidade e homogeneidade da aplicação. No caso de chapisco aplicado com desempenadeira dentada, deve-se verificar a formação dos cordões. É muito importante a inspeção diária desta etapa, pois, além de a execução ser rápida, a condenação de grandes áreas executadas é de difícil correção.

Ceotto et al. (2005), em seus estudos, ratificam a necessidade de serem adotadas medidas preventivas como testes de dureza da superfície e testes de aderência, para cada lote da fachada em uma área mínima de 1,00 m², conforme mostram as Figuras 10 e 11 abaixo.

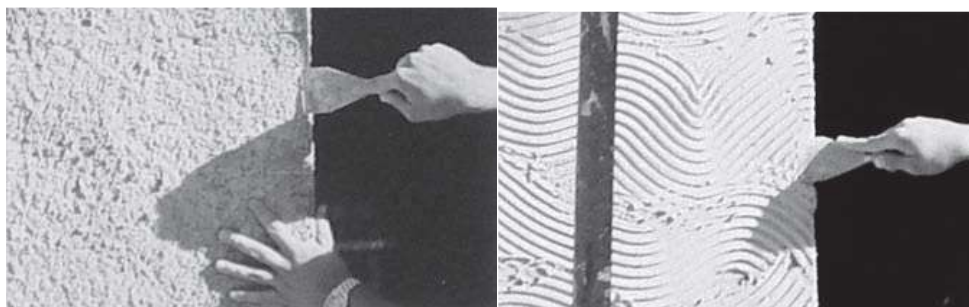
- **Teste de dureza da superfície** - devem ser executados riscos cruzados com a ponta de uma espátula na superfície do chapisco, observando-se o grau de dificuldade de se fazerem estes riscos. Quanto mais difícil for fazer estes riscos, maior a dureza e resistência do chapisco. Se, por outro lado, o chapisco se fragmentar ou esfarelar (abrindo sulcos maiores), é sinal de que sua dureza e resistência superficial é inadequada. Quando isso ocorrer, deve-se ter uma disposição específica para essa correção (cura, remoção). Pode-se também complementar essa avaliação friccionando os dedos da mão sobre a superfície do chapisco e observar a quantidade de material que se desprende.
- **Teste de aderência** - deve-se forçar o deslocamento do chapisco com a raspagem da espátula na interface da base com o chapisco. Se o chapisco se soltar com facilidade, a aderência com a base está comprometida. Caso isso ocorra, deve-se ter uma disposição específica para a correção do problema. Os procedimentos de correção devem levar em conta as causas geradoras da não-conformidade, como bases lisas ou engorduradas, bases mal preparadas, chapiscos fracos e chapiscos com deficiência de aplicação (CEOTTO et al., 2005).

FIGURA 10 – Teste de risco



Fonte: Ceotto et al. (2005)

FIGURA 11 – Teste de aderência com a espátula



Fonte: Ceotto et al. (2005)

A dureza ainda pode ser verificada pelo teste do lixamento, executado sobre os riscos feitos para o teste de risco (Figura 12), objetivando a confirmação, ou não, dos resultados obtidos pelo risco. O procedimento consiste em lixar (com lixa nº 120) a superfície já riscada, com movimentos de vai-e-vem (por 10 vezes), provocando, assim, um desgaste na superfície. Quando a superfície apresentar baixa resistência à abrasão, o desgaste é considerado maior e os riscos ficam apagados. Desta forma, a avaliação deverá ter continuidade, com repetição dos riscos e o lixamento deverá ser realizado até a camada mais profunda.

FIGURA 12 – Teste de lixamento



Fonte: Ceotto et al. (2005)

Assim como existem vários testes para avaliar a dureza, a aderência também pode ser verificada por meio de ensaio de percussão (Figura 13), através de impactos leves feitos por martelo com cabeça de plástico, a fim de verificar a ocorrência de sons cavos. Quando isto ocorre, indica que houve deslocamento do revestimento e, desta forma, todo o lote deve ser percutido e as áreas devem ser delimitadas e removidas. Essa remoção deve ser cuidadosa para poder se verificar em qual interface ocorreu o deslocamento, se entre o emboço e o chapisco, ou se entre o chapisco e a base, ou se entre o reboco e o emboço. Esta verificação indicará qual a causa provável do deslocamento, o que facilita a definição da recomposição mais adequada.

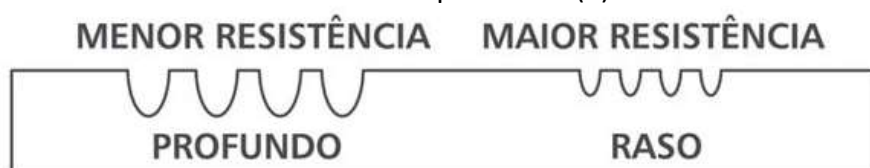
FIGURA 13 – Teste de percussão (I)



Fonte: Ceotto et al. (2005)

Quanto mais profundo for o sulco, menor é a dureza e resistência da superfície. Pode-se concluir também que, quanto mais difícil de executar o risco, maior a dureza e resistência da superfície do revestimento, conforme apresentado na Figura 14.

FIGURA 14 – Teste de percussão (II)



Fonte: Ceotto et al. (2005)

Segundo Bauer (1994), a cura do chapisco deve existir, obrigatoriamente, tanto em climas quentes, como secos. Dessa forma, a cura por aspersão de água deve ter início quando não houver lavagem do chapisco pela água de cura e a duração da cura (manter o chapisco molhado) deve ser de, no mínimo, 24 horas, recomendando estendê-la para até 48 horas em condições de clima quente e seco.

Já a norma NBR 7200 (ABNT, 1998) informa que a aplicação do emboço sobre o chapisco deve ser feita quando este estiver com uma idade mínima de 03 (três) dias. No entanto, esta recomendação diz respeito à idade em que o chapisco tem resistência para suportar o peso do emboço, porém, as inspeções sugeridas nos estudos de Ceotto et al (2005) só devem ser conclusivas quando o chapisco tiver uma idade mínima de 07 (sete) dias. Sendo assim, a recomendação é que a aplicação do emboço só deve ser executado quando o chapisco estiver no mínimo com 07 (sete) dias de idade.

Quando a cura do chapisco não é feita corretamente, ocorrem falhas como pulverulência, fissuração intensa e desagregação.

6.3 EMBOÇO E REBOCO

Durante a execução do emboço e reboco, deve ser feito o controle da argamassa que será aplicada com relação à densidade de massa, retenção de água, resistência à tração na flexão e à compressão e módulo de deformação. A amostragem deve ser realizada para cada 1.000 m² de área a ser revestida. Com relação à espessura, as camadas de argamassa que são aplicadas em espessuras maiores que 2,5 cm, estão mais sujeitas a sofrerem retração na secagem e apresentarem fissuras. Motivo pelo qual recomenda-se que sejam aguardados dias, no mínimo, para o intervalo de aplicação entre duas camadas do revestimento de argamassa, pois nesse período a retração da argamassa é grande, da ordem de 60% a 80% do valor total (MACIEL et al., 1998).

Os autores ainda afirmam que como o tempo de sarrafeamento e desempenho representam o período de tempo necessário para a argamassa perder parte da água de amassamento e chegar a uma umidade adequada para iniciar as operações de acabamento superficial da camada de argamassa, essas operações não devem ser feitas com a argamassa muito úmida, uma vez que poderão ser formadas fissuras e até mesmo ocorrer o descolamento da argamassa em regiões da superfície já revestida. Ou seja, sarrafeamento precoce induz ao surgimento de fissuração, e sarrafeamento retardado exige grande esforço para o corte da argamassa, motivo pelo qual, deve-se dar especial atenção a definição da extensão dos panos a revestir, dimensionando equipes com produtividade adequada à execução do revestimento.

Cincotto et al. (1995), afirmam que para os casos de descolamento por empolamento ou pulverulência, deve-se renovar a camada de revestimento que apresenta problemas, enquanto que para o caso de descolamento em placas, a renovação da camada de revestimento, deve seguir os procedimentos de apicoamento da base, eliminação da base hidrófuga e aplicação de chapisco para melhoria da aderência.

O substrato deve fornecer condições para que ocorra a ligação mecânica com o revestimento, de maneira a se garantir adequada aderência, minimizando problemas de descolamento e, conseqüentemente, os aspectos relacionados à limpeza da base devem ser observados, como a eliminação de pó e resíduos e a presença de desmoldantes em substratos de concreto (BAUER, 1997).

6.4 INSPEÇÕES DAS FACHADAS

O procedimento de avaliar e monitorar, ao longo do tempo, o desempenho dos revestimentos, considerando sua exposição às intempéries, às possíveis deformações estruturais e às movimentações térmicas e higroscópicas, segundo Ceotto et al. (2005), é denominado de inspeção, que devem ser periódicas e programadas, devendo ser realizadas por profissionais habilitados, especializados em manutenção de fachadas, acompanhados pelos projetistas e pelos profissionais responsáveis pela execução do revestimento.

As inspeções preventivas são programadas pelo projetista da fachada e devem ser feitas no primeiro ano, terceiro ano e no quinto ano após o término de execução da construção.

- Na primeira inspeção, um ano após o término da execução da construção, é observada a qualidade do revestimento de fachada um relatório. que servirá de orientação para a inspeção posterior.
- Na segunda inspeção, três anos após o término da execução da construção, realiza-se a lavagem da fachada, com jato d'água pressurizado, do tipo leque, moderado, no sentido de cima para baixo, sem a utilização de qualquer detergente ou produto químico, com o objetivo de facilitar a observação visual, bem como eliminar impregnações de fuligem ácida ou fungos, que aceleram a deterioração do revestimento.
- Na terceira inspeção, cinco anos após o término da execução da construção, também é realizada a lavagem da fachada da mesma forma que na segunda inspeção (CEOTTO et al., 2005).

De acordo com Ceotto et al. (2005), afirmam que na primeira e segunda inspeção, eventualmente, ocorrem manutenções preventivas em virtude de deficiências localizadas, porém, na terceira inspeção é imprescindível a realização de manutenção preventiva, prevista pelo projetista da fachada, como por exemplo, para situações onde a fachada argamassada encontrar-se-á pintada, devendo ocorrer o refazimento dessa pintura.

Para as situações de fachadas com revestimentos cerâmicos, o rejuntamento entre as placas cerâmicas deverá ser recomposto, a critério do projetista ou, no caso de ambientes agressivos, o prazo para recomposição não deve ultrapassar 10 anos. A cada três anos, o procedimento da terceira inspeção, deverá ser repetido.

7 CONCLUSÃO

Para que uma edificação atenda as necessidades dos seus usuários, ela deve ser planejada, projetada e construída tendo em vista a satisfação em sua plenitude. Portanto, deve-se levar em consideração a manutenção da edificação, a fim de mantê-la conservada sempre.

Todavia, a execução da manutenção deve constar, previamente, no planejamento de uso da edificação, e ser realizada de forma técnica, executada por empresas especializadas e profissionais treinados e capacitados. Jamais, uma manutenção predial deve ser de improviso ou casual, uma vez que caracteriza o descaso com a durabilidade da edificação.

Em se tratando das argamassas de revestimento de fachada, as manutenções preventivas devem ser acompanhadas por projetos e ter execuções adequadas, contribuindo com a longevidade do revestimento externo e fazendo com que o mesmo possa alcançar sua vida útil prevista ou até estendê-la.

De acordo com Bauer, a complexidade do revestimento de fachada quanto à composição, funções, desempenho, materiais e metodologias construtivas, contrapostas à significativa deficiência normativa e técnico-científica, tornam a atividade de especificação, projeto e controle de qualidade dos revestimentos, uma atividade de grande especificidade, a qual foge muitas vezes ao escopo da formação básica e atuação do engenheiro civil e do arquiteto.

O projeto de revestimento de fachada representa uma ferramenta valiosa para a prevenção das manifestações patológicas e, quando da inexistência desse projeto, o que sobressai é a ausência de conhecimento técnico para execução dos revestimentos, gerando a tendência do usuário de executar pequenos reparos, sem a devida preocupação com a causa da patologia. Dessa forma, a patologia alastra-se progressivamente, por muitas vezes em um longo espaço de tempo, solicitando um reparo constante e antieconômico.

Com a prevenção e manutenção das fachadas pode-se detectar, previamente, uma patologia, como por exemplo, o surgimento de fissuras, manchas e descolamentos, dentre outras. Cabendo ao usuário da edificação, após a identificação das causas da patologia e a extensão do dano, escolher sobre qual medida preventiva, com recomendação técnica, deverá ser adotada para sanar a patologia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7200:1998. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1997.

NT NBR 13281:2005 – Argamassa para as sentamento e

ABNT NBR 13281:2005 – Argamassa para as sentamento e

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13281:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13749:2013. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). BT 106: Guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo/SP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Mãos a Obra pro. V.4. 1ª edição. Câmara Brasileira do Livro, SP Brasil. Alaúde editorial LTDA. 2013.

ALIEVI, C. V.; FOPPA, C. Projeto de revestimento de fachada. Revista Especialize On-line IPOG. Ed. nº 11, Vol. 01, Goiânia/GO, julho, 2016. ISSN 2179-5568.

BAÍÁ, L. L. M.; SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. CTE, São Paulo, Ed. O Nome da Rosa, 2001, 2ª edição, 82 p.

BARROS, M. M. B.; TANIGUTI, E. K.; RUI Z, L.B.; SABBATINI, F. H. Tecnologia construtiva racionalizada para produção de revestimentos verticais. Notas de aula da disciplina PCC 816. Escola Politécnica. São Paulo/SP, 1997.

BAUER, L.A.F. Materiais de Construção. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2 volumes, 5ª Edição, 1994.

BAUER, R. J. F. Falhas em revestimentos, suas causas e sua prevenção. Centro Tecnológico Falcão Bauer, 1996.

BAUER, R. J. F. Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. Anais. p.321-33. Salvador, 1997.

BAUER, E. Revestimento de Argamassa: Características e Peculiaridades. Brasília: LEM. UnB, 92p. SINDUSCON, 2005.

CANDIA, M. C. Contribuição ao estudo das técnicas de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998, 198p.

CARVALHO, JR., A. N.; SILVA, A. P.; NETO, F. M. Perícias em patologias de revestimentos em fachadas. In: X Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias, X COBREAP. Porto Alegre/RS, IBAPE, 1999.

CARVALHO JR., A. N. Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Belo Horizonte/BH, 2005. 331p.

CARASEK, H. Materiais de construção civil e Princípios de ciência e engenharia de materiais. Ed. G. C. Isaia, São Paulo/SP, IBRACON, 2007. v. 2. p.1712.

CAVANI, G. R.. Ensaios – Revista de Tecnologia da Construção – Técnica. São Paulo, n. 88, julho, 2004.

CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAKURA, E. H.; Revestimentos de Argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação (Recomendações Técnicas Habitare). ANTAC. Porto Alegre/RS, 2005. V. 1. 96p.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio (Publicação IPT 2378). 1.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

COSTA, F. N. Processo de produção de revestimento de fachada de argamassa: problemas e oportunidades de melhorias. Porto Alegre/RS. 2005.

FIORITO, A. J. S. I. Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução. 2a ed., São Paulo/SP, PINI, 2009, 236p.

GASPAR, P. L.; COLEN, I. F.; BRITO, J. de. Técnicas de Diagnóstico e Classificação de Anomalias por Perda de Aderência em Rebocos. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2015.

KUS, H.; NYGREN, K. Microenvironmental characterization of rendered autoclaved aerated concrete, Building Research & Information, 30(1), 2002, p. 25-34.

HENRIQUES, F. R.; AIRES, B. L.; PROENÇA, N. Materiais pétreos e similares - terminologia das formas de alteração e degradação. Informação Técnica, Patologia e Reabilitação das Construções 2. Lisboa, LNEC, 2004.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos. São Paulo/SP, 1998.

MACIEL, L. L.; MELHADO, S. B. Diretrizes para o detalhamento do projeto de revestimento de argamassa de fachada. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Anais. Vitória/ES, 1999, p.769-780.

MAGALHÃES, A.C. Patologia de rebocos antigos. Cadernos Edifícios no. 2 - Revestimentos de paredes em edifícios antigos. Lisboa, LNEC, 2002, p. 69-85.

METALSSI, O. O.; AÏT-MOKHTAR, A.; TURCRY, P.; RUOT, B. Consequences of carbonation on microstructure and drying shrinkage of a mortar with cellulose ether. Construction and Building Materials 34 (2012) 218–5.

NAKAMURA, J. Projeto de fachadas. Revista Técnica, vol.92, nov. 2004.

SEGAT, G. T. Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: Estudo de Caso em Conjunto Habitacional Popular na Cidade de Caxias do Sul (RS). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

Capítulo 5



10.37423/250810253

INTEGRATED VALORIZATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: ACID-CATALYZED HYDROLYSIS TO SOLUBLE CARBOHYDRATES FOLLOWED BY RU/C-CATALYZED HYDROGENATION

JORNANDES DIAS DA SILVA

Universidade de Pernambuco-UPE

Cláudio César Barros de Oliveira

Universidade de Pernambuco-UPE



1. INTRODUCTION

Sugarcane bagasse conversion processes, including pretreatments of hemicellulose and lignin followed by acid hydrolysis of cellulose, effectively break down these polymeric structures. The resulting saccharide molecules, with their diverse functional groups, enable the synthesis of a wide range of compounds. This versatility, combined with their abundant availability from agricultural sources, positions saccharides as valuable intermediates for the production of high-value products.

