

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XI



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

11^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

11ª 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, 2022

105 f.: il

DOI: 10.37423/2022.edcl600

ISBN: 978-65-5367-220-8

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/10.37423/2022.edcl600>

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

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

Dr. João Luís Ribeiro Ulhôa

Dra. Eyde Cristianne Saraiva-Bonatto

MSc. Frederico Celestino Barbosa

MSc. Carlos Eduardo de Oliveira Gontijo

MSc. Plínio Ferreira Pires

Editora Conhecimento Livre

Piracanjuba-GO

2022

CAPÍTULO 1	6
DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA ANÁLISE DE BIOSPECKLE LASER	
Adilson Machado Enes	
José Igor Reinan Santos	
Maria Fernanda de Menezes Santos	
Marielly Rodrigues Santos	
Diego Andrade Pereira	
Luiz Diego Vidal Santos	
Wellington Gonzaga Do Vale	
Silvestre Rodrigues	
Jonathan Gazzola	
Valfran José Santos Andrade	
DOI 10.37423/221006629	
CAPÍTULO 2	12
PRODUÇÃO DE ÁLCOOL DESINFETANTE PARA DOAÇÃO A POPULAÇÃO EM	
VULNERABILIDADE SOCIAL DO MUNICÍPIO DE CANOINHAS, SC	
Josiéli de Oliveira dos Santos Veiga	
Daiana Alves Machado	
Cleoci Beninca	
Juliana Aparecida da Silva	
Marli da Silva Santos	
Maria Bertília Oss Giacomelli	
William Sadao Hasegawa	
DOI 10.37423/221006694	
CAPÍTULO 3	16
MICROGERAÇÃO DE ENERGIA DISTRIBUÍDA: ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MINIUSINA	
FOTOVOLTAICA	
ROBERT DIAS XIMENES	
Fábio Minoru Yamaji	
DOI 10.37423/221006722	
CAPÍTULO 4	22
IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE TÉCNICA DE MPPT APLICADA NA GERAÇÃO EÓLICA	
Alisson Pereira de Andrade	
João Paulo Silva Oliveira	
Leandro Pains Moura	
DOI 10.37423/221006740	

CAPÍTULO 5	38
TUBOS GALVANIZADOS COMO FONTE DE CONTAMINAÇÃO POR CHUMBO EM ÁGUA RESIDENCIAL	
Thais Pereira Sarmento	
Fernando Benedicto Mainier	
Dayanni de Brito da Silva	
Renan Cardoso de Oliveira	
DOI 10.37423/221006772	
 CAPÍTULO 6	 50
DIMENSIONAMENTO DE MURO DE SOLO REFORÇADO, COM GEOSSINTÉTICOS: PROJETO DE RECUPERAÇÃO DA AVENIDA DAS NAÇÕES, PORTAL DO SOL, PARAÍBA DO SUL	
Wallace da Silva	
Carlos Augusto da Silva Júnior	
Gabriel Pereira Gonçalves	
Rômulo Rodrigues Coelho Delfino Souza	
DOI 10.37423/221006778	
 CAPÍTULO 7	 73
O REJEITO DE SINTER FEED NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO	
Ayrton Vianna Costa	
Adriana Guerra Gumieri	
DOI 10.37423/221006788	
 CAPÍTULO 8	 93
ANÁLISE DA RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE POISSON BOLTZMANN ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	
Nathalia Salles Vernin Barbosa	
Eduardo Rocha de Almeida Lima	
Pedro Henrique Rodrigues Alijó	
Frederico Wanderley Tavares	
DOI 10.37423/221006793	

Capítulo 1



10.37423/221006629

DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA ANÁLISE DE BIOSPECKLE LASER

Adilson Machado Enes

Universidade Federal de Sergipe

José Igor Reinan Santos

Universidade Federal de Sergipe

Maria Fernanda de Menezes Santos

Universidade Federal de Sergipe

Marielly Rodrigues Santos

Universidade Federal de Sergipe

Diego Andrade Pereira

Universidade Federal de Sergipe

Luiz Diego Vidal Santos

Universidade Federal de Sergipe

Wellington Gonzaga Do Vale

Universidade Federal de Sergipe

Silvestre Rodrigues

Universidade Federal de São João del-Rei

Jonathan Gazzola

Universidade Federal de São Carlos

Valfran José Santos Andrade

Universidade Federal de Sergipe

Resumo: O biospeckle laser é um fenômeno óptico de interferência já bem descrito na literatura, conforme os trabalhos de Braga jr, (2000) e Enes (2005). Como existe uma correlação entre as perturbações observadas no fenômeno e processos biológicos, o estudo de suas aplicações tem ganhado força na Engenharia Agrícola, sobretudo para análise de sementes. Estudos demonstram que a identificação dos fenômenos decorrentes da atividade biológica em materiais é possível por meio de técnicas de análise de frequências como a Transformada de Fourier (ENES, 2005). Outro fator que contribui para que ocorram alterações nos padrões de speckle dinâmico é a atividade de água. Desde 2015 diversos estudos foram realizados no LAPROT (Laboratório de Prototipagem da UFS) a fim de dominar o método, passando por técnicas de quantificação, mapeamento e tratamento de frequências. Atualmente, os esforços têm se concentrado na criação de um dispositivo portátil de análise, que com poucas adaptações, possa realizar os mesmos procedimentos experimentais que são realizados em um PC do tipo desktop comum. Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo avaliar um método, portátil e de baixo custo, para capturar e processar dados do biospeckle laser. Para tanto, os algoritmos de processamento foram adaptados para uma plataforma de processamento ARM, tomando por base um Raspberry Pi 3 Modelo B+.

Palavras-chave: Processamento de imagens, Speckle dinâmico, Raspberry Pi.

INTRODUÇÃO:

O biospeckle é um fenômeno óptico de interferência que ocorre quando há incidência de luz coerente em materiais cuja interação óptica possa ser categorizada como sendo rugosa. Diversos estudos apontam que materiais biológicos, de uma maneira geral, oferecem superfícies, nas quais, a interação com a luz coerente provoca as perturbações de interferência que dão origem ao fenômeno. Levando-se em conta que nesse tipo de material as atividades estão diretamente relacionadas com a viabilidade celular, troca de gases, respiração, atividade microbiana e atividade de água (aw), o biospeckle tem sido estudado como uma potencial ferramenta na análise de qualidade e viabilidade de sementes (SILVA, 2007), (ROMERO, 1999). Na Engenharia Agrícola, os esforços no emprego da técnica têm se concentrado na busca por métodos rápidos, objetivos e não destrutivos para a avaliação de materiais biológicos, sobretudo na área de sementes, sendo os principais estudos relacionados à avaliação de viabilidade e vigor, diferenciação, mapeamento de áreas com atividades distintas (BRAGA JR, 2000), avaliação do teor de água e identificação de agentes patogênicos (BRAGA JÚNIOR et al., 2005). As principais metodologias abordadas para o estudo do biospeckle visam aplicações laboratoriais com procedimentos de coleta e processamento de dados em etapas separadas, sendo necessário o uso de um computador do tipo Desktop e, muitas vezes, o uso de softwares proprietários, como por exemplo o MATLAB. As técnicas empregadas na análise são baseadas na variação temporal dos dados com estatísticas de primeira e segunda ordem, tais como a História Temporal do Speckle (STS), Matrizes de Ocorrências Modificadas (MOC), Diferenças Generalizadas (DG), Fujji e Momento de Inércia (MI). Até o momento, as propostas de utilização do biospeckle laser têm ficado restritas ao laboratório, uma vez que diversos fatores como a vibração ambiental e ruídos externos podem interferir nas medições, exigindo um ambiente controlado. Diante dos fatos apresentados, este trabalho teve por objetivo avaliar um método, portátil e de baixo custo, para capturar e processar dados do biospeckle laser.

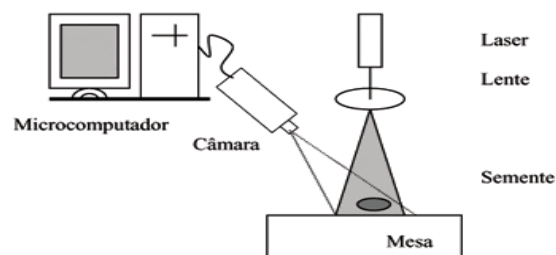
MATERIAL E MÉTODOS:

As etapas experimentais foram divididas em: **Avaliação de sementes de feijão através do Biospeckle:** Uma amostra (amostra I) de 300 gramas de sementes de feijão foi submetida a uma imersão em água destilada por 24 horas a fim de atingir estados de maior umidade. A amostra foi acondicionada em uma embalagem hermeticamente fechada e impermeável à água e armazenada à temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) durante 24 horas a fim de se conservar as características físicas e fisiológicas até o início dos ensaios com biospeckle. O tratamento foi, então, submetido à ensaio com biospeckle para obtenção dos valores de Momento de Inércia, Diferença Generalizada, Matrizes de

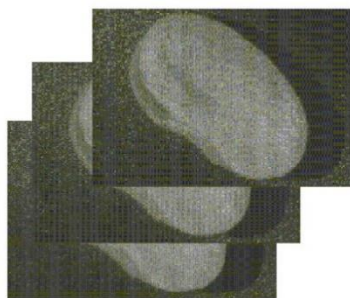
Ocorrências Modificadas e História Temporal do Speckle. Uma segunda amostra (amostra II) também de 300 gramas não foi submetida à imersão e não foi modificado nenhum aspecto de sua umidade, essa segunda amostra foi usada para efeito de comparação e análise de resultados.

METODOLOGIA DE CAPTURA DAS IMAGENS:

Foi utilizado o Laser HeNe de 632 nm incidindo nas amostras de grãos de feijão, a configuração de aquisição está ilustrada na Figura 1.



Foram coletadas imagens através de método direto. Utilizou-se um microscópio digital XTrad, registrando os vídeos no formato AVI diretamente no Raspberry Pi 3 Modelo B+, após a aquisição, foi feita segmentação de frames sucessivos do vídeo com o uso do Raspberry Pi 3 Modelo B+, códigos de programação desenvolvidos em laboratório e algoritmos de processamento adaptados, obtendo assim imagens para o processamento, conforme a Figura 2. Os mesmos procedimentos foram realizados em um PC Desktop comum, usando o software Matlab, para fins de comparação.



RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados corroboram os resultados obtidos por Braga jr, (2000) e Enes (2005), demonstrando existir correlação entre a umidade das sementes de feijão e os níveis de atividade monitorados pelo biospeckle laser. Estas correlações puderam ser obtidas tanto no processamento convencional quanto no processamento adaptado para o Raspberry Pi B+. Os mapas visuais com áreas de atividades a partir da aplicação do método DG, executado no sistema portátil de processamento pode ser visualizado na figura 3.

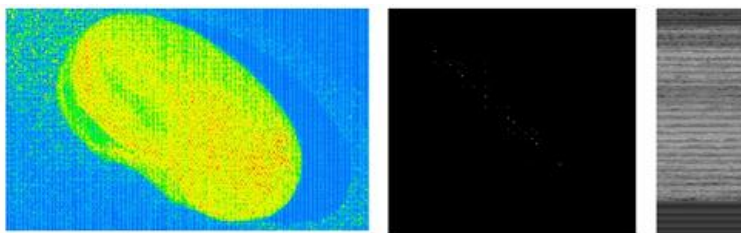


Figura 3 – Mapeamento de atividade, Matrizes de ocorrências modificadas e História temporal do Speckle, respectivamente.

Através do método adaptado, ainda foi possível calcular os valores de MI, comparando-se duas amostras com as unidades, bem como, os valores de Matrizes de Ocorrências Modificadas (MOC) e História Temporal do Speckle (STS). Todos os procedimentos executados a partir do dispositivo portátil se mostraram compatíveis com aqueles processados no PC Desktop e ambos corroboram os resultados observados na literatura.

CONCLUSÕES:

Pode-se concluir que os procedimentos de análises desenvolvidos podem ser utilizadas como mais uma metodologia para a obtenção de informações relativas aos materiais submetidos ao biospeckle laser, trazendo informações importantes relativas aos materiais estudados, com potencial aplicação no estudo da interação entre a luz laser e o material biológico. Como também se nota foi possível avaliar um método de processamento do biospeckle laser em um dispositivo portátil e de baixo custo, obtendo-se resultado satisfatório.

AGRADECIMENTOS:

A Universidade Federal de Sergipe, ao Departamento de Engenharia, e ao Laboratório de Prototipagem. Ao PIBIC pela concessão da bolsa permitindo a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS:

BRAGA JR, R. A.; RABELO, G. F.; GRANATO, L. R.; SANTOS, E. F.; MACHADO, J. C.; ARIZAGA, R.; RABAL, H. J.; TRIVI, M. Detection of Fungi in Beans by the Laser Biospeckle Technique. Biosystems Engineering, San Diego, v. 91, n. 4, p. 465-469, Ago. 2005.

BRAGA JÚNIOR., R. A. “Bio-Speckle”: uma contribuição para o desenvolvimento de uma tecnologia aplicada à análise de sementes. 2000. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ENES, A. M. Análise do comportamento de tecidos vivos e tecidos mortos em sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pela ótica do biospeckle laser. 2005. 32 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROMERO, G. G. Estudio y caracterización de patrones de speckle que varían en el tiempo. 1999. 133 p. Tese (Doutorado em Física) - Universidad Nacional de Salta, Argentina.

SILVA, E. R. DA. Estudo das propriedades do Biospeckle e suas aplicações. São Paulo, 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Departamento de Física Geral, Universidade de São Paulo.

Capítulo 2



10.37423/221006694

PRODUÇÃO DE ÁLCOOL DESINFETANTE PARA DOAÇÃO A POPULAÇÃO EM VULNERABILIDADE SOCIAL DO MUNICÍPIO DE CANOINHAS, SC

Josiéli de Oliveira dos Santos Veiga

Daiana Alves Machado

Cleoci Beninca

Juliana Aparecida da Silva

Marli da Silva Santos

Maria Bertília Oss Giacomelli

William Sadao Hasegawa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - câmpus Canoinhas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - câmpus Canoinhas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - câmpus Canoinhas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná - câmpus União da Vitória

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - câmpus Canoinhas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - câmpus Canoinhas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - câmpus Canoinhas

INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou, em janeiro de 2020, que o surto do novo coronavírus (SARS-CoV-2) constitui uma Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional. No Brasil, o primeiro caso foi confirmado pelo Ministério da Saúde em 26 de fevereiro de 2020¹. Atualmente, a Avaliação do Risco Potencial para COVID-19 do Estado de Santa Catarina classifica a região de Canoinhas na situação de risco grave². A transmissão ocorre de uma pessoa doente para outra ou por contato próximo, através de aperto de mão, gotículas de saliva, espirro, tosse, objetos ou superfícies contaminadas. Como prevenção, recomenda-se o uso de máscara, lavagem frequente das mãos e utilização de álcool gel 70%³. Dada a importância do acesso a materiais de higiene pela população para a prevenção e combate à doença, o objetivo deste trabalho foi produzir álcool gel desinfetante para doação a população em vulnerabilidade social do município de Canoinhas, SC.

METODOLOGIA

A produção de álcool antisséptico seguiu as orientações da Farmacopeia Brasileira⁴. Inicialmente, verificou-se a concentração do álcool 96 °GL com um alcoômetro, realizando-se a interseção entre as leituras com a da tabela de conversão. Então, determinou-se o volume de álcool 96 °GL necessário para preparar a quantidade prevista de álcool 77% (v/v). Transferiu-se o álcool 96 °GL para um béquer e completou-se o volume com água destilada até atingir a concentração final desejada. Com a mistura sob agitação constante, adicionou-se Carbômer 980 previamente micronizado (0,5 g/100 mL). Para ajuste do pH da solução entre 6 e 7 e obtenção da consistência em gel, utilizou-se um alcalinizante (0,6 mL/100 mL) e um potenciômetro de bancada. O produto final foi envasado em frasco PET de 500 mL, devidamente rotulado, conforme orientações da ANVISA⁵. A entrega do álcool antisséptico a população foi realizada pela Secretaria de Saúde de Canoinhas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a execução do projeto, produziu-se 723 frascos de álcool gel que foram doados a população de Canoinhas. O álcool 70% é um desinfetante intermediário com ação microbicida que causa desnaturação proteica e interferência metabólica nos microrganismos, sendo um dos principais aliados na prevenção de doenças microbianas⁶. Ademais, é um produto altamente efetivo e de baixo custo, apesar da elevação de preço durante a pandemia. Além disso, na ausência de água e sabão, é o único produto capaz de higienizar as mãos e superfícies de forma eficaz e segura, auxiliando no combate à COVID-19¹.

CONCLUSÃO

Considerando a necessidade de adoção de ações efetivas de prevenção e combate à COVID-19, conclui-se que este projeto contribuiu, ainda que de forma pequena, no acesso da comunidade em vulnerabilidade social de Canoinhas a um dos produtos mais utilizados na pandemia. Muitas famílias não adquiriram o álcool gel, devido à elevação do preço de comércio. Dessa forma, a doação dos álcoois desenvolvidos garantiu, a algumas dessas famílias, a possibilidade de proteger-se de maneira eficaz contra a COVID-19.

Palavras-chave: Álcool gel antisséptico, SARS-CoV-2, COVID-19.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, pelo apoio financeiro concedido através da Chamada Pública Emergencial para enfrentamento à pandemia COVID-19.

REFERÊNCIAS

1. OLIVEIRA, A. C.; LUCAS, T. C.; IQUIAPAZA, R. A. O que a pandemia da COVID-19 tem nos ensinado sobre adoção de medidas de precaução? *Texto & Contexto Enfermagem* 2020, v. 29: e20200106. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-265X-TCE-2020-0106>. Acesso em: 14 set. 2020.
2. GOVERNO DE SANTA CATARINA. Coronavírus: gestão da saúde. Florianópolis: Governo de Santa Catarina, 2020. Disponível em: <http://www.coronavirus.sc.gov.br/gestao-da-saude/>. Acesso em: 15 set. 2020.
3. BRASIL. Ministério da Saúde. Sobre a doença. [2020]. Disponível em: <https://coronavirus.saude.gov.br/sobre-a-doenca#interna>. Acesso em: 14 set. 2020.
4. BRASIL. Ministério da Saúde. Formulário Nacional da Farmacopeia Brasileira. 2. ed. Brasília: Anvisa, 2012.
5. BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Nota Técnica nº 03, de 24 março de 2020. Dispõe de orientações sobre doação de álcool 70%. Brasília, DF: ANVISA, 2020. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/2857848/5680794/NT+FINAL.pdf/361b79b3-9277-452a-835a-3b9ef9be1bb9>. Acesso em: 10 jun. 2020.
6. BERNARDI, G. A.; COSTA, T. C. M. Avaliação da atividade antimicrobiana do álcool 70% em superfícies contaminadas. *Journal of Infection Control*, v. 6, n. 4, 2017. Disponível em: <https://www.crmv-pr.org.br/uploads/noticia/arquivos/Avaliacao-da-atividade-antimicrobiana-do-alcool-70-em-superficies-contaminadas.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

Capítulo 3



10.37423/221006722

MICROGERAÇÃO DE ENERGIA DISTRIBUÍDA: ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MINIUSINA FOTOVOLTAICA

ROBERT DIAS XIMENES

Instituto Federal de São Paulo

Fábio Minoru Yamaji

Universidade Federal de São Carlos



Resumo: Nos últimos anos a tecnologia para geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos (FV) tem se mostrado mais eficiente e barata. Desde o início do século XXI observamos um aumento nos preços dos combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, novos conhecimentos na ciência dos materiais e outros avanços tecnológicos são aplicados na produção dos painéis e das células fotovoltaicas, causando assim uma queda no preço. No Brasil com edição da Resolução ANEEL 482/2012, atualizada pela 687/2015, passou a permitir que o consumidor gere a sua própria energia, ainda que parcialmente e em períodos de geração e consumo diferentes a partir de micro e minissistemas de energia renovável. Isso aqueceu o mercado de venda, instalação e manutenção destes equipamentos. Atraindo mais empresas para este mercado em ascensão. Para o dimensionamento e o orçamento de sistemas fotovoltaicos são considerados a posição geográfica, a insolação, o histórico de consumo, assim como uma taxa de desconto anual para o cálculo do payback. No presente trabalho, os dados inicialmente estimados para atribuir a viabilidade econômica foram confrontados com os valores fornecidos pelo sistema de gerenciamento de uma mini usina fotovoltaica de 77,5 kWp instalada em uma IES na região metropolitana de Sorocaba. Os dados utilizados são relativos ao estudo preliminar com um ano de monitoramento. A proposta do fornecedor “A” estimou uma produção média mensal de 8.252 kWh/mês e uma produção anual de 99.024 kWh/ano, já o fornecedor “B” estimou uma produção média mensal de 8.876 kWh/mês e uma produção anual de 106.512 kWh/ano. A geração FV foi monitorada na saída dos inversores. Sendo que a média anual dos valores mensais monitorados ficou bem próxima dos valores inicialmente estimados nas propostas comerciais. Como resultado, a geração de energia a partir de FV mostra-se benéfica ao meio ambiente e uma alternativa econômica viável.

Palavras-chave: Fotovoltaica, Eficiência energética, Energia, Energias renováveis.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a tecnologia para geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos (PV) tem se mostrado mais eficiente e barata. A energia solar fotovoltaica é vista com a energia produzida por meio da conversão da radiação solar em eletricidade. A conversão é feita por meio das células fotovoltaicas que estão agrupadas nos painéis fotovoltaicos (SUMATHI et.al., 2015).

Desde o início do século XXI observamos um aumento nos preços dos combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, novos conhecimentos na ciência dos materiais e outros avanços tecnológicos são aplicados na produção dos painéis e das células fotovoltaicas, causando assim uma queda no preço. O sistema que mais tem atraído investimentos do pequeno consumidor no Brasil é o sistema on-grid ou grid-connected. O sistema on-grid é aquele que está conectado diretamente a rede, onde a energia produzida é enviada para a concessionária que, por um sistema de créditos, abate parte da conta de energia elétrica do consumidor (PINHO e GALDINO, 2014; SUMATHI et.al., 2015).

No Brasil com edição da Resolução ANEEL 482/2012, atualizada pela 687/2015, passou a permitir que o consumidor gere a sua própria energia, ainda que parcialmente e em períodos de geração e consumo diferentes a partir de micro e minissistemas de energia renovável. Isso aqueceu o mercado de venda, instalação e manutenção destes equipamentos. Atraindo mais empresas e pequenos consumidores para este mercado em ascensão (PINHO e GALDINO, 2014; SUMATHI et.al., 2015). Um dos grandes questionamentos desses pequenos consumidores/investidores é a aderência dos valores projetados na fase de orçamento e os valores gerados efetivamente pelas mini e micro usinas instaladas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo quantitativo nas ciências sociais, de acordo com Marconi e Lakatos (2010), é expresso em números, devendo ter na lógica da sequência dos dados a premissa que leva a solução real. Para que as variáveis sejam calculadas de acordo com a concepção proposta, a quantificação dos resultados é de extrema importância para determinar se o projeto será aceito ou não, seja no âmbito financeiro, quanto no tocante orçamentário no viés da melhor alocação destes recursos, seja pelo efeito subsequente econômico que o investimento irá gerar, quando destacado o efeito quantitativo diante das externalidades.

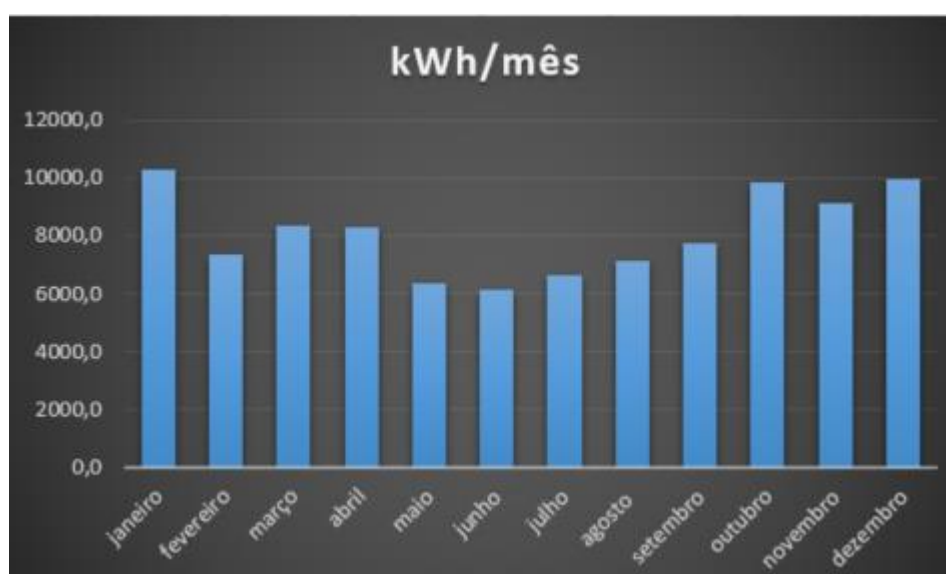
Para o dimensionamento e o orçamento de sistemas fotovoltaicos são considerados a posição geográfica, a insolação, o histórico de consumo, assim como uma taxa de desconto anual para o cálculo do payback. No presente trabalho, os dados inicialmente estimados para atribuir a viabilidade

econômica foram confrontados com os valores fornecidos pelo sistema de gerenciamento de uma mini usina fotovoltaica de 77,5 kWp instalada em uma IES na região metropolitana de Sorocaba. Os dados utilizados são relativos ao estudo preliminar com um ano de monitoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo inicial foi considerando a irradiação de sol diária por períodos sazonais, a geração de energia ocorre semelhantemente como apresentado no gráfico a seguir, ou seja, há meses que a geração de energia é maior que em outros.