Hemicellulose and cellulose can be depolymerized via acid hydrolysis, yielding xylose and glucose, respectively (Guan-Yu Pan et al., 2016; Mushrif et al., 2015). These saccharides can then undergo further processing in the presence of homogeneous or heterogeneous catalysts to form oligomeric mixtures. These mixtures can be subsequently converted into valuable chemicals, with one important transformation being catalytic hydrogenation. This process converts the oligomeric sugars into polyols, which are valuable compounds for a wide range of industrial applications.

The processing of raw materials rich in saccharides, such as sugarcane, starch, molasses, and bagasse, has been widely studied for their potential to yield products with industrial applications (Abreu et al., 1995; Baudel et al., 2005; Dussán et al., 2014; Oliveira et al., 2015). These materials are subjected to biomass conversion processes that include pretreatment steps targeting hemicellulose and lignin, followed by acid or enzymatic hydrolysis of cellulose to depolymerize the biomass into saccharides and lignin fractions. The resulting products can subsequently be converted into value-added chemicals (Aho et al., 2015; Kusserow et al., 2003; Yadav et al., 2012).

Catalysts based on nickel, chromium, and copper have long been utilized for the hydrogenation of mono and disaccharides into polyols, such as sorbitol and mannitol, which are widely used in the food, pharmaceutical, and polymer industries (Turek et al., 1983). These metals, particularly nickel, offer a cost-effective and robust catalytic platform for converting carbohydrate substrates under moderate temperature and pressure conditions. However, their selectivity and efficiency can be limited, particularly in aqueous-phase reactions or at low substrate concentrations.

To enhance catalytic activity and selectivity, recent research has focused on the development of novel ruthenium-based catalysts, which exhibit superior hydrogenation performance due to their higher intrinsic activity and resistance to deactivation in aqueous environments (Mushrif et al., 2015). Ruthenium supported on carbon or metal oxides has demonstrated high conversion rates and improved selectivity toward desired polyols in both mono and disaccharide hydrogenation reactions.

Experimental studies have shown that the hydrogenation of aqueous glucose solutions can be effectively conducted in both batch and continuous flow reactors using supported nickel and ruthenium catalysts. In particular, Mikkola et al. (2000) reported the successful application of these catalysts under varied operating conditions, highlighting the enhanced catalytic performance of ruthenium over nickel in continuous hydrogenation systems. These findings support the ongoing transition from traditional base-metal systems toward more efficient noble-metal-based catalysts for biomass-derived sugar upgrading.

In this work, sugarcane bagasse was subjected to acid hydrolysis in a sequence of steps designed to release xylose and glucose from hemicellulose and cellulose, respectively. The resulting hydrolysates were then hydrogenated using a nickel-based catalyst to produce polyols. A kinetic evaluation approach was applied to quantitatively assess both the hydrolysis and hydrogenation processes.

2. MATERIAL AND EXPERIMENTAL METHODS

The reaction operations, including alkaline delignification and acid hydrolysis, were conducted in a 1.5 L slurry reactor using solid-to-liquid ratios of 1:3 and 1:1. Delignification was performed on bagasse that had undergone pre-hydrolysis. The resulting slurry was filtered to separate the residual solid (referred to as m_{bag}), while the liquid phase was analyzed for total solids and lignin content. Hemicellulose extraction was performed using a 1.0 wt% H_2SO_4 aqueous solution at 80°C, 90°C, and 100°C for 2 hours. The treated material was then analyzed for residual cellulose and saccharide content. The cellulose-rich fraction was hydrolyzed at 140°C, 160°C, and 180°C under an inert argon atmosphere (30 bar) for 3 hours using a 20.0 wt% HCl solution containing 8.0 wt% LiCl. Hydrolysates from both hemicellulose and cellulose processing steps were treated with $Ca(OH)_2$ for sulfur removal and Pb for chlorine removal.

The saccharide solutions were then processed by catalytic hydrogenation. The catalyst was prepared from nickel nitrate ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, Sigma) and activated carbon (specific surface area: $890 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, particle size: 91 μm , Carbomer Co., Brazil) as the support. The incipient wetness method was used for preparation, where the activated carbon was impregnated with the nickel nitrate solution. The solid was dried at 393 K for 12 h, followed by calcination at 500°C in an argon flow for 5 h. To activate the catalyst, it was reduced under a hydrogen flow (1:1 v/v, $120 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) at 700°C for 2 h. The catalyst was characterized by atomic absorption spectroscopy (AAS, Model-CGAA7BC) to determine metal

content, by textural characterization (specific surface area, pore volume) using the BET method (ASAP 2010), and by X-ray diffraction (XRD, Cu-K α source, Siemens D5000) to analyze solid phases.

The hydrogenation experiments were conducted with 0.50 L of saccharide solutions in a 1.0 L batch reactor (Parr Inst., USA). The initial concentrations of xylose and glucose were 98.86 g·L⁻¹ and 102.32 g·L⁻¹, respectively, with a catalyst concentration of 5.0 g·L⁻¹. The reaction was initiated when the temperature reached the operating value, and the system was maintained at a constant pressure of 30.0 bar. The temperature was kept constant with an accuracy of ± 1 K throughout the reaction.

Analyses of saccharides and polyols in the liquid phases were performed using liquid chromatography (HPLC) with an Aminex HPX-87 column (BioRad, USA), employing 0.001 N H₂SO₄ as the mobile phase.

2.1 MODEL CALCULATION METHODOLOGY

The solutions to the mass balance equations were obtained using the 4th-order Runge-Kutta method with the initial condition: $t = 0$; $C_{PDn} = C_{PDn0}$ and $C_{Mo} = 0$. A numerical optimization procedure was applied, where the initial values of the kinetic parameters were iteratively adjusted by comparing the calculated component concentrations with the experimental values. The optimized parameters were obtained by minimizing a quadratic objective function, f_{ob} , defined as:

$$f_{ob} = \sum_{i=1}^n f_{ob,i}, \text{ where } f_{ob,i} = \sum_{m=1}^n \left(C_{m,i}^{exp} - C_{m,i}^{teor} \right)^2 \quad (1)$$

In this equation, $C_{m,i}^{exp}$ and $C_{m,i}^{teor}$, represent the experimental and calculated concentrations of each component, respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The fractionation of biomass through the extraction of hemicellulose and cellulose, followed by the depolymerization of oligosaccharides (with degree of polymerization PNDn - 1) and monosaccharides (Mo), is described in the following model formulation.



Based on the reaction scheme and employing the steady-state approximation for the intermediate acidified oligomers (PDnH, where $n = 1, 2, 3, \dots$), the rate of monosaccharide production (r_{Mo}) is expressed as follows:

$$r_{Mo} = \frac{k_{PDn} (C_{PDn}^0 - C_{Mo})}{1 + \frac{k_{PDn}}{k'_{PDn}} (C_{PDn}^0 - C_{Mo})} C_{AcH}^0 \quad (4)$$

Where k_{PDn} and k'_{PDn} are the rate constants for the acidification and depolymerization steps, respectively, and Polysaccharide (C_{PDn}^0), Monosaccharide (C_{Mo}), and Acid (C_{AcH}^0) represent the initial concentrations of the components.

3.1 HYDROLYSIS OF HEMICELLULOSE

Biomass fractionation, including hemicellulose extraction ($PDn = Hm$) and subsequent depolymerization, was performed. The lignin-free biomass pulp underwent diluted acid hydrolysis ($AcH = H_2SO_4$), promoting the hydrolysis and removal of hemicelluloses. The mass balance for the batch conversion of hemicellulose to xylose ($Mo = XL$) is described by Eq. (5), in conjunction with the monosaccharide production rate, Eq. (1).

$$\frac{dC_{XL}}{dt} = \frac{m_{bag}}{V_L} \frac{k_{Hm} (C_{Hm}^0 - C_{XL})}{1 + \frac{k_{Hm}}{k'_{Hm}} (C_{Hm}^0 - C_{XL})} C_{H_2SO_4}^0 \quad (5)$$

The mass balance equation, integrated with the optimization procedure, was solved using data from each isothermal experiment, allowing for the estimation of kinetic parameters at three temperatures. Subsequently, the Arrhenius law was applied to determine the activation energy. Figure 1 presents the experimental and predicted concentrations of residual oligomers and produced xylose.

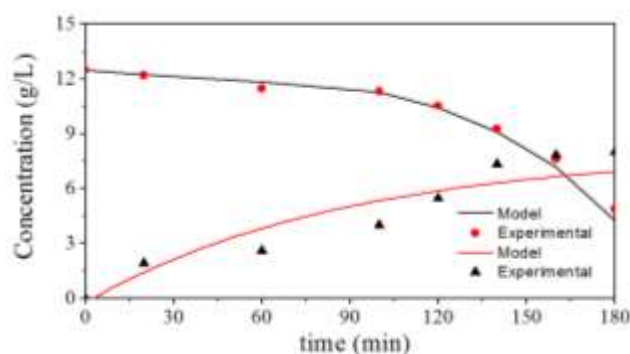


Figure 1. Concentration profiles of hemicellulose oligomers and xylose over time. Conditions: 100 °C, 50.0 g, 1.50 L, and HCl (5.0 wt%).

The concentration profiles show that xylose extraction was substantial, reaching a 64% yield (based on hemicellulose content) and corresponding to 16.0 wt% per biomass at 100 °C after 3 hours with 5.0 wt% sulfuric acid solution. The arabinose content was approximately 1.2 wt% per biomass, while the degradation product furfural, formed via dehydration, was detected at a low concentration of 1.0 wt% per biomass.

Based on the reaction rate constants at the operating temperatures ($k_{80}^{\circ\text{C}} = 8.13 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, $k_{90}^{\circ\text{C}} = 9.87 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, and $k_{100}^{\circ\text{C}} = 10.23 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$), the activation energy for the hydrolytic conversion of hemicellulose was estimated as $E_{\text{atHm}} = 12.92 \text{ kJ / mol}$.

3.2 HYDROLYSIS OF CELLULOSE

The cellulose pulp (PDn = Cel), subjected to acid hydrolysis (AcH = HCl) in the presence of LiCl, was converted into oligomers (PDn-1) and the monosaccharide glucose (Mo = GL). The mass balance, incorporating the glucose production rate r_{GL} , Eq. (1), was expressed in Equation 6 for the batch operation of cellulose conversion to glucose.

$$\frac{dC_{\text{GL}}}{dt} = \frac{m_{\text{bag}}}{V_L} \frac{k_{\text{Cel}} (C_{\text{el}}^0 - C_{\text{GL}})}{1 + \frac{k_{\text{Cel}}}{k_{\text{Cel}}} (C_{\text{el}}^0 - C_{\text{GL}})} C_{\text{LiCl}} C_{\text{HCl}}^0 \quad (6)$$

A procedure similar to that used for the hemicellulose–xylose process was employed to solve the mass balance equation for the cellulose-glucose process. Figure 2 shows the evolution of both experimental and predicted concentrations of residual oligomers and produced glucose.

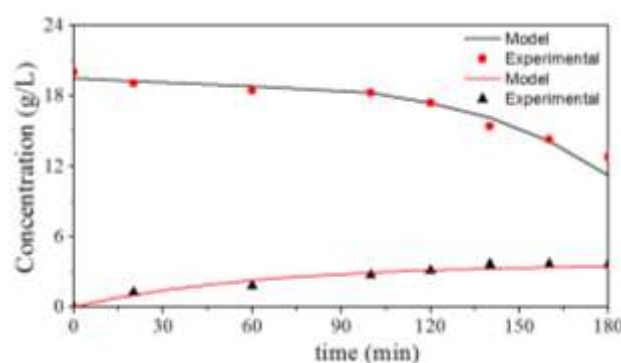


Figure 2. Concentration profiles of cellulose oligomers and glucose. Conditions: 180 °C, 50.0 g, 1.50 L; HCl (25.0 wt%), and LiCl (10 g/L).

The cellulose conversion reached 34%, and lithium chloride was found to be an effective promoter for the acid hydrolysis of cellulose. The concentration data indicate that glucose extraction achieved a 16.23% yield (calculated as $[\text{glucose/cellulose}] \times 100$), corresponding to 10.52 wt% per biomass at 100 °C after 180 minutes with a 5.00 wt% sulfuric acid solution. The degradation product, hydroxymethylfurfural, formed via dehydration, was produced in low concentrations (0.76 wt% per biomass).

The kinetic parameters were estimated at three different temperatures: $k_{\text{Cel1}}(40^\circ\text{C}) = 18.44 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$, $k_{\text{Cel1}}(60^\circ\text{C}) = 22.31 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$, and $k_{\text{Cel1}}(80^\circ\text{C}) = 36.87 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$. The activation energy, calculated using the Arrhenius equation, was found to be $E_a = 29.88 \text{ kJ/mol}$.

3.3 HYDROGENATION OF CARBOHYDRATES

Soluble carbohydrates obtained from biomass were hydrogenated in the presence of a Ni (9.6 wt%)/AC catalyst at 160°C under H_2 at 30.0 bar. The nickel content and surface area, characterized by AAS and B.E.T.- N_2 , were 9.65 wt% and 578 m^2/g , respectively. XRD analyses enabled the identification of nickel oxide peaks at 2θ 37.7° and 63.7°, and nickel peaks at 2θ 44.5° and 51.8°.

3.3.1 MODELING OF HYDROGENATION OPERATIONS

The hydrogenation of monosaccharides (Mo) originating from hemicellulose and cellulose is represented by the reaction: $\text{H}_2 (\text{g}) + \text{Mo}(\text{L}) \rightarrow \text{Cat} \rightarrow \text{Po}(\text{L})$, where Po refers to polyols such as xylitol, arabitol, and sorbitol. The monosaccharide production rate (Eq. 7) follows a Langmuir-Hinshelwood-type model involving both dehydrogenation and hydrogenation. The model assumes adsorption of hydrogen on basic sites (activated carbon support), adsorption of glucose onto metallic sites (nickel) via its aldehyde group, hydrogen-aldehyde interaction, and desorption of the formed polyol.

$$r_{\text{Mo}} = r_{\text{Po}} = \frac{k K_{\text{H}_2} K_{\text{Mo}} C_{\text{H}_2} C_{\text{Mo}}}{\left(1 + K_{\text{H}_2} C_{\text{H}_2}\right) \left(1 + K_{\text{Mo}} C_{\text{MO}} + K_{\text{Po}} C_{\text{Po}}\right)} \quad (7)$$

The mass balance of the components ($j = \text{Mo}, \text{Po}$), which describes the evolution of the processes, is represented by Eq. (7), referring to the operation in the slurry reactor. It is assumed that hydrogen is retained in excess in the liquid phase under pressure, where strong mechanical agitation ensures that chemical kinetic regime conditions are maintained. Under the given operating conditions, the rate-controlling regime of the catalytic reaction is confirmed by examining mass transfer limitations using the Weisz criterion and evaluating the external mass transfer resistance fraction, as follows.

$$\phi_i = \frac{r_i L_c^2}{D_{e,i}} C_i \quad (8)$$

$$f_{e,i} = \frac{r_i L_c}{k_{m,i}} C_i \quad (9)$$

The mass balance equations are expressed as:

$$V_L \frac{dC_j}{dt} = \pm M_c \left(\frac{K_{M_0} C_{M_0}}{1 + K_{M_0} C_{M_0} + K_{P_0} C_{P_0}} \right) \quad (5)$$

From the experimental concentrations of monosaccharides and polyols the proposed models were well adjusted (objective functions, $f_{ob, XL-X} = 6.25 \times 10^{-2}$, $f_{ob, GL-G} = 3.08 \times 10^{-2}$). In Figs. 3 and 4 are shown the concentration evolutions, experimental and predicted by the models.

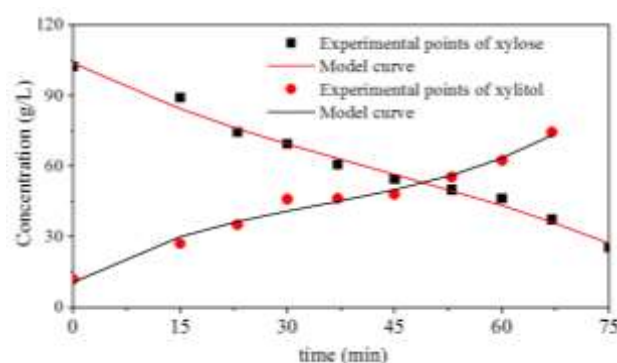


Figure 3: Hydrogenation of carbohydrates and conversion of xylose into xylitol. Conditions: cat. Ni (9.62% wt.)/AC, 160°C, 30.0 bar.

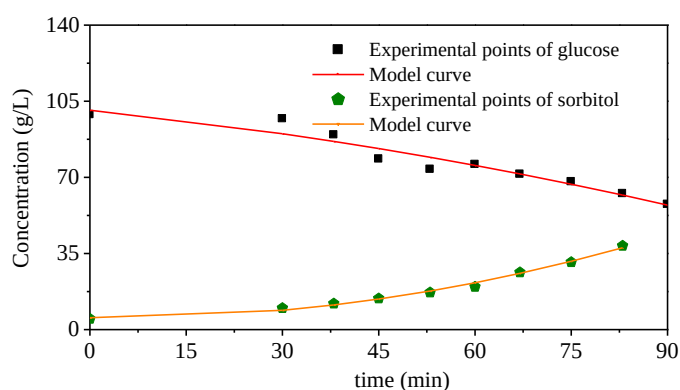


Figure 4: Hydrogenation of carbohydrates and conversion of glucose into sorbitol. Conditions: cat. Ni (9.6% wt.)/AC, 160°C, 30.0 bar.

Based on the model adjustment, were estimated values of the reaction rate constants ($k_{M0} = k_X, k_G$), and the adsorption constants ($K_{M0} = K_X, K_G$; $K_{P0} = K_{XL}, K_S$) are presented in Tables 3 and 4.

Table 3: Parameters of hydrogenation of xylose into xylitol. Conditions: cat. Ni (9.62% wt.)/AC, 120 - 160°C, 30.0 bar.

Parameters	120 °C	140 °C	160 °C
k_{XL} (mol/g h)	1.76	2.85	5.92
K_{XL} (L/mol)	5.22	3.16	1.53
$K_X 10^2$ (L/mol)	4.18	2.89	1.38

Table 4: Parameters of hydrogenation of glucose into sorbitol. Conditions: cat. Ni (9.62% wt.)/AC, 120 - 160°C, 30.0 bar.

Parameters	120 °C	140 °C	160 °C
k_{GL} (mol/g h)	0.31	0.66	1.24
K_{GL} (L/mol)	2.41	2.09	1.88
$K_S 10^2$ (L/mol)	7.06	5.56	2.24

Kinetic assessments at three temperatures using a Ni catalyst (9.6 wt.%)/AC led to estimates of the activation energies (based on Arrhenius' law) for the hydrogenation of glucose and xylose to sorbitol and xylitol, respectively. For xylose hydrogenation, the activation energy $E_{a,XL}=42.74$ kJ/mol was lower than the value reported by Mikkola et al. (2000), who found 53.00 kJ/mol using Raney Ni at 130 °C and 70 bar. For glucose hydrogenation, the activation energy $E_{a,GL}=49.08$ kJ/mol was somewhat higher than the 38.54 kJ/mol reported by Turek et al. (1983) with a nickel catalyst supported on silica.

The adsorption constants of monosaccharides were higher than those of polyols. The estimated heats of adsorption for xylitol ($\Delta H_{ad} = 6.75$ kJ/mol) and sorbitol ($\Delta H_{ad} = 97.05$ kJ/mol), calculated using the van 't Hoff equation, are consistent with experimental evidence indicating their greater availability in the liquid phase. This behavior reflects their relatively weak adsorption, which is favorable under the reaction conditions for product formation.

4. CONCLUSIONS

Hemicellulose and cellulose obtained from sugarcane bagasse were depolymerized by acid hydrolysis to produce xylose and glucose, respectively. The monosaccharides were obtained with yields $[(\text{monosaccharide/polysaccharide}) \times 100]$ of 63.87% for xylose and 21.05% for glucose. Based on the mass of lignin-free sugarcane bagasse, the monosaccharide contents accounted for 21.67 wt.% and 14.03 wt.% of biomass, respectively.

The monosaccharide solutions (102.32 g xylose L^{-1} , 98.86 g glucose L^{-1}) were hydrogenated in the presence of nickel catalyst (Ni (9.6% wt.)/AC), with activities quantified by the activation energies of $E_{\text{atXL}} = 42.74 \text{ kJ/mol}$ for xylose hydrogenation and $E_{\text{atGL}} = 49.08 \text{ kJ/mol}$ for glucose hydrogenation. The valuable polyols were produced with yields of 78.62% in xylitol, and 39.64% in sorbitol.

NOMENCLATURE

AcH	Acid
AC	Activated carbon
d_p	Particle diameter
$C_{mi}^{Exp}, C_{mi}^{Th}$	Experimental and calculated concentrations
C_{PDn}	Concentration of polysaccharide
C_{PDn}, C_{Mo}	Concentrations of polysaccharide and monosaccharide
C_{PDn}^0, C_{Mo}^0	Initial concentrations of polysaccharide and monosaccharide
C_{AcH}^0	Initial concentration of acid
C_{Hm}^0, C_{Cel}^0	Initial concentration of hemicellulose and cellulose
E_{atHm}	Activation energy of hemicellulose
E_{atCel}	Activation energy of cellulose
f_{ob}	Objective function
GL	Glucose
H_{H2}	Henry's constant of hydrogen
k_{PDn}, k'_{PDn}	Rate constants of acidification and depolymerization
k_{Hm}, k'_{Hm}	Rate constants of acidification and depolymerization of hemicellulose
k_{Cel}, k'_{Cel}	Rate constants of acidification and depolymerization of cellulose
K_{H2}	Adsorption equilibrium constant of hydrogen
m_{bag}	Mass of bagasse
Mo	Monosaccharide
M_C	Mass of catalyst
PD _n	Polysaccharide
PD _{n-1}	Oligosaccharide
PD _n H	Acidified oligosaccharide

P_{H_2}	Partial pressure of hydrogen
r_{Mo}	rate of production of monosaccharides
X	Xylitol
XL	Xylose
V_L	Liquid volume

REFERENCES

- Abreu, C. A. M., Lima Filho, N. M. and Zoulalian A., *Biomass and Bioenergy*, v. 9, pp. 487-492 (1995).
- Aho A., Roggan S., Eränen K., Salmi T. and Murzin D. Y., Continuous hydrogenation of glucose with ruthenium on carbon nanotube catalysts *Catalysis Science and Technology*, v.5, pp. 953-959 (2015).
- Baudel, H. Zaror, M., C. and Abreu, C. A. M., Improving the value of sugarcane bagasse wastes via integrated chemical production systems: an environmentally friendly approach. *Industrial Crops and Products*, v. 21, pp. 309-315 (2005).
- Dussan, K. J., Silva, D. V., Moraes, E. J. C., Arruda P. V. and Felipe M. G. A., Acid hydrolysis of cellulose to glucose from sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Transactions*, v. 38, pp.433-438 (2014).
- Guan-Yu Pan, Yu-Long Ma, Xiao-Xia Ma, Yong-Gang Sun, Jun-Min Lv, Jian-Li Zhang., Catalytic hydrogenation of corn stalk into polyol over Ni-W/MCM-41 catalyst. *Chemical Engineering Journal*, v. 299, pp. 386-392 (2016).
- Kusserow, B., Schimpf, S. and Claus P., Hydrogenation of Glucose to Sorbitol over Nickel and Ruthenium. *Catalysts Advanced Synthesis and Catalysis*, v. 345, pp. 289-299 (2003).
- Mikkola, Jyri-Pekka, Vainio, H., Salmi, T., Sjöholm R., Ollonqvist T. and Väyrynen J., Deactivation kinetics of Mo-supported Raney Ni catalyst in the hydrogenation of xylose to xylitol. *Applied Catalysis A: General*, v. 196, 143-155 (2000).
- Mushrif, S. H., Vasudevan, V., Krishnamurthy, C. B., Venkatesh, B., Multiscale molecular modeling can be an effective tool to aid the development of biomass conversion technology: A perspective. *Chemical Engineering Science*, v. 121, pp. 217-235 (2015).
- Oliveira, C. C. B., Silva, D. J., Araújo, A. D. F., Raphael C. R. B., Abreu, C. A. M., Kinetic evaluation of carbohydrate biomass conversions. *Chemical Engineering Transactions*, v. 43, 949-954 (2015).
- Turek, F., Chakrabarti, R. K., Lange, R., Geike, R. and Flock, W., *Chemical Engineering Science*, v.38, 275-281 (1983).Yadav, M., Mishra, D. K., Hwang, Jin-Soo., Catalytic hydrogenation of xylose to xylitol using ruthenium catalyst on NiO Modified TiO₂ support. *Applied Catalysis A: General*, v. 425 - 426, PP. 110 - 116 (2012).

Capítulo 6



10.37423/250810254

A SYSTEMATIC EXPERIMENTAL STUDY ON PHYSICAL PARAMETER OPTIMIZATION IN A THREE-PHASE PACKED BED REACTOR

JORNANDES DIAS DA SILVA

Universidade de Pernambuco-UPE

Sérgio Mário Lins Galdino

Universidade de Pernambuco-UPE



1. INTRODUCTION

Trickle-bed reactors (TBRs) are a class of multiphase reactors characterized by a fixed bed of solid catalyst particles through which gas and liquid phases flow simultaneously in a cocurrent downward direction, typically at low superficial velocities. The design facilitates intimate phase contact, enabling efficient mass and heat transfer among the three phases: gas, liquid, and solid. The low liquid and gas velocities promote partial wetting of the catalyst surface, leading to complex flow regimes that significantly influence reactor performance. TBRs are of particular importance in gas-liquid-solid catalytic systems due to their simplicity, compact design, ease of operation, and relatively low pressure drop.

They are extensively utilized in petroleum refining operations, where they serve as the primary reactor configuration for processes such as hydrotreating (removal of sulfur, nitrogen, and other contaminants), hydrodemetallization (removal of heavy metals from crude fractions), and hydrocracking (conversion of heavy hydrocarbons into lighter, more valuable products). Beyond refineries, TBRs are also widely applied in the petrochemical and chemical industries for oxidation, hydrogenation, and alkylation reactions. In the biochemical sector, they are used for enzymatic and microbial reactions, while in environmental engineering, they serve in wastewater treatment and biofiltration applications.

Mathematical models of trickle-bed reactors (TBRs) serve as valuable tools to reduce the experimental effort needed for developing this important equipment in industrial applications. While experimentation and prototype development remain essential for accurate engineering design, mathematical modeling and numerical simulation are continually advancing, offering deeper insights into processes and physical phenomena that support and enhance reactor design. Moreover, model validation still depends on experimental data, which often involve complex and challenging measurements. Consequently, the use of mathematical models also stimulates the development of new experimental methods and techniques.

Various mathematical models have been developed to describe catalyst particles that are either fully or partially wetted within trickle-bed reactors (TBRs). These models necessarily involve numerous assumptions and simplifications to enable the solution of the complex governing equations. Generally, TBR models account for mechanisms including forced convection, axial dispersion, interphase heat and mass transfer, intraparticle diffusion, adsorption, and chemical reactions (Silva et al., 2003; Burghardt et al., 1995; Iliuta et al., 2002; Latifi et al., 1997).

Various flow regimes can occur in a trickle-bed reactor (TBR), depending on the liquid and gas mass flow rates, fluid properties, and the geometric characteristics of the packed bed (Charpentier and Favier, 1975). A fundamental understanding of TBR hydrodynamics is essential for effective design, scale-up, and operation. Each flow regime influences the hydrodynamics differently. Key hydrodynamic parameters for design and operation include the pressure gradient and liquid saturation. The pressure gradient reflects mechanical energy dissipation resulting from the two-phase flow through the fixed bed of solid particles. Liquid saturation, which partially fills the void space of the packed bed, is linked to several important factors such as the pressure gradient, external wetting of catalyst particles, mean residence time of the liquid phase, and heat and mass transfer phenomena (Specchia and Baldi, 1977).

The objective of the work is to estimate and describe the behavior of the axial dispersion coefficient of the liquid phase, $D_{ax,L}$, and overall liquid-solid mass transfer, $(Ka)_{LS}$, coefficient using a set of experiments carried out in a laboratory scale TBR. Comparing the mathematical model with experimental data. Analyzing the correlations from the $D_{ax,L}$ and $(Ka)_{LS}$ as a function of the volumetric flow rate

2. MATHEMATICAL MODEL

A 1D mathematical model was developed based on the liquid-solid approach, in which the liquid phase consisting of water and a NaOH tracer is treated as a continuum flowing through a fixed bed of solid catalyst particles. The model accounts for axial dispersion, liquid-solid mass transfer, partial wetting, and reaction phenomena. It is specifically applied to the liquid phase behavior using NaOH as a tracer and is formulated under the following assumptions: (i) the system operates isothermally, (ii) flow rates remain constant throughout the reactor, (iii) intraparticle diffusion resistance is neglected, and (iv) at any axial position, the chemical reaction rate within the solid equals the liquid-solid mass transfer rate.

- Mass balance for the liquid;

$$h_L \frac{\partial C_L(z,t)}{\partial t} + \frac{4Q_L}{\pi d_f^2} \frac{\partial C_L(z,t)}{\partial z} = D_{ax,L} \frac{\partial^2 C_L(z,t)}{\partial z^2} - (1 - \epsilon_s) \text{PWE} (Ka)_{LS} [C_L(z,t) - C_S(z,t)] \quad (2.1)$$

- The initial and boundary conditions for Eq. (2.1) are:

$$C_L(z,0) = C_{L,0} \quad (2.2)$$

$$D_{ax,L} \left. \frac{\partial C_L(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0^+} = \frac{4Q_L}{\pi d_f^2} [C_L(z,t)|_{z=0^+} - C_L(z,0)] \quad (2.3)$$

$$\left. \frac{\partial C_L(z,t)}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \quad (2.3)$$

- Combining the chemical reaction rate with the mass transfer rate:

$$(K_a)_{LS} [C_L(z,t) - C_S(z,t)] = k_r C_S(z,t) \eta \varepsilon_s \quad (2.5)$$

Equations (2.1) to (2.5) are analyzed using dimensionless variables to simplify the mathematical formulation and enable comparison of results across different scales and operating conditions. Table 1 summarizes the dimensionless variables and parameters, along with their definitions and characteristic scales used for nondimensionalization.

Table1: Summary of dimensionless variables

liquid and solid concentrations, dimensionless	Time and coordinate axial direction, dimensionless
$\Gamma_L(\xi, \tau) = \frac{C_L(z,t)}{C_{L,0}}$	$\tau = \frac{4 Q_L t}{L h_L \pi d_f^2}$
$\Gamma_S(\xi, \tau) = \frac{C_S(z,t)}{C_{L,0}}$	$\xi = \frac{z}{L}$

2.1 DIMENSIONLESS EQUATIONS

The governing equations, Eqs. (2.1) to (2.5), can be expressed in dimensionless form by introducing appropriate dimensionless variables and scaling parameters. This transformation simplifies the mathematical analysis by reducing the number of independent variables and highlights the key dimensionless groups governing the system behavior. The resulting dimensionless equations are presented below:

$$\frac{\partial \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \xi} = \frac{1}{P_E} \frac{\partial^2 \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} - \alpha_{LS} [\Gamma_L(\xi, \tau) - \Gamma_S(\xi, \tau)] \quad (2.6)$$

$$\Gamma_L(\xi, 0) = 1 \quad (2.7)$$

$$\left. \frac{\partial \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right|_{\xi=0^+} = P_E \left[\Gamma_L(\xi, \tau) \Big|_{\xi=0^+} - 1 \right] \quad (2.8)$$

$$\left. \frac{\partial \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = 0 \quad (2.9)$$

$$\Gamma_L(\xi, \tau) - \Gamma_S(\xi, \tau) = \beta_S \Gamma_S(\xi, \tau) \quad (2.10)$$

Equations (2.6) through (2.10) incorporate several key dimensionless parameters that characterize the transport and reaction phenomena within the system. Derived through the nondimensionalization of the governing equations, these groups reflect the relative contributions of axial dispersion, mass transfer, reaction kinetics, and flow behavior. A brief description of each dimensionless group is provided below:

$$\alpha_{LS} = \frac{(1 - \varepsilon_s) F_M (K_a)_{LS} L \pi d_r^2}{4 Q_L} \quad (2.11)$$

$$P_E = \frac{4 Q_L L}{D_{ax,L} \pi d_r^2} \quad (2.12)$$

$$\beta_S = \frac{k_r \eta \varepsilon_s}{(K_a)_{LS}} \quad (2.13)$$

2.2 ANALYTICAL SOLUTION

Solving transport problems in three-phase systems is inherently complex and often requires numerical approximation methods. However, analytical solutions can be applied to simplified models, provided that the boundary conditions are handled with care. Most available analytical solutions pertain to infinite or semi-infinite domains. For finite domains, analytical approaches have been developed by Feike and Torid (1998) and Dudukovic (1982). In these works, the authors adopt the analytical procedure in the finite field region ($0 \leq z \leq L \rightarrow 0 \leq \xi \leq 1$) where the method of separation of variables is used. The $\Gamma_S(\xi, \tau)$ was isolated from Eq. (2.10) and it was introduced in Eq. (2.6), reducing it to:

$$\frac{\partial \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \xi} = \frac{1}{P_E} \frac{\partial^2 \Gamma_L(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} - \gamma \Gamma_L(\xi, \tau) \quad (2.14)$$

Where,

$$\gamma = \frac{\alpha_{LS} \beta_S}{\beta_S + 1} \quad (2.15)$$

The analytical solution of Eq. (2.14) was obtained by the separation of variables method using the following relation:

$$\Gamma_L(\xi, \tau) = N_L(\xi) * Z_L(\tau) \quad (2.16)$$

Then, Eq. (14) was separated in two ordinary differential equations with constant coefficients:

$$\frac{dZ_L(\tau)}{d\tau} + \lambda^2 Z_L(\tau) = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{d^2 N_L(\xi)}{d\xi^2} - \frac{dN_L(\xi)}{d\xi} + (\lambda^2 - \gamma) P_E N_L(\xi) = 0 \quad (2.18)$$

The global solution of Eqs. (17) and (18) for $\xi = 1$ is given by:

$$\Gamma_L(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1.6}{T_{2,n}(\lambda_n) T_{3,n}(\lambda_n) - T_{1,n}(\lambda_n) T_{4,n}(\lambda_n)} \left\{ [T_{2,n}(\lambda_n) - T_{3,n}(\lambda_n) \sin \varphi_n(\lambda_n) \cos \varphi_n(\lambda_n)] + \right. \\ \left. T_{4,n}(\lambda_n) \cos \varphi_n(\lambda_n) [\cos \varphi_n(\lambda_n) - 1] + \sin \varphi_n(\lambda_n) [T_{3,n}(\lambda_n) - T_{1,n}(\lambda_n) \sin \varphi_n(\lambda_n)] \right\} e^{-\lambda_n^2 \tau} \quad (2.1)$$