Figura 1 – Geração de energia elétrica na Mini usina em 2019.



Fonte: Grupo de trabalho Projeto “PA3033”

A proposta do fornecedor “A” estimou uma produção média mensal de 8.252 kWh/mês e uma produção anual de 99.024 kWh/ano, já o fornecedor “B” estimou uma produção média mensal de 8.876 kWh/mês e uma produção anual de 106.512 kWh/ano.

A usina fotovoltaica da IES entrou em operação em 28 de novembro de 2018. A produção acompanhada durante o ano de 2019 ficou em uma média mensal de 8.110,6 kWh/mês e uma produção anual de 97.327,2 Wh/ano.

A geração FV foi monitorada na saída dos inversores. Sendo que a média anual dos valores mensais monitorados ficou bem próxima dos valores inicialmente estimados nas propostas comerciais.

Figura 2 – Usina fotovoltaica do Campus



Fonte: Grupo de trabalho Projeto “PA3033”

CONCLUSÃO

Como resultado, podemos verificar a proximidade dos valores calculados, feitos através softwares de dimensionamento de projetos fotovoltaicos utilizados para fazer os orçamentos, e os valores levantados através do monitoramento da mini usina.

Em condições de céu claro, com auxílio da geometria para cálculo da posição relativa entre o Sol e a Terra, a geração solar fotovoltaica pode ser prevista com grande exatidão. Contudo, no presente trabalho também foi possível perceber que em escalas menores de tempo, a presença e o comportamento aleatório de nuvens podem resultar em rápidas variações da radiação solar e, portanto, da geração de energia elétrica. Os resultados preliminares mostram uma boa aderência entre os valores estimados e levantados. Isso aponta para ideia que a geração de energia a partir de FV mostra-se benéfica ao meio ambiente e uma alternativa econômica viável.

REFERÊNCIAS

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CELP-CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

SUMATHI, S.; KUMAR, L. A. ; SUREKHA, P. Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques. Springer, 2015.

AGRADECIMENTOS

Grupo de trabalho do projeto “PA3033”, CPFL e IFSP

Capítulo 4



10.37423/221006740

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE TÉCNICA DE MPPT APLICADA NA GERAÇÃO EÓLICA

Alisson Pereira de Andrade

Universidade Federal de Uberlândia

João Paulo Silva Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia

Leandro Pains Moura

Universidade Federal de Uberlândia



Resumo: O aumento da capacidade de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, com destaque para a fonte eólica, cria a necessidade de realização de estudos que façam análises relacionadas com as influências da inserção desta fonte alternativa nas redes elétricas. Tem-se também como importante a otimização do aproveitamento eólico no que tange à extração de potência dos ventos. Nesse contexto, destacam-se as técnicas de extração da máxima potência, ou MPPT, as quais são utilizadas para aumentar o rendimento dos aerogeradores. Assim, o presente artigo é direcionado para a análise de uma técnica MPPT voltada para sistemas de geração eólica à máquina síncrona e conversores plenos, visando estudos de desempenho da filosofia de controle adotada diante de distintas situações de funcionamento.

Palavras-chave: Geração Eólica, Fontes Renováveis, Modelagem Computacional, Técnicas de MPPT.

I. INTRODUÇÃO

Percebe-se atualmente um aumento acentuado no uso de energia proveniente de fontes renováveis, dentre as quais tem-se destacado, sobremaneira, a geração eólica de energia elétrica.

Vale ressaltar que a geração eólica encontra-se inserida no contexto da busca por meios de geração de energia de características renováveis tendo em vista a sustentabilidade ecológica, social e energética. Temas estes que, no cenário atual, têm ganhado importância e têm sido adotados como norteadores das políticas públicas em todo o mundo [1].

Essas fontes de energia, no sistema elétrico brasileiro, diferente da geração hidrelétrica ou mesmo termelétrica, possuem grandes variações de potência ao longo do período de geração e, sendo assim, não é possível realizar o controle da fonte primária de energia assim como é feito em usinas hidrelétricas, por exemplo. Isto posto, torna-se necessário estratégias que contornem tal problemática [2].

No que tange à energia eólica, a adequação da fonte primária (vento) se dá através de diferentes estratégias, as quais serão apresentadas na sequência. Não obstante a isto, é importante ressaltar que a extração de potência do vento possui um ponto ótimo de funcionamento do ponto de vista da potência extraída, o qual pode ser alcançado pelo chamado rastreamento do ponto de máxima potência que, em inglês, é definido por *Maximum Power Point Tracking* – MPPT [3].

Neste contexto, o presente informe técnico pretende apresentar as distintas estratégias de MPPT e, complementarmente, realizar a implementação computacional daquela que for julgada a mais adequada para a geração eólica de arranjo com topologia *Full Converter*. A implementação será realizada em um *software* no domínio da frequência e servirá para eventuais avaliações de desempenho.

II. SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

O princípio de funcionamento da geração de energia elétrica através de energia eólica é a de conversão da energia cinética dos ventos em potência por turbinas eólicas. Neste contexto, é importante destacar conceitos estabelecidos pelo físico alemão Albert Betze, de que o máximo de extração de energia mecânica advinda da energia cinética presente nas massas de ar é de 59,3% [4].

A geração eólica segue, atualmente, via de regra, duas metodologias de conversão mecânica-elétrica a saber: sistema DFIG de geração e o arranjo *Full Converter* de conversão [5]. O primeiro tipo baseia-

se na utilização de um gerador de indução (assíncrono), cujo estator é conectado à rede elétrica, geralmente através de um transformador. Com o intuito de controlar a velocidade do rotor do gerador, conecta-se um conversor tipo *back-to-back* ao mesmo. Esta topologia de geração encontra-se ilustrada na Fig. 1 [6].

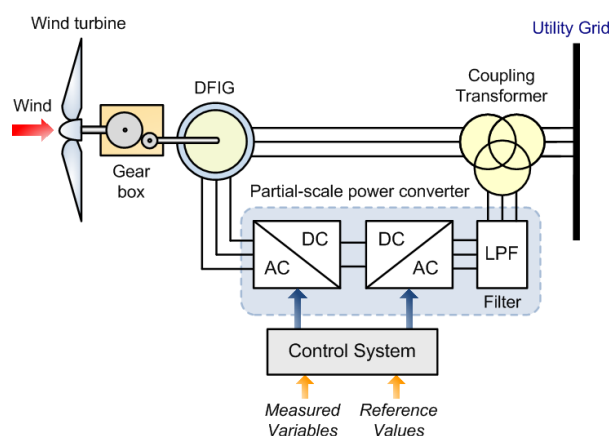


Figura. 1: Topologia DFIG de geração eólica.

Já a segunda topologia de geração eólica é conhecida por *Full Converter*. A mesma utiliza geradores síncronos de rotor bobinado ou de ímã permanente, sendo este último mais comumente empregado. A topologia geral consiste deste gerador conectado a um retificador não controlado, um conversor DC-DC e um inversor para conexão do conjunto com a rede elétrica [7]. A Fig. 2 apresenta uma visão geral deste arranjo [5].

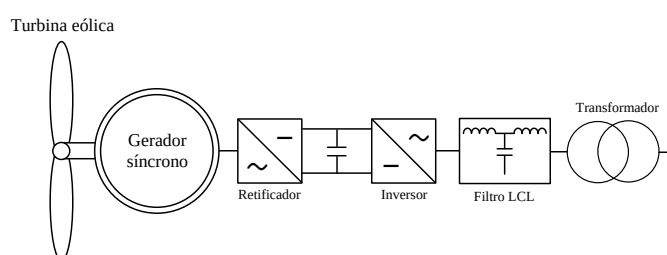


Figura. 2: Topologia *Full Converter* de geração eólica.

Os dois procedimentos de geração eólica diferem-se principalmente pela potência a qual os conversores estão sujeitos: na topologia DFIG os conversores são dimensionados considerando cerca de 30% da potência nominal dos geradores, enquanto na topologia *Full Converter*, considera-se uma potência igual ou superior à 100%.

No presente trabalho investigativo será considerado tão somente geração *Full Converter*. Tal opção foi realizada por ser esta uma topologia de forte uso no Brasil [8]. Neste sentido, na sequência, segue um maior detalhamento deste sistema de geração.

III. TOPOLOGIA FULL CONVERTER

Na topologia *Full Converter*, a primeira etapa após a conversão mecânica-elétrica realizada pela máquina síncrona é a retificação, a qual tem como objetivo converter tensões com amplitudes e frequências variáveis em um elo de corrente contínua.

Uma segunda etapa de transformação é a conversão CC-CC. Esta conversão faz uso de um conversor *boost* ou *buck*. O principal objetivo desta etapa é a extração da máxima potência do sistema (MPPT).

Uma terceira etapa de conversão é a inversão do sinal CC em CA. Esta etapa faz uso de um inversor de frequência para converter tensão e corrente, que estavam na forma contínua, em alternadas com a mesma frequência da rede elétrica. Tal processo em geral utiliza de um controle de conversão trifásico vetorial [9].

No trabalho ora realizado, apresenta-se um estudo focado na etapa de conversão CC-CC, conforme já mencionado, ou seja, nos métodos e procedimentos destinados à extração da máxima potência do sistema de geração eólica. Neste sentido, com o intuito de aprimorar o rendimento de um aerogerador na conversão de energia foram desenvolvidos distintos métodos de controle para a extração da máxima potência. Dentre as principais estratégias, pode-se citar: *Hill Climb Search* (HCS), *Tip Speed Ratio* (TSR), e *Power Signal Feedback* (PSF) [10].

O HCS baseia-se em encontrar o ponto máximo global da função de C_p (coeficiente de potência) em relação à velocidade do rotor. Este C_p é uma relação entre a potência elétrica gerada (potência útil) e a potência do vento incidente nas pás do aerogerador (potência total), conforme será melhor explanado no próximo subitem. Este método utiliza do fato de que a função C_p tem apenas um ponto máximo local, ponto que corresponde ao valor zero para a derivada da equação.

O segundo método, TSR, adequa a velocidade do rotor do gerador para a velocidade em que o coeficiente de potência C_p seja o ótimo. Como desvantagem apresentada pelo método está a necessidade de monitorar a velocidade do vento e de rotação da turbina, o que eleva os custos da execução do projeto [10].

O terceiro método a ser citado é o PSF, o qual consiste na utilização de um torque elétrico ótimo como referência, alterando a velocidade do rotor a fim de se obter o torque elétrico próximo do torque elétrico ótimo. O fator limitante desse método é a necessidade de se conhecer as características do gerador e da turbina para ajuste das malhas de controle [11].

Neste contexto, os estudos apresentados no presente trabalho serão conduzidos fazendo uso do método PSF, uma vez que este é o método mais comumente empregados nos sistemas de geração eólica.

PRINCIPAL TÉCNICA DE MPPT APLICADA NA GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA

A turbina eólica não é capaz de converter toda a energia advinda das massas de ar, ou seja, a energia mecânica gerada no eixo da turbina será menor do que a disponível pelo vento. A razão entre estas duas potências é denominada Coeficiente de Potência. Este coeficiente, representado pela equação (1), quantifica a eficiência da turbina eólica em converter a energia cinética presente no vento em energia mecânica.

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_v} = \frac{\text{Potência extraída pela turbina}}{\text{Potência disponível no vento}} \quad (1)$$

Onde: P_{mec} é a potência mecânica extraída pela turbina e P_v é a potência disponível no vento.

O coeficiente de potência também pode ser determinado em função de alguns parâmetros construtivos da turbina [9]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{turbina} R}{v_1} \quad (4)$$

Onde: λ é a razão da velocidade da pá; λ_i é uma constante auxiliar para o cálculo do C_p ; β é o ângulo de passo das pás da turbina; $\omega_{turbina}$ é a velocidade da pá da turbina; R é o raio da turbina e v_1 é a velocidade média do vento.

A representação gráfica de C_p em função da velocidade do rotor está ilustrada na Fig. 3 [10].

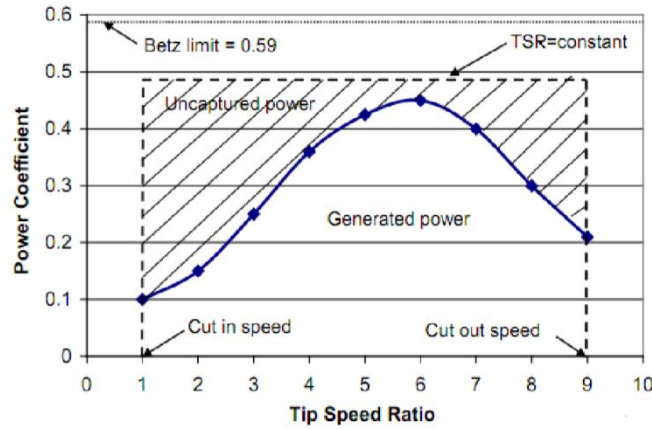


Figura 3: Gráfico de C_p em função da razão da velocidade do rotor.

Vale salientar que a potência disponível no vento é dada pela expressão [12]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v_1^2 \quad (5)$$

Onde: ρ é a densidade do ar seco ($1,225 \text{ kg/m}^3$) e A é a área de varredura do rotor em m^2 . Já a potência extraída pela turbina pode ser apresentada como se segue:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3 \quad (6)$$

Uma vez conhecida a potência mecânica máxima que pode ser extraída do vento, considerando uma determinada velocidade do vento, estima-se a velocidade ótima de rotação da turbina eólica, velocidade que maximizará o coeficiente de potência para a condição imposta pelo vento. Para variação da velocidade da turbina, faz-se necessária a alteração do conjugado eletromagnético do gerador, conforme apresentado na equação (7):

$$T_{mec} - T_{ele} = J \frac{d\omega_{turbina}}{dt} \quad (7)$$

Onde: T_{mec} é o torque mecânico no eixo da turbina; T_{ele} é o torque eletromagnético gerado pelo gerador e J é a inércia das pás da turbina.

O torque ou conjugado eletromagnético, por sua vez, pode ser controlado indiretamente através do controle da corrente do estator do gerador, papel que é desempenhado pelo conversor *boost*. A corrente de referência para o controle do conversor *boost*, a qual garante um máximo C_p para a dada condição de vento, depende de características do sistema de geração e pode estimada através da equação (8).

$$I_{cc,ref} = \frac{T_{ele-otimo}}{3n_p \lambda_{d,est}} \quad (8)$$

Onde: $I_{cc,ref}$ é a corrente de referência usada para o controle de MPPT; $T_{ele-otimo}$ é o torque elétrico para C_p máximo; n_p é o número de polos do gerador; $\lambda_{d,est}$ é o fluxo de eixo direto do gerador.

O torque elétrico ótimo pode ser calculado por [9]:

$$T_{ele-otimo} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p-otimo}}{\lambda_{otimo}} \omega_{turbina}^2 \quad (9)$$

Onde, $C_{p-otimo}$ é o coeficiente de potência máximo da turbina eólica e λ_{otimo} é a razão de velocidade das pás.

Portanto, o conversor *boost* irá agir de maneira a garantir uma corrente de referência no estator do gerador, a qual levará à um C_p ótimo relacionado à máxima extração de potência para as condições atuais de operação do aerogerador.

IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE MPPT EM UM SIMULADOR NO DOMÍNIO DO TEMPO

Nesta etapa dos desenvolvimentos foi realizada a implementação do controle de MPPT escolhido no simulador *Matlab*. O modelo computacional do sistema de geração eólica utilizado nas análises de desempenho é constituído de: representação do vento, modelo equivalente da turbina eólica, gerador síncrono de ímã permanente, retificador não controlado e, evidentemente, o conversor *boost* juntamente com sua malha de controle, conforme apresentado pela Fig. 4. Vale ressaltar que o sistema de inversão empregado em sistemas de geração reais não foi contemplado nesse estudo, uma vez que o mesmo não tem influência significativa nos resultados.

Vale ressaltar que a única parte não implementada do aerogerador, neste arranjo, foi seu sistema de inversão para conexão à rede elétrica. Tal implementação não foi feita devido o foco deste informe técnico ser a análise do sistema de MPPT. Na Figura 5 tem-se destacado as conexões gerais do circuito de MPPT implementado neste trabalho.

Na sequência será desenvolvida uma aplicação do arranjo eólico ora implementado com uma respectiva análise de desempenho do sistema de MPPT.

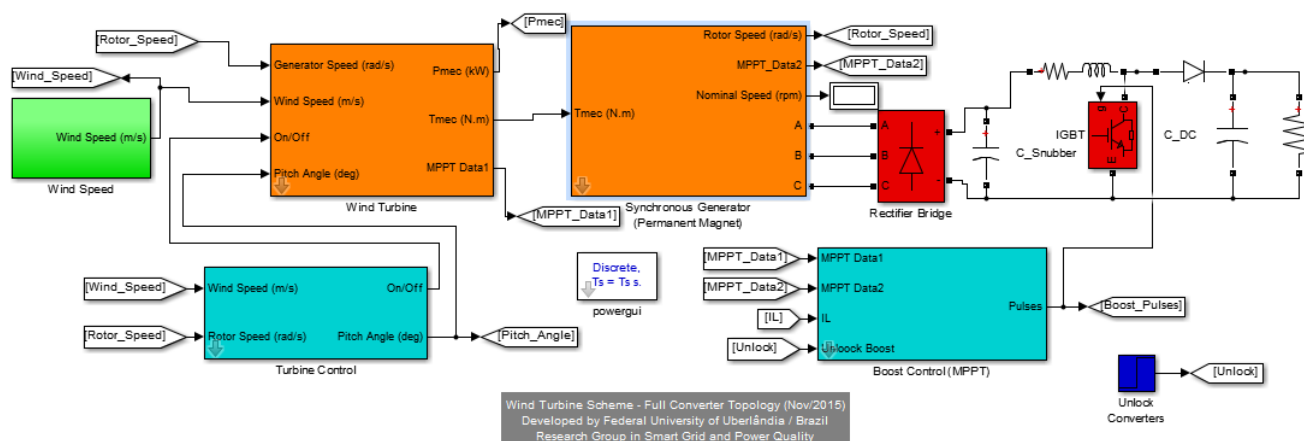


Figura 4: Modelagem do sistema eólico de topologia *Full Converter* no Matlab.

VI. ESTUDOS DE CASO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ARRANJO IMPLEMENTADO

Uma vez realizada a modelagem computacional do conversor boost e do respectivo controle MPPT, os quais foram implementados no *Matlab/Simulink*, tem-se nesta secção a avaliação da modelagem via de estudos de casos.

Serão realizados três estudos de caso, a saber:

- Caso 1: arranjo de geração eólica sem controle de MPPT;
- Caso 2: arranjo de geração eólica com controle de MPPT e potência entregue no elo CC inferior à máxima potência;
- Caso 3: arranjo de geração eólica com controle de MPPT e potência entregue no elo CC próximo da máxima potência.

Vale lembrar que a máxima potência é aquela alcançada quando o aerogerador está operando próximo ao coeficiente de potência ótimo.

Para os estudos computacionais, considerou-se um aerogerador *Full Converter* de 1MW, cujos principais parâmetros estão parâmetros destacados na Tabela I.

TABELA I: PARÂMETROS DO AEROGERADOR

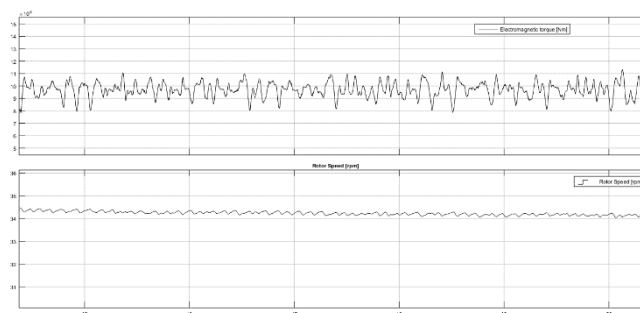
TURBINA EÓLICA	Raio	40
	Velocidade Nominal (m/s)	12
	Velocidade Cut in (m/s)	3
	Velocidade Cut Out (m/s)	25
GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO	Tensão Nominal (V)	690
	Potência nominal (MVA)	1
	Número de polos	120
	Frequência Nominal (Hz)	17
	Reatância de eixo direto (pu)	0,68
	Reatância de eixo em quadratura (pu)	0,60
	Reatância transitória de eixo direto (pu)	0,24
	Reatância subtransitória eixo direto (pu)	8
	Reatância subtransitória eixo quadratura (pu)	0,18
	Reatância transitória eixo quadratura (pu)	4
	Reatância de dispersão (pu)	0,10
	Reatância do estator (pu)	0,01
	Inércia conjunto gerador e turbina (Kg.m ²)	3
		5000
		0

Complementarmente, tem-se um conversor *boost* que utiliza uma chave IGBT, um indutor de $1,2\text{ mH}$, um diodo e um capacitor de saída de 90 mF . A carga que receberá a energia gerada será uma resistência, cujo valor é definido na sequência.

Ressalta-se, ainda, que todas as simulações foram feitas durante um intervalo de 25 s, que o passo de integração aplicado é de $50\text{ }\mu\text{s}$ e que a condição de vento atribuída foi a de um vento base de 11 m/s durante todo período de simulação.

CASO 1: ARRANJO EÓLICO SEM MPPT

Uma vez realizada a simulação computacional, têm-se, na sequência, os gráficos resultantes para a Caso 1. A resistência representativa do carregamento, a qual está conectada na saída do elo CC, é de $1,8\text{ ohm}$.

**Figura 6: Torque elétrico e velocidade do rotor – Caso 1.**

Verifica-se uma velocidade constante de aproximadamente $34,8\text{ rpm}$, enquanto o torque também se mantém constante em aproximadamente 110 kN.m . Já na Figura 7 destaca-se o comportamento do coeficiente de potência.

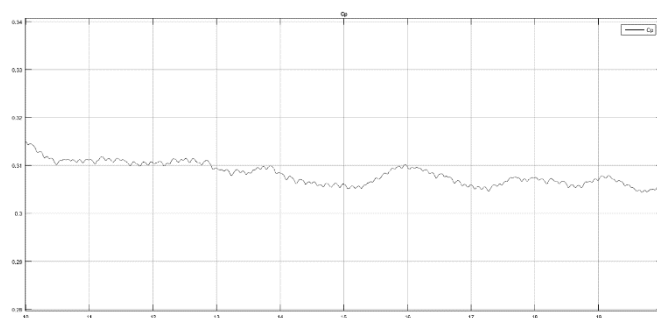


Figura 7: Comportamento de C_p – Caso 1.

O coeficiente de potência apresenta pequenas variações em torno de 31%. Na Figura 8 é mostrado o gráfico da potência elétrica de saída do elo CC ao longo do tempo. Percebe-se que a mesma se mantém constante em cerca de 450kW.

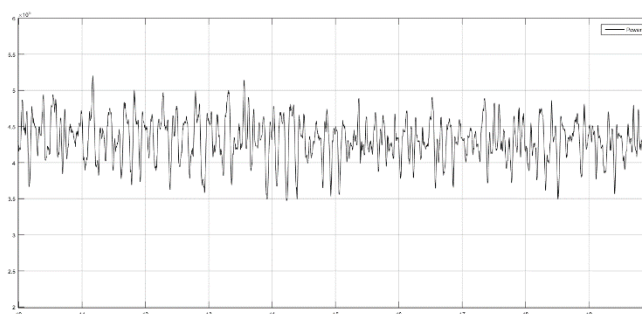


Figura 8. Potência elétrica injetada no elo CC – Caso 1.

CASO 2: ARRANJO EÓLICO COM MPPT OPERANDO EM UM PONTO DE BAIXO COEFICIENTE DE POTÊNCIA

Neste estudo, chamado de Caso 2, manteve-se o mesmo valor de resistência representativa do carregamento.

Os gráficos aqui apresentados seguem a mesma lógica adotada para a Caso 1. Vale ressaltar que o controle do MPPT é ativado a partir do instante 15s. Isto é válido tanto para a Situação 2 como para a Caso 3.

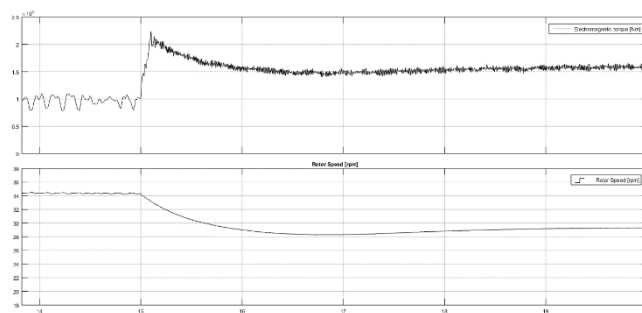


Figura 9: Torque elétrico e velocidade do rotor – Caso 2.