Where,

$$T_{1,n}(\lambda_n) = \frac{1}{1 + 16 [\varphi_n(\lambda_n)]^2} \left\{ \varphi_n(\lambda_n) [3.2 \sin \varphi_n(\lambda_n) \cos \varphi_n(\lambda_n) + 0.6 \varphi_n(\lambda_n)] + \sin^2 \varphi_n(\lambda_n) \right. \\ \left. [0.8 + 25.6 [\varphi_n(\lambda_n)]^2] \right\} \quad (2.20)$$

$$T_{2,n}(\lambda_n) = \frac{\varphi_n(\lambda_n)}{1 + 16 [\varphi_n(\lambda_n)]^2} \left\{ 3.3 \sin^2 \varphi_n(\lambda_n) - 13.2 \sin \varphi_n(\lambda_n) \cos \varphi_n(\lambda_n) + 0.4 [\varphi_n(\lambda_n)]^3 \right\} \quad (2.21)$$

$$T_{3,n}(\lambda_n) = \frac{1}{1 + 16 [\varphi_n(\lambda_n)]^2} \left\{ 3.3 \varphi_n(\lambda_n) \cos^2 \varphi_n(\lambda_n) + 13.2 [\varphi_n(\lambda_n)]^2 + \cos \varphi_n(\lambda_n) \sin \varphi_n(\lambda_n) - 2 \right. \\ \left. \varphi_n(\lambda_n) - 10.4 [\varphi_n(\lambda_n)]^3 \right\} \quad (2.22)$$

$$T_{4,n}(\lambda_n) = \frac{1}{1 + 16 [\varphi_n(\lambda_n)]^2} \left\{ 1.6 \sin^2 \varphi_n(\lambda_n) \{ 1 + 16 [\varphi_n(\lambda_n)]^2 \} + 3.2 \varphi_n(\lambda_n) \cos \varphi_n(\lambda_n) \right. \\ \left. \sin \varphi_n(\lambda_n) - 10.4 [\varphi_n(\lambda_n)]^3 \right\} \quad (2.23)$$

$$\varphi_n(\lambda_n) = \frac{1}{2} \left\{ 4P_E \left\{ \left[\left(2n + \frac{1}{2} \right) \pi \right]^2 - \gamma \right\} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}}; \lambda_n = (2n + \frac{1}{2}); (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.24)$$

3. MATERIALS AND METHODS

The experiments were conducted in a three-phase trickle bed reactor consisting of a fixed bed with a height of 0.22 m and an inner diameter of 0.030 m, packed with catalytic particles. A cocurrent downward gas-liquid flow carried a liquid tracer in the liquid phase through the bed. The volumetric flow rates of the gas (QG) and liquid (QL) phases were maintained to ensure a low interaction regime, with QL ranging from 7.07×10^{-8} to $2.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and QG ranging from 1.41×10^{-5} to $3.18 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. These experiments were performed in a pilot plant trickle bed reactor (Ramachandran and Chaudhari, 1983).

Continuous analysis of the NaOH tracer (10 mol m^{-3}) was performed using an HPLC/UV-CG 480C system at the outlet of the fixed bed. The results are expressed in terms of tracer concentration versus time.

The methodologies used to evaluate the axial dispersion of the liquid phase and overall liquid-solid mass transfer effects for the $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$ -NaOH/activated carbon system were:

- Comparison of the experimental results with Equation (28) developed for the system;
- Evaluation of the axial dispersion coefficient ($D_{ax,l}$) and the overall liquid-solid mass transfer coefficient ($(K_a)_{ls}$) parameters in the mathematical model, with initial values obtained from the correlations in Table 2;
- Optimization of $D_{ax,l}$ and $(K_a)_{ls}$ parameters by comparing experimental data with model predictions from Equation (3.25).

The axial dispersion coefficient of the liquid phase and the overall liquid–solid mass transfer coefficient were simultaneously determined by minimizing the objective function (F), based on the comparison between experimental and theoretical data obtained at the fixed bed outlet, as defined below:

$$F[D_{ax,L}, (K_a)_{LS}] = \sum_{k=1}^N \left\{ \left[\Gamma_L(\tau) \right]_k^{Exp} - \left[\Gamma_L(\tau) \right]_k^{Eq.(19)} \right\}^2 \quad (3.25)$$

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Twenty tracer experiments were conducted in a laboratory-scale trickle-bed reactor (TBR), varying the liquid-phase volumetric flow rate (Q_L). Experimental procedures and results, focused on the trickling flow regime, are presented and discussed in detail. Model predictions were compared with the experimental data sets. An objective function (F) was calculated to assess the agreement, indicating strong correlation between the model and experimental results. Optimization of the axial dispersion coefficient ($D_{ax,L}$) and the overall liquid–solid mass transfer coefficient $(K_a)_{LS}$ was performed using a subroutine that minimizes the objective function (Box, 1965).

Table 2: Correlations for the obtainment of the $D_{ax,L}$, k_{LS} and PWE, the initial values

Correlations	Equation s	Reference s
$D_{ax,L} = 0.55 (Re_L)^{0.61}$	(4.26)	Lange et al. (1999)
$(K_a)_{LS} = 2.514 \frac{\left[1 - \left(\frac{h_L}{\varepsilon_{ex}}\right)\right] D_L}{d_p^2} (R_L)^{0.73} (R_G)^{0.2} (S_{CL})^{0.5} \left(\frac{d_p}{d_r}\right)^{0.2}$	(4.27)	Fukushima and Kusaka, (1977)
$PWE = 3.40 (Re_L)^{0.22} (Re_G)^{-0.08} (Ga_L)^{-0.51}$	(4.28)	Fukushima and Kusaka, (1977)

The calculation of NaOH concentrations from the mathematical model for the N_2/H_2O –NaOH/activated carbon system involves several fixed parameters. The values of these parameters used in the parameter-fitting procedure are listed in Table 3.

The axial dispersion coefficient ($D_{ax,L}$) and the overall liquid–solid mass transfer coefficient $((K_a)_{LS})$ were optimized at various volumetric flow rates of the liquid phase, ranging from 5.581×10^{-7} to $4.248 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The $D_{ax,L}$ values varied between 0.735×10^{-5} and $3.186 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ when using H_2O and NaOH as liquid fluids. Similarly, $(K_a)_{LS}$ ranged from 0.124×10^{-2} to $2.496 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. The objective function values ranged from 1.212×10^{-4} to 1.572×10^{-4} . Optimization for all twenty runs was

performed by minimizing the objective function, as defined in Eq. (2.25). The optimized values of $D_{ax,L}$ and $(Ka)_{LS}$ across the runs varied by up to an order of magnitude.

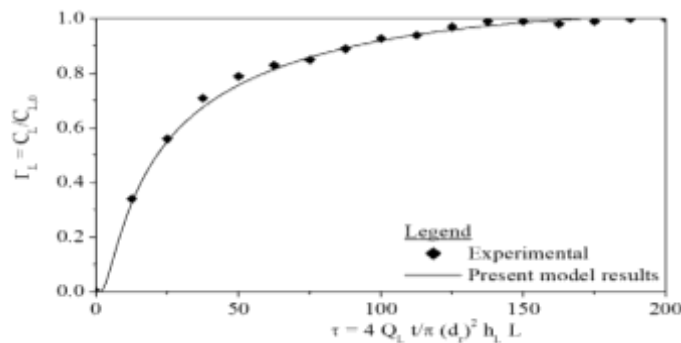
The tracer method was developed in our laboratory to rapidly evaluate the external fluid-solid contacting efficiency (Silva et al., 2003). This study aims to experimentally and theoretically investigate tracer behavior introduced into the liquid stream. Experimentally measured tracer concentrations at the outlet of the fixed-bed TBR were obtained over time using HPLC with a UV detector (CG480C model). These concentrations were then compared with predictions from the mathematical model. The dimensionless dynamic concentration profiles are presented in Figures 1a and 1b, which correspond to different volumetric flow rates. The good agreement between experimental and theoretical results confirms the validity of the mathematical model, Eq. (2.19).

Table 3: Summary of intervals of operating conditions for the particle-fluid (Colombo et al., 1976 and Silva et al., 2003)

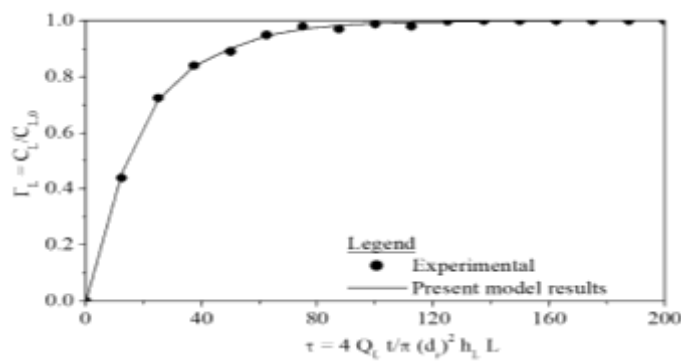
Category	Properties	Num. Values
Op. Conditions	Pressure (P), atm	1.01
	Temperature (T), K	298.00
	Volumetric flow rates of the liquid phase (Q_L) $\times 10^6$, $m^3 s^{-1}$	4.248-0.558
	Volumetric flow rates of the gas phase (Q_G) $\times 10^5$, $m^3 s^{-1}$	9.861
	Standard acceleration of gravity (g), $m s^{-2}$	9.81
Bed properties	Total bed height (L) $\times 10^2$, m	0.22
	Bed porosity (ϵ_s)	0.59
	External porosity (ϵ_{ex})	0.39
	Effective liquid-solid mass transfer area per unit column	0.021
	Diameter of the catalyst particle (d_p) $\times 10^4$, m	3.90
	Diameter of the reactor (d_r) $\times 10^2$, m	3.00
	Density of the particle (ρ_p) $\times 10^{-3}$, $kg m^{-3}$	2.56
	reaction rate constant (k_r) $\times 10^{-1}$, $kgmol kg^{-1} s^{-1}$	5.41
Liquid properties	Density of the liquid phase (ρ_l) $\times 10^{-3}$, $kg m^{-3}$	1.01
	Liquid molecular diffusivity (D_L) $\times 10^{10}$, $m^2 s^{-1}$	5.81

	Viscosity of the liquid phase (μ_l) $\times 10^{-4}$, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	8.96
	Surface tension (σ_l) $\times 10^2$, N m^{-1}	5.51
	Dynamic liquid holdup (h_L) $\times 10^1$	4.91
Gas properties	Density of the gaseous phase (ρ_g) $\times 10^1$, kg m^{-3}	6.63
	Viscosity of the gaseous phase (μ_g) $\times 10^5$, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	1.23

In Fig. 1a, the fitted curve from experimental data is compared with transient mathematical model simulations at a volumetric flow rate of $3.751 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. The axial dispersion coefficient of the liquid phase for this experiment was $2.836 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, and the overall liquid–solid mass transfer coefficient was $2.196 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. The Peclet number was 149.7, and the objective function value was 1.423×10^{-4} . The simulation time was approximately 9 seconds. The saturation profile shows a propagating front around $\tau = 190$, demonstrating good agreement between experimental and theoretical results and validating the mathematical model.



(a)



(b)

Figure 1: Concentration profiles of the NaOH tracer at the outlet of the $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$ -NaOH/activated carbon in operating conditions from $4.248 \times 10^{-6} \leq Q_L \leq 5.581 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$; $Q_G = 9.861 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$

In Fig. 1b, the fitted curve from experimental data is compared with transient mathematical model simulations at a volumetric flow rate of $1.096 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The axial dispersion coefficient of the liquid phase was $1.105 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, and the overall liquid–solid mass transfer coefficient was $0.975 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. The objective function value was 1.015×10^{-4} , and the Peclet number was 112.3. The simulation time was approximately 6 seconds. The saturation profile exhibits a propagating front around $\tau = 120$, demonstrating good agreement between experimental and theoretical results and validating the mathematical model.

Analysis of the axial dispersion coefficient of the liquid phase and the overall liquid–solid mass transfer coefficient in concurrent gas–liquid trickle bed reactors has mostly relied on empirical correlations valid within specific operating conditions. In this study, the axial dispersion coefficient, $D_{ax,L}$, and the overall liquid–solid mass transfer coefficient, $(Ka)_{LS}$, were calculated as functions of the volumetric flow rate of the liquid phase. Both coefficients increase with increasing volumetric flow rate.

In the studied trickling flow regime, our experimental results for the axial dispersion coefficient of the liquid phase and the overall liquid–solid mass coefficient are well described by the following correlations:

$$D_{ax,L} = 88.149(Q_L)^{1.248}, R^2 = 0.9967; 4.248 \times 10^{-6} \leq Q_L \leq 5.581 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}; Q_G = 9.861 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (4.29)$$

$$(Ka)_{LS} = 40.791(Q_L)^{2.127}, R^2 = 0.9978; 4.248 \times 10^{-6} \leq Q_L \leq 5.581 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}; Q_G = 9.861 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (4.30)$$

The exponent and the pre-exponential term related to the volumetric flow rate in Eqs. (4.29) and (4.30) were optimized. Among the four resulting parameters, the accuracy was particularly high for the exponent of the volumetric flow rate. Table 4 presents these parameters along with their corresponding accuracies.

Table 4: Confidence intervals from 95%

Equation (4.29)		Equation (4.30)	
Parameters	Accuracy (%)	Parameters	Accuracy (%)
88.149	9.16	40.791	10.32
1.248	3.78	2.127	4.13

The mean relative error between the predicted and experimental values of $D_{ax,L}$ and $(ka)_{LS}$ is computed as follows:

$$\bar{\varphi}_{D_{ax,L}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{\left| D_{ax,L}^{Pred.} - D_{ax,L}^{Exp.} \right|}{D_{ax,L}^{Exp.}} \quad (4.31)$$

$$\bar{\varphi}_{(ka)_{LS}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{\left| (Ka)_{LS}^{Pred.} - (Ka)_{LS}^{Exp.} \right|}{(Ka)_{LS}^{Exp.}} \quad (4.32)$$

The mean values of the axial dispersion coefficient and the global mass transfer coefficient were assessed using the root mean square deviation (RMSD), which quantifies the deviation between predicted and experimental values.

$$RMSD_{D_{ax,L}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_p} \left[\left(\bar{\varphi}_{D_{ax,L}} \right)^{exp.} - \left(\bar{\varphi}_{D_{ax,L}} \right)^{pred.} \right]^2} \quad (4.33)$$

$$RMSD_{(ka)_{LS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_p} \left[\left(\bar{\varphi}_{(ka)_{LS}} \right)^{exp.} - \left(\bar{\varphi}_{(ka)_{LS}} \right)^{pred.} \right]^2} \quad (4.34)$$

Figure 2 shows the variation in the experimental axial dispersion coefficient of the liquid phase, along with theoretical predictions from Eq. (4.29), as a function of the volumetric flow rate. The agreement between theoretical and experimental values is satisfactory across the entire range of volumetric flow rates. The mean relative error between the predicted and experimental results of the hydrodynamic parameter was calculated using Eq. (4.31). Additionally, the variability of the relative error around the mean was quantified using Eq. (4.33). These metrics were computed over twenty runs, yielding a mean relative error of 8.57% and a root mean square deviation of 6.21%.

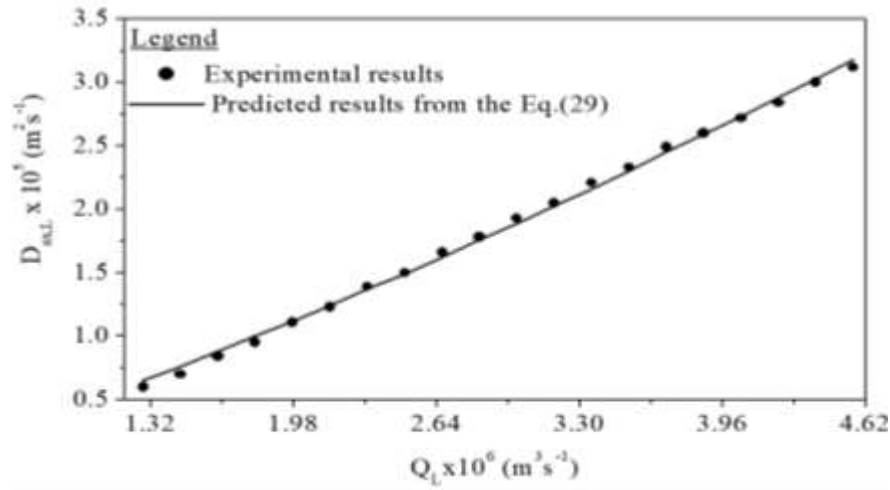


Figure2: Axial Dispersion Coefficient of the Liquid Phase as a Function of the Volumetric Flow Rate

Figure 3 presents the variation in the experimental data of the overall liquid–solid mass transfer coefficient, along with theoretical predictions obtained from Eq. (4.30). The comparison between theoretical and experimental results shows very good agreement, particularly across the full range of volumetric flow rates. The mean relative error between the predicted and experimental values of this parameter was computed using Eq. (4.32). Furthermore, the deviation of the relative error around the mean value was calculated from Eq. (4.34). Based on twenty experimental runs, the mean relative error was 9.71%, and the quadratic deviation was 6.83%.

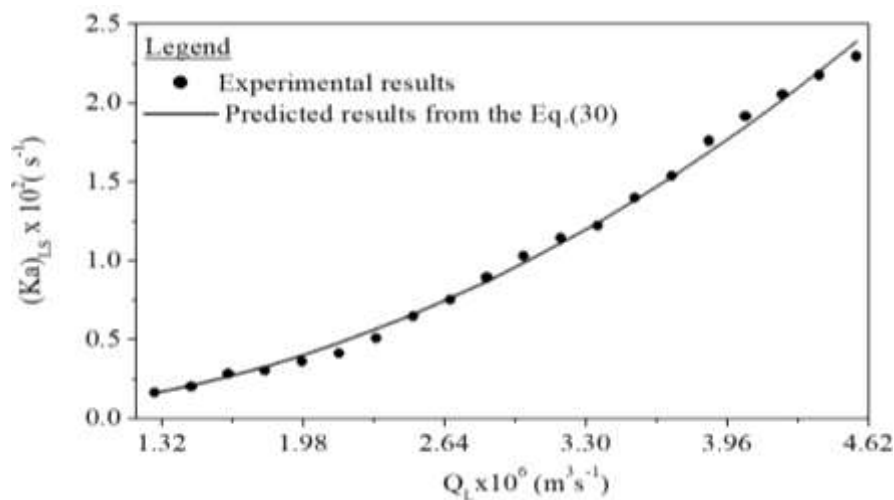


Figure 3: Overall Liquid-Solid mass Transfer Coefficient as a Function of the Volumetric Flow Rate

5. CONCLUSIONS

The objective of this paper is to conduct an analysis of the axial dispersion coefficient of the liquid phase and the overall liquid–solid mass transfer coefficient using NaOH tracer in a trickle-bed reactor (TBR) under trickling flow conditions. First, the analytical solution of the mathematical model developed for the NaOH tracer in the TBR is presented. In the second step, the parameters $D_{ax,L}$ and $(ka)_{LS}$ were simultaneously optimized by comparing experimental results with Eq. (2.19) via Eq. (3.25). In the third step, the model was validated by comparing experimental data with theoretical predictions from Eq. (2.19), as shown in Figs. 1a and 1b. The fourth step involved proposing correlations for the axial dispersion coefficient of the liquid phase and the overall liquid-solid mass transfer coefficient as functions of the volumetric flow rate, according to Eqs. (3.29) and (3.30). In the fifth step, the behavior of these two parameters as functions of volumetric flow rate was illustrated in Figs. 2 and 3. Furthermore, statistical analysis using confidence intervals demonstrated that all parameters involved in the correlations for $D_{ax,L}$ and $(ka)_{LS}$ were estimated with high accuracy.

NOMENCLATURE

C_L	Concentration of the liquid tracer in the liquid phase, kg m^{-3}
C_S	Concentration of the liquid tracer in the external surface of solid, kg m^{-3}
$D_{ax,L}$	Axial dispersion coefficient for the liquid tracer in the liquid phase, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
D_L	Liquid molecular diffusivity, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
d_p	Diameter of the catalyst particle, m
d_r	Diameter of the reactor, m
F	Objective function
PWE	wetting factor, dimensionless
Ga_L	Galileo number, $G_{aL} = d_p^3 g \rho_L^2 / \mu_L$
h_L	Dynamic liquid holdup, dimensionless
i	Complex number $\sqrt{-1}$
$(Ka)_{LS}$	overall liquid-solid mass transfer coefficient, s^{-1}
k_r	Reaction constant, $\text{kgmol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$
L	Height of the catalyst bed, m
N_L	Defined function in Eq. (16)
Pe	Peclet number, $Pe = V_{SL} L / D_{ax}$
Q_L	Volumetric flow rates of the liquid phase, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_G	Volumetric flow rates of the gas phase, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Re_L	Reynolds number, $Re_L = V_{SL} \rho_L d_r / \mu_L$
Re_G	Reynolds number, $Re_G = V_{SG} \rho_G d_r / \mu_G$
Sc_L	Schmidt number, $Sc_L = \mu_L / \rho_L D_L$
t	Time, s
z	Axial distance of the catalytic reactor, m
$Z_L(\tau)$	Function defined in Eq. (16)

Greek Letters

α_{LS}	Parameter defined in Eq. (11), dimensionless
β_S	Parameter defined in Eq. (13), dimensionless
ε_{ex}	External porosity, dimensionless
ε_S	Bed porosity, dimensionless
Ψ_i	Dimensionless concentration of the tracer in liquid and solid, $i = L, S$
η	Catalytic effectiveness factor
μ_L	Viscosity of the liquid phase, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ξ	Parameter defined in Table 1, dimensionless
ρ_L	Density of the liquid phase, kg m^{-3}

REFERENCES

- Box, P., 1965, "A new method of constrained optimization and a comparison with other method", Computer Journal, Vol. 8, pp. 42-52.
- Burghardt A., Bartelmus G., Jaroszynski M., Kolodziej A., 1995, Hydrodynamics and mass transfer in a three-phase fixed bed reactor with concurrent gas-liquid downflow, Chemical Engineering and Processing, Vol. 28, pp. 83-99.
- Burghardt A., Kolodziej, A. S., Jaroszynski M., 1990, Experimental studies of liquid-solid wetting efficiency in trickle-bed cocurrent reactors", Chemical Engineering Journal, Vol. 28, pp. 35-49.
- Charpentier, J. C.; Favier, M., 1975. Some liquid holdup experimental data in trickle bed reactors for foaming and non-foaming hydrocarbons, Aiche Journal, 21, 1213-1221.
- Dudukovic M. P., 1982, "Analytical solution for the transient response in a diffusion cell of the wick-kallenbach type", Chemical Engineering Science, Vol. 37, pp. 153-158.
- Feike J. L., Toride N., 1998, "Analytical solutions for solute transport with binary and ternary exchange", Soil Sci. Soc. Am. J, Vol. 56, pp. 855-864.
- Fukushima, S., Kusaka, K., 1977, "Interfacial area boundary of hydrodynamic flow region in packed column with cocurrent downward flow, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 10, No. 6, pp. 461-467.
- Iliuta, I, Bildea, S. C., Iliuta, M. C., Larachi, F., 2002, "Analysis of trickle-bed and packed bubble column bioreactors for combined carbon oxidation and nitrification", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 19, pp. 69-87.
- Lange, R., Gutsche, R., Hanika, J., 1999, "Forced periodic operation of a trickle-bed reactor", Chemical Engineering Science, Vol. 54, pp. 2569-2573.
- Latifi, M. A., Naderifar, A., Midoux, N., 1997, "Experimental investigation of the liquid-solid mass transfer at the wall of trickle-bed - Influence of Schmidt Number", Chemical Engineering Science, Vol. 52, pp. 4005- 4011.
- Liu, G., Zhang, X., Wang, L., Zhang, S., Mi, Z., 2008, "Unsteady-state operation of trickle-bed reactor for dicyclopentadiene hydrogenation", Chemical Engineering Science, Vol. 36, pp. 4991-5001.
- Ramachandran P. A., Chaudhari, R. B., 1983, Three phase catalytic reactors, Gordon and Breach Science Publishers, New York, U.S.A., Chap. 7, pp. 200-255.
- Silva, J. D., Lima, F. R. A.; Abreu, C. A. M.; Knoechelmann, A, 2003, Experimental analysis and evaluation of the mass transfer process in a trickle bed regime, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 20, No.4, pp. 375-390.
- Specchia, V. and Baldi, G., Pressure Drop and Liquid Holdup for Two Phase Concurrent Flow in Packed Beds, Chem. Eng. Sci, 32, 515-523 (1977).

Capítulo 7



10.37423/250810255

COMPREHENSIVE MODELING AND SIMULATION OF TOLUENE STEAM REFORMING KINETICS AND HEAT TRANSFER IN SOLAR-POWERED REFORMERS

JORNANDES DIAS DA SILVA

Universidade de Pernambuco-UPE

Sérgio Mário Lins Galdino

Universidade de Pernambuco-UPE



1. INTRODUCTION

Growing concerns over fossil fuel depletion and climate change have spurred interest in renewable energy, particularly solar energy, as a sustainable alternative to conventional power generation. Solar-powered industrial processes have advanced significantly in this context. Among these, reforming systems that use solar heat to drive high-temperature endothermic reactions are known as solar thermochemical processes (Dolan et al., 2016). Solar thermochemical reforming employs concentrated solar energy as a thermal source to facilitate endothermic chemical transformations (Yu and Reitz, 2019; Abdesslem et al., 2013). This approach supports the sustainable production of renewable fuels, such as solar-derived hydrogen, through solar-driven reaction pathways.

The heat and mass transfer processes involved in the steam reforming of toluene (SRT) within a solar thermochemical reactor (STR) can be numerically investigated using a comprehensive mathematical modeling approach. This modeling framework integrates the principles of convective and conductive heat transfer with multicomponent mass transport; all coupled to a detailed thermochemical kinetic model that governs the reaction mechanism. The model accounts for spatial and temporal temperature variations in the reactor domain, as well as the diffusion and convection of chemical species within the gas phase and at the catalytic surface.

Solar-driven toluene reforming relies on the utilization of concentrated solar irradiation (CSI) as an energy source to sustain the high operating temperatures required for the process. This has led to the development of the solar thermochemical reactor (STR) concept to study the solar reforming of toluene (SRT) (Modest, 2013). As an emerging renewable energy technology, solar-driven steam reforming of toluene is a promising method for producing solar hydrogen (H_2). The STR is a crucial device for reforming processes that operate at elevated temperatures and enable various high-temperature applications. However, the modeling of STRs remains a challenging and active research area in renewable energy engineering (Ceylan et al., 2017). Typically, mathematical models integrate physical and chemical parameters by coupling fluid-solid mass transfer, heat transfer, momentum transfer, and chemical reaction processes (Chen et al., 2018). Within this framework, mathematical modeling serves as an effective tool for analyzing reactor design and optimizing operating conditions based on STR performance.

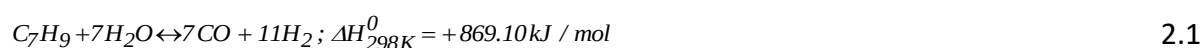
This work aims to investigate the heat and mass transfer phenomena coupled with thermochemical reaction kinetics in a solar thermochemical reactor (STR). The performance of the STR under solar-driven toluene reforming (SRT) conditions is numerically evaluated, with emphasis on gas-phase

temperature profiles. The study also explores the spatial distribution of reactants and products, the influence of operating time on toluene conversion, and the dimensionless hydrogen flow rate (DFR) relative to the initial toluene concentration.

2. PHYSICAL MODEL

2.1 KINETIC MECHANISM

The kinetic mechanism is the sequence of elementary chemical reactions and their rate expressions that explain how reactants (toluene and steam) convert into products (mainly hydrogen, carbon monoxide, and carbon dioxide) in the presence of a catalyst under high-temperature conditions. In solar-driven steam reforming of toluene, the SRT reaction was considered as follows.



The component models of these reactions are defined as toluene (C_7H_8), oxygen (O_2), hydrogen (H_2), carbon and monoxide (CO).

2.2 THERMOCHEMICAL MODELLING

The kinetic model of the global rate provides a mathematical framework for describing the overall reaction rate as a function of temperature, partial pressures of reactants, and catalytic surface properties. In the context of solar-driven toluene steam reforming, this model captures the net rate at which toluene reacts with steam to generate products such as hydrogen (H_2), carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO_2). The kinetic model of the global rate is given as follows.

$$R_{SRT} = k_r C_{C_7H_9}; k_r = k_{r,0} \exp\left(\frac{E_a}{RT_g}\right) \quad 2.2$$

Where R_{SRT} ($\text{kmol/kg}_{\text{cat}} \text{ sec}$) is the global reaction rate, k_r ($\text{m}^3/\text{kg}_{\text{cat}} \text{ sec}$) is the constant of the global reaction rate (Eq. (1)), $C_{C_7H_9}$ (kmol/m^3) is the concentration of toluene, respectively; $k_{r,0}$ ($\text{m}^3/\text{kg}_{\text{cat}} \text{ sec}$) is the frequency factor, E_a (kJ/kmol) is the activation energy, R (kJ/kmol K) is the universal gas constant, T_g (K) is the gas phase, respectively.

The net rates of each chemical components (r_i , $i = \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}$ and H_2) are computed in Table 1 and can be found in Reference (Cruz and Silva, 2017).

Table 1: Net rates of components i from Eq. (1).

Components	Equations of net rates	Components	Equations of net rates
C_7H_9	$r_{\text{C}_7\text{H}_9} = -\eta_1 R_{\text{SRT}}$	CO	$r_{\text{CO}} = +7\eta_1 R_{\text{SRT}}$
H_2O	$r_{\text{H}_2\text{O}} = -7\eta_1 R_{\text{SRT}}$	H_2	$r_{\text{H}_2} = +11\eta_1 R_{\text{SRT}}$

2.3 THERMOCHEMICAL PROCESS

Thermochemical processes refer to chemical transformations that occur under the influence of thermal energy, typically involving heat-induced reactions such as decomposition, synthesis, reforming, or oxidation. These processes play a vital role in converting chemical feedstocks into valuable products through endothermic or exothermic reactions, often at elevated temperatures. Specifically, the thermochemical process in steam reforming involves the reaction of hydrocarbons, such as toluene, with steam at elevated temperatures, typically in the range of 600-900°C. The steam reforming reaction is strongly endothermic, requiring continuous heat supply to sustain the reaction. The overall process converts complex organic molecules into synthesis gas (syngas), primarily composed of hydrogen (H_2), carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO_2), which are valuable intermediates for hydrogen production and other chemical syntheses. Researchers have demonstrated the effective use of solar thermal energy to drive highly endothermic reforming reactions. To investigate the steam reforming of toluene (SRT) process, a schematic setup (see Fig. 1) was employed within a solar thermochemical reactor (STR).

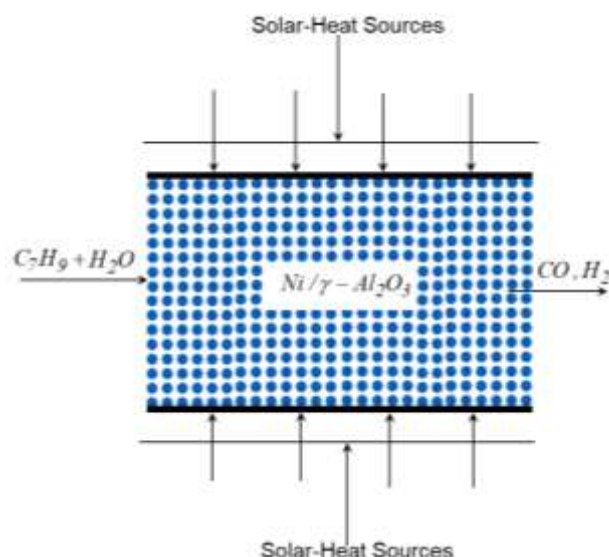


Fig. 1: schematic setup from STR

2.4 STR MODELING

The main purpose of this section is to develop a precise mathematical model to simulate the behavior of the STR processing system. To evaluate the key variables in the developed model, the following assumptions are adopted: (i) the gas phase behaves ideally; (ii) axial dispersion occurs within the STR; (iii) no diffusion of chemical components takes place at the catalyst surface or inside the catalyst; (iv) constant pressure and superficial velocity are maintained throughout the STR, with no pressure drop; (v) the STR operates under dynamic conditions; (vi) the axial porosity of the STR is constant; and (vii) physical properties such as density, catalyst weight, and particle size remain constant over the STR's operating range. Based on these assumptions, the energy and mass balance equations within the STR are formulated as follows.

- Energy balance in the gas phase;

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i C_{p,i} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \sum_{i=1}^4 \rho_i C_{p,i} \frac{\partial T_g}{\partial z_j} = \left(\lambda_g (T_g) + \frac{16n^2 \sigma T_\infty^3}{3k_R} \right) \frac{\partial^2 T_g}{\partial z_j^2} + h_{gs} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{3}{R_p} (T_g - T_s|_{r=R_p}) + \Delta H_1 \eta_1 R_{SRT} \quad 2.$$

3

In the Eq. (2a), ρ_i (kg/m³) is the density of the gaseous mixture, T_g (K) is the temperature of the gaseous phase, $C_{p,i}$ (kJ/kg K) is the molar heat capacity at constant pressure of the gaseous mixture, λ_g (W/m K) is the gas thermal conductivity, n (-) is the refractive index, σ (W/m² T⁴) is the Stefan-Boltzmann constant, T_∞ (K) is the ambient temperature, k_R (m⁻¹) is the Rosseland extinction coefficient in porous medium, h_{gs} (W/m² K) is the gas-solid heat transfer coefficient, ε_b

($\text{m}^3\text{gas}/\text{m}^3\text{reactor}$) is the void fraction of bed, r_p (m) is the particle radius, T_s (K) is the temperature of the solid phase, ΔH_1 (kJ/kmol) is the heat of reaction, η_1 (-) is the effectiveness factor from Eq. (1), respectively.

The appropriate initial and boundary conditions associated with Eq. (2.3) are defined below to ensure a well-posed problem and accurately capture the temporal and spatial evolution of the dependent variables within the STR domain:

- initial condition, i.e., $t = 0$; the inlet face surface from STR, i.e., $z = 0^+$; at the outlet face surface from ST- μ PB reactor, i.e., $z = L_z$;

$$T_g \Big|_{t=0, 0 \leq z \leq L_z} = 0 \quad 2.4$$

$$\lambda_g \left(T_g \right) \frac{\partial T_g}{\partial z_j} \Big|_{z=0^+, t \geq 0} = \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \sum_{i=1}^4 \rho_i C_{pi} \left(T_g \Big|_{z=0^+, t \geq 0} - T_{g,in} \right) \quad 2.5$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial z_j} \Big|_{z=L_z, t \geq 0} = 0 \quad 2.6$$

- Mass balance of components i ($i = \text{C}_7\text{H}_8, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}$ and H_2) in STR;

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \frac{\partial C_i}{\partial z_j} = D_{ax,i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z_j^2} + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \eta_1 \sum_{i=1}^4 \rho_i r_i; 0 \leq z \leq L_z, t > 0 \quad 2.7$$

In Eq. (2.7), C_i (kmol/m^3) is the concentration of components i in the gas phase, q_g (m^3/sec) is the gas flow rate, d_c (m) is the inner diameter from STR, $D_{ax,i}$ (m^2/sec) is the axial mass dispersion coefficient of components i , r_i ($\text{kmol}/\text{kg}_{\text{cat.}} \text{sec}$) is the net rates from components i , respectively.