Nota-se que o torque se estabiliza após o desbloqueio do conversor boost (MPPT) em torno de 160kN.m, enquanto a velocidade caía para aproximadamente 29,3rpm.

O comportamento do coeficiente de potência, apresentado na Figura 10, mostra-se superior em relação à situação anterior, alcançando um patamar de aproximadamente 43,4%.

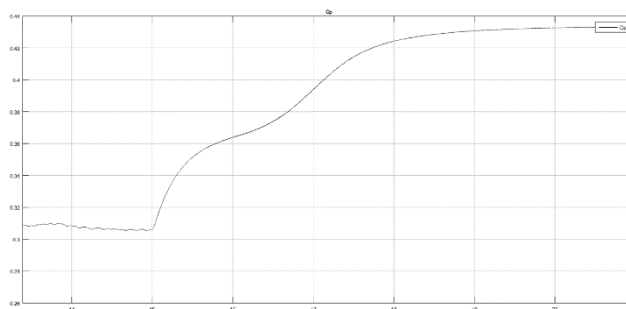


Figura 10: Comportamento de C_p – Caso 2.

Por fim, tem-se na Figura 11 um gráfico da potência elétrica da saída do elo CC ao longo do tempo, no qual pode-se observar uma elevação da mesma para um nível em torno de 600kW. Isto, é claro, após sua estabilização.

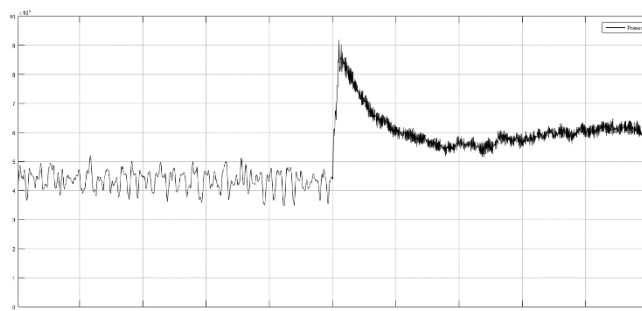


Figura 11: Potência elétrica injetada no elo DC – Caso 2.

C. Caso 3: arranjo eólico com MPPT operando em um ponto de alto coeficiente de potência

Nesta situação, a resistência foi alterada para um valor representativo de um elevado coeficiente de potência mesmo na ausência de MPPT, adotando-se para tanto 1,3ohm.

Fica evidenciado, por meio da Figura 12, um ligeiro aumento do torque elétrico – estabilizando-se em torno de 170kN.m, enquanto a velocidade cai para 29,5rpm, após, é claro, a ativação do sistema MPPT.

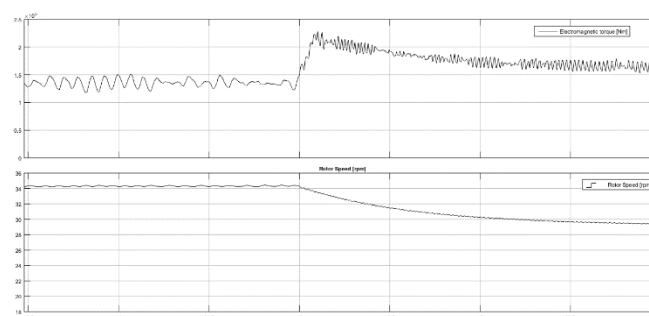


Figura 12: Torque elétrico e velocidade do rotor – Caso 3.

No que se refere ao coeficiente de potência, para esta situação, verifica-se, após estabilização, uma manutenção do mesmo em cerca de 43,3%.

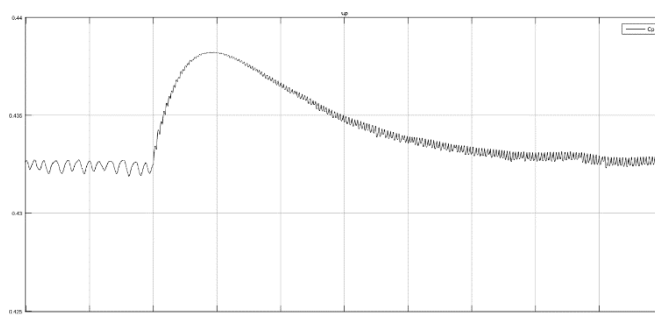


Figura 13: Comportamento de C_p – Caso 3.

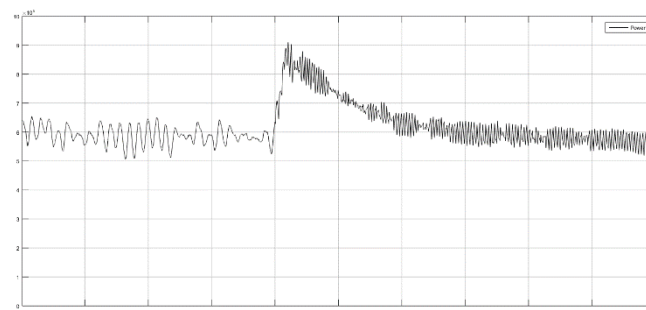


Figura 14: Potência elétrica injetada no elo CC – Caso 3.

Na figura 14, potência elétrica injetada no elo CC, observa-se que praticamente não houve variação perceptível da potência de saída com a aplicação do MPPT, mantendo-se a mesma em torno 600kW.

Diante dos resultados obtidos com a implementação computacional do sistema eólico, pode-se afirmar:

- Em todas as situações impostas os sistemas simulados resultaram em valores coerentes com o aerogerador utilizado e as condições de vento estabelecidas.

- No Caso 1 não foi percebida qualquer variação significativa nos índices selecionados para análise, conforme já era esperado, uma vez que não teve atuação do MPPT.
- No Caso 2 verificou-se, com a atuação do MPPT, uma elevação do torque elétrico, coeficiente de potência e potência elétrica disponibilizada. Por outro lado, houve uma diminuição da velocidade do rotor. Estes valores quando comparados à Caso 1 (sem MPPT) evidenciam uma sensível melhora da eficiência do sistema de geração eólica, elevando a potência de cerca de 450kW para algo em torno de 600kW.
- Vale ressaltar, para o caso 2, que o aumento do torque elétrico em detrimento à diminuição da velocidade do rotor deve-se ao fato que a elevação do torque elétrico representa uma oposição ao torque mecânico da máquina síncrono, o que, por sua vez, faz com que haja uma desaceleração da mesma. Isto está matematicamente correlacionado pela Equação (7). Por fim, a elevação do torque elétrico, nesta situação, ocorre devido ao aumento da corrente provocado pela atuação do MPPT.
- No Caso 3, onde foi colocada uma condição de carga cujo o valor já levava à um alto coeficiente de potência, observou-se uma pequena variação nos indicadores de corrente e torque elétrico. Contudo, a potência manteve-se a mesma independentemente da atuação do MPPT. Nesta situação, o MPPT não trouxe ganhos significativos.

VII. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado a principal estratégia para maximização do rendimento da turbina eólica nomeado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) para um gerador *Full Converter*. Ademais, foi discutido matematicamente e fisicamente a metodologia do PSF (Power Signal Feedback), demonstrando através de equações, o funcionamento do PSF no sistema eólico e suas consequências esperadas com as principais grandezas envolvidas no sistema.

Por fim, realizou-se um estudo de caso por meio de simulações implementadas no software *Matlab/Simulink*, sendo utilizado um sistema eólico de arranjo *Full Converter* de geração e lógica PSF de extração da máxima potência. A apresentação dá-se de como o aspecto físico do sistema foi transferido para o software e as suas devidas características. Este estudo de caso gerou diversos resultados relacionados à aplicação do MPPT. Estes resultados, por sua vez, enfatizaram as vantagens e limitações (quando da ocorrência próximo ao C_p máximo) da aplicação da técnica de rastreamento de máximo ponto de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos ao CNPQ (Proc. 460208/2014-4) e à FAPEMIG (Proc. TEC-APQ-02447-15) pelo suporte financeiro concedido via Projetos de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. L. C. Cruz, “Geração distribuída”, O Setor Elétrico, edição 93, outubro de 2013.
- [2] G. L. Xavier. “Avaliação de desempenho da estratégia de representação laboratorial de turbinas eólicas utilizando motores de indução controlados”. Dissertação (Mestrado)-FEELT, UFU, Uberlândia, 2012.
- [3] J. S. Thongam, M. Ouhrrouche. “MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems”, University of Quebec at Chicoutimi, Quebec, Canada.
- [4] M. Ragheb, “Wind Energy Conversion Theory, Betz Equation”, 2014.
- [5] A. F. Bonelli. “Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica”. Dissertação (Mestrado)- FEELT, UFU, Uberlândia, 2010.
- [6] A. L. Tsuchida, “Aspectos Metodológicos Acerca da Modelagem de Turbinas Eólicas”, USP, São Carlos, 2012.
- [7] P. A. B. Block, F. S. Retorta, D. B. Dahlke, M. D. Teixeira. “Estudo Comparativo do Desempenho harmônico de aerogeradores”, Institutos Lactec, Curitiba, Paraná, 2015.
- [8] J. M. V. S. Reis. “Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curto-Circuitos no Sistema”. Dissertação (Mestrado)- Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- [9] A. Reis. “Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização dos Harmônicos”. Dissertação (Mestrado)- FEELT, UFU, Uberlândia, 2014.
- [10] S. S. Mali, B. E. Kushare. “MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines”, Research Assistant, Electrical Engineering Department, IIT Bombay, India, 2013.
- [11] G. N. Ram, A. Kiruthiga, Dr. J. D. Shree, “A Novel Maximum Power Point Tracking System for Wind-Energy-Conversion System using Particle Swarm Optimization”, IJERT, Vol. 3 Issue 2, February – 2014.
- [12] J. Hui, “An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems”, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 2008.

Capítulo 5



10.37423/221006772

TUBOS GALVANIZADOS COMO FONTE DE CONTAMINAÇÃO POR CHUMBO EM ÁGUA RESIDENCIAL

Thais Pereira Sarmiento

Universidade Federal Fluminense

Fernando Benedicto Mainier

Universidade Federal Fluminense

Dayanni de Brito da Silva

Universidade Federal Fluminense

Renan Cardoso de Oliveira

Universidade Federal Fluminense



Resumo: Este trabalho apresenta uma abordagem crítica sobre a qualidade dos tubos de aço galvanizado utilizadas em instalações hidráulicas e sua potencial participação na contaminação da água por chumbo, com base na avaliação das etapas do processo de galvanização e artigos que avaliaram o uso dessas tubulações. O processo de zincagem a quente consiste, essencialmente, na imersão total dos tubos em banho de zinco líquido, na temperatura de 450-470°C, para formar um revestimento de zinco, que depende do tempo de contato e dos constituintes metálicos presentes no banho de zinco líquido. A adição direta de chumbo ao banho de zinco líquido e/ou o uso de lingotes de zinco com altos teores de chumbo pode contaminar a peça galvanizada. Os depósitos provenientes da corrosão dos tubos revestidos representam uma preocupação considerando que este acúmulo, ao longo do tempo, pode apresentar concentração em chumbo maior que o revestimento inicial. Alguns casos relatados na literatura mostram que, geralmente, vários fatores combinados aumentam a liberação do chumbo.

Palavras chave: Aço galvanizado, chumbo, processo de imersão a quente, corrosão, contaminação da água.

INTRODUÇÃO

Os dutos galvanizados apresentam um revestimento de zinco na superfície do aço para lhe conferir proteção à corrosão. Esse processo de galvanização se tornou consagrado devido a sua grande diversidade de usos e produtos, sendo empregadas na fabricação na chaparia de veículos, peças de eletrodomésticos, coberturas de construções, tubulações de águas pluviais, tubulações de drenagem, vergalhões de aço, arames, dentre outros. Esse processo consiste na colocação da peça em um banho de zinco fundido a uma faixa de temperatura entre 440 a 470°C, devendo ficar imersa de 1 a 5 minutos dependendo da espessura do revestimento que se deseja, terminada a operação de imersão a peça é resfriada [1-4].

É bastante comum nesses banhos de zinco fundido a adição de 0,5% a 1,4% (em massa) de chumbo. A sua adição é realizada para aumentar a fluidez do banho, reduzir o ataque do zinco ao substrato de aço, proteger a cuba contra o ataque excessivo do zinco, impedindo o seu desgaste prematuro, aumentar a ductilidade, melhorar as propriedades mecânicas e influenciar nas condições corrosivas. O chumbo ainda favorece a formação de espessuras de camadas menores, auxiliando no controle do crescimento dos compostos intermetálicos nos aços reativos e reduzindo o consumo de zinco, levando assim a benefícios financeiros importantes para a indústria de galvanização [5, 6].

Algumas análises realizadas em tubos e conexões de aços galvanizados instalados de 1950 a 2008 mostram que a concentração de chumbo no revestimento de zinco original pode variar de não detectado a quase 2%, dependendo do fabricante e do tipo de conexão. Historicamente, tubos de chumbo, soldas com chumbo, latão e bronze foram consideradas as principais fontes de chumbo na água. No entanto, pesquisas documentam que o teor de chumbo usado na galvanização pode ser uma fonte significativa de contaminação em longo prazo [5].

Os padrões de potabilidade tanto nacionais quanto internacionais determinam limites de concentrações aceitáveis de chumbo em água potável. Porém, as agências reguladoras geralmente coletam amostras no sistema de distribuição de água ou nas estações de tratamento de água. Consequentemente, os efeitos das instalações prediais hidráulicas não recebem muita atenção, local onde a água pode permanecer na instalação da tubulação por várias horas antes de alcançar a torneira. Assim, dependendo do período de estagnação e do tipo de instalação do encanamento, as concentrações de chumbo podem ser significativamente maiores do que no sistema de distribuição [7, 8].

O chumbo é um metal nocivo ao meio ambiente e tóxico ao homem, podendo criar graves problemas de saúde pública. É uma neurotoxina potente que pode causar danos a quase todos os órgãos, trazendo vários riscos para os seres humanos, incluindo gastrointestinais e defeitos cardiovasculares, pressão alta, problemas renais, anemia, embriotoxicidade, neoplasia, supressão da medula óssea e convulsões.

A exposição crônica ao chumbo pode induzir mutilação cardíaca e vascular causando doenças cardiovasculares. Além disso, outros efeitos, incluindo anormalidades neurocomportamentais, fraqueza neuromuscular, problemas auditivos, menor atenção extensão, dificuldade de aprendizagem, além de afetar o sistema reprodutivo do homem. Em baixas concentrações por um longo período pode ter efeito bioacumulativo. O maior risco de exposição ao chumbo é para bebês, crianças pequenas e mulheres grávidas. As liberações íons Pb^{2+} provenientes de tubulações à base de chumbo na água residencial tem sido associada a maior incidência de abortos e morte fetal [7-14].

Já no meio ambiente, a água contendo íons chumbo pode danificar o ecossistema, infiltrando e contaminando as águas subterrâneas, lagos, rios, oceanos e solos. Além dessas instalações hidráulicas prediais a contaminação do meio ambiente pode ser proveniente da corrosão das coberturas de aço galvanizado, tubulações de águas pluviais, tubulações de drenagem, dentre outros [1].

2. TUBOS DE AÇO GALVANIZADO

O processo de galvanização por imersão a quente de tubos de aço é um dos mais antigos e do ponto de vista comercial um dos mais importantes. Ocorre através das seguintes etapas: limpeza mecânica, desengraxamento, decapagem, fluxagem, zincagem e secagem, sendo que todas as etapas são intercaladas com enxágue para não passar contaminantes.

2.1. PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE

O pré-tratamento do metal é muito importante para o processo de galvanização e deve ser realizado através das seguintes etapas. A limpeza mecânica pode ser feita através de lixa, escova de aço, espátula, marteleto, escovas rotativas e outros. O desengraxe que tem por objetivo fazer a limpeza e remoção de resíduos orgânicos, como sujeira, marcas de tinta, graxa e óleo. É feito com utilização de soluções alcalinas concentradas, compreendendo formulações à base de hidróxido, carbonato e silicatos de sódio ou solventes orgânicos, normalmente, à base de hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos e organoclorados. Após a etapa de desengraxe é feita uma lavagem para que não haja contaminação nos tanques. Na etapa de decapagem a peça é imersa em banhos com soluções ácidas

para remover incrustação e óxidos de ferro da superfície. Geralmente, são utilizadas formulações à base de ácido clorídrico ou ácido sulfúrico com adições de inibidores de corrosão visando evitar o ataque acentuado das peças metálicas. As soluções ácidas usadas variam de 5 a 15 % em volume com uma temperatura de 60 a 70°C [2,3,6].

A etapa de fluxagem é responsável pela remoção de óxidos, ainda aderentes à superfície metálica, de tal modo a propiciar uma superfície limpa para melhorar a difusão entre as ligas ferrosas e o zinco fundido. Existem duas técnicas de aplicação denominadas de processo seco e processo úmido. No processo a seco, após a decapagem as peças são imersas em uma solução aquosa de cloreto de zinco (ZnCl_2) e cloreto de amônio (NH_4Cl) a quente. Após esse processo são aquecidas em estufa e levadas ao banho de zinco fundido. A principal vantagem deste processo é a menor possibilidade de choque térmico que reduz o risco de empenamento nas peças com pouca espessura [3].

No processo úmido, a mistura de cloretos de zinco e de amônio, é fundida e forma uma massa sobrenadante no banho de zinco fundido. Assim, as peças são introduzidas lentamente, de tal forma, a não romper o sobrenadante e propiciar uma excelente remoção das impurezas aderentes à superfície. As principais vantagens deste processo residem nos seguintes fatos: requer menor manipulação das peças; não necessita de estufas para pré-aquecimento das peças e a eficiência na remoção dos óxidos aderentes [3].

Na etapa de zincagem a peça de aço, depois de limpa, é imersa no zinco fundido a uma temperatura de 450°C a 470°C, de 4 a 5 minutos, formando um revestimento aderente que proporciona além da proteção por barreira uma proteção catódica à corrosão. Essa temperatura de banho não pode ser superior, pois pode ocorrer maior difusão entre o ferro e zinco e assim ocorrer maior teor de ferro no revestimento final. Durante esse processo uma série de camadas intermetálicas é formada através da reação do ferro com o zinco. A taxa de reação normalmente é parabólica com o tempo, ou seja, a taxa inicial da reação é muito rápida e pode-se observar uma considerável agitação no banho de zinco. A espessura principal do revestimento é formada durante esse período. Em seguida, a reação fica mais lenta e a espessura do revestimento não aumenta significativamente, mesmo se a peça ficar na cuba por um período maior de tempo [2, 3,14-17].

2.2. MICROESTRUTURA

O revestimento obtido em condições normais é formado por quatro fases intermetálicas entre zinco e ferro denominadas, respectivamente, de Gama (γ), Delta (δ), Zeta (ξ) e Eta (η) conforme mostra a Figura 1.

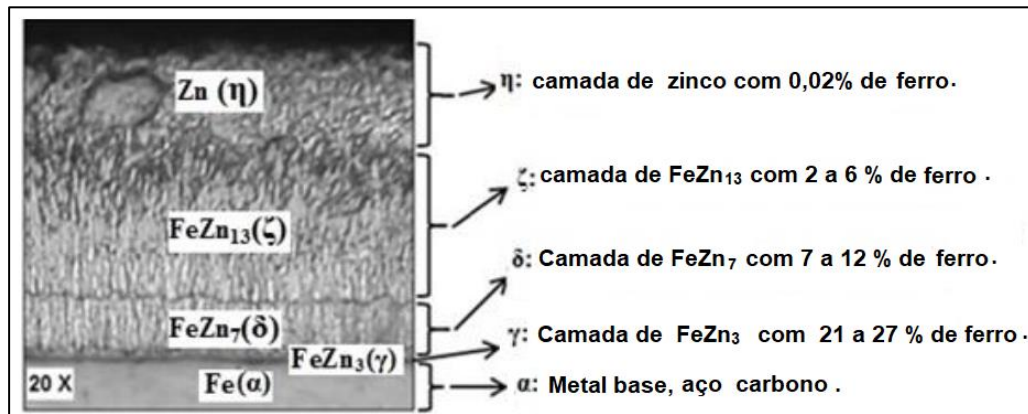


Figura 1 – Micrografia das camadas de FeZn do processo de imersão a quente

As camadas intermetálicas são mais duras que o aço base, assim essa combinação de propriedades de revestimento de zinco fornece sua alta resistência ao desgaste. Em alguns casos, irregularidades do revestimento galvanizado levam a uma camada Eta (η) de zinco puro muito fina, impedindo a proteção do substrato de aço contra a corrosão conforme mostram algumas micrografias obtidas de tubos galvanizados utilizados na construção civil.

3. LIBERAÇÃO DE CHUMBO

Considerando que muitas estações de tratamento de água têm, continuamente, melhorando os processos visando garantir uma melhor qualidade da água, a água residencial que chega aos clientes geralmente é pior do que na estação de tratamento. Tal fato é devido à contaminação durante a transmissão na rede de distribuição. Além dos problemas com a coloração da água, a água pode conter altos níveis de turbidez, quantidades excessivas de ferro e manganês, excesso bactérias e outros contaminantes. Os compostos de chumbo também são uma preocupação, considerando as diversas fontes de contaminação, incluindo tubos de chumbo, tubos revestidos com estanho, tubos de aço galvanizado, conexões e acessórios soldados com materiais de latão e revestimento de argamassa de cimento. Os tubos de aço galvanizado, geralmente, acumulam compostos de zinco que podem afetar o gosto da água, mas também se acumulam na tubulação, ameaçando qualidade da água ou em muitos casos, se tornando nutrientes para os biofilmes [18].

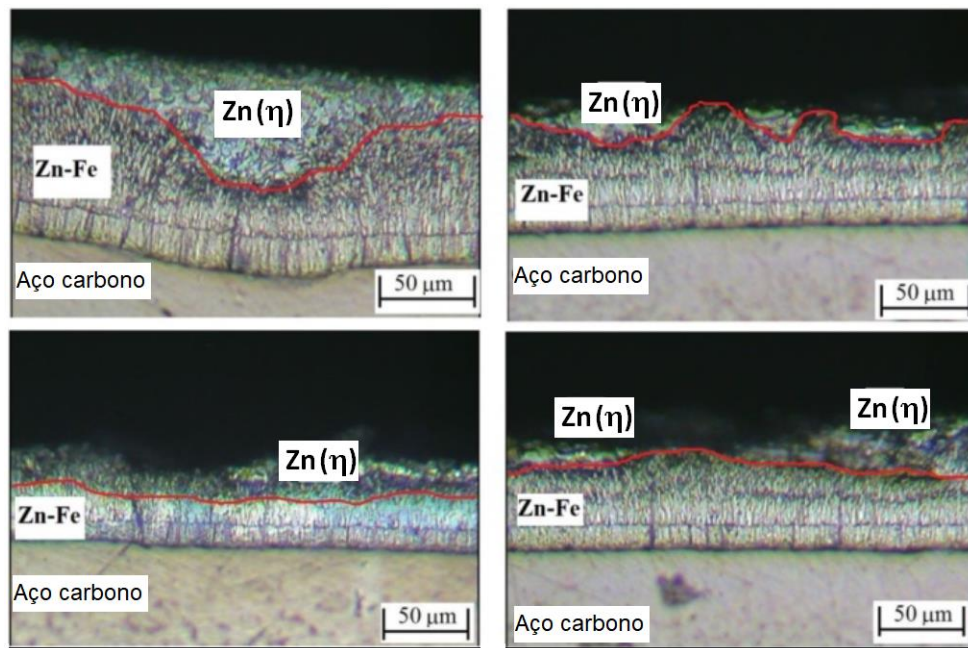


Figura 2 – Micrografias das camadas de zinco evidenciando a espessura final da camada de zinco (η)

O tubo de aço galvanizado pode ser fonte de compostos de chumbo de duas maneiras como fonte direta e indireta. Podem vir a ser fonte de liberação direta de chumbo quando o revestimento de zinco é corroído liberando assim o chumbo na forma de partículas ou dissolvido em água. Em alguns casos, mesmo após a corrosão do revestimento de zinco, acontece de não diminuir a concentração de chumbo e sim aumentar. Isso é explicado pelo fato de existir depósitos de ferro ricos em chumbo que ficou aderido ao longo das tubulações de aço galvanizado, podendo se tornar um reservatório para a liberação indireta de chumbo [5].

3.1. FORMAÇÃO DE DEPÓSITOS

Os depósitos que ocorrem nos tubos podem estar associados aos microrganismos presentes na água que produzem polímeros extracelulares contribuindo para a formação de biofilme e assim a adesão dos produtos de corrosão as paredes internas da tubulação. Duas classes diferentes de microrganismos causam corrosão nos tubos de aço: aeróbicos e tipos anaeróbicos com tipos completamente diferentes de reações de corrosão. Assim, as células de concentração diferenciais podem modificar o potencial das superfícies metálicas e propiciar à formação de células de corrosão localizadas [19].

A concentração dos metais tóxicos nos depósitos dos tubos está relacionada com o material do tubo e o estado do revestimento interno, influenciando o tipo e o conteúdo de poluentes presentes no depósito. Isso indica que os poluentes metálicos nos depósitos são produtos das reações de

precipitação e corrosão dos tubos. Portanto, as fontes dos depósitos sólidos incluem subprodutos da corrosão dos tubos, resíduos de deposição de partículas, precipitação de substâncias dissolvidas.