The appropriate initial and boundary conditions corresponding to Eq. (2.7) are presented below to ensure the mathematical model is properly constrained and capable of accurately representing the system's temporal and spatial behavior within the STR domain:

- Initial condition, i.e., $t = 0$; at the inlet face from ST- μ PB reactor, i.e., $z = 0^+$; at the outlet face from ST- μ PB reactor, i.e., $z = L_z$;

$$C_i \Big|_{t=0, 0 \leq z \leq L_z} = 0 \quad 2.8$$

$$\varepsilon_b D_{ax,i} \frac{\partial C_i}{\partial z_j} \Big|_{z=0^+, t \geq 0} = \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \left(C_i \Big|_{z=0^+, t \geq 0} - C_{i,in} \right) \quad 2.9$$

$$\left. \frac{\partial C_i}{\partial z_j} \right|_{z=L_z, t \geq 0} = 0 \quad 2.10$$

3. APPLICATION OF THE LAPLACE TRANSFORM

The Laplace transforms of the unknown functions ($T_g(z, t)$ and $C_i(z, t)$, $t \geq 0$) are defined by the integrals (if they exist) corresponding to Eqs. (5a) - (5c), which can be found in Silva et al. (2019). Similarly, the Laplace transforms of the time derivatives in the partial differential equations are given by Eqs. (5d) - (5f), also presented in Silva et al. (2019). Consequently, Eqs. (2a) - (3d) were transformed into ordinary differential equations (ODEs), along with their prescribed initial and boundary conditions. The resulting transformed equations are reported as follows.

- Energy balance for the gas phase in the Laplace domain;

$$\left(\lambda_g(T_g) + \frac{16n^2 \sigma T_\infty^3}{3k_R} \right) \frac{d^2 \bar{T}_g(z_j, s_k)}{dz_j^2} - \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \sum_{i=1}^4 \rho_i C_{p,i} \frac{d \bar{T}_g(z_j, s_k)}{dz_j} + \left(h_{gs} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{3}{R_p} - s_k \sum_{i=1}^4 \rho_i C_{p,i} \right) \bar{T}_g(z_j, s_k) - h_{gs} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{3}{R_p} \bar{T}_s(z_j, s_k) \Big|_{r=R_p} = 0 \quad 2.11$$

The boundary conditions from Eq. (2.11) are transformed in the Laplace domain as follows.

$$\left. \frac{d \bar{T}_g(z_j, s_k)}{dz_j} \right|_{z_j=0^+, s_k \geq 0} = \frac{4q_g \sum_{i=1}^4 \rho_i C_{p,i}}{\pi d_c^2 \lambda_g(\bar{T}_g)} \left(\bar{T}_g(z_j, s_k) \Big|_{z_j=0^+, s_k \geq 0} - \frac{\bar{T}_g(z_j)}{s_k} \right) \quad 2.12$$

$$\left. \frac{d \bar{T}_g(z_j, s_k)}{dz_j} \right|_{z_j=L_z, s_k \geq 0} = 0 \quad 2.13$$

- Mass balance of chemical components i in the Laplace domain;

$$D_{ax,i} \frac{d^2 \bar{C}_i(z_j, s_k)}{dz_j^2} - \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \frac{d \bar{C}_i(z_j, s_k)}{dz_j} - s_k \bar{C}_i(z_j, s_k) + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \eta_1 \sum_{i=1}^4 \bar{r}_i(z_j, s_k) = 0 \quad 2.14$$

The boundary conditions from Eq. (2.14) are shown in the Laplace domain as follows.

$$\varepsilon_b D_{ax,i} \left. \frac{d \bar{C}_i(z_j, s_k)}{dz_j} \right|_{z_j=0^+, s_k \geq 0} = \frac{4q_g}{\pi d_c^2} \left(\bar{C}_i(z_j, s_k) \Big|_{z_j=0^+, s_k \geq 0} - \frac{\bar{C}_i(z_j)}{s_k} \right) \quad 2.15$$

$$\left. \frac{d\bar{C}_i(z_j, s_k)}{dz_j} \right|_{z_j=L_z, s_k \geq 0} = 0 \quad 2.16$$

3.1 NUMERICAL SOLUTION OF TRANSFORMED EQUATIONS

The mathematical difficulties for solving a system of nonlinear ordinary differential equations are great due to the numerical stability. In view that, some numerical methods have been used to investigate numerical solutions. The selection of numerical method is dependent on the desired accuracy as well as concerns about the stability and robustness of the system while maintaining computational efficiency (Silva, 2015). In this study, the system of the transformed equations (Eqs. (2.11) - (2.16)) in jointly with the boundary conditions are discretized by finite volume (FV) method. After the discretization from the transformed equations using VF method, the inverse Laplace transformation is applied (Teles and Silva, 2015). The trapezoidal method was used to approximate the transformed functions in time domain and details can found in Ref. (Silva and Oliveira, 2012). It is found that the variation of integration step has negligible influence on the results obtained of this work. Therefore, an integration step of 10^{-6} was used to reach all the simulated results in this article.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 PARAMETERS OF THE MATHEMATICAL MODEL

A computational algorithm implemented in FORTRAN 95 was developed by the authors to solve the model equations presented in this work. The operating conditions, kinetic parameters, energy parameters, and mass transfer parameters used to simulate the SRT process variables are summarized in Table 2. Some physical properties were defined as functions of the operating temperature and were accordingly evaluated at the specific operating temperature of the SRT process.

Table 2: Operating conditions, kinetic parameters and mass parameters.

Categories	Properties	Numerical Values
Operation Conditions	Operating pressure (atm)	1.01
	Operating temperature (K)	1800
	Gas flow rate (m ³ /sec)	3.5x10 ⁻⁵ -5.5 x10 ⁻⁵
	Reactor diameter (d _c)	0.032

	Reactor length (m)	0.14
Kinetic parameters	Activation Energy (kJ/kmol K)	196
	Universal Constant of gases ($\text{m}^3 \text{ atm/kmol K}$)	8.314
	Frequency Factor ($\text{m}^3/\text{kg}_{\text{cat}} \text{ sec}$)	2.26×10^{13}
Energy parameters	Density of the gaseous mixture (kg/m^3)	0.793
	Molar heat capacity of the gaseous mixture (kJ/kg K)	1.079 0.40
	STR diameter (mm)	109.123
	Gas thermal conductivity (W/m K)	2.67×10^{-8}
	Stefan-Boltzmann constant ($\text{W/m}^2 \text{ T}^4$)	300
	Ambient temperature (T_{∞} , K)	1.738×10^4
	Rosseland extinction coefficient (m^{-1})	
Mass parameters	Initial concentration of C_7H_9 (kmol/m^3)	0.1501
	Initial concentration of H_2O (kmol/m^3)	0.5892
	Initial concentration of H_2 (kmol/m^3)	1.31×10^{-5}
	Initial concentration of CO (kmol/m^3)	1.06×10^{-8}
	Axial mass dispersion coefficient of C_7H_9 (m^2/sec)	6.14×10^{-6}
	Axial mass dispersion coefficient of H_2O (m^2/sec)	2.97×10^{-5}
	Axial mass dispersion coefficient of H_2 (m^2/sec)	9.02×10^{-6}
	Axial mass dispersion coefficient of CO (m^2/sec)	2.01×10^{-5}
	Void fraction of bed ($\text{m}^3\text{gas}/\text{m}^3\text{reactor}$)	0.41
	Effectiveness factor (-)	0.0139 (1250K)

4.2 TEMPERATURE PROFILES AND REACTANT AND PRODUCT DISTRIBUTIONS

A mathematical model was developed based on heat and mass transfer phenomena coupled with the kinetic model of the SRT process in a stirred tank reactor (STR). Figures 2 and 3 present the temperature profiles and the concentration profiles of reactants and products resulting from the SRT process.

Figure 2 shows the temperature profiles of the gas phase along the STR length for different inlet superficial gas velocities (V_{sg}). Five V_{sg} values, ranging from 0.90 to 1.90 m/s, were used to investigate

their effect on gas-phase temperature. As V_{sg} increases, the gas-phase temperature decreases from an initial value of 1800 K. For example, the temperature drops to 1242.37 K at $V_{sg} = 0.90$ m/s and further decreases to 1017.91 K at $V_{sg} = 1.90$ m/s. Additionally, the thermal equilibrium temperature at the gas outlet increases as V_{sg} decreases, ensuring total energy conservation in the SRT process. Therefore, increasing V_{sg} effectively reduces both the gas-phase temperature and the temperature gradient, thereby enhancing the thermal safety of the fixed bed within the STR.

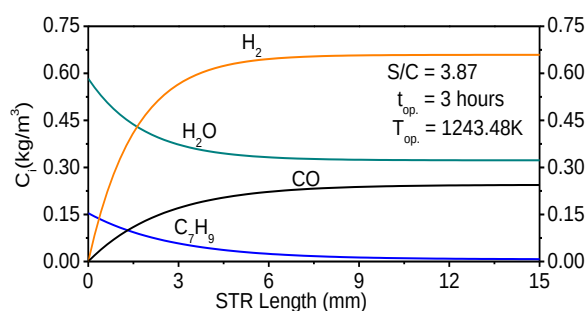
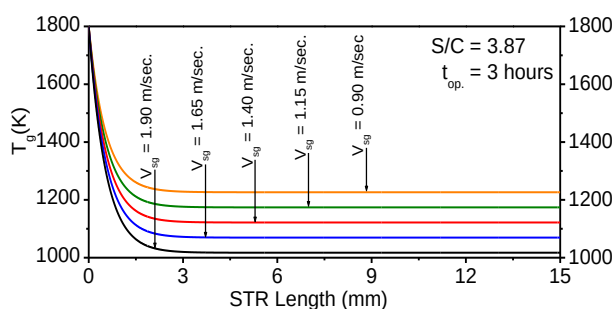


Fig. 2: Comparisons of the temperature profiles of the gas phase along the STR length on Ni/γ-Al₂O₃. **Fig. 3:** Reactant and product distributions along the STR length on Ni/γ-Al₂O₃.

Figure 3 shows the mole concentration profiles of reactants and products along the fixed bed of the porous medium STR with radiative heat loss. As observed, the mole concentrations of the reactants C₇H₉ and H₂O decrease sharply along the bed before exhibiting minor fluctuations up to the gas outlet. The mole concentration of H₂ increases significantly due to thermal energy storage in the gaseous mixture, reaching a maximum value and then remaining constant toward the outlet. In contrast, the mole concentration of CO rises more gradually, also reaching a plateau near the gas outlet.

4.3 CONVERSIONS OF C₇H₉ AND DRT OF H₂ AND CO

The SRT process is characterized by the overall conversion of C₇H₉ in the model reaction. Once the temperature and concentration profiles reach steady state, the conversion can be calculated using Eq. (4.1) below.

$$\text{Conver. of } C_7H_8 = 1 - \frac{C_{C_7H_8}}{C_{C_7H_8,0}} \quad 4.1$$

Figure 4 shows the effect of operating time on the overall conversion of C₇H₉ in the model reaction at 650 kPa and 1243.48 K in the STR fixed bed with radiative heat loss. The overall conversion was computed at five different operating times and increases steadily over time. At the

center of the outlet surface, the conversion values were 0.0000 ($t_1 = 0.00$ hours), 0.5204 ($t_2 = 1.0$ hour), 0.6873 ($t_3 = 1.5$ hours), 0.8158 ($t_4 = 2.0$ hours), and 0.9467 ($t_5 = 3.0$ hours).

The dimensionless flow rate (DFR) of H_2 , defined relative to the initial concentration of C_7H_9 , serves as a suitable metric to quantify the amount of H_2 produced in the SRT process. It is calculated using Eq. (4.2) as follows.

$$DFR \text{ of } H_2 = \frac{C_{H_2}}{C_{C_7H_9,0}}$$

4.2

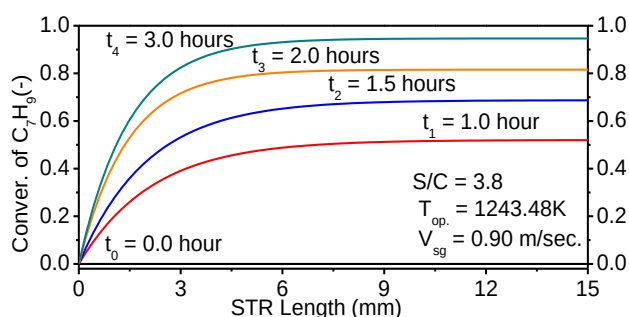


Fig. 4: Effect of the operating time on the conversions of C_7H_9 along the STR length of the SRT reaction on $Ni/\gamma-Al_2O_3$ ($d_{p,av.} = 96\mu m$) with 9% Ni loading.

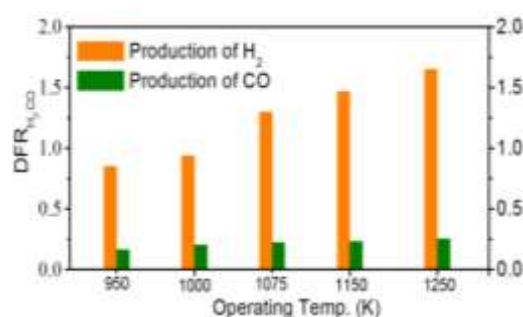


Fig. 5: Effect of the operating temperature on the DFR of H_2 and CO of the SRT on $Ni/\gamma-Al_2O_3$ ($d_{p,av.} = 96\mu m$) with 9% Ni loading.

Figure 5 shows the effect of operating temperature on the DFR of H_2 in the SRT process with radiative heat loss. The DFR of H_2 increases with increasing operating temperature due to the endothermic nature of the SRT reaction (Eq. (2.1)), resulting in higher hydrogen production at elevated temperatures. Figure 5 shows the effect of operating temperature on the DFR of H_2 in the SRT process with radiative heat loss. The DFR of H_2 increases with increasing operating temperature due to the endothermic nature of the SRT reaction (Eq. (2.1)), resulting in higher hydrogen production at elevated temperatures.

1. Conclusions

The heat transfer and thermochemical performance of the SRT process are numerically investigated, accounting for radiative heat loss. A mathematical model was developed to simulate heat and mass transport coupled with thermochemical reaction kinetics. The finite volume method was used to solve this model.

1. The temperature profiles of the gas phase are strongly influenced by the inlet superficial gas velocity (V_{sg}). Consequently, the reaction temperature at the outlet surface region of the STR varies between 1017.19 K and 1243.48 K.
2. The reactant concentration profiles (C_7H_9 and H_2O) decrease sharply along the length of the STR, while the product profiles (H_2 and CO) increase significantly in the same direction.
3. The overall conversion of C_7H_9 reached 94.58% after 3.0 hours of operation.
4. The DFR of the products (H_2 and CO) increases significantly with operating temperature, reaching maximum values of 1.6521 and 0.2548 at 1250 K, respectively.

REFERENCES

- Abdesslem J, Khalifa S, Abdelaziz N, Abdallah M, 2013, Radiative properties effects on unsteady natural convection inside a saturated porous medium. Application for porous heat exchangers, *Energy*, 61, 224-233.
- Cruz B M, Silva J D, 2017, A two-dimensional mathematical model for the catalytic steam reforming of methane in both conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reactors for the Production of hydrogen, *Int J Hydrogen Energy*, 42, 23670-23690.
- Ceylan I, Gurel A E, Ergun A, 2017, The mathematical modeling of concentrated photovoltaic module temperature. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 19641-19653.
- Chen X, Wang F, Yan X, Cheng Z, Han Y, Jie Z, 2018, Thermal and chemical analysis of methane dry reforming in a volumetric reactor under highly concentrated solar radiation, *Sol Energy*, 162, 187-195.
- Dolan M D, Beath A C, Hla S, Way J D, Abu El Hawa H W, 2016, An experimental and techno-economic assessment of solar reforming for H₂ production. *Int J Hydrogen Energy*, 41, 14583-14595.
- Modest M F, 2013, *Radiative Heat Transfer*. Burlington: Academic Press, third ed.
- Silva P. B. A, Carvalho J. D. C. G, Silva J. D, 2019, Hydrogen adsorption on Ni/ γ -Al₂O₃ in a fixed-bed adsorber: Experimental validation and numerical modelling. *Int J Hydrogen Energy*, 44, 304-317.
- Silva J. D, 2015, Numerical modelling for a catalytic trickle-bed reactor using Laplace transform technique. *Chem Eng Trans*, 43, 1573-1578.
- Silva J. D, Oliveira C B, 2012, Fluidynamics modelling for a fixed bed gasifier using Laplace transform finite difference method. *Proc Eng*, 42, 753-769.
- Teles V. H. B, Silva J. D, 2015, Pressure swing adsorption technology using 5A zeolite for the removal of H₂S in the fixed bed reactor. *Chem Eng Trans*, 43, 1111-1116.
- Yu Z, Reitz R D, 2019, Numerical investigation of radiative heat transfer in internal combustion engines. *Appl Energy*, 235, 147-163.