O ferro, alumínio e manganês são geralmente os principais elementos metálicos dos depósitos. No entanto, metais tóxicos, como cromo, chumbo, cobre, cádmio, níquel e arsênio também podem se acumular no sistema de distribuição de água. Os depósitos não aderentes também são responsáveis pela ocorrência de coloração da água. Embora as concentrações de alguns metais pesados na água tratada são extremamente baixas ou até indetectáveis, eles podem se acumular e se concentrar nesses depósitos ao longo do tempo [18].

O ferro tem uma forte tendência de absorver o chumbo. Assim, em tubos de aço galvanizado onde o revestimento de zinco já sofreu desgaste, o ferro pode se acumular com o chumbo formando depósitos que podem ser liberado em uma turbulência do fluxo de água. Estudos relacionam altos níveis de chumbo particulado com elevados níveis de ferro particulado e matéria orgânica, indicando a adsorção do chumbo ao ferro [20].

Além do ferro existem estudos relacionando o chumbo liberado dos tubos de aço galvanizado com a presença de cádmio. Apesar de baixas concentrações, o teor de cádmio pode identificar, indiretamente, a presença de chumbo em tubos de aço galvanizado. Entretanto, devido ao baixo teor de cádmio nem sempre é representativo para indicar a presença de chumbo, porém caso seja identificado na água pode descartar fontes de contaminação de chumbo como tubos de chumbo, solda com chumbo ou latão. Assim, uma possível maneira de distinguir o chumbo do aço galvanizado e o chumbo do latão nas águas é usando a concentração de cádmio como uma impressão digital [5, 8].

3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A LIBERAÇÃO DE METAIS

Vários fatores que influenciam na liberação dos metais tóxicos na água tanto na corrosão do revestimento de zinco como na liberação dos depósitos acumulados nos tubos. Dentre eles estão o pH, alcalinidade, temperatura, salinidade e outros. As falhas prematuras nos revestimentos de zinco também pode ser um fator que aumenta a corrosão do revestimento [21].

A turvação e a cor da água podem indicar maior liberação de ferro. A liberação de ferro também pode ser acelerada pelo aumento da temperatura e influenciada pelo tempo de permanência hidráulica [22].

Na ótica de Chowdhury et al. [7] a idade elevada dos tubos galvanizados e os fluxos médio e alto podem gerar regimes turbulentos no sistema de distribuição de água, acarretando o aumento da liberação de chumbo em comparação com a condição de baixo fluxo.

Segundo Masters & Edwards [20] a liberação de chumbo para água está associada à corrosão do aço, desta forma, a redução do pH da água de 10,3 para 9,7 favorece a diminuição da solubilidade do chumbo, entretanto, esta operação na estação de tratamento acarretou o aumento das queixas dos consumidores no aparecimento de água vermelha e liberação de ferro. Diante desses fatos o pH foi mantido em 10,3.

Misturas de águas dessalinizadas com alto teor de cloretos com águas superficiais podem acarretar problemas de corrosão na distribuição de águas residenciais sendo alertada por Imran et al. [23].

A troca de tubos de chumbo por tubos de cobre e também a troca por conexões de cobre e latões, com a intenção de reduzir a exposição do consumidor ao chumbo, em alguns locais, propiciou o início de corrosão galvânica aumentando as taxas de corrosão, considerando que o cobre funciona como catodo em relação aos tubos de chumbo e tubos galvanizados. Consequentemente houve um aumento nas águas dos teores de íons chumbo, zinco e ferro [19, 24].

4. CASOS DE CONTAMINAÇÃO

Em Washington os níveis elevados de chumbo nas águas foram desencadeados por uma mudança de desinfecção química de cloro livre em cloramina para cumprir com os novos regulamentos de desinfecção. Casos semelhantes de níveis elevados de chumbo em eventos aquáticos foram documentados em outras cidades nos EUA. Até o momento, Lansing, Michigan e Madison, Wisconsin são as únicas duas cidades que tinham alto nível de chumbo na água, que substituíram toda a tubulação. Esses esforços levaram mais de uma década para se completar e custaram dezenas de milhões de dólares, mas Madison considerou que as substituições em longo prazo seriam mais eficazes financeiramente em comparação com o controle contínuo da corrosão via dosagem de fosfato [25].

A cidade de Fresno, Califórnia, com amplo uso de tubos de aço galvanizado, historicamente utiliza águas subterrâneas como fonte de água potável. Em 2004, Fresno mudou para a água de superfície tratada em sua rede de distribuição e começou a receber um aumento nos relatórios de coloração da água. No caso de Tucson, Arizona, em 1992, ao mudar de águas subterrâneas para águas superficiais provocou a liberação de ferrugem do tubo de aço galvanizado, resultando em milhares de reclamações de coloração da água dos consumidores. Os problemas relacionados à corrosão tubo de aço

galvanizado foram parcialmente resolvidos por com a remoção das tubulações de aço galvanizado. Até 2017, mais de 440 km de tubos galvanizados foram substituídos no sistema de distribuição de água de Tucson [21].

Flint, Michigan mudou o fornecimento de água para o Rio Flint como uma fonte temporária de água potável sem programar o controle de corrosão em abril de 2014. Dez meses depois, as amostras coletadas da água em uma residência revelaram progressivo aumento dos níveis de chumbo na água coincidindo com aumento de coloração da água. A avaliação forense revelou que a causa dos altos níveis de chumbo na água foi a desestabilização das camadas de ferrugem por corrosão que se acumularam ao longo de décadas em um tubo de aço galvanizado a jusante de um tubo de chumbo [26].

Essa mudança foi recebida com a oposição dos moradores que alegaram que a água de o rio Flint não era seguro. Depois que as preocupações foram confirmadas por pesquisadores independentes a crise se tornou um tema de debate nacional, a cidade de Flint e as autoridades estaduais optaram por voltar ao que era antes e prometeu reparar os danos causados por negligência regulatória.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que os tubos de aço galvanizados são mais resistentes e seguros quando comparados a outros tubos metálicos, graças a sua superfície de zinco. Porém, essa mesma superfície de zinco que lhe dá uma enorme vantagem também traz a desvantagem da alta liberação de zinco na água. O zinco liberado pode ser uma fonte de alimento para os microrganismos presentes no biofilme, que é um dos responsáveis pelos depósitos de metais na superfície interna da tubulação.

Além disso, a liberação direta de chumbo presente no revestimento de zinco tem mostrado que pode ser uma contaminação significativa dependendo da qualidade da água. Também, é fato que nem sempre a coloração da água é um indicativo de contaminação por chumbo, pois em tubos novos pode ocorrer essa contaminação. Entretanto, em tubulações mais antigas em que os depósitos de metais são liberados, nesses casos geralmente o ferro está associado à liberação do chumbo.

As contaminações mostram que vários fatores contribuem na liberação de chumbo como mostram os artigos referenciados. Além disso, é importante alertar que as imperfeições e descontinuidades do revestimento de zinco reduzem a vida útil dessas tubulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]Veleza, L.; Meraz, E.; Acosta, M. (2010). Zinc precipitation runoff from galvanized steel in humid tropical climate. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, v. 45, n. 1, p. 76–83.
- [2]Mainier, F. B., Santos, R. G. S. D., and Farneze, H. N.,(2019). Quality Analysis of Galvanized Pipes Applied to Natural Gas Installations in Civil Construction, *Matéria*, (Rio de Janeiro) 24 (2). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0675>.
- [3]Marder, R. A. (2000). The Metallurgy of Zinc-Coated Steel. *Progress Materials Science* 45: 191-271. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00006-1).
- [4]Shibli, S. M. A., Meena, B. N., and Remya, R. (2015). A Review on Recent Approaches in the Field of HotDipZincGalvanizingProcess.SurfaceandCoatingTechnology262:2105.<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.054>.
- [5]Clark, B. N.; Masters, S. V.; Edwards, M. A. (2015). Lead Release to Drinking Water from Galvanized SteelPipeCoatings.EnvironmentalEngineeringScience,v.32,n.8,p.713721.<http://doi.org/10.1089/ees.2015.0073>.
- [6]Souza Júnior, O. B., Biehl, L. V., Hackenhaar, R. A., (2014) Princípios do processo de galvanização à quente. *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, 24(2), 93-110.
- [7]Chowdhury, S., Kabir, F., Mazumder, M. A. J., & Zahir, M. H. (2018). Modeling lead concentration in drinking water of residential plumbing pipes and hot water tanks. *Science of the Total Environment*, 635, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.065>.
- [8]Mainier, F. B., Semaan, F. S., Sarmiento, T. P., Amorim, P. H. O., & Dos Santos, R. G. S. (2020). Lead and Cadmium Distribution in Tubes of Galvanized Steel by Hot-Dip Used for Drinking Water Supply. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 14, 271-279.
- [9]Brown, M. J., and Margolis, S. (2012). Lead in Drinking Water and Human Blood Lead Levels in the United States. *MMWR Suppl.* 61 (4): 1-9.
- [10]Lee, J. W., Choi, H., Hwang, U. K., Kang, J. C., Kang, Y. J., Kim, K. I., & Kim, J. H. (2019). Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review.*Environmentaltoxicologyandpharmacology*,68,101108.<https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.010>.
- [11]Levallois, P., St-Laurent, J., Gauvin, D., Courteau, M., Prévost, M., Campagna, C., ... & Rasmussen, P. E. (2014). The impact of drinking water, indoor dust and paint on blood lead levels of children aged 1–5 years in Montréal (Québec, Canada). *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 24(2), 185-191. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.129>.
- [12]Vaziri, N. D. (2008). Mechanisms of lead-induced hypertension and cardiovascular disease. *AmericanJournalofPhysiologyHeartandCirculatoryPhysiology*,295(2),H454H465.<https://doi.org/10.1152/ajpheart.00158.2008>.
- [13]Vaziri, N. D., & Gonick, H. C. (2008). Cardiovascular effects of lead exposure. *The Indian journal of medical research*, 128(4), 426-435. <https://escholarship.org/uc/item/1v83j79q>.

- [14]He, L., Chen, Z., Dai, B., Li, G., & Zhu, G. (2018). Low-level lead exposure and cardiovascular disease: The roles of telomere shortening and lipid disturbance. *The Journal of toxicological sciences*, 43(11), 623-630. <https://doi.org/10.2131/jts.43.623>.
- [15]Culcasi, J. D., Sere, P. R., Elsner, C. I., & Di Sarli, A. R. (1999). Control of the growth of zinc-iron phases in the hot-dip galvanizing process. *Surface and Coatings Technology*, 122(1), 21-23. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00404-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00404-1).
- [16]Shibli, S. M. A., Meena, B. N., & Remya, R. (2015). A review on recent approaches in the field of hotdipzincgalvanizingprocess. *SurfaceandCoatingsTechnology*, 262, 210215. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.054>.
- [17]Kania, H., Mendala, J., Kozuba, J., & Saternus, M. (2020). Development of Bath Chemical CompositionforBatchHotDipGalvanizingAReview. *Materials*, 13(18), 4168. <https://doi.org/10.3390/ma13184168>.
- [18]Liu, Q., Han, W., Han, B., Shu, M., & Shi, B. (2018). Assessment of heavy metals in loose deposits in drinking water distribution system. *Environmental monitoring and assessment*, 190(7), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6761-9>.
- [19]Chukhin, V., Andrianov, A., & Spitsov, D. (2018). The mechanism and identification of corrosion of steel pipes in hot water supply systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 365, No. 2, p. 022025). IOP Publishing.
- [20]Masters, S., & Edwards, M. (2015). Increased lead in water associated with iron corrosion. *Environmental engineering science*, 32(5), 361-369. <https://doi.org/10.1089/ees.2014.0400>.
- [21]Tang, M., Nystrom, V., Pieper, K., Parks, J., Little, B., Guilliams, R., & Edwards, M. (2018). The relationship between discolored water from corrosion of old iron pipe and source water conditions. *Environmental Engineering Science*, 35 (9), 943-952. <https://doi.org/10.1089/ees.2017.0435>.
- [22]Shi, B., & Taylor, J. S. (2007). Potential impact of enhanced coagulation on corrosion by-product releaseinadistributionsystem. *Desalination*, 208(13), 260268. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.06.016>.
- [23]Imran, S. A., Dietz, J. D., Mutoti, G., Xiao, W., Taylor, J. S., & Desai, V. (2006). Optimizing source water blends for corrosion and residual control in distribution systems. *Journal-American Water Works Association*, 98(5), 107-115. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07664.x>.
- [24]St. Clair, J., Cartier, C., Triantafyllidou, S., Clark, B., & Edwards, M. (2016). Long-term behavior of simulated partial lead service line replacements. *Environmental engineering science*, 33(1), 53-64. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0337>.
- [25]Pieper, K. J., Martin, R., Tang, M., Walters, L., Parks, J., Roy, S., & Edwards, M. A. (2018). Evaluating water lead levels during the Flint water crisis. *Environmental science & technology*, 52(15), 8124-8132. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00791>.
- [26]Pieper, K. J., Tang, M., & Edwards, M. A. (2017). Flint water crisis caused by interrupted corrosion control: Investigating “ground zero” home. *Environmental science & technology*, 51(4), 2007-2014. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04034>.

Capítulo 6



10.37423/221006778

DIMENSIONAMENTO DE MURO DE SOLO REFORÇADO, COM GEOSSINTÉTICOS: PROJETO DE RECUPERAÇÃO DA AVENIDA DAS NAÇÕES, PORTAL DO SOL, PARAÍBA DO SUL

Wallace da Silva

Centro Universitário Redentor, Itaperuna-RJ

Carlos Augusto da Silva Júnior

Centro Universitário Univêrtrix, Três Rios-RJ

Gabriel Pereira Gonçalves

Centro Universitário Redentor, Itaperuna-RJ

Rômulo Rodrigues Coelho Delfino Souza

Centro Universitário Redentor, Itaperuna-RJ



Resumo: A ideia de “terra armada” ou “solo armado” foi desenvolvida pelo engenheiro francês Henri Vidal nos anos 60 e aprimorado ao longo do tempo, por meio da pesquisa com ensaios com muros em escala natural e de modelos reduzidos. Para se dimensionar a estabilidade interna de uma estrutura de contenção tipo solo armado é normatizado pela NBR 9286/86 - Terra Armada – Especificação_ editada e publicada pela ABNT_ Associação Brasileira de Normas Técnicas. Contudo, há bibliografias especializadas que apontam ao uso de outros modos de dimensionamento, que assim como a NBR 9286/86, se baseiam na teoria geral de mecânica dos solos. Neste trabalho, foi apresentada uma comparação entre a utilização de geossintéticos que provém de polímeros e tiras metálicas, ficou notório que a utilização dos geossintéticos é mais vantajosa, pois apresenta menor custo, mais rapidez e a mesma eficiência para construção de um muro de solo reforçado. Este estudo buscou a melhor demonstração do tema, visando introduzir o leitor a este método construtivo de solo reforçado.

Palavras-chave: muro; contenção; terra armada; solo reforçado.

1 INTRODUÇÃO

A contenção de terra reforçada do tipo Solo Armado, foi proposta pelo engenheiro francês Henri Vidal nos anos 60, se mostrando como uma possibilidade para obras geotécnicas como: túneis e viadutos, pois, pode alcançar grandes alturas (superiores a 20 m), com uma técnica simples em seu modelo de construção. Segundo Silva (2012) é uma estrutura de aterro compactado, com reforços de armações metálicas que interatuam com a terra por meio do atrito solo $\times$ armadura.

Terra armada, ou solo armado, é definida como o modelo de construção com finalidade de uma maior capacidade estrutural do solo, principalmente a cargas de tração. A NBR 9286/86 - Terra Armada – Especificação, editada e publicada pela ABNT— Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 9286/86), foi a última norma encontrada e que especifica os critérios para o dimensionamento deste tipo de estrutura, definindo que o modelo de reforço em terra armada da seguinte forma:

Sistema constituído pela associação do solo de aterro com propriedades adequadas, armaduras (tiras metálicas ou não) flexíveis, colocadas, em geral, horizontalmente em seu interior, à medida que o aterro vai sendo construído, e por uma pele de paramento flexível externo fixado às armaduras, destinando a limitar o aterro. (NBR 9286, 1986, p. 01).

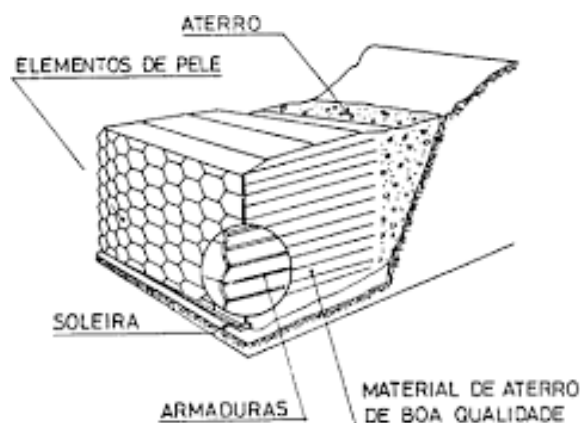


Figura 1 – Modelo Terra Armada

Fonte: https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRjLCDYA9o4tQSgKQrpMPPBCoxSZ2pjbX_gEg&usqp=C AU.

Muros de contenção, aprimoramentos de solo reforçado é um método para se obter uma segurança maior, atendendo as necessidades e propiciando afluência a áreas com níveis diferentes, com melhor segurança de encostas e ou gerando ambiências propícias para o uso do solo. Apresenta o melhor custo $\times$ benefício para o tipo da estrutura e a utilização da contenção de uso solo reforçado está cada

vez mais competitiva, já que se trata de uma estrutura que suporta cargas muito mais elevadas que o seu peso próprio e que apresenta um custo de execução e manutenção bem abaixo dos outros métodos de estruturas de contenção.

Segundo Elias, Christopher e Berg (2001) as estruturas de contenção em solos reforçados são soluções: econômicas, apresentam grande tolerância à recalques de fundação, apresentam facilidade construtiva e prazo de execução reduzido. Nessa circunstância, o objetivo deste trabalho é apresentar como é a aplicação e demonstrar como realizar o dimensionamento de um muro de contenção do tipo Terra Armada com geossintéticos, explicando seu funcionamento e analisando a sua viabilidade de uso, para recuperação da rua do Portal do Sol, bairro localizado no município de Paraíba do Sul, estado do Rio de Janeiro.

2 MURO DE SOLO REFORÇADO, MODELO TERRA ARMADA

O solo reforçado do tipo terra armada é constituído por um solo de aterro arenoso ($\leq 15\%$ passam na peneira #200), com elementos de reforços do tipo tira metálicas ligadas ao componente de face, prolongada até o interior do maciço. Os elementos de face são constituídos por placas de concretos ou geossintéticos, não possuindo função estrutural. Os elementos de face impossibilitam desestabilizações locais e erosões na face do talude. Este tipo de estrutura tem fácil adaptação a diversos padrões de taludes, sua estrutura é flexível, suportando grandes deformações da fundação e o acabamento no elemento de face pode ser adequado para satisfazer requisitos de aparência arquitetônica e os custos de construção, por área de face, em função da altura do muro, para várias soluções de contenção (ELIAS; CHRISTOPHER; BERG, 2001).

O funcionamento deste tipo de estrutura se dá pela incorporação de componentes resistentes à tração ao solo, transferindo esses esforços por meio do atrito solo x reforço. Sendo assim, o material resultante é um composto com resistência elevada podendo se definir como coesivo anisotrópico. A máxima tensão de cisalhamento que pode ser gerada é função da tensão normal sobre o reforço e do ângulo de atrito na interface. Para a ocorrência da mobilização total da tensão de cisalhamento na interface é preciso que exista um deslocamento relativo entre o solo e o reforço.

De acordo Marangon (2018) são os elementos que integram o muro de solo reforçado do modelo de terra armada:

- Escamas ou paramentos verticais (Fases): na maioria das vezes são feitos de concreto armado ou escamas metálicas flexíveis, como blocos articuláveis que tem o objetivo de suportar os esforços provenientes das armaduras.
- Tiras de ferro zincado (Armaduras): função de distribuição dos esforços cisalhantes a uma vasta área do solo e transmiti-las às escamas. Deve-se apresentar alta resistência a tração, feitas em aço inoxidável e com espaçamento a cada 0,75 m.
- Aterro compactado (Material 1ª categoria): o aterro deve ser corretamente compactado, com finalidade de melhorar o solo, de maneira a evitar recalques posteriores, consequentemente aumentando a força de atrito entre o solo e o reforço.

2.1 MURO SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO

Os geossintéticos compõem um dos mais novos grupos de materiais de construção, aplicados corretamente em diversas obras civis, em especial na construção pesada. O termo provém da junção de "geo", referindo-se à terra, e "sintético", referindo-se aos materiais poliméricos empregados na sua fabricação (EHRlich, 2009).

Geossintético é a denominação genérica de um produto polimérico, sintético ou natural, industrializado, cujas características contribuem para o melhoramento de obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais das seguintes funções: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial (VERTEMATTI, 2004).

A NBR ISO 10318 (2015) sobre Geossintéticos é responsável por denominar e classificar os materiais geossintéticos. Os materiais geossintéticos mais conhecidos e utilizados no âmbito construtivo são: Geotêxteis, Geogrelhas, Georredes, Geocompostos, Geomembranas, Geocompostos argilosos, Geotubos, Geocélulas e o Geoexpandido.

- Resistência à tração, T (KN/m);
- Elongação sob tração, (%);
- Taxa de deformação, (%/s);
- Módulo de rigidez à tração, J (KN/m);
- Comportamento em fluência;
- Resistência a esforços de instalação;

- Resistência à degradação ambiental.

Os geossintéticos são basicamente compostos por polímeros e, em menor proporção, por aditivos. Os aditivos promovem melhorias nos processos de fabricação ou alteram os aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico. Em geral, os geossintéticos são fabricados a partir de polímeros sintéticos, derivados de petróleo, embora algumas fibras naturais, como o coco e o sisal possam ser empregadas na fabricação de geotêxteis e mantas (VERTEMATTI, 2004).

Nas últimas décadas, os geossintéticos vêm estabelecendo um papel importante no setor construtivo, substituindo ou aperfeiçoando técnicas de contenção existentes, permitindo assim, combinações e associações com solos e agregados, resultando em soluções mais esbeltas, mais rápidas, leves, econômicas e seguras (VERTEMATTI, 2004).

A estrutura do muro de solo reforçado não difere do convencional, a diferença só está na estabilidade interna pela aplicação do geossintético em camadas múltiplas. Deixando o solo seguramente reforçado dispensando a utilização de estruturas de arrimo, que apresentam alto peso. Essa técnica de solo reforçado utiliza o próprio solo do local. A estrutura da face do muro pode ser elaborada em alvenaria comum, concreto projetado, gramíneas ou através de muro de blocos articulados. Devido a vantagens como essas, a obra torna-se mais leve, rápida e economicamente viável.

A inclusão de materiais geossintéticos como elemento de reforço do material de aterro propicia uma redistribuição global das tensões e deformações, permitindo a adoção de estruturas com face vertical (muros) ou maciços mais íngremes (taludes), com o menor volume de aterro compactado (Vertematti, 2004, p.84).

Segundo Vertematti (2004), em projetos voltados à contenção de solo, o uso dos geossintéticos como elemento de reforço, apresenta diversas vantagens:

- Rapidez na construção da obra;
- Redução dos impactos ambientais mediante as obras de contenção;
- Possibilidade de construção de taludes e aterros com inclinações acentuadas;
- Utiliza equipamentos de simples operação;
- Permite a escolha de tipos variados de faceamento dos taludes;
- Possibilita a execução de obras em locais de difícil acesso.

A figura 2 apresenta uma comparação de custo por metro quadrado, dentre todas as alternativas o muro de solo reforçado com geossintético apresenta as melhores taxas.

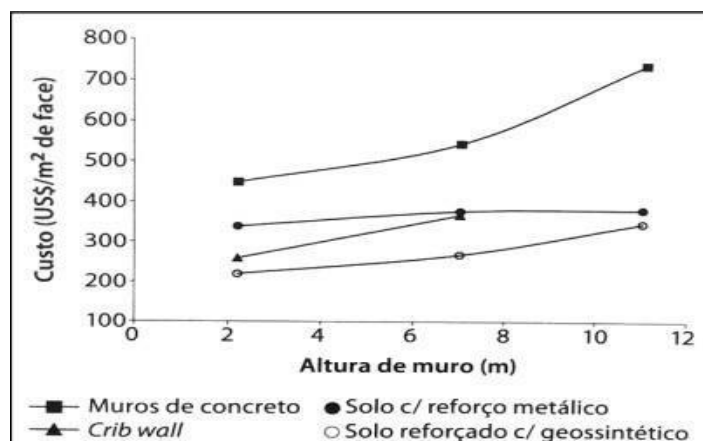


Figura 2 – Comparativo de custo entre técnicas de contenção

Fonte: EHRLICH, 2009 apud ELIAS; CHRISTOPHER; BERG, 2001.

2.2 MURO SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO

Para se dimensionar este tipo de estrutura, segundo Erlich e Becker (2009), primeiro, deve-se considerar a estabilidade externa do maciço, com verificações de escorregamento, tombamento, pressão na fundação e ruptura global. Logo depois, deve ser avaliada a estabilidade interna, sendo cada camada de reforço verificada quanto a ruptura deste, e, quanto ao seu arrancamento, através do equilíbrio total.

Pré-dimensionamento:

- Para estruturas convencionais: $L/H \geq 0,5$;
- Para estruturas especiais: $L/H \geq 0,7$;
- A Ficha deve apresentar: $D \geq 0,4m$ ou $D \geq 0,1H$;
- Esforço a tração máx. atuante: $T_{max} = K \cdot \bar{\sigma}_v \cdot e_v$.

K = coeficiente de empuxo;

e_v = espaçamento vertical (em geral = 0,75m);

$\bar{\sigma}_v$ = Tensão vertical, calculada pelo equilíbrio do bloco de solo- reforçado acima do nível analisado, considera o seu peso próprio e o empuxo ativo sobre esse bloco.

2.3 DIMENSIONAMENTO

Para realizar o dimensionamento foi utilizado a técnica de Ehrlich e Mitchell (2009), esse método fornece a tração máxima atuante no reforço-Método para estabilidade interna-, e, pode ser utilizado a geogrelhas ou tiras metálicas.

Cálculo da tração máxima no reforço:

$$T = S_v \cdot S_h \cdot 'x_r = S_v \cdot S_h \cdot K_r \cdot 'z$$

- K_r = coeficiente de empuxo residual (valor procurado para determinação de $T_{\text{máx}}$);
- $'z$ = tensão geostática vertical no nível do reforço considerado;
- S_v = espaçamento vertical entre reforços;
- S_h = espaçamento horizontal (= 1m).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu em mostrar como pode ser o processo de realização do muro de solo reforçado com geossintéticos e com a tira metálica.

Em todo muro de solo, haverá um empuxo gerado sobre a estrutura de terra armada, cuja função é suportar todos esses esforços. De acordo com Caputo (2016), o solo sofre uma tensão vertical, calculada através do somatório das componentes normais ao plano, advinda em grande parte pelo peso próprio do solo), dividida pela área total de abrangência dos contatos do solo. Quanto maior a profundidade do ponto a ser analisado e a densidade deste solo maior será a tensão aplicada no local, ou seja, quanto mais profundo no solo mais tensão aplicar-se-á, fazendo com que as tensões verticais aumentem de acordo com sua profundidade. Essas tensões verticais acabam provocando tensões horizontais que realizará uma força contra a estrutura de terra armada.

As tensões horizontais também estão diretamente associadas à altura do muro, de modo que, quanto maior a profundidade do solo, maior a tensão aplicada, e quando este solo fica totalmente saturado, o empuxo da água se somará as demais tensões horizontais do solo, porém, uma forma de mitigar ou reduzir este empuxo gerado, é o uso de barbacãs, que são drenos dispostos em camadas horizontais para diminuir a saturação do solo e as pressões causadas pela água (op. cit).

Foi utilizado um solo de aterro arenoso, em conjunto com elementos de reforço tiras metálicas. O solo foi misturado com outro composto para melhorar sua resistência. Em seguida, o solo é compactado

em camadas, com a utilização de uma espécie de malha entre as camadas para dissipar as tensões de cisalhamento em cada camada, reforçando o solo.

A base do muro de terra armada deve ser bem fixada até a formação das placas (chamadas de escamas) que possuem formatos variados. As placas são pré-moldadas, possuindo espécies de grampos que servem para fazer sua fixação, elas geralmente são colocadas por guindastes, sendo apoiadas umas nas outras desde a base de fundação, sendo travadas e alinhadas na posição correta.

Na parte de dentro é colocada uma espécie de fita para fazer o travamento das placas funcionando como tirantes. Essas são fitas de fixação e recebem aterro em camadas, podendo ser adensado com o rolo ou até mesmo sendo utilizada como filtro. O sistema de drenagem da terra armada pode ser feito pelas próprias juntas da escama instalando um geotêxtil atrás das placas, fazendo com que a água passe pelas juntas. As fitas possuem uma ancoragem passiva, com o tamanho definido em projeto de acordo com a altura do talude, o aterro utilizado sobre as fitas geralmente é granulado.

O solo reforçado por geossintéticos formou uma estrutura composta, por solo compactado e elementos de reforço de materiais poliméricos geossintéticos, nesse caso, os geossintéticos de reforço foram incorporados ao aterro em camadas horizontais individuais, espaçadas verticalmente entre si, resultando em uma estrutura composta que absorve e transfere as cargas dinâmicas geradas e a pressão lateral da terra provocada pela parte não armada da estrutura. A face da estrutura sempre deve ser revestida.

PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO:

Supõe-se uma superfície potencial de ruptura plana separando a zona ativa da zona resistente. Reforço “e” é o espaçamento vertical. O ângulo de atrito entre o solo e o reforço. Após ser analisada a estabilidade, externa e interna do maciço (corpo coesivo monolítico), foi realizado o pré-dimensionamento de acordo com o item 2.2 deste artigo.

MÉTODO DE CÁLCULO:

Foi realizada a verificação da estabilidade externa analiticamente e da estabilidade interna por meio de folhas de cálculos. Sendo analisadas ao pormenor e as expressões utilizadas foram descritas no pré-dimensionamento. Por meio de cálculos manuais, foram dimensionados os reforços inextensíveis, que verifica em simultâneo a estabilidade em relação ao caso estático e sísmico e outra para reforços

extensíveis que realizar as mesmas verificações. A estabilidade interna é feita com base na norma AASHTO e a estabilidade externa é feita com base EC7.

É na estabilidade externa que foram escolhidos os parâmetros geométricos do muro, o tipo de material de aterro, o comprimento do reforço e o coeficiente sísmico. Logo após foram calculados os impulsos e o peso da cunha do solo, de acordo com a estabilidade.

A figura 3 e 4 apresentam, respectivamente, um fluxograma com o Passo a Passo para Verificação da Estabilidade Externa e a Verificação da Estabilidade Interna.

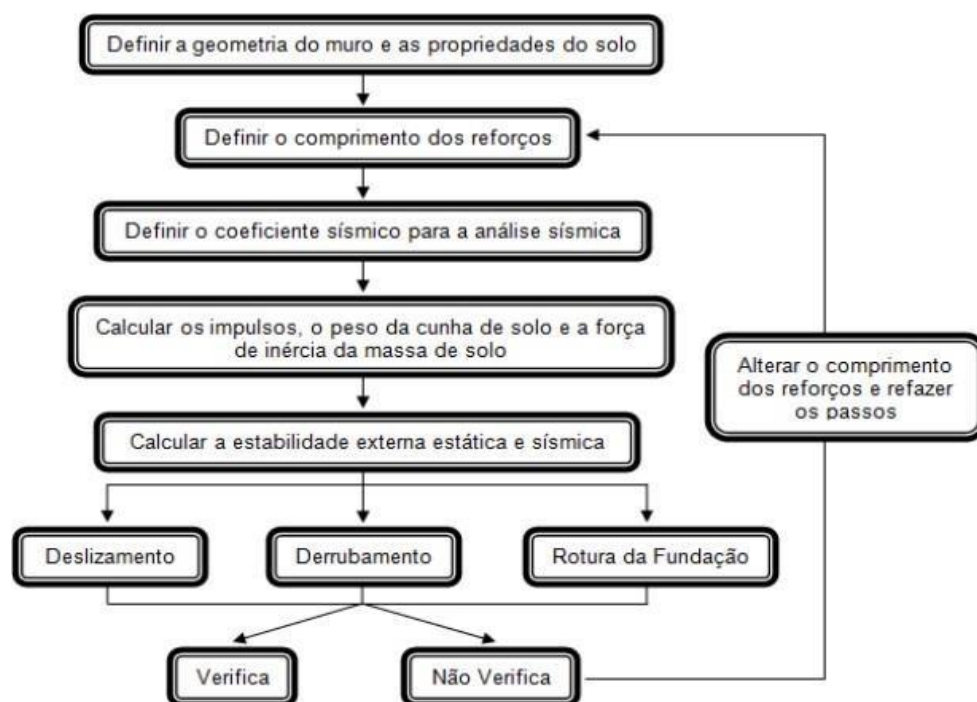


Figura 3 – Passo a Passo Para Verificação da Estabilidade Externa

Fonte: core.ac.uk/download/pdf/303716877.pdf.

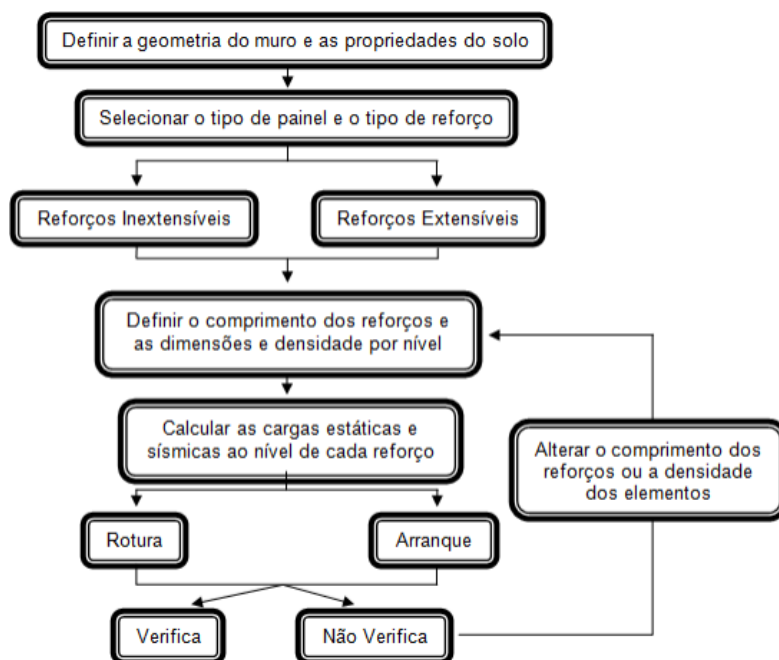


Figura 4 – Passo a Passo Para Verificação da Estabilidade Interna

Fonte: <https://core.ac.uk/download/pdf/303716877.pdf>.

Quando se trata de uma análise global é realizada, por programa de cálculo automático SLOPE/W que já tem interface gráfica e permite desenhar a estrutura que está sendo analisada. Com a inserção das características do solo, do reforço, dessa forma foram encontrados todos os dados e valores necessários para realização do muro.

O projeto do muro de solo reforçado para um aterro no endereço avenida das Nações, no bairro do Portal do Sol, situado no município de Paraíba do Sul, segue a concepção a seguir (figura 5 com uma ilustração de como seria o muro) e considerando seu tempo de vida útil até 120 anos:

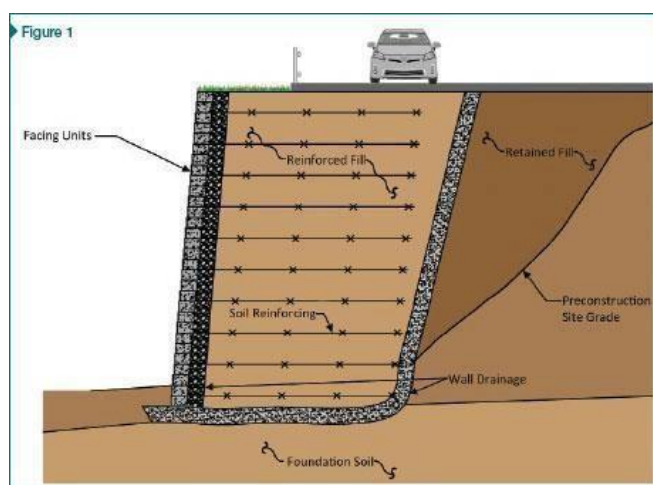


Figura 5 – Rua no portal do sol

Fonte: Autor, 2022.

Foi calculada a tração atuante em cada nível de reforço geossintético do muro de solo reforçado e verificado se o reforço geossintético escolhido para a obra atende aos critérios de dimensionamento.

Dados do muro:

- Face: blocos segmentais de concreto;
- Reforço: geogrelha de poliéster;
- Altura: 6 m;
- Base: 4.5 m;
- Espaçamento vertical entre reforços: $S_v = 0.40$ m;
- Espaçamento horizontal: $S_h = 1.00$ m;
- Sobrecarga rodoviária: $\Delta\sigma_v = 15$ kPa.
- Dados do solo:
- O aterro deve ser compactado atingindo-se um GC = 100%;
- Peso específico natural solo compactado $\gamma = 19$ KN/m³;
- $R_f = 0.90$ (parâmetro hiperbólico).
- Dados do reforço geossintético:
- $T_{\max} \geq 55$ KN/m;
- Módulo de rigidez de acordo com a norma ABNT NBR 12824: $J = E \cdot A \geq 400$ KN/m;
- Fator de redução para fluência: $FR_f = 1.67$ (período de projeto de 120 anos);
- Fator de redução para danos mecânicos: $FR_{dm} = 1.06$;
- Fator de redução para danos químicos e ambientais: $FR_{amb} = 1.03$ (pH solo neutro);
- Fator de redução por incertezas na produção /extrapolação: $\gamma = 1.10$ (período de 120 anos).

Dados do rolo compactador:

- Rolo vibratório pé de carneiro que será utilizado nesse trabalho: modelo CA 250 PD, Dynapac;
- $Q = 78 + 300 = 378$ kN;
- $L = 2.13$ m.

Dimensionamento:

- Tensão horizontal induzida pela compactação ($\sigma'_{xp,i}$) e Tensão vertical induzida pela compactação ($\sigma'_{zc,i}$);
- Gerado por um rolo compactador tipo CA 250 PD;

Cálculo de tensão horizontal induzida pela compactação ($\sigma'_{xp,i}$)

$$\sigma'_{xp,i} = v_o(1 + K_a) \cdot \left[\frac{\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot Q \cdot N_\gamma}{L} \right]^{1/2}$$

- $\phi' = \text{ângulo de atrito do solo} = 25^\circ$;
- $K_o = \text{coeficiente de empuxo no repouso: } K_o = 1 - \tan \phi' = 1 - \tan 25^\circ = 0,577$;
- $v_o = \text{coeficiente de Poisson do solo} = 0,366$;
- $Q = \text{máxima força vertical imposta pelo rolo} = 378 \text{ kN}$;
- $\gamma' = \text{peso específico do solo} = 19 \text{ kN/m}^3$;
- $K_a = \text{coeficiente de empuxo ativo} = \tan^2 (45^\circ - \phi'/2) = 0,40583$;
- $N_\gamma = \text{fator de capacidade de carga segundo a teoria de Rankine}$;
- $L = \text{largura do rolo compactador} = 2,13 \text{ m}$;

$$\sigma'_{xp,i} = 59,6127 \text{ kPa.}$$

Cálculo de tensão vertical induzida pela compactação ($\sigma'_{zc,i}$):

$$\sigma'_{zc,i} = \frac{\sigma'_{xp,i}}{K_o}$$

Tensão Vertical em cada camada de Reforço com espaçamento vertical entre reforços: $S_v = 0.40 \text{ m}$:

MÉTODO DE EXECUÇÃO:

Os muros de terra armada consistem num método que aumentar a capacidade do solo de formar que resista a tração internar, por meio de colocação de elementos de amarração que distribuem esses esforços através do atrito da área maior do solo, fazendo com que o conjunto trabalhe como um corpo sólido, resistindo a esforços e cargas excepcionais.

- Primeiro são colocadas as escamas (painéis pré-moldados de revestimento);
- Devem ser instaladas formando uma superfície vertical com o auxílio de tratores e guindastes;

- A primeira linha de placas é normalmente colocada sobre uma base de concreto, que serve como elemento de fundação para o parâmetro externo;
- Tal soleira deve ser apoiada em material resistente como, por exemplo, solo compactado, solo-cimento etc.;
- Em princípio, a fundação da base das escamas de concreto e do aterro deve ser de mesma natureza a fim de se evitar recalques diferenciais e esforços de tração não previstos nas tiras metálicas;
- A colocação das escamas deve se desenvolver em linhas horizontais sucessivas, sendo o aterro executado juntamente com a elevação das escamas;
- Depois é fixada uma camada de armaduras;
- Devem ser colocadas perpendicularmente às escamas, salvo indicação explícita em contrário, no projeto;
- São fixadas às escamas por parafusos;
- Espalhamento e compactação das camadas de aterro selecionado sobre as armaduras;
- A compactação das diversas camadas deve seguir a NBR 7182 – “Solo – Ensaio e compactação” e deve obedecer às especificações de projeto;
- Não deve danificar ou deslocar da posição original as armaduras ou escamas;
- Nas proximidades do paramento a vibração deve ser lenta e cuidadosa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa etapa serão analisados os resultados e a discussões dos valores obtidos no dimensionamento do muro. Os resultados foram divididos em seis etapas. Na primeira etapa foi encontrado o valor da tensão vertical geostática, na segunda etapa foi obtido os valores da tensão horizontal induzida, na terceira etapa foi encontrado os valores das envoltórias, na quarta etapa foi obtido os valores da tração máxima e do reforço geossintético para que atenda todas as camadas calculadas com coeficiente de segurança, na quinta etapa se apresentou o gráfico de tensões verticais partindo do princípio que nas ultimas camadas a tração máxima é maior, na sexta etapa obteve o gráfico que mostra exatamente que nas duas últimas camadas da envoltória é onde exige o reforço máximo.

Observa-se pelo resultado da tabela 1 de acordo com a profundidade de cada camada, foi encontrado o valor da tensão geostática para cada camada de reforço. Partindo do princípio de quanto maior a profundidade maior a tração máxima exercida. É necessário que a tração máxima solicitada seja menor que a tração a tração máxima do reforço.

No quadro 1 são apresentados os valores obtidos da tensão vertical geostática.

Quadro 1 -Tabela com Tensões vertical geostática

Camada de Reforço	Profundidade (m)	Tensão Vertical geostática σ'_z (Kpa)
1	0,0	15,000
2	0,4	22,600
3	0,8	30,200
4	1,2	37,800
5	1,6	45,400
6	2,0	53,000
7	2,4	60,600
8	2,8	68,200
9	3,2	75,800
10	3,6	83,400
11	4,0	91,000
12	4,4	98,600
13	4,8	106,200
14	5,2	113,800
15	5,6	121,400
16	6,0	129,000

Fonte: Autores, 2022.

No quadro 2 são apresentados os valores obtidos da tensão horizontal induzida em cada camada de reforço.

Tabela 2 -Tabela com Tensões vertical e horizontal induzida em cada camada de reforço

Camada de Reforço	Profundidade (m)	Tensão vertical induzida pela compactação, $\sigma'_{zc,i}$ (kPa)	Tensão horizontal induzida pela compactação, $\sigma'_{xp,i}$ (kPa)
1	0,0	103,2445	59,6127
2	0,4	103,2445	59,6127
3	0,8	103,2445	59,6127
4	1,2	103,2445	59,6127
5	1,6	103,2445	59,6127
6	2,0	103,2445	59,6127
7	2,4	103,2445	59,6127
8	2,8	103,2445	59,6127
9	3,2	103,2445	59,6127
10	3,6	103,2445	59,6127
11	4,0	103,2445	59,6127
12	4,4	103,2445	59,6127
13	4,8	103,2445	59,6127
14	5,2	103,2445	59,6127
15	5,6	103,2445	59,6127
16	6,0	103,2445	59,6127

Fonte: Autores (2022)

Observa-se pelo resultado do quadro 2 que a distribuição das tensões verticais e horizontais induzidas em cada camada de reforço, ficaram iguais em todas as camadas ao que se considera ideal para a construção de um muro de solo reforçado. A tensão vertical induzida se dá pela compactação e é utilizada no cálculo da tração máxima, sendo feito o cálculo da tensão horizontal vertical induzida primeiro pela compactação.

No quadro 3 são apresentadas as envoltórias de tensões, OCR e o método utilizado para calcular em cada camada de reforço.

Quadro 3 -Tabela com envoltórios de tensões, OCR e o método utilizado para calcular em cada camada de reforço

Camada de Reforço	Profundidade (m)	Envoltória de tensões σ'_{zc} (kPa)	OCR	Método de Cálculo
1	0,0	103,245	6,883	Calcular Kr
2	0,4	103,245	4,568	Calcular Kr
3	0,8	103,245	3,419	Calcular Kr
4	1,2	103,245	2,731	Calcular Kr
5	1,6	103,245	2,274	Calcular Kr
6	2,0	103,245	1,948	Calcular Kr
7	2,4	103,245	1,704	Calcular Kr
8	2,8	103,245	1,514	Calcular Kr
9	3,2	103,245	1,362	Calcular Kr
10	3,6	103,245	1,238	Calcular Kr
11	4,0	103,245	1,135	Calcular Kr
12	4,4	103,245	1,047	Calcular Kr
13	4,8	106,200	1,000	kr=kc
14	5,2	113,800	1,000	kr=kc
15	5,6	121,400	1,000	kr=kc
16	6,0	129,000	1,000	kr=kc

Fonte: Autores (2022)

Observa-se pelo resultado do quadro 3 que foram encontrados os valores das envoltórias, o OCR e o método de cálculo utilizado para cada camada, pois até a 12ª camada foi utilizado o mesmo método, assim para foi utilizado o $kr = kc$. Foi feita uma envoltória de tensão que assumiu o valor máximo de cada profundidade do reforço. Quando OCR for diferente de 1 a determinação de kr vai depender de kc.

Na quadro 4 é apresentada a tração máxima e a verificação do reforço geossintético.

Quadro 4 -Tabela com $k\Delta 2$, V_{un} , k_r , tração máxima e verificação de reforço geossintético

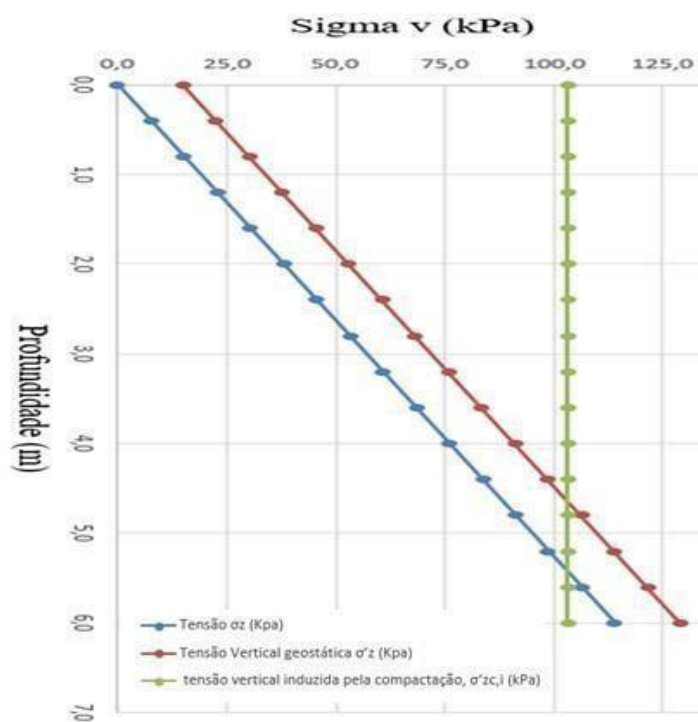
Camada de Reforço	Profundidade (m)	$K\Delta 2$	V_{un}	k_r	Tração máxima (Kpa)	Verificação de reforço geossintético
1	0,0	0,502	0,3340	0,6835	4,101	Atende
2	0,4	0,485	0,3267	0,462	4,176	Atende
3	0,8	0,472	0,3208	0,351	4,240	Atende
4	1,2	0,462	0,3158	0,2845	4,302	Atende
5	1,6	0,452	0,3115	0,24	4,358	Atende
6	2,0	0,444	0,3076	0,2085	4,420	Atende
7	2,4	0,437	0,3041	0,1655	4,012	Atende
8	2,8	0,430	0,3009	0,1505	4,106	Atende
9	3,2	0,424	0,2980	0,1385	4,199	Atende
10	3,6	0,419	0,2953	0,128	4,270	Atende
11	4,0	0,414	0,2927	0,119	4,332	Atende
12	4,4	0,409	0,2903	0,112	4,417	Atende
13	4,8	-	-	0,109	4,630	Atende
14	5,2	-	-	0,1165	5,303	Atende
15	5,6	-	-	0,124	6,021	Atende
16	6,0	-	-	0,1325	6,837	Atende

Fonte: Autores (2022)

Pelo resultado do quadro 4 tem-se o valor da tração máxima em cada camada do solo reforçado e a verificação e descoberta que o reforço geossintético atende todas as camadas. A interpretação gráfica possibilitou a análise de algumas premissas relacionadas ao coeficiente de segurança.