Capítulo 8



10.37423/250810256

INVESTIGATION OF THE HYDROGEN STORAGE PROCESS VIA ADSORPTION USING A ZSM-5 CATALYST IN A FIXED BED REACTOR

JORNANDES DIAS DA SILVA

Universidade de Pernambuco-UPE

Emanoel Soares Cândido Silva

Universidade de Pernambuco-UPE



1. INTRODUCTION

Steam reforming (SR), dry reforming with CO₂ (DR), and partial oxidation (POX) are three cornerstone routes for generating synthesis gas (syngas), a mixture primarily composed of H₂ and CO. In steam reforming, light hydrocarbons such as methane react with super-heated steam (700-950 °C) over Ni-based catalysts to yield H₂ and CO according to $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$. Dry reforming replaces steam with CO₂ ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$), allowing simultaneous greenhouse-gas utilization, though it typically demands slightly higher temperatures (750-1000 °C) and more coke-resistant catalysts, often Ni promoted with noble metals or rare earth oxides. Partial oxidation, in contrast, is mildly exothermic ($\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{H}_2$); when conducted autothermally it can be combined with SR or DR to balance heat demand, achieving compact reactor footprints attractive for on-board or distributed H₂ generation. Poirier et al. (2001) and Ströbel et al. (1999) demonstrated gravimetric hydrogen uptakes approaching 1-2 wt % at 77 K and 1 bar. This work laid the groundwork for today's rapidly evolving research into tailored pore architectures, spill-over promoters, and hybrid adsorbent-tank systems aiming to meet the U.S. DOE 2025 targets of 5.5 wt % and 40 g H₂ L⁻¹ for onboard vehicular storage.

A comprehensive mathematical model is developed to simulate hydrogen (H₂) adsorption in a fixed-bed column, incorporating key physical and mass transfer mechanisms that govern the system's dynamic behavior. The model explicitly includes axial dispersion in the gas phase along the column, which affects the longitudinal distribution of H₂ and influences breakthrough profiles and overall system performance. Mathematically, the system is described by a set of coupled partial differential equations (PDEs) representing mass balances in the gas phase, within the porous adsorbent, and at the adsorbent surface. These equations incorporate spatial and temporal variables, effective dispersion coefficients, intraparticle diffusivity, and adsorption isotherms (e.g., Langmuir or Freundlich). Together, they provide a rigorous framework for evaluating and predicting the performance of fixed-bed adsorbers used in hydrogen storage or purification systems. The modeling approach adopted here follows the methodology proposed by Silva et al. (2003), serving as a basis for system design, optimization, and scale-up.

The coupled system of partial differential equations (PDEs) describing hydrogen adsorption dynamics in the fixed-bed column was numerically solved using a hybrid computational approach combining the implicit finite difference method (IFDM) and the orthogonal collocation method (OCM), as applied in previous adsorption studies (Raghavan and Ruthven, 1986; Ma and Guiochon, 1991; Lee et al., 1999; Raghavan et al., 1986). This strategy leverages the strengths of each method for different equation

types. The linear equations governing hydrogen concentration in the gas phase and adsorption kinetics at the solid surface were discretized and solved using IFDM. This method is especially suited for stiff linear systems, providing enhanced numerical stability and unconditional stability in transient simulations involving fine temporal discretization.

The objective of this study is to develop and analyze a two-phase gas–solid model capable of simulating the dynamic behavior of hydrogen (H_2) adsorption onto ZSM-5 zeolite within a fixed-bed adsorption column. The model incorporates key mass transfer phenomena, including convective and dispersive transport in the gas phase and intraparticle diffusion within the microporous structure of the ZSM-5 particles. By capturing both interphase and intraparticle transport mechanisms, the model offers an accurate representation of adsorption kinetics and equilibrium, providing a foundation for optimizing hydrogen storage and purification processes under varying operational conditions.

2. PHYSICAL MODEL

A comprehensive physical model for hydrogen (H_2) storage has been developed to simulate and analyze the dynamic behavior of gas injection and distribution within a controlled environment. In this model, pure hydrogen gas is introduced into a chamber initially filled with nitrogen (N_2), which serves as an inert carrier or background gas. The injection process is carried out in the gaseous phase under defined pressure and temperature conditions to closely replicate experimental or operational scenarios. The spatial configuration, injection point, and flow direction follow the design parameters of the experimental prototype, as illustrated in Figure 1. This setup allows for the investigation of interfacial transport phenomena, gas mixing dynamics, and potential adsorption or reaction behaviors within the system.

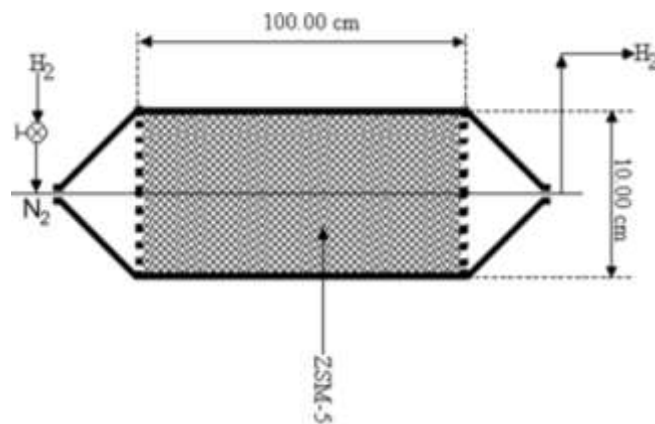


Figure 1: Physical model for the fixed-bed adsorption reactor

3. MATHEMATICAL MODELLING

3.1 MASS BALANCE OF H₂ IN THE GASEOUS PHASE

A mathematical model was developed to describe the behavior of the H₂ component, incorporating the following assumptions: (i) constant physical properties of the fluid phase; (ii) negligible radial concentration gradients within the adsorption column; (iii) plug flow with axial dispersion for the H₂ flow; (iv) explicit modeling of micropore diffusion within the solid adsorbent particles; and (v) surface adsorption kinetics governing H₂ uptake, represented by an appropriate kinetic model. Based on these assumptions, the governing conservation equations for H₂ are expressed in the following form:

- Mass balance of H₂;

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} + V_g \frac{\partial C_{H_2}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{z,H_2} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial z} \right) - k_{m,H_2} \frac{3}{r_p} (1 - \varepsilon_i) \left(C_{H_2} - C_{H_2,P} \Big|_{r=R} \right) \quad (3.1)$$

- Initial and boundary conditions;

$$C_{H_2} \Big|_{t=0} = C_{H_2,0} \quad (3.2)$$

$$D_{z,H_2} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = V_g \left(C_{H_2} \Big|_{z=0^+} - C_{H_2,0} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (3.4)$$

3.2 MASS BALANCE OF H₂ INSIDE ZSM-5

The resulting governing equation combines a transient mass balance with appropriate expressions for intraparticle diffusion and adsorption kinetics, capturing both the rate at which H₂ is transported into the particle and the rate at which it is immobilized on active sites. This comprehensive formulation thus accounts for the time-dependent accumulation of hydrogen within the solid phase, bridging the external mass transfer resistance, pore-scale transport processes, and molecular-level adsorption dynamics. It provides a robust framework for predicting adsorption performance under varying pressures, temperatures, and flow conditions, and serves as a critical foundation for the design and optimization of hydrogen storage and purification systems.

- Mass balance for H₂ within micropores of the solid phase;

$$\frac{\partial C_{H_2,p}}{\partial t} = D_{eff,H_2} \left(\frac{\partial^2 C_{H_2,p}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_{H_2,p}}{\partial r} \right) - \frac{\partial q_{H_2,ad}}{\partial t} \quad (3.5)$$

- Initial and boundary conditions;

$$C_{H_2,p} \Big|_{t=0} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial C_{H_2,p}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (3.7)$$

$$D_{eff,H_2} \frac{\partial C_{H_2,p}}{\partial r} \Big|_{r=R} = k_{m,H_2} \left(C_{H_2,g} - C_{H_2,p} \Big|_{r=R} \right) \quad (3.8)$$

- Mass balance for adsorbed H₂ at the surface of the solid particles;

$$\frac{\partial q_{H_2,ad}}{\partial t} = k_{ad} \left(C_{H_2,p} - \frac{q_{H_2,ad}}{\rho_p K_{ed}} \right) \quad (3.9)$$

- the initial condition;

$$q_{H_2,ad} \Big|_{t=0} = 0 \quad (3.10)$$

Equations (3.1) through (3.10) are analyzed by introducing dimensionless variables, which help simplify the mathematical expressions and highlight the key governing parameters. The definitions of these dimensionless variables are summarized in Table 1. By scaling the original variables according to the characteristic length, time, concentration, and other relevant physical quantities, the dimensionless form facilitates a more generalized analysis and comparison of the system behavior under different operating conditions.

Table 1: Dimensionless Concentrations, Dimensionless time, Dimensionless length of Column and

Dimensionless Radius of Particle

Dimensionless Variables	Dimensionless Variables	Dimensionless Variables
$\mathcal{C}_{H_2} = \frac{C_{H_2}}{C_{H_2,0}}$	$\mathcal{C}_{H_2,ad} = \frac{q_{H_2,ad}}{C_{H_2,0}}$	$\xi = \frac{z}{L}$
$\mathcal{C}_{H_2,p} = \frac{C_{H_2,p}}{C_{H_2,0}}$	$\tau = \frac{V_g}{L} t$	$\eta = \frac{r}{R}$

Equations (3.1) through (3.10) can be rewritten in terms of dimensionless variables to simplify the analysis and provide a more general understanding of the system's behavior. By normalizing key

quantities such as length, time, and concentration with appropriate characteristic scales, the governing equations become independent of specific units and highlight the fundamental dimensionless groups controlling the process. This approach not only reduces the complexity of the problem but also facilitates the comparison of results across different operating conditions and scales. The dimensionless forms of the equations are presented below:

- Dimensionless mass balance of the gas phase;

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2}}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}_{H_2}}{\partial \xi} = \frac{1}{Pe_g} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_{H_2}}{\partial \xi^2} - \alpha_g \left(\mathcal{G}_{H_2} - \mathcal{G}_{H_2,p} \Big|_{\eta=1} \right) \quad (3.11)$$

- Initial and boundary conditions have been rewritten in terms of dimensionless Variables;

$$\mathcal{G}_{H_2} \Big|_{\tau=0} = 1.0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2}}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0^+} = Pe_g \left(\mathcal{G}_{H_2} \Big|_{\xi=0^+} - 1 \right) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2}}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} = 0 \quad (3.14)$$

- Dimensionless mass balance of the solid phase;

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2,p}}{\partial \tau} = \beta_g \left(\frac{\partial^2 \mathcal{G}_{H_2,p}}{\partial \eta^2} + \frac{2}{\eta} \frac{\partial \mathcal{G}_{H_2,p}}{\partial \eta} \right) - \frac{\partial \mathcal{G}_{H_2,ad}}{\partial \tau} \quad (3.15)$$

$$\mathcal{G}_{H_2,p} \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2,p}}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2,p}}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = Bi_m \left(\mathcal{G}_{H_2,g} - \mathcal{G}_{H_2,p} \Big|_{\eta=1} \right) \quad (3.18)$$

- Dimensionless mass balance for adsorbed H₂ at the surface of the solid particles;

$$\frac{\partial \mathcal{G}_{H_2,ad}}{\partial \tau} = \mu_1 \left(\mathcal{G}_{H_2,p} - \frac{\mathcal{G}_{H_2,ad}}{\mu_2} \right) \quad (3.19)$$

$$\mathcal{G}_{H_2,ad} \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (3.20)$$

The dimensionless parameters associated with Equations (3.11) through (3.20) are summarized and defined in Table 2. These parameters are essential for characterizing the relative influence of different

physical phenomena in the system, such as diffusion, reaction rates, and transport mechanisms. By using these dimensionless groups, the equations can be analyzed more effectively, enabling a generalized understanding of the system behavior across various operating conditions. The definitions in Table 2 provide the mathematical expressions and physical meanings of each parameter to guide the subsequent analysis.

Table 2: Dimensionless coefficients from Eqs. (3.11) to (3.20).

Dimensionless Parameters	Dimensionless Parameters	Dimensionless Parameters
$Pe_g = \frac{LV_g}{D_{z,H_2}}$	$\beta_g = \frac{Deff,H_2}{R_p^2} \frac{L}{V_g}$	$\mu_1 = \frac{k_{ad} L}{V_g}$
$\alpha_g = k_{m,H_2} \frac{3}{r_p} \frac{L}{V_g} (1 - \varepsilon_i)$	$Bi_m = \frac{k_{m,H_2} R_p}{D_{eff,H_2}}$	$\mu_2 = \rho_p K_{ed}$

4. ANALYSIS OF THE PHYSICAL PARAMETERS OF THE MODEL

To solve the mathematical model presented in this work, it is necessary to know several key parameters, including the gas volume V_g , the hydrogen diffusion coefficient D_{z,H_2} , the mass transfer coefficient k_{m,H_2} , the porosity of the adsorbent ε_i , the effective diffusion coefficient within the adsorbent particles D_{eff,H_2} , the adsorption rate constant k_{ad} , the particle density ρ_p , and the equilibrium constant K_{eq} , all of which appear in Equations (2.11) through (2.20). These parameters are often dependent on temperature, pressure, and material properties, and cannot always be measured directly. Therefore, they were estimated using empirical or semi-empirical correlations found in the scientific literature, which relate these transport coefficients to measurable physical quantities such as temperature, pressure, and adsorbent characteristics.

The axial dispersion coefficient of hydrogen (H_2) in the system is determined using a well-established empirical correlation proposed by Yang (1987). This correlation takes into account the hydrodynamic and physical properties of the fluid flowing through the reactor or porous medium, such as velocity, particle size, and fluid viscosity, to estimate the extent of axial mixing beyond pure molecular diffusion. By incorporating axial dispersion, the model more accurately represents the real transport phenomena where convective flow is accompanied by dispersion effects that cause spreading of the species along the axial direction.

$$\frac{D_{z,H_2}}{LV_g} = \frac{0.3}{Re Sc} + \frac{0.5}{1 + 3.8/(Re Sc)} \quad (4.1)$$

Where D_{z,H_2} is the mass axial dispersion coefficient for hydrogen, V_g is the superficial velocity of the gas feed, L is the length of the column, Re is the particle Reynolds number, and Sc is the Schmidt number. These parameters are fundamental in characterizing the axial dispersion behavior of hydrogen in the system.

The external mass transfer coefficient is determined by means of a semi-empirical correlation proposed by Wakao and Kaguei (1982), which relates mass transfer to hydrodynamic parameters such as Reynolds and Schmidt numbers for flow around catalyst particles.

$$\frac{k_{m,H_2} d_p}{D_{m,H_2}} = 2.0 + 1.1 (Re)^{0.6} (Sc)^{1/3} \quad (4.2)$$

Where k_{m,H_2} is the gas–solid external mass transfer coefficient, d_p is the diameter of the solid particles, and D_{m,H_2} is the molecular diffusivity of hydrogen gas. These parameters are used to characterize the rate of mass transfer from the bulk gas to the external surface of the particles.

The effective diffusivity of hydrogen within the ZSM-5 catalyst was determined using the methodology described by Froment (1990), which accounts for the combined effects of molecular diffusion, Knudsen diffusion, and the structural characteristics of the porous medium.

$$\frac{1}{D_{eff,H_2}} = \frac{\varepsilon_p}{\tau_0} \left(\frac{1}{D_{k,H_2}} + \frac{1}{D_{m,H_2}} \right) \quad (4.3)$$

Where D_{eff,H_2} is the effective diffusion coefficient for H_2 , τ_0 is the tortuosity factor, D_{k,H_2} is the Knudsen diffusivity and ε_i is the internal porosity.

The molecular diffusion coefficient was estimated using a modifying correlation for H_2 gas (Bird et al., 1960).

$$D_{m,H_2} = \frac{1.0 \times 10^{-3} T^{1.75}}{P \left[\left(\sum V_M \right)_{H_2}^{1/3} \right]^2} \left(\frac{1}{M_{H_2}} \right)^{1/2} \quad (6d)$$

Where P is the operating pressure, T is the operating temperature, $(\sum V_M)_{H_2}$ is the molecular volume of H_2 and M_{H_2} is the molecular weight of H_2 .

The diffusivity per unit cross-sectional area of the pore was given by form of Knudsen (Gosiewsk, 1999).

$$D_{k,H_2} = 97 r_p \left(\frac{T}{M_{H_2}} \right)^{1/2} \quad (6e)$$

Where r_p is the pore radius and D_{k,H_2} is Knudsen diffusion coefficient for H_2 .

5. SOLUTION OF THE PROPOSED EQUATION SYSTEM

Applying the numerical methods for the solution of the partial differential equation system, a number of aspects has to be considered, i. e., (i) the numerical solution should be good approximation to the exact solution; (ii) the numerical method must be efficient, i. e., the computational cost and the memory requirement on a computer are within a reasonable limit. On the other hand, the original problem and the associating numerical problem should be uniquely solvable when corresponding initial and boundary conditions are given. In this work, we investigate a coupled partial differential equation system for H_2 within the adsorption column, within the solid phase and at surface of the solid particles. To solve numerically this equation system, a large variety of numerical techniques may be used. Here was focalized on the implicit finite difference method to solve equation of pure H_2 and equation of the adsorption kinetics, while equation of H_2 within the solid phase was solved by the orthogonal collocation method.

6. RESULTS AND DISCUSSIONS

The numerical analysis focuses on the describing of the simulation of the storage of H_2 in a fixed bed adsorption column. The adsorption properties of a porous solid depend principally on the size of its pores, which are classified as micropores (<2nm), mesopores (between 2nm and 50nm) and macropores (>50nm) (Chahine and Bose, 1994). Two types of high-surface-area adsorbent are available commercially, zeolites and micropores carbons. Therefore, the study present was accomplished with ZSM-5. Thus, characteristics of bed, operating conditions, physical properties and adsorbent are reported in Tab. (3) below.