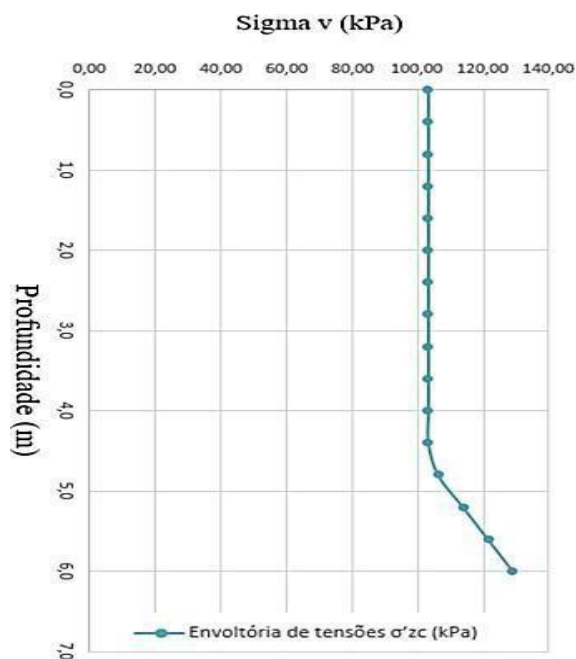
É importante ressaltar que os valores da Tração Máxima em kPa, conforme mencionado na tabela, já apresentam um coeficiente de segurança de 10% sobre o valor esperado dessa tensão. Dessa forma, esse majoramento de 10% é importante para permitir uma maior segurança e vida útil deste material, além de conferir maior segurança caso sejam utilizadas tensões maiores do que as inicialmente pensadas.

A seguir são demonstrados os gráficos de tensões verticais de acordo com a profundidade de cada camada do reforço.

Gráfico 1 – Tensões Verticais (kPa)

Fonte: Autores (2022)

Este gráfico demonstra que o quanto mais profunda a camada a tração máxima tem que ser maior atingindo o seu total de 55 kN/m.

Gráfico 2- Envoltória de tensões σ'_{zc} (kPa)

Fonte: Autores (2022)

No gráfico 2 é demonstrada a envoltória nas duas últimas camadas onde exatamente exige o reforço máximo trabalhando no seu total de 55 kN/m.

De acordo com os dados fornecidos e analisando todos os cálculos realizados utilizando a tabela do Excel provido na disciplina de geossintéticos aplicados a engenharia, o reforço com geossintético atende ao seu limite de ruptura em todas as 16 camadas de reforço.

5 CONCLUSÕES

O modelo de solo reforçado do tipo terra armada é um método usado para construir e estruturar muros, é uma contenção flexível, frequentemente unida a aterro com material selecionado e compactado, peças retas reforçadas submetidas a tração e componentes modulares pré-fabricados. Utiliza-se esse modelo de construção em diversos modelos de obras, como: construção de rodovias, ferrovias, industriais e outras exigências relacionadas a construção e engenharia civil.

Devido a sua boa capacidade de carga, esta técnica faz-se destinada para edificar muros de proporções elevadas, mesmo até aqueles que requerem o suporte de sobrecarga. A teoria foi postulada devido a interação entre o material de aterro e os elementos de reforços, que são armações de alta aderência, em dimensão adequada, capaz de formar um maciço integrado em que os elementos de reforço resistem aos esforços de tração interno.

Os maciços armados operam como uma espécie de corpo coesivo monolítico, que pode aguentar o seu próprio peso e suportar as cargas externas, o motivo pelo qual foram desenvolvidos. Neste trabalho, foi apenas analisado alguns parâmetros que induzem o pré-dimensionamento deste tipo de estrutura, sendo assim, conclui-se que os muros de contenção de solo reforçado do modelo terra armada são mais vantajosos que os muros de contenção tradicionais.

Portanto nesse trabalho optou-se pelo método Ehrlich e Mitchell, com a utilização de geossintéticos ao invés de tiras metálicas para realização do muro de solo reforçado, porque o geossintético apresentam mais vantagens, sua execução é mais rápida, o custo é bem menor, além do que nos tempos de hoje a utilização dos polímeros vem aumentando em grande escala.

No final, há o Anexo com a tabela do Excel completa e os gráficos na horizontal, um gráfico com todas as tensões.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Terra Armada: Especificação: NBR 9286. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Geossintéticos Parte 1: termos e definições: Especificação: NBR ISO 10318. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga - Método de ensaio: Especificação: NBR 12824. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BRUGGER, P. J., e MONTEZ, F.T. Muros de Contenção em Solo Reforçado com Geogrelhas e Blocos Segmentais. Porto Alegre, Brasil, 2003

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações. vol. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: Ed. Livros Técnicos e Científicos, 2016.

CARDOSO, F. F. Sistemas de Contenção – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Tecnologia da Construção de Edifícios I. Fevereiro 2002. (Documento não publicado) Disponível em: http://pcc2435.pcc.usp.br/pdf/sistemas_contencao.pdf. Acesso em: 30 ago. 2022.

DAS, Braja M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 6ª edição, Ed. Thomson Learning, São Paulo, Brasil, 2007.

EHRlich, M. Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ELIAS, V.; CHRISTOPHER, B. R.; BERG, R. R. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines. Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 2001.

ERLICH, M.; BECKER, L. Muros e Taludes de Solo Reforçado: projeto e execução. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

FÉLIX, C. M. S. Comportamento dos muros de terra armada. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia do Porto, 1991.

FÉLIX, C.; GONÇALVES, M.; CARDOSO, A. S. Dimensionamento de estruturas de Terra Armada. Um programa de cálculo automático, 3º Encontro Nacional de Geotecnia, Porto, 1989.

MARANGON, M. Apostila de Mecânica dos Solos. Universidade Federal de Juiz de Fora - NuGeo / Núcleo de Geotecnia: Minas Gerais, 2018. Disponível em: ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-M.-Dez-2018-Capa-Apresentação-e-Índice.pdf. Acesso em: 30 set. 2022.

MENEZES, Mayko de Souza; PONTES, Fernanda Veronesi Marinho; AFONSO, Júlio Carlos. Panorama dos Resíduos de Construção e Demolição. Departamento de Química Analítica, Instituto de Química.

Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.abq.org.br/rqi/2011/733/RQI733-pagina17-Panorama-dos-Residuos-de-Construcao-e-Demolicao.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2022.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. (Coord.) Manejo e gestão dos resíduos da construção civil. Volume 1 – Manual de orientação: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: CAIXA, 194p. Brasília, 2005.

RICCIO FILHO, Mario Vicente. Geossintéticos Aplicados à Engenharia: muros de solo reforçado. Juiz de Fora: PEC/UFJF, 2022. 71 p.

SANTOS, A.C. S. dos. Notas de aula – Disciplina: Fundações e Obras de Terra II. Universidade do Estado de Mato Grosso. Disponível em: http://www.unemat-net.br/prof/foto_p_downloads/fot_3452fot_ii_-_notas_de_aula__teuua_aumada_e_coutina_atiuantada_pdf.pdf. Talude Seguro. Revista Técnica. Editora Pini, São Paulo, 2004. Acesso em: 30 set. 2022.

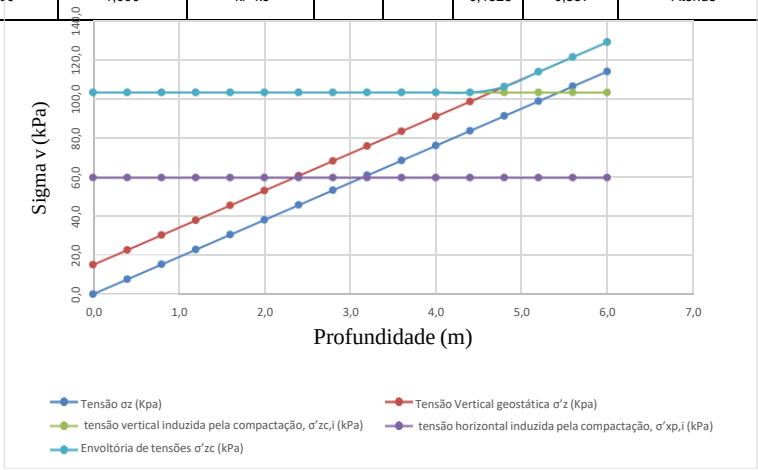
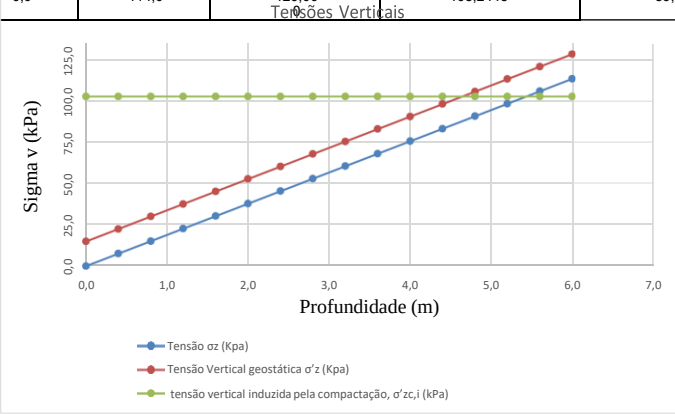
SILVA, N. H. Muros de terra armada – verificação da segurança. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Nova de Lisboa, Lisboa-PT, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/7694>. Acesso em: 30 ago. 2022.

TERRA ARMADA BRASIL. Terra Armada. Disponível em: www.terraarmada.com.br. Acesso em: 30 ago. 2022.

VERTEMATTI, J. C. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 2004.

ARTIGO PARA PUBLICAÇÃO –

Camada de Reforço	Profundidade (m)	Tensão oz (Kpa)	Tensão Vertical geostática $\sigma'z$ (Kpa)	tensão vertical induzida pela compactação, $\sigma'zc,i$ (kPa)	tensão horizontal induzida pela compactação, $\sigma'xp,i$ (kPa)	Envoltória de tensões $\sigma'zc$ (kPa)	OCR	Método de Cálculo	K Δ 2	Vun	kr	Tração máxima (Kpa)	Verificação de reforço geossintético
1	0,0	0,0	15,000	103,2445	59,6127	103,24	6,883	Calcular Kr	0,502	0,3340	0,6835	4,101	Atende
2	0,4	7,6	22,600	103,2445	59,6127	103,24	4,568	Calcular Kr	0,485	0,3267	0,462	4,176	Atende
3	0,8	15,2	30,200	103,2445	59,6127	103,24	3,419	Calcular Kr	0,472	0,3208	0,351	4,240	Atende
4	1,2	22,8	37,800	103,2445	59,6127	103,24	2,731	Calcular Kr	0,462	0,3158	0,2845	4,302	Atende
5	1,6	30,4	45,400	103,2445	59,6127	103,24	2,274	Calcular Kr	0,452	0,3115	0,24	4,358	Atende
6	2,0	38,0	53,000	103,2445	59,6127	103,24	1,948	Calcular Kr	0,444	0,3076	0,2085	4,420	Atende
7	2,4	45,6	60,600	103,2445	59,6127	103,24	1,704	Calcular Kr	0,437	0,3041	0,1655	4,012	Atende
8	2,8	53,2	68,200	103,2445	59,6127	103,24	1,514	Calcular Kr	0,430	0,3009	0,1505	4,106	Atende
9	3,2	60,8	75,800	103,2445	59,6127	103,24	1,362	Calcular Kr	0,424	0,2980	0,1385	4,199	Atende
10	3,6	68,4	83,400	103,2445	59,6127	103,24	1,238	Calcular Kr	0,419	0,2953	0,128	4,270	Atende
11	4,0	76,0	91,000	103,2445	59,6127	103,24	1,135	Calcular Kr	0,414	0,2927	0,119	4,332	Atende
12	4,4	83,6	98,600	103,2445	59,6127	103,24	1,047	Calcular Kr	0,409	0,2903	0,112	4,417	Atende
13	4,8	91,2	106,200	103,2445	59,6127	106,20	1,000	kr=kc	-	-	0,109	4,630	Atende
14	5,2	98,8	113,800	103,2445	59,6127	113,80	1,000	kr=kc	-	-	0,1165	5,303	Atende
15	5,6	106,4	121,400	103,2445	59,6127	121,40	1,000	kr=kc	-	-	0,124	6,021	Atende
16	6,0	114,0	129,000	103,2445	59,6127	129,00	1,000	kr=kc	-	-	0,1325	6,837	Atende



Capítulo 7



10.37423/221006788

O REJEITO DE SINTER FEED NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Ayrton Vianna Costa

Universidade Federal de Minas Gerais

Adriana Guerra Gumieri

Universidade Federal de Minas Gerais



Resumo: O Brasil é o sexto país detentor de maiores quantidades de minério de ferro e o segundo maior produtor de minério de ferro. O rejeito de *sinter-feed* é um resíduo do processo de produção do minério de ferro. Durante este processo, o material é submetido a operações de lavagem e peneiramento, ou mesmo jigagem, contendo, ainda ao final, uma significativa quantidade de ferro, cuja separação não é possível, especialmente pelo processamento magnético. Este rejeito vem sendo depositado, ao longo dos anos, em pilhas junto às áreas de mineração, causando danos ao meio ambiente e exigindo uma demanda de custos relativos à sua disposição e controle ambiental. A areia natural quartzosa, utilizada em concretos e argamassas, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem, no qual sua obtenção contribui para a degradação ambiental. A areia natural constitui um bem finito e não renovável e tem sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades. Este trabalho apresenta um estudo da viabilidade do aproveitamento do rejeito de *sinter-feed*, oriundo de atividades mineradoras, como agregado na produção de concretos destinados a obras de pavimentação, tendo como foco desde a fabricação de elementos pré-moldados, simples ou intertravados, até mesmo aos concretos moldados no local. Realizou-se a caracterização física, química, mineralógica, ambiental e microestrutural do rejeito e também o estudo das suas propriedades relacionadas à durabilidade e desempenho mecânico, visando o seu emprego como agregado para o concreto. O rejeito é constituído, principalmente, por hematita, quartzo e goethita/limonita e classifica-se inerte. No ensaio de reatividade potencial álcali-agregado, o rejeito foi considerado como um material inócuo. No geral, o rejeito de *sinter-feed* apresentou desempenho satisfatório com relação às propriedades físicas, técnicas e ambientais, o que favorece seu emprego na fabricação de concretos para pavimentação. Devido tratar-se de um material mais pesado em relação aos agregados utilizados nos concretos convencionais, maior conveniência seria obtida na condição de produção dos respectivos concretos no próprio local de aplicação.

Palavras-chave: *sinter-feed*, rejeitos de mineração, agregados, pavimentação.

INTRODUÇÃO

A busca de uma destinação útil aos resíduos oriundos de atividades siderúrgicas e mineradoras tem sido uma preocupação constante por parte das empresas que se dedicam a estas atividades, de ambientalistas, bem como órgãos e instituições de pesquisas e controle interessados na qualidade do meio ambiente.

Na área da siderurgia, grande avanço se estabeleceu no aproveitamento de determinadas escórias como componentes importantes na produção de alguns cimentos Portland, contribuindo para significativas economias em sua produção, melhoria de suas características e, principalmente, utilização inteligente dos resíduos gerados nas indústrias siderúrgicas.

No setor de mineração de rochas, materiais que no passado eram resíduos na produção de britas, atualmente, graças a pequeno investimento e estabelecimento de mais uma fase de beneficiamento das frações finas da britagem, constituem, com crescente aceitação pelo mercado, as areias artificiais. As areias calcáreas, por exemplo, com o seu emprego substituindo, parte ou integralmente, as areias provenientes dos rios, incorpora significativas melhorias nas propriedades dos concretos e argamassas, ao mesmo tempo que estabelece também uma desejável economia no consumo deste bem natural, finito e não renovável.

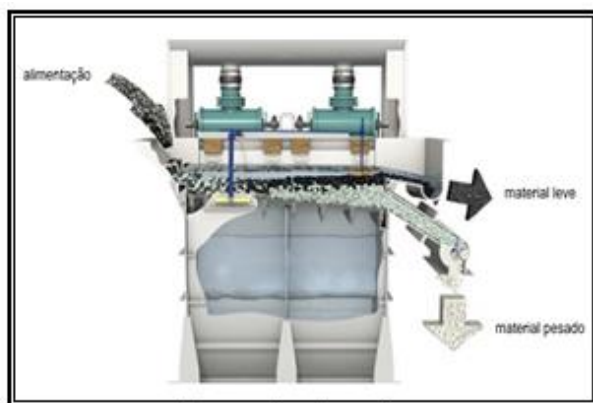
A areia natural quartzosa, seja de barranco ou de rio, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem. Ambos os casos contribuem, enormemente, para a degradação ambiental dos locais e das cercanias de sua exploração, geralmente próximo aos grandes centros urbanos. A degradação do meio ambiente devido à extração de areia caracteriza-se, principalmente, pela retirada da cobertura vegetal, grande erosão das áreas exploradas, assoreamento dos leitos hídricos e significativa alteração paisagística. A areia natural constitui um bem finito e não renovável e tem sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, além, evidentemente, da sua heterogeneidade. Sua obtenção em locais mais distantes aumenta significativamente o custo de transporte.

O Brasil é o sexto país detentor de maiores quantidades de minério de ferro, com quase 7% das reservas mundiais (Quaresma, 2001) e o segundo maior produtor de minério de ferro. Em 2007, o país produziu 350 milhões de toneladas, equivalentes a 18,42% da produção mundial, que é de 1,9 bilhões de toneladas. (IBRAM, 2008). O alto teor de ferro contido nos minérios brasileiros (60 a 67% nas hematitas e 50 a 60% nos itabiritos) leva o Brasil a ocupar lugar de destaque no cenário mundial, em termos de ferro contido no minério. O estado de Minas Gerais é responsável por mais de 86% dessas

reservas, notabilizando-se pela grande quantidade de plantas de mineração, especialmente as de ferro, espalhadas pela região (Quaresma, 2001).

O minério de ferro é utilizado na indústria siderúrgica (99%) e o restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e construção de estradas. Sua utilização pode ser feita por minérios granulados e aglomerados (*sinter* ou *pelota*). Os granulados (6 a 25 mm) são adicionados diretamente nos fornos de redução, enquanto os aglomerados são os minérios mais finos. Os principais processos de aglomeração são sinterização e pelotização. Na sinterização são obtidos minérios *sinter-feed* (0,15 a 6,35 mm) e na pelotização são obtidos minérios *pellet-feed* (menor que 0,15mm). O minério de ferro com teores médios de 65% de ferro, sílica e alumínio em torno de 3% cada, e baixo teor de fósforo, é utilizado nos alto-fornos para a produção de ferro gusa e nos fornos de redução direta para produção de ferro-esponja. O *sinter-feed* é destinado às usinas siderúrgicas integradas de aço. (Quaresma, 2001).

O rejeito de *sinter-feed* é um resíduo do processo de produção do minério de ferro que, até o momento, não tem grande direcionamento comercial. Durante o processo de extração e tratamento do minério de ferro, o material é submetido a operações de lavagem e peneiramento, ou mesmo processado em instalações de jigues, gerando um rejeito sem contaminantes e com razoável regularidade granulométrica. Jigagem é um processo de concentração gravimétrica mineral. Baseia-se na diferença de densidade existente entre os minerais presentes no minério, utilizando-se de um meio fluido (água ou ar) para efetivar a separação/concentração. Os equipamentos, tradicionalmente, utilizados são os jigues, usados nas minerações de ouro, ferro e outros minérios. Na mineração de ferro, a jigagem pode ser utilizada como um segundo processo de concentração, quando o rejeito gerado no processo do rolo magnético ainda apresente teores elevados de Fe. Esse material contém, ainda, uma significativa quantidade de ferro, cuja separação não é possível apenas pelo processo de separação magnética. O rejeito vem sendo depositado, ao longo dos anos, em enormes pilhas junto às áreas de mineração, causando danos ao meio ambiente e exigindo uma demanda de custos relativos à sua disposição e controle ambiental.



Esquemático de um jigue

Pilha de rejeito *sinter feed*Rejeito de *sinter feed* em detalhe

O objetivo deste trabalho foi estudar o rejeito de *sinter-feed* visando seu emprego em concretos destinados às obras de pavimentação, podendo alcançar desde a produção de elementos pré-fabricados até a sua utilização em concretos moldados em campo. Apresentam-se os resultados de análise física, química, mineralógica e ambiental do rejeito e avalia-se o resíduo segundo parâmetros de qualidade adotados para os agregados empregados nos concretos. O aproveitamento deste resíduo, certamente, virá a se constituir em uma alternativa para a substituição, total ou parcial, das areias naturais e preservação do meio ambiente. O rejeito de *sinter-feed* estudado foi procedente de uma planta de mineração situada no município de Sarzedo, Minas Gerais, e que representa o perfil de mineração de ferro desenvolvido em nossas demais regiões e sítios minerários.

METODOLOGIA

A amostragem do resíduo foi realizada conforme recomendações das normas brasileiras ABNT NBR 10007 e NBR 7216, obtendo-se amostras parciais em vários pontos das pilhas de estocagem (topo, a meia altura e base das pilhas) e em pilhas de diversas idades de formação, de tal forma que a amostra homogeneizada garantisse a representatividade do resíduo. Foram realizados os seguintes ensaios no material:

- Caracterização Química;
- Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X;
- Obtenção do extrato lixiviado do resíduo (ABNT NBR 10005);
- Obtenção do extrato solubilizado do resíduo (ABNT NBR 10006);
- Classificação do resíduo sólido (ABNT NBR 10004);
- Reatividade potencial álcali-agregado (ABNT NBR 9774);
- Ensaio acelerado de durabilidade do agregado – Soundness Test (DNER ME-089);
- Composição granulométrica do agregado (ABNT NM 248);
- Massa específica real (ABNT NM 52);
- Massa unitária (ABNT NBR 7251);
- Teor de argila em torrões e materiais friáveis (ABNT NBR 7218);
- Teor de materiais pulverulentos (ABNT NM 46);
- Teor de impurezas orgânicas (ABNT NM 49);
- Ensaio de qualidade do agregado miúdo (ABNT NBR 7221). Para o ensaio de qualidade do agregado miúdo, tomou-se como referência os resultados de resistência à compressão axial obtidos para argamassa utilizando uma areia natural quartzosa, de procedência conhecida e reconhecida como de boa qualidade, de uso corrente em obras de concreto na região de Belo Horizonte.
- Secções polidas e lâminas delgadas em argamassa para análise de microscopia ótica.

A adequabilidade do emprego do rejeito como agregado (obtida pela determinação do traço ideal, do ajuste da granulometria mais adequada, eventuais correções de finos e do diâmetro máximo do agregado), pode ser facilmente obtida pelas práticas de dosagem experimental e ajuste de produção dos concretos. As experiências realizadas na produção de peças pré-moldadas e suas aplicações (Cruz, 2003) são demonstrações efetivas desta realidade já empregada para os agregados convencionais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 1 apresenta a composição química do rejeito de *sinter-feed*. O material, após a separação do Ferro pelo processo de rolo magnético, ainda apresentou grande quantidade deste elemento, na condição de não magnético, razão pela qual este processo foi ineficaz para uma separação maior inicial.

Tabela 1 - Composição química do rejeito de *sinter-feed* (%)

Elementos/Óxidos					
Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	ppc
55,85	14,78	1,65	0,16	0,44	2,68

Em um processamento complementar conduzido em instalação de jigue foi possível a obtenção de um rejeito em condições mais adequadas ao seu emprego pretendido, conforme tabela seguinte:

Tabela 2 - Composição química do rejeito de *sinter-feed* (%)

Elementos/Óxidos					
Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	ppc
38,88	40,56	2,20	0,098	0,14	1,65

Estes foram dados obtidos diretamente do laboratório de análises químicas da Itaminas, relativos à sua Mina de Jangada. É importante observar o desejável crescimento percentual da Sílica no rejeito, após o seu processamento em jigue.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Na caracterização mineralógica do rejeito, obtida por difração de Raios-X, foram obtidos os minerais maiores constituintes: hematita (Fe₂O₃) e quartzo (SiO₂); menores constituintes: goethita/limonita (FeO(OH)), anatásio (TiO₂), fosfato de alumínio (AlPO₄) e óxido de manganês hidratado (MnO(OH)).

LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DO RESÍDUO

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados do ensaio de lixiviação e de solubilização do rejeito de *sinter-feed* e os valores máximos permitidos segundo a norma NBR 10004.

Tabela 3 - Ensaio de lixiviação do rejeito de *sinter-feed*

PARÂMETRO	Rejeito (mg/l)	Valor Máximo Permitido (mg/l)
Prata	< 0,01	5,0
Bário	0,007	70,0
Cromo	< 0,04	5,0
Arsênio	< 0,0003	1,0
Cádmio	< 0,0005	0,5
Chumbo	< 0,005	1,0
Mercúrio	< 0,20	0,1
Selênio	< 0,0005	1,0

Tabela 4 - Ensaio de solubilização do rejeito de *sinter-feed*

PARÂMETRO	A (mg/l)	B (mg/l)	Valor Máximo Permitido (mg/l)
Prata	< 0,01	< 0,01	0,05
Alumínio	< 0,10	< 0,10	0,2
Bário	0,005	0,007	0,7
Cromo	< 0,04	< 0,04	0,05
Cobre	< 0,004	< 0,004	2,0
Ferro	< 0,03	0,08	0,3
Manganês	< 0,012	0,018	0,1
Sódio	< 0,45	0,93	200,0
Zinco	< 0,05	0,15	5,0
Mercúrio	< 0,20	< 0,20	0,001
Selênio	< 0,0005	< 0,0005	0,01
Arsênio	< 0,0003	< 0,0003	0,01
Chumbo	< 0,005	< 0,005	0,01
Cádmio	< 0,0005	< 0,0005	0,005

O rejeito de *sinter-feed* não apresentou nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água segundo a norma NBR 10004. Com base nos resultados obtidos, rejeito de *sinter-feed* classifica-se como classe II B, correspondente aos resíduos inertes.

REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO

A Tabela 5 apresenta o resultado do ensaio de reatividade potencial álcali-agregado para o rejeito de *sinter-feed*. O ensaio visa verificar, por método químico, a reatividade potencial de agregados com os álcalis do cimento Portland, através da reação entre uma solução de hidróxido de sódio 1N com o agregado. Os resultados são expressos pela quantidade de sílica dissolvida e pela redução da

alcalinidade, sendo classificado como inócuo, deletério ou potencialmente deletério, segundo os parâmetros da NBR 9774.

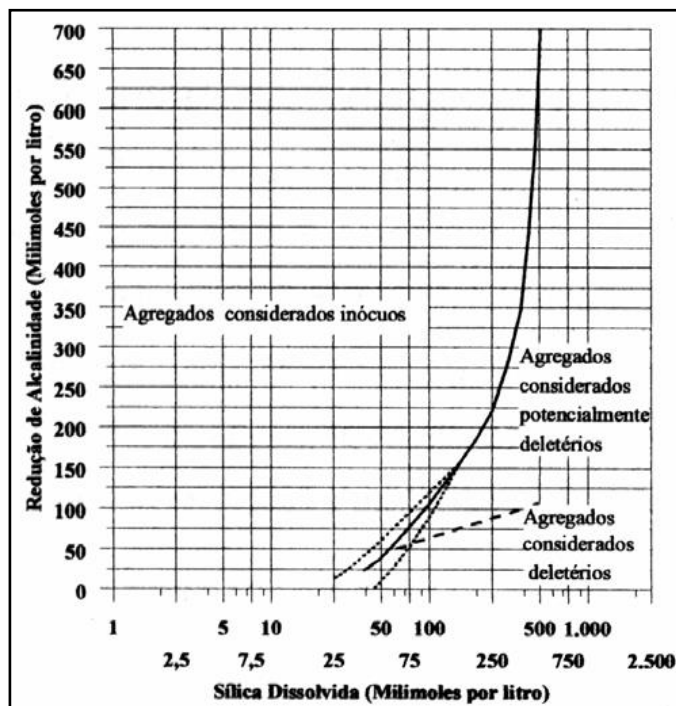


Tabela 5 - Reatividade álcali-agregado do rejeito de *sinter-feed*

Amostra	Sílica dissolvida (milimoles/litro)	Redução de alcalinidade (milimoles/litro)
01	7	446

Os resultados obtidos indicam que o rejeito de *sinter-feed* pode é considerado **inócuo**.

ENSAIO ACELERADO DE DURABILIDADE DO AGREGADO *SINTER-FEED*

Trata-se de um ensaio químico acelerado, que visa medir o desgaste total do agregado, por sua perda de massa, por faixas granulométricas, após ciclos de lavagem em soluções sulfatadas (sulfato de magnésio). O rejeito de *sinter-feed* apresentou desgaste de 2%, valor bastante inferior a 12%, máximo admitido pela normalização brasileira, DNER 8994.

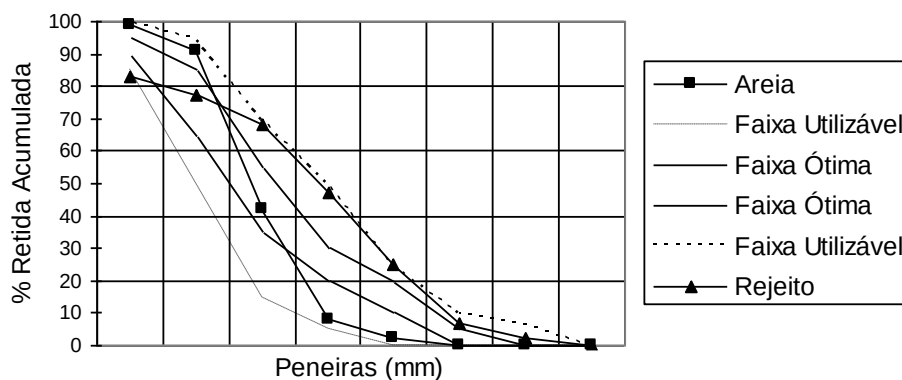
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A Tabela 6 apresenta as composições granulométricas do rejeito de *sinter-feed* e uma areia lavada usual, obtidas pelo método de peneiramento e os valores especificados para agregados em concretos, de acordo com a norma NBR 7211. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas dos materiais.

Tabela 6 - Composição granulométrica: rejeito de *sinter-feed* e areia lavada

Peneira (mm)	% Retida Acumulada					
	Rejeito	Areia	Faixa Utilizável		Faixa Ótima	
			Inferior	Superior	Inferior	Superior
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	2	0	0	7	0	0
4,8	7	0	0	10	0	5
2,4	25	2	0	25	10	20
1,2	47	8	5	50	20	30
0,6	68	42	15	70	35	55
0,3	77	91	50	95	65	85
0,15	83	99	85	100	90	95
Módulo de Finura	3,07	2,42				
Dimensão Máxima	6,3	2,4				

O rejeito apresenta granulometria de uma areia grossa, próxima ao limite superior da faixa utilizável, tendo sua amostra o diâmetro máximo de 6,3 mm e módulo de finura de 3,07. A areia tomada como referência é média, situando-se quase que integralmente na faixa utilizável, com diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura de 2,42. Portanto, o rejeito de *sinter-feed* é mais grosso que a areia lavada.

**Figura 1** - Curvas granulométricas do rejeito de *sinter-feed*, da areia lavada, das faixas granulométricas ótima e utilizável.

MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA

A massa específica e a massa unitária são parâmetros importantes através do qual classificamos os agregados em leves, normais ou pesados (Mehta e Monteiro, 1994). A massa específica é um parâmetro que nos propicia o cálculo teórico do consumo de cimento por m³ dos traços de concreto.

O rejeito de *sinter-feed* apresentou massa específica igual a $3,756 \text{ kg/dm}^3$, superior aos $2,653 \text{ kg/dm}^3$, obtida para a areia comparada.

A massa unitária (aparente) trata-se de parâmetro importante para o estabelecimento dos traços de concreto em volume, a partir das dosagens experimentais desenvolvidas. O rejeito de *sinter-feed* possui massa unitária igual a $1,862 \text{ kg/dm}^3$, superior aos $1,326 \text{ kg/dm}^3$, obtida para referida areia.

Desta forma, o rejeito classifica-se como agregado pesado e que, por conseguinte, conduzirá a peças de concreto de peso mais elevado. A elevada densidade do rejeito está relacionada, principalmente ao seu elevado teor de ferro em relação às areias comuns, cuja separação não foi possível pelo processo de rolo magnético, mesmo após seu processamento no jig. Há que se considerar que uma instalação de jig, embora propicie uma separação maior do minério de ferro pelo sistema gravimétrico, em contrapartida, conduz a um elevado consumo de água e também investimentos, cuja relação custo/benefício, certamente, deve ser um aspecto importante a ser considerado.

Para se avaliar a ordem de grandeza deste aumento de peso, foram comparadas as densidades das argamassas, a partir de corpos de prova adensados e no estado endurecido, produzidas com uma areia lavada média convencional e com a produzida com o rejeito de *sinter-feed*. A massa específica média da primeira foi de $2,112 \text{ g/cm}^3$, enquanto a da segunda foi de $2,780 \text{ g/cm}^3$, ou seja, a argamassa com rejeito mostrou-se 31,65% mais pesada.

Por esta razão, não se vislumbra, em princípio, uma utilização interessante deste material como agregado de uso corrente em obras de concreto armado, pois implicaria num peso próprio estrutural bastante superior ao usualmente considerado nos projetos e obras de estruturas comuns, com as conseqüências naturais que isto implicaria e seus desdobramentos.

Entretanto, como agregado na produção do concreto para uso em obras de pavimentação, a serem aplicados diretamente sobre o terreno, além das vantagens de ordem ecológica da utilização do rejeito, contribuiria, também, para uma maior estabilidade da pavimentação, à medida que constituiria pavimentos com maior peso próprio, menos sujeitos às deformações decorrentes das solicitações externas. Outra aplicação viável para este material seria na produção de blocos de concreto destinados às alvenarias em edificações térreas, onde este acréscimo de peso, descarregado diretamente sobre o terreno, não constituiria qualquer dificuldade ou aumento relevante de custos.

Do ponto de vista estético, na pavimentação, por exemplo, o emprego deste rejeito confere às peças uma coloração amarronzada clara, bastante interessante e que após o seu assentamento deixa o pavimento menos sujeito às marcas de uso e eventual incrustação de sujeira adquirida com o tempo.

TEOR DE ARGILA EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS

É uma verificação importante que visa quantificar eventuais contaminações do agregado com argila ou materiais friáveis, que durante o processamento do concreto podem destorroar-se em finos, comprometendo a dosagem de água e cimento, a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto. A amostra de rejeito apresentou-se isenta de torrões de argila e materiais friáveis. A norma brasileira estabelece um percentual máximo de 3% contido nos agregados para concretos.

TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS

Semelhantemente aos torrões de argila, o material pulverulento, embora necessariamente não constitua contaminação, mas quando em excesso e dependendo das características desejadas na composição granulométrica, pode constituir-se em excesso de finos que, eventualmente, poderá comprometer a trabalhabilidade do concreto, bem como a sua resistência mecânica. A norma brasileira estabelece para este quesito um percentual máximo de 3% para os concretos sujeitos ao desgaste superficial e 5% para concretos protegidos deste desgaste. Para agregados oriundos de processos industriais, estes percentuais são elevados para 10% e 12%, respectivamente. O rejeito de *sinter-feed* apresentou 13,7% de materiais pulverulentos, ou seja, partículas abaixo de 75 µm, estando, ligeiramente, acima do limite especificado.

IMPUREZAS ORGÂNICAS

As impurezas orgânicas podem afetar as reações de hidratação do cimento e a formação de seus principais compostos, comprometendo a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos. A norma brasileira estabelece o máximo de 300 ppm na amostra de agregado (por meio colorimétrico) e, no ensaio, quando o agregado apresenta resultado superior ao valor máximo deve ser procedido ao ensaio de qualidade do agregado, avaliando-se a resistência à compressão de argamassas contendo o agregado. A solução de hidróxido de sódio em contato com o rejeito de *sinter-feed* apresentou coloração mais clara que a solução padrão, indicando, desta forma, baixo teor de matéria orgânica.

ENSAIO DE QUALIDADE DO AGREGADO MIÚDO PELA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS

Apesar do rejeito de *sinter-feed* apresentar baixo teor de matéria orgânica, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial de argamassas, uma contendo este rejeito e outra a areia quartzosa comum. Devido à significativa diferença de densidade dos materiais comparados, para este teste, foi necessário um ajuste na proporção utilizada dos mesmos, de forma a igualar os volumes de material contido nas argamassas produzidas. Assim, as argamassas trabalhadas foram produzidas nos seguintes traços, em massa, (cimento, agregado e água), o que correspondeu ao mesmo volume de agregados:

- argamassa com areia quartzosa: 1 : 2,35 : 0,60
- argamassa com rejeito de *sinter-feed*: 1 : 3,30 : 0,60

A relação água/cimento adotada para as ambas as argamassas foi 0,60 e foi utilizado o cimento Portland CII-E-32, que pode apresentar em sua composição um percentual de até 34% de escória de alto-forno. Foram moldados 04 (quatro) corpos de prova de diâmetro 50 mm x 100 mm para rompimento nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. A Figura 2 apresenta os resultados das resistências obtidas. A argamassa contendo o rejeito apresentou maior resistência à compressão axial que a argamassa de referência, evidenciando o bom desempenho da argamassa com rejeito em relação à esta propriedade mecânica.

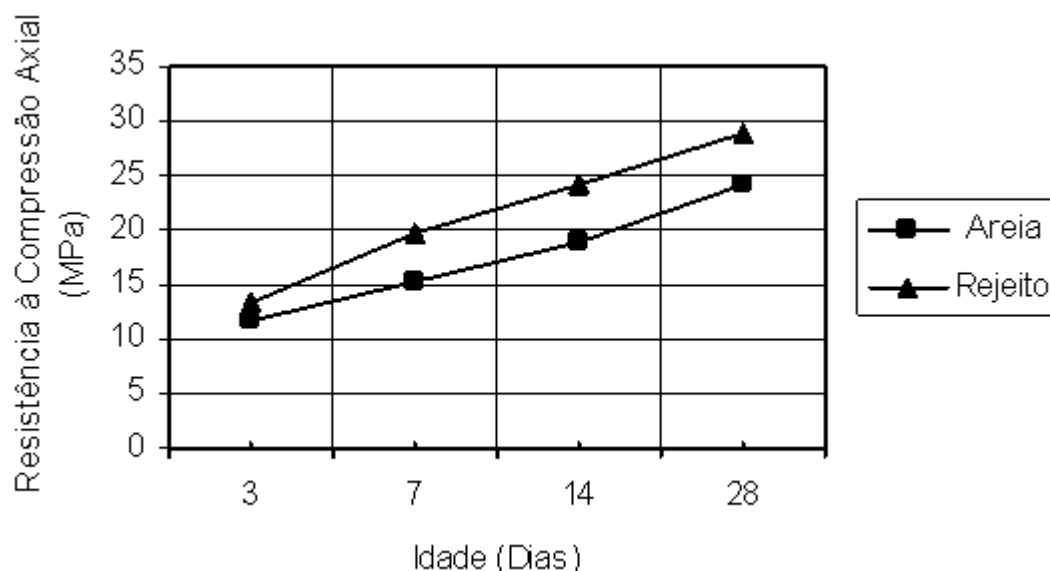


Figura 2 – Resistência à compressão axial das argamassas com areia lavada e rejeito de *sinter-feed*.

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA ARGAMASSA COM REJEITO

Foi realizada uma análise microestrutural da argamassa contendo o rejeito de *sinter-feed*. A técnica adotada foi a da microscopia ótica. Foram feitos cortes transversais em corpo de prova extraído da argamassa e preparada secção polida para análise por luz refletida (Figura 3) e lâmina delgada para análise por luz transmitida (Figura 4). A técnica da microscopia ótica foi utilizada visando não apenas verificar os minerais existentes, inclusive os que não são cristalinos e não detectados na difração por raio-X, mas também, para estabelecer uma quantificação volumétrica dos mesmos. Os resultados encontrados estão na Tabela 6.

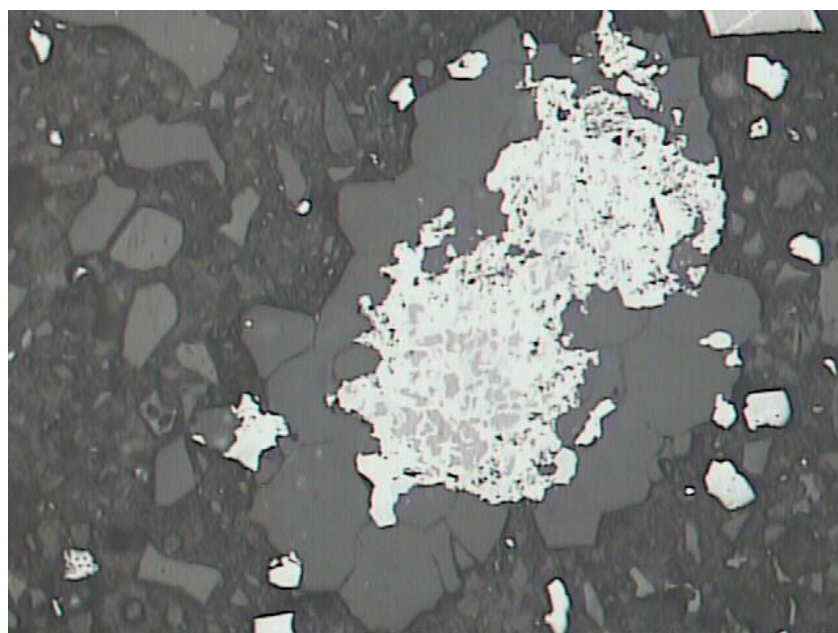


Figura 3 – Fotomicrografia - secção polida - luz refletida – aumento 200X

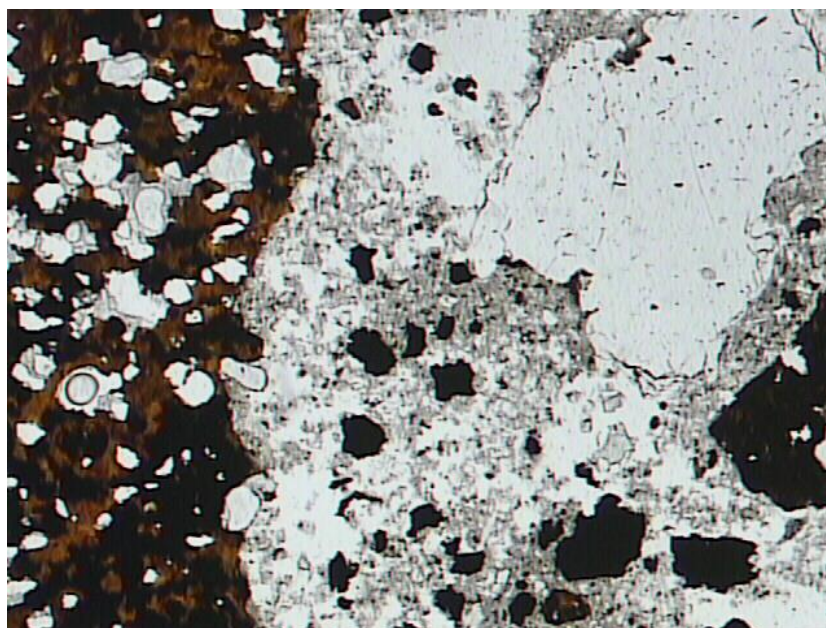


Figura 4 – Fotomicrografia - lâmina delgada - luz transmitida – aumento 50X

Tabela 7 - Quantificação volumétrica dos minerais (%)

Mineral	Seção Polida	Lâmina Delgada	Média
Hematita	26,61%	22,00%	24,30%
Goethita/Limonita	44,96%	37,86%	41,41%
Quartzo	19,74%	38,05%	29,89%
Magnetita	0,25%	0,10%	0,17%
Caulinita	0,78%	0,36%	0,57%
Quartzo misto	7,66%	1,63%	4,66%
Turmalina	aglomerados de cristais anídricos a subídricos		raro

Os minerais essenciais encontrados são goethita, hematita e quartzo e os minerais acessórios são magnetita, caulinita e turmalina. Os minerais e processos de alteração são: magnetita em estágio avançado de alteração para hematita (martitização); e hematita em estágio intermediário e avançado de alteração para goethita.

a) Descrição em seção polida:

- quartzo anidro de granulometria variando desde muito fina (< 0,01 mm) a muito grossa (> 0,22 mm) ocorrendo liberado e disseminado pela amostra;
- hematita de granulação inferior à do quartzo, ocorrendo de forma liberada;
- goethita/limonita de pouco a muito porosa, apresentando-se com restos de hematita;

- magnetita ocorrendo somente como restos nas hematitas;
- partículas mistas compostas por goethita/limonita, hematita, quartzo;
- caulinita associada a goethita.

A fotomicrografia apresenta hematita martítica com restos de magnetita inclusa/associada ao quartzo.

b) Descrição em lâmina delgada:

- Existência de todos os constituintes identificados na seção polida, imersos em uma matriz finíssima de provável carbonato (matriz de cimento)

A fotomicrografia apresenta partículas de goethita, quartzo e aspectos da matriz cimentícia.

CONCLUSÕES

Os estudos mineralógicos realizados nas amostras do rejeito (difração por raio-X) e em corpos de prova de argamassa (microscopia ótica) definem a composição predominante do rejeito em hematita, quartzo e goethita/limonita.

Com relação á classificação ambiental, o rejeito de *sinter-feed* classifica-se na classe II B, correspondente aos resíduos inertes.

No ensaio de reatividade potencial álcali-agregado, o rejeito apresentou excelente desempenho, podendo ser considerado como agregado inócuo.

No ensaio de durabilidade do agregado, realizado pela avaliação da resistência a sulfatos, o rejeito atendeu aos requisitos, apresentando desgaste bastante inferior ao limite máximo estabelecido por norma, quando submetido ao sulfato de magnésio, que é um ambiente mais agressivo.

O rejeito apresenta granulometria de uma areia grossa, próxima ao limite superior da faixa utilizável. É isento de torrões de argila e materiais friáveis, porém, seu teor de materiais pulverulentos está um pouco acima do estabelecido por norma, não comprometendo o desempenho das argamassas.

Em relação a sua densidade, o rejeito classifica-se como agregado pesado e que, por conseguinte, conduzirá a peças de concreto de peso mais elevado. A elevada densidade do rejeito está relacionada, principalmente, ao seu elevado teor de ferro cuja separação não foi possível pelos processos de separação magnética e da jigagem. Entretanto, como agregado na produção do concreto para elementos de pavimentação, aplicados diretamente sobre o terreno, o rejeito contribuiria para uma

maior estabilidade da pavimentação, à medida que constituiria pavimentos com maior peso próprio, menos sujeitos às deformações decorrentes das solicitações externas.



No ensaio de qualidade do agregado, a argamassa contendo o rejeito apresentou maior resistência à compressão axial que a argamassa de referência, evidenciando seu bom desempenho com relação às propriedades mecânicas.

No geral, o rejeito de *sinter-feed* apresentou desempenho satisfatório com relação às propriedades físicas, técnicas e ambientais, o que favorece seu emprego na utilização de concretos para pavimentação, tanto na pré-moldagem como nos moldados *in loco*. Devido ao seu maior peso em relação aos agregados convencionais, maior economia seria obtida na condição de produção dos elementos de concreto no próprio local de aplicação, geralmente viável em empreendimentos tais como conjuntos habitacionais, implantação de novos bairros, pavimentações internas, de novas ruas e alvenarias de residências populares e de pavimento único.



AGRADECIMENTOS

À empresa ITAMINAS Comércio de Minérios Ltda., pelo fornecimento da amostra de rejeito de *sinter-feed*; ao CETEC/MG (Centro Tecnológico de Minas Gerais) e a empresa DIFRA Engenharia e Consultoria Ltda., pela realização dos ensaios deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). ET 27 – Pavimentação com blocos pré-moldados de concreto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

---- . NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

---- . NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

---- . NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

---- . NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

---- . NBR 9774: Agregado - Verificação da reatividade potencial pelo método químico. Rio de Janeiro, 1987.

---- . NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

---- . NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

---- . NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

---- . NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

---- . NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

---- . NBR NM 49: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

---- . NBR 7221: Agregados – Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

--- . NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro, 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER): ME 089 – Ensaio acelerado de durabilidade do agregado.

Ferro – Produção. Disponível em: <www.ibram.org.br/sites/7001784100001361.pdf> acesso em: 06 out. 2008.

LUIZ OTÁVIO MAIA CRUZ. Dissertação de Mestrado UFRJ 2003 – Pavimento intertravado de concreto – estudo dos elementos e método de dimensionamento.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais. PINI. 1994.

QUARESMA, L.F. Ferro Balanço Mineral Brasileiro 2001. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/assets/galeria_documento/balanço_mineral_2001/ferro.pdf> acesso em: 06 out. 2008.

Capítulo 8



10.37423/221006793

ANÁLISE DA RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE POISSON BOLTZMANN ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Nathalia Salles Vernin Barbosa

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(UERJ)*

Eduardo Rocha de Almeida Lima

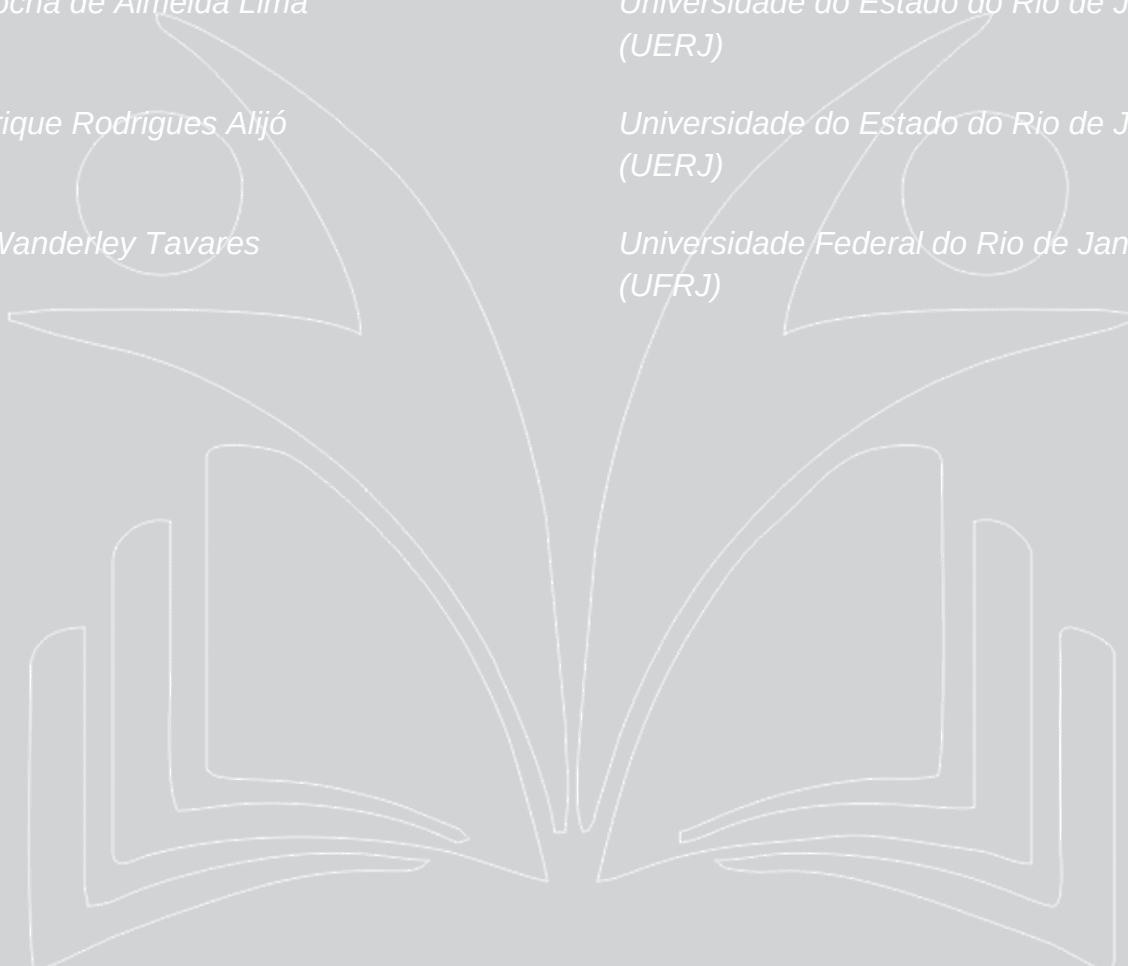
*Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(UERJ)*

Pedro Henrique Rodrigues Alijó

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(UERJ)*

Frederico Wanderley Tavares

*Universidade Federal do Rio de Janeiro
(UFRJ)*



Resumo – A equação de Poisson-Boltzmann (EPB), usada para descrever sistemas coloidais, consiste em um método implícito, caracterizado por uma equação diferencial parcial elíptica de segunda ordem. Na forma clássica da equação, consideram-se apenas as interações eletrostáticas. Objetiva-se, aqui, estudar a resolução da EPB através do método de elementos finitos com aproximação em *spline* de segunda ordem. As equações EPB usadas são a clássica e a modificada, modificada no sentido da inclusão de potenciais não eletrostáticos referentes às interações de dispersões de van der Waals entre os íons e macropartículas. O método utilizado consiste na divisão do domínio em certo número de subdomínios, na qual as variáveis envolvidas no problema são aproximadas por meio da interpolação dos seus valores fixados no contorno. O algoritmo de cálculo desenvolvido é validado pela comparação dos resultados numéricos da EPB clássica com resultados presentes na literatura.

1. INTRODUÇÃO

Diferentes técnicas podem ser utilizadas na modelagem de sistemas coloidais, tais como os métodos implícitos, equações diferenciais e métodos explícitos. Os modelos implícitos consideram o solvente como meio contínuo cujas características são descritas por um único parâmetro: a constante dielétrica. Nessa análise, ocorre redução do grau de liberdade do sistema. Exemplos de modelos implícitos são: a equação de Poisson-Boltzmann (ALIJO, 2011; BAKER, 2005; LIMA et al., 2009; MOREIRA, 2007), Lei de Coulomb e métodos generalizados de Born (FEIG; BROOKS, 2004).

A equação de Poisson-Boltzmann (EPB – Equação 1) é uma equação diferencial parcial elíptica de segunda ordem. Em sua forma clássica, é obtida a partir da equação de Poisson ao se considerar que a concentração de íons varia com a distância em relação à superfície de acordo com a distribuição de Boltzmann, sendo afetada pelo potencial eletrostático e pela temperatura, conforme abordagem de Gouy-Chapman para dupla camada elétrica.

$$\varepsilon_0 \nabla \cdot (\varepsilon \nabla \psi) = -e \sum_i z_i c_{i,\infty} \exp\left(\frac{-ez_i \psi}{k_B T}\right) \quad (1)$$

em que ε_0 é a permissividade do vácuo, ε é a constante dielétrica do meio, $c_{i,\infty}$ é a concentração do íon i (número de íons por unidade de volume) a uma distância infinitamente grande da fase sólida (no seio do fluido, $\psi_\infty = 0$), e é a carga do elétron, z_i é a valência do íon, ψ é o potencial eletrostático, k_B é a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta.

Visando a inserção de outros tipos de interação além das eletrostáticas na EPB, a lei de distribuição de Boltzmann pode ser representada em sua forma modificada pela Equação (2).

$$c_i = c_{i,\infty} \exp\left(-\frac{U_i - U_{i,\infty}}{k_B T}\right) \quad (2)$$

em que c_i é a concentração do íon i (número de íons por unidade de volume), $U_{i,\infty}$ é a energia potencial do íon no seio da fase fluida (ou no reservatório) e U_i é a energia potencial do íon em função de sua posição no espaço.

Considerando que os potenciais de interação sejam aditivos, de tal forma que a presença de um determinado potencial não influencie diretamente na ação de outro, o potencial total é obtido através

da soma dos potenciais. Assim, a energia potencial de um íon em um elemento de volume é dada por (LIMA, 2008; MOREIRA, 2007; NINHAM, 1999):

$$U_i = z_i e \psi + \sum_j U_{i,j} \quad (3)$$

em que $U_{i,j}$ é a j-ésima contribuição energética não-eletrostática referente ao íon i . As interações não-eletrostáticas podem ser, por exemplo, interações de van der Waals entre o íon e a superfície, de imagem, de hidratação, dentre outras. Moreira (2007) estudou a influência desses diferentes potenciais em diferentes sistemas coloidais, mostrando que estes são relevantes para explicar alguns fenômenos, como adsorção de partículas coloidais e tensão superficial de soluções eletrolíticas.

Considerando que, no seio da fase fluida, tanto o potencial elétrico da dupla camada, como o potencial de dispersão de van der Waals entre os íons e macropartícula em solução e outros potenciais que por ventura venham a ser considerados, tendem a zero (estado de referência), pode-se substituir o potencial total pela soma destes potenciais, obtendo assim uma expressão mais geral da distribuição de Boltzmann:

$$c_i = c_{i,\infty} \exp\left(-\frac{z_i e \psi + \sum_j U_{i,j}}{k_B T}\right) \quad (4)$$

A EPB modificada é obtida por meio da aplicação da Equação (4) na equação de Poisson, resultando na Equação (5).

$$\varepsilon_0 \nabla \cdot (\varepsilon \nabla \psi) = -e \sum_i z_i c_{i,\infty} \exp\left(-\frac{z_i e \psi + \sum_j U_{i,j}}{k_B T}\right) \quad (5)$$

Note que, se as interações não-eletrostáticas $U_{i,j}$ forem desconsideradas, a Equação (5) reduz-se à Equação (1). Assim, a EPB em sua forma clássica, é um caso particular da equação modificada.

Por conveniência numérica, escreve-se a Equação (5) na forma adimensional como:

$$\nabla \cdot (\bar{\varepsilon} \nabla y) = -\frac{\sum_i z_i c_{i,\infty} \exp(-z_i y - \sum_j u_{i,j})}{\sum_i z_i^2 c_{i,\infty}} \quad (6)$$

Em que $y = e\psi/k_B T$ o potencial eletrostático adimensional, $\bar{\epsilon}$ é constante dielétrica normalizada, sendo igual a $\bar{\epsilon} = \epsilon/\epsilon_W$, ϵ_W é a constante dielétrica da água na temperatura do sistema analisado e $u_{i,j} = \sum_i U_{i,j}/k_B T$ refere-se às interações não-eletrostáticas adimensionais.

Na Equação (6), todas as variáveis espaciais estão adimensionadas pelo fator , dado por:

$$\kappa^2 = \frac{e^2 \sum_i c_{i,\infty} z_i^2}{\epsilon_W \epsilon_0 k_B T} \quad (7)$$

Neste trabalho, para o cálculo de U_i foi considerado as interações íon-específicas não eletrostáticas correspondentes às interações de dispersão de van der Waals obtidas através da teoria de *Lifshitz* (LIMA, 2008; TAVARES et al., 2004).

Para interação entre um íon e uma superfície plana, tem-se (ALIJO, 2011; LIMA, 2008; MOREIRA, 2007; NINHAM; LO NOSTRO, 2010):

$$U_i = -\frac{B_i}{x^3}, \quad \text{para } x \geq r_i \quad (8)$$

em que x é a distância perpendicular do centro do íon a superfície. De acordo com Ninham e Lo Nostro (2010), essa fórmula é válida a partir de uma distância entre o centro do íon e a superfície equivalente a uma ou duas vezes o diâmetro do íon. Quando o coeficiente B_i é positivo, a interação é atrativa, promovendo, em geral, uma adsorção do íon na interface. Por outro lado, um valor de B_i negativo indica uma repulsão, promovendo, em geral, uma depleção do íon na superfície.

O objetivo deste trabalho consiste na resolução da EPB adimensionada através do método dos elementos finitos com aproximação em *spline* de segunda ordem em um sistema estacionário e unidimensional em coordenadas cartesiana e esférica.

Apesar da EPB apresentar limitações para os íons divalentes ou fenômenos nos quais a correlação entre os íons é importante, esta teoria tem a vantagem de ser resolvida com baixo custo computacional e não apresentar instabilidade numérica para os sistemas altamente assimétricos, como ocorre com as teorias das equações integrais (LIMA et al., 2009).

2. TEORIA

2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos consiste na divisão do domínio, no qual é definido o problema que se deseja modelar, em domínios menores. Em cada uma dessas subdivisões do domínio, as variáveis envolvidas no problema são aproximadas por meio da interpolação dos seus valores fixados no contorno. Obtém-se assim, um modelo matemático representado por um conjunto de equações cujas incógnitas são os valores destas mesmas variáveis nos contorno das várias subdivisões (nós dos elementos finitos) (PINTO; LAGE, 2001).

Como exemplo para a aplicação do método de elementos finitos para o caso unidimensional em estado estacionário, considera-se a equação geral:

$$\frac{d}{dx} \left(\Theta \frac{dy}{dx} \right) + S = 0 \quad (9)$$

em que x é a variável independente, y a variável dependente e S é o termo fonte.

No desenvolvimento do método dos elementos finitos com aproximação em *spline* de segunda ordem, procuram-se aproximações polinomiais de segunda ordem para os subintervalos (elementos finitos) (PINTO; LAGE, 2001). Dessa forma, tem-se que:

$$y(x, a, b, c) = a + bx + cx^2 \quad (10)$$

$$y'(x, b, c) = b + 2cx \quad (11)$$

$$y''(x, c) = 2c \quad (12)$$

Para cada elemento i , variando de 1 até n (número de elementos finitos), há um conjunto de coeficientes $(a_i, b_i \text{ e } c_i)$ referentes ao *spline* de segunda ordem.

Define-se como resíduo a função obtida quando se substitui a aproximação proposta na equação que se deseja resolver. Dessa forma, se a aproximação for exata, o resíduo é nulo nos pontos do intervalo considerado (PINTO; LAGE, 2001).

Dividindo o intervalo em n elementos finitos, sendo x_{m_i} a fronteira de cada elemento i (varia de 1 até $n - 1$, uma vez que se excetuam as fronteiras inicial e final) e utilizando a aproximação

polinomial de segunda ordem, obtém-se $3n$ parâmetros, sendo necessárias $3n$ equações para resolver o sistema obtido, de forma a se obter uma única solução.

O sistema resíduo para uma equação diferencial de segunda ordem é composto pelas condições de contorno substituídas da aproximação polinomial proposta, condições de continuidade do *spline* na fronteira dos elementos, condições de diferenciabilidade do *spline* na fronteira dos elementos e equações diferenciais substituídas pela aproximação polinomial em pontos de colocação.

Duas equações são obtidas pelas condições de contorno substituídas da aproximação polinomial proposta. Sendo as condições de contorno do tipo valor da variável definido tem-se que as duas primeiras equações do sistema resíduo (res_1 e res_2) são iguais as Equações (13) e (14).

$$res_1 = y(x_0, a_1, b_1, c_1) - y|_{x=x_0} \quad (13)$$

$$res_2 = y(x_f, a_n, b_n, c_n) - y|_{x=x_f} \quad (14)$$

Se as condições de contorno forem do tipo valor da derivada definido, obtém como res_1 e res_2 as Equações (15) e (16).

$$res_1 = y'(x_0, b_1, c_1) - y'|_{x=x_0} = 0 \quad (15)$$

$$res_2 = y'(x_f, b_n, c_n) - y'|_{x=x_f} = 0 \quad (16)$$

Em relação às condições de continuidade do *spline* na fronteira dos elementos obtém-se $n - 1$ equações. Para variando de 1 até $n - 1$, tem-se:

$$res_{2+i} = y(xm_i, a_i, b_i, c_i) - y(xm_{i+1}, a_{i+1}, b_{i+1}, c_{i+1}) = 0 \quad (17)$$

No que se refere às condições de diferenciabilidade do *spline* na fronteira dos elementos, obtém-se $n - 1$ equações. Para variando de 1 até $n - 1$, tem-se:

$$res_{1+n+i} = y'(xm_i, b_i, c_i) - y'(xm_{i+1}, b_{i+1}, c_{i+1}) = 0 \quad (18)$$

As equações do sistema resíduo referente às equações diferenciais são obtidas pela substituição por aproximação polinomial em pontos de colocação no interior de cada subintervalo, obtendo-se n equações. Adotou-se como ponto de colocação (xc_i) a média do subintervalo relativo a cada elemento. Dessa forma, há n pontos de colocação.

Quando o termo fonte for não linear, o sistema algébrico a ser resolvido também é não linear. Uma estratégia utilizada para resolver o problema consiste na linearização do termo fonte em torno do valor de y no ponto de colocação do elemento finito considerado na iteração anterior (y_c).

$$S = S_c y_c + S_p \quad (19)$$

Sendo S_c e S_p coeficientes dependentes dos valores da propriedade y_c na iteração anterior. Assim, a solução desse sistema deve ser iterativa, ou seja, o sistema linearizado é resolvido a cada iteração e a solução do sistema não linear é obtida após a convergência das soluções dos sistemas lineares em iterações consecutivas (LIMA, 2008; PINTO; LAGE, 2001).

Vale ressaltar que o sistema linear obtido caracteriza-se como um sistema esparso. Como estratégia para resolução, optou-se por ordenar as equações de forma a se obter sistema banda composto pela diagonal principal mais três diagonais imediatamente superiores a esta e duas diagonais imediatamente inferiores a diagonal principal. O método utilizado para resolver o sistema algébrico linear obtido caracteriza-se por um método de sistemas heptadiagonal (BARBOSA, 2014).

2.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS À EQUAÇÃO DE POISSON-BOLTZMANN

Tornando a considerar a EPB em sua forma adimensional definida pela equação (6) e comparando-a com a Equação (9), podem-se identificar os termos Θ e S correspondentes. O Quadro 1 apresenta tais termos obtidos mediante a aplicação do método dos elementos finitos à resolução numérica da EPB, nas geometrias retangulares e esféricas, ambas unidimensionais. Nota-se que o termo corresponde ao lado direito da EPB com o sinal invertido, enquanto que o termo origina-se do Laplaciano e da constante dielétrica normalizada, expresso no sistema de coordenadas considerado.

Coordenadas	Variáveis independentes	Γ	S
Retangulares	x	$\bar{\epsilon}$	$\frac{\sum_i z_i c_{i,\infty} \exp(-z_i y - u_i)}{\sum_i z_i^2 c_{i,\infty}}$
Esféricas	r	$\bar{\epsilon} r^2$	$r^2 \left(\frac{\sum_i z_i c_{i,\infty} \exp(-z_i y - u_i)}{\sum_i z_i^2 c_{i,\infty}} \right)$

Quadro 1 – Coeficientes do método de elementos finitos aplicado à EPB em diferentes sistemas de coordenadas.

Durante o procedimento de resolução do sistema algébrico não-linear resultante, a linearização iterativa do termo fonte S em torno de um ponto y_c da iteração anterior (y_c^*) resulta na Equação (19). Neste caso, os coeficientes S_c e S_p podem ser obtidos considerando os dois primeiros termos da expansão em série de Taylor do lado direito da EPB em torno de y_c^* .

3. RESULTADOS

Visando a validação do método dos elementos finitos com spline de segunda ordem, este foi comparado à solução analítica obtida na abordagem de Gouy-Chapman (coordenadas cartesianas), sem incluir o potencial não-eletrostático (MOREIRA, 2007; LIMA, 2008; BARBOSA, 2014).

Este é um problema clássico, unidimensional, para uma única placa, com o potencial especificado na superfície igual a -15 mV, sendo o sistema aquoso com eletrólitos simétricos z:z a uma concentração no seio da fase fluida igual a 150,0 mM e temperatura igual a 298.15 K. A constante dielétrica do meio corresponde à da água na referida temperatura ($\epsilon = 78,5$). Na Figura 1, pode-se observar que a solução apresentada pelo método dos elementos finitos é satisfatória quando comparada à solução analítica.

Em coordenadas esféricas, quando o raio de uma partícula carregada em uma solução eletrolítica é grande o suficiente, a solução tende a se aproximar da solução em coordenadas cartesianas. Dessa forma, foi avaliada a solução para coordenadas esféricas considerando três diferentes raios de partículas, nas mesmas condições do sistema anterior.

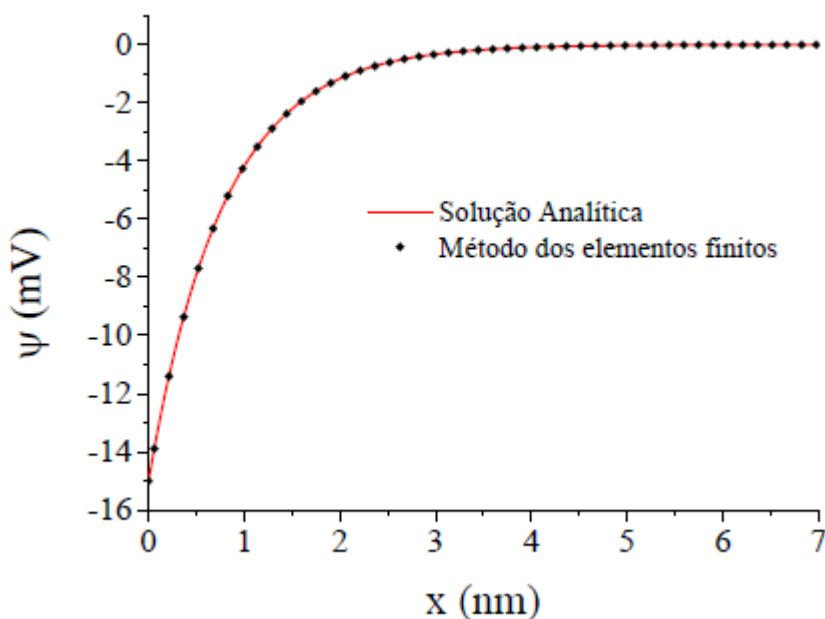


Figura 1 – Validação método dos elementos finitos em coordenadas cartesianas.

De acordo com a Figura 2, para partículas carregadas com raio da ordem de 10^{-7} m ou maior, verifica-se concordância com a solução analítica em coordenadas retangulares na presença de uma placa plana carregada.

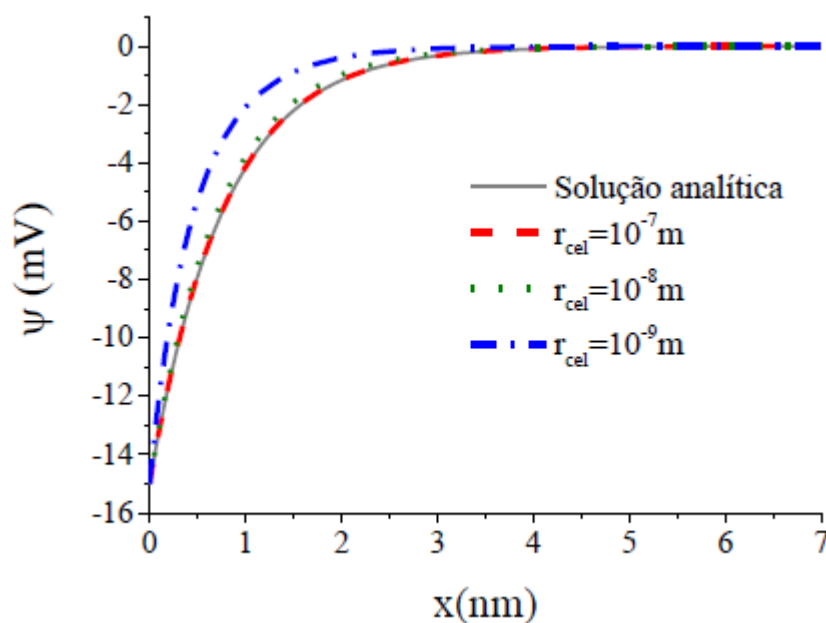


Figura 2 – Comparação da solução numérica por elementos finitos em coordenadas esféricas com a solução analítica em coordenadas cartesianas.

O terceiro caso a ser analisado consiste na EPB modificada com a inclusão das interações de van der Waals entre íons e coloide via teoria de *Lifshitz*. O potencial foi especificado a uma distância de $2\text{\AA}$ da

superfície (distância equivalente ao raio iônico) sendo igual a -15 mV. Os eletrólitos NaCl e NaI estão presentes no sistema em concentrações equimolares no seio da fase fluida. Os coeficientes de dispersão entre a superfície e os íons Na^+ , Cl^- e I^- são respectivamente: $0,454 \times 10^{-50} \text{Jm}^3$, $3,576 \times 10^{-50} \text{Jm}^3$ e $5,71^2 \times 10^{-50} \text{Jm}^3$.

A Figura 3 apresenta o perfil de concentração iônica relativa (razão da concentração do íon em x pela concentração do íon no seio da fase fluida).

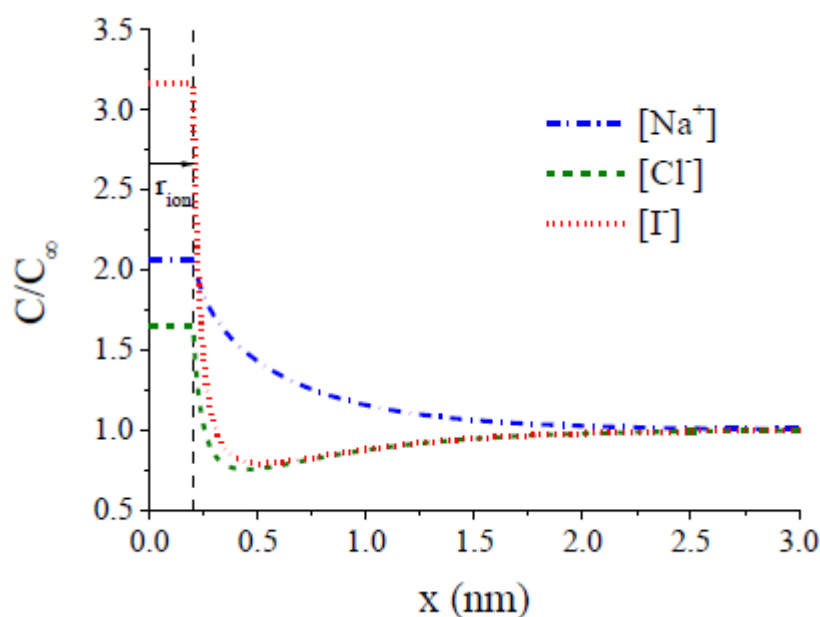


Figura 3 – Perfil de concentração relativa próximo a uma superfície carregada

($\psi(x = 2\text{\AA}) = -15,0 \text{ mV}$) a $298,15 \text{ K}$. O platô até a distância de $2\text{\AA}$ corresponde ao raio iônico.

Observa-se que próximo à superfície há uma maior concentração do íon I^- devido a maior polarizabilidade deste em relação ao Cl^- . Quanto mais polarizável o íon, maior a adsorção deste a superfície.

Boström et al. (2009) obteve resultados similares quando analisou a partição iônica entre duas fases, sendo uma composta por partículas coloidais (micelas) neutras e a outra livre de micelas. Observou-se que quanto mais polarizável o íon, maior a tendência deste de se acumular na fase mais densa que era composta pelas micelas, adsorvendo-se na superfície destas.

4. CONCLUSÃO

O método dos elementos com aproximação em *spline* de segunda ordem mostrou-se adequado para resolução da equação de Poisson-Boltzmann unidimensional clássica e modificada tanto em

coordenadas cartesianas como esféricas. O método foi validado pela solução analítica da EPB clássica em um sistema simétrico em coordenadas cartesianas.

5. REFERÊNCIAS

- ALIJO, P. H. R. Cálculo de propriedades físico-químicas de sistemas coloidais assimétricos via equação de Poisson-Boltzmann modificada. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa em Pós-Graduação em Engenharia Química, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- BARBOSA, N. S. V. Aplicação da equação de Poisson-Boltzmann modificada em sistemas análise da partição iônica em um eritrócito. 2014. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