Table 3: Bed Characteristics, Process Conditions, Physical Properties and Adsorbent.

Definitions	Symbols	Values
Length	L	100 cm
Inside Diameter	d_{in}	3.68 cm
Outside Diameter	d_{ex}	4.14 cm

H ₂	External Porosity		ε_{ex}	0.78
	Feed Temperature		T	80K-298K
	Total Feed Pressure		P	11 atm - 100 atm
	Feed Concentrations for		$C_{\text{H}_2, 0}$	$1.26 \times 10^{-2} \text{ mol cm}^{-3}$
	Feed	Superficial	V_g	0.26 m s^{-1}
	Velocity			
	Gas phase density		ρ_g	$1.20 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$
	Gas phase viscosity		μ_g	$2.86 \times 10^{-5} \text{ pa s}$
	Pore Radius		r_p	16 μcm
	Pellet radius		R_p	0.17 cm
	Pellet void fraction		ε_i	0.39
	Pellet density		ρ_p	1.16 g cm^{-3}

The intrinsic parameters in the mathematical model as the axial dispersion (D_{z, H_2}), gas-solid external mass transfer (k_{m, H_2}) and effective diffusivity ($D_{\text{eff}, \text{H}_2}$) coefficients for H₂ were estimated by Eqs. (6a) to (6c), while the adsorption rate (k_{ad}) and adsorption equilibrium (K_{ed}) constants were extracted experimentally in the literature (Silva, 1996). On the other hand, the necessary parameters used in the simulation were summarized in Tab. (4) below.

Table 4: Parameter used in the computation simulations.

Symbols	Values	Units
D_{z, H_2}	0.71 - 1.05	$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$
K_{m, H_2}	7.56 - 8.57	cm s^{-1}
$D_{\text{eff}, \text{H}_2}$	1.86×10^{-2}	$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$
k_{ad}	1.24×10^{-3}	s^{-1}
K_{ed}	1.54×10^{-4}	$\text{cm}^3 \text{ kg}^{-1}$

D_{m, H_2}	0.85	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
D_{K, H_2}	1.89×10^{-2}	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
$(V_M)_{H_2}$	7.4	$\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$
M_{H_2}	2.01	g mol^{-1}
d_p	0.34	cm

The data shown in Table 4 were used to simulate hydrogen storage in an adsorption column packed with ZSM-5. Numerical experiments were conducted for pure hydrogen distributed both in the void spaces between adsorbent particles and within the adsorbent particles, including the quantity of hydrogen adsorbed on the particle surfaces. The system of partial differential equations was solved using implicit finite difference and orthogonal collocation methods. Each simulation required approximately 1 to 4 minutes of CPU time, using a time step of 10^{-3} (units) and a solver tolerance of 10^{-5} .

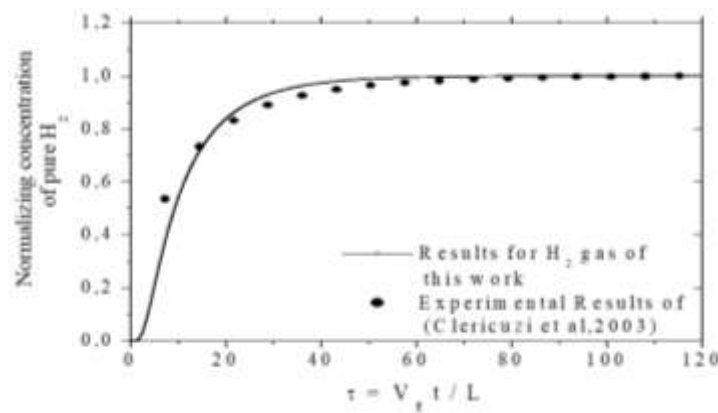


Figure 2: comparing of normalizing curve one of this work with the experimental results obtained in the literature, $T = 80\text{K}$ and $P = 11\text{atm}$.

The fit between the computed results and experimental results was carried out and, therefore, a sensibility analysis was realized with the initial concentration of hydrogen, $C_{H_2,0}$, for the adsorption column, in solid particles and at surface of the solid particles.

Figures (3)-(5), based on the data in Table 4, offer a comparative view of hydrogen distribution across the different phases of the adsorption system. Figure 3 represents the concentration profile of pure H_2 in the adsorption column at $\xi = 1.0$, corresponding to the gas phase. Figure 4 presents the

distribution of pure H_2 within the porous structure of the solid particles at $\eta = 1.0$, reflecting diffusion in the solid phase. Finally, Figure 5 illustrates the adsorption of H_2 at the external surface of the solid particles, emphasizing the interaction between hydrogen molecules and the adsorbent surface.

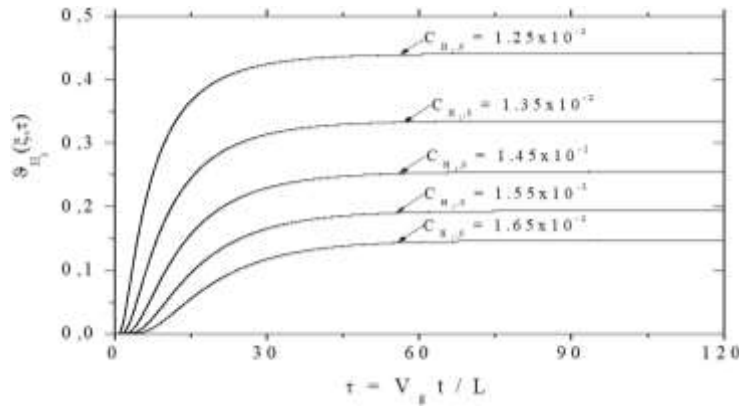


Figure 3: Dimensionless transient response at the exit ($\xi = 1.0$) of the adsorption column for a variation in the initial concentration of H_2 , $T = 80K$ and $P = 11atm$.

Figure (4) presents the distribution of pure H_2 inside the solid particles. Unlike the bulk phase, this result accounts for mass transfer phenomena occurring within the porous structure of the adsorbent material, where hydrogen molecules penetrate the particle matrix. The figure illustrates how hydrogen concentration profiles evolve within the solids, providing insights into diffusion limitations and the role of porosity in determining transport resistance.

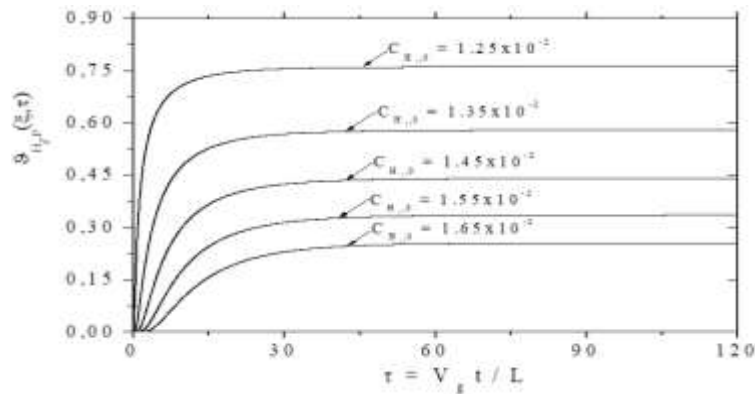


Figure 4: Dimensionless transient response at the exit ($\eta = 1.0$) of the solid particles for a variation in the initial concentration of H_2 , $T = 80K$ and $P = 11atm$.

Figure (5) illustrates the adsorption of H_2 on the surface of the solid particles. This representation focuses on the interaction between hydrogen molecules and the active adsorption sites, describing the extent of hydrogen retention at the surface level. Such data are critical for understanding the

adsorption capacity, surface coverage, and overall efficiency of the adsorbent material under the studied conditions.

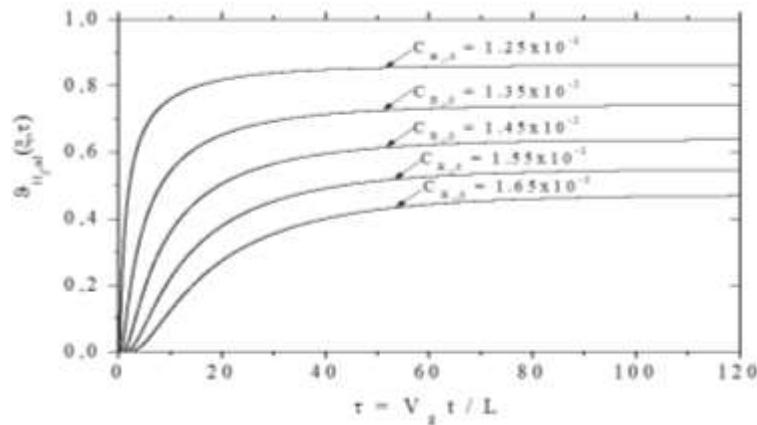


Figure 5: Dimensionless transient response for adsorbed H_2 at the surface of the solid particles for a variation in the initial concentration of H_2 , $T = 80K$ and $P = 11atm$.

6.1 EFFECT OF THE STORAGE TEMPERATURE AND PRESSURE

The storage capacity of an adsorption system is determined by the characteristics of the adsorbent material and the operating conditions, particularly temperature and pressure. Figure (6) compares the adsorption of H_2 as a function of pressure at five temperatures, indicating that higher temperatures limit hydrogen storage capacity. Physical adsorption occurs when the density of H_2 molecules at the adsorbent surface exceeds that in the bulk phase, driven by van der Waals interactions between the solid atoms and the gas molecules. Figure (7) presents a comparison of bulk H_2 density and adsorbed H_2 density at two temperatures as a function of pressure, highlighting the influence of temperature on adsorption behavior.

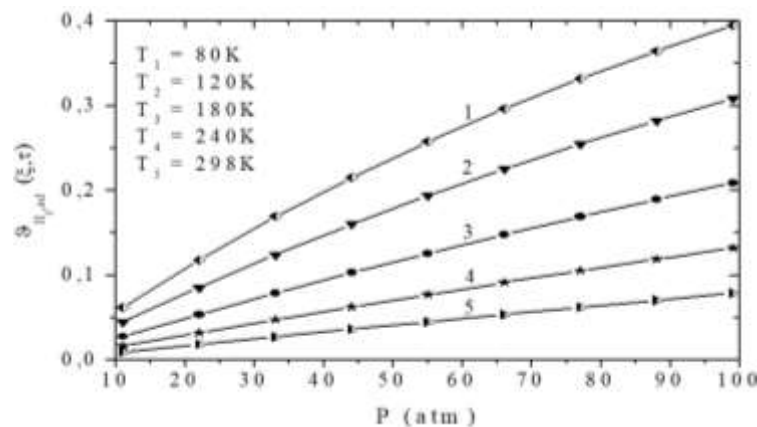


Figure 6: Average concentration of H_2 stored at the surface of ZSM-5 in different temperatures

Figure (6) shows the variation of the average H_2 concentration at the surface of the solid particles at different temperatures, providing insight into the adsorption behavior of hydrogen under varying thermal conditions. The figure illustrates that lowering the storage temperature significantly increases the adsorption capacity of the system, as cooler conditions enhance the interactions between H_2 molecules and the adsorbent surface. In addition, increasing the operating pressure further promotes hydrogen uptake, as higher pressure increases the driving force for adsorption, allowing more H_2 molecules to accumulate on the solid particle surface.

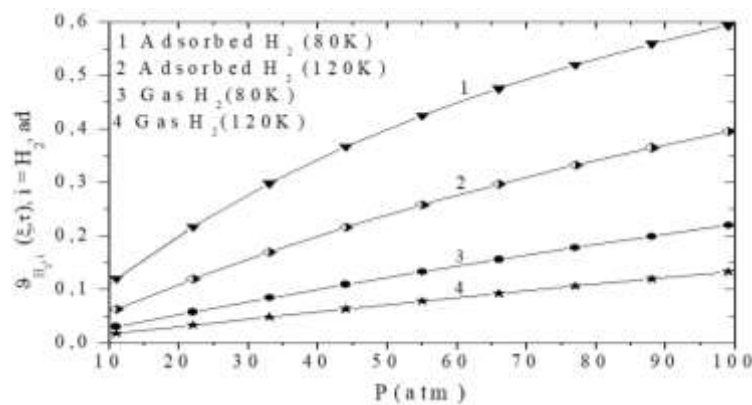


Figure 7: Comparing of H_2 storage of the average H_2 concentration in the adsorption column and the average H_2 concentration at the surface of ZSM-5 in different temperatures

Figure (7) presents a comparison between the average concentration of adsorbed H_2 on the solid particle surface and the average concentration of pure H_2 in the bulk phase at two temperatures. At both temperatures, the adsorbed H_2 concentration is higher than that of pure H_2 , reflecting surface enrichment. This effect results from van der Waals interactions between the ZSM-5 adsorbent and the hydrogen molecules.

7. CONCLUSIONS

The analysis of hydrogen adsorption in the micropores of catalytic particles within a fixed-bed column led to the following conclusions:

1. The proposed model showed good agreement between computed and experimental results.
2. Variations in the initial hydrogen concentration had a significant effect on the transient response in the adsorption column, within the solid particles, and on their surfaces.
3. Hydrogen storage on the surface of the solid particles increased as the system temperature decreased.

4. Hydrogen storage in the adsorption column also increased with decreasing system temperature.

NOTATIONS

Bi_m	Mass Biot number
$C_{H_2, g}$	H_2 concentration, mol/cm ³
$C_{H_2, p}$	H_2 concentration into solid phase, mol/cm ³
D_{eff, H_2}	effective diffusivity coefficient of the particle for H_2 , cm ² /s
D_{m, H_2}	Molecular diffusion coefficient for H_2 , cm ² /s
D_{z, H_2}	Mass axial dispersion coefficient for H_2 , cm ² /s
D_{k, H_2}	Knudsen diffusivity for H_2 , cm ² /s
d_p	Diameter of the particle, cm
d_{in}	Inside diameter of column, cm
d_{ex}	Outside diameter of column, cm
k_{ad}	Adsorption rate constant, s ⁻¹
K_{ed}	Adsorption equilibrium constant, cm ³ /g
k_{m, H_2}	Gas-solid mass transfer coefficient, cm/s
M_{H_2}	Molecular weight for H_2
L	Length of column, cm
P	Operating pressure, atm
r_p	Pore radius, μ m
R_p	Pellet radius, cm
T	Operating temperature, K
V_g	Feed superficial velocity, cm/s
$(V_M)_{H_2}$	Molecular volume for H_2

Greek Letters

ε_{ex}	External porosity
ε_i	Internal porosity
ρ_g	Gas phase density, g/cm ³
ρ_p	Pellet density, g/cm ³
μ_g	Gas phase viscosity, pa s

REFERENCES

- Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N. *Transport Phenomena*. New York, Wiley, 1960.
- Chahine, R.; Bose, T. K. Low-Pressure Adsorption Storage of Hydrogen. *International Journal Hydrogen Energy*, v. 19, No. 2, p. 161-164, 1994.
- Clericuzi, G. Z.; Barbosa, C. B.; Souza-Aguiar, E. F.; Medina, N. Comparação de Adsorventes Zeolíticos Contendo Zinco para a Remoção de Enxofre, Utilizando Coluna de Leito Fixo. 1º Congresso de P&D Petróleo e Gás da UFPE, p.241-246, 2003.
- Froment, G. F.; Bischoff, B. K. *Chemical Reactor Analysis and Design*. John Wiley, New York, 1990.
- Gosiewski, K.; Bartmann, U.; Moszczynski, M.; Mleczko, L. Effect of the intraparticle mass transport limitations on temperature profiles and catalytic performance of the reverse-flow reactor for the partial oxidation of methane to synthesis gas. *Chem. Eng. Sc.*, v. 54, p. 4589-4602, 1999.
- Lee, T. T.; Wang, F. Y.; Newell, R. B. Dynamic simulation of bioreactor systems using orthogonal collocation on finite elements. *Computers and Chemical Engineering*, v. 23, p. 1247-1262, 1999.
- Ma, Z.; Guiochon, G. Application of orthogonal collocation on finite elements in the simulation of non-linear chromatography. *Computers and Chemical Engineering*, v.15,p. 415-426, 1991.
- POIRIER, E.; CHAHINE, R.; BOSE, T. K. Hydrogen Adsorption in Carbon Nanostructures. *International Journal Hydrogen Energy*, v. 26, p. 831-835, 2001.
- RAGHAVAN, N. S.; RUTHVEN, D. M. Simulation of chromatographic response in columns packed with bidisperse structured particles. *Chemical Engineering Science*, v. 40, p. 699 – 706, 1985.
- Raghavan, N. S; Hassan, M. M.; Ruthven, D. M. Numerical simulation of a PSA system using a pore diffusion model. *Chemical Engineering Science*, v. 41, p. 2787 – 2793, 1986.
- Silva, J. D.; Lima, F. A.; Abreu, C.M. A. M.; Knoechelmann, A. Experimental analysis and evaluation in a Trickle-bed reactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 20, p. 375-390, 2003.
- Strobel, R.; Jorissen, L.; Schliermann, T.; Trapp, V.; Schutz, W.; Bohmhmml, K.; Wolf, G.; Garcke, J. Hydrogen Adsorption on Carbon Materials. *Journal of Power Sources*, v. 84, p. 221-224, 1999.
- Yang, R.T. *Gas separation by adsorption process*, Butterworths, Boston, 1987.
- Wakao, N.; Kaguei, S. *Heat and Mass Transfer in Packed beds*, Now York, 1930

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XIX



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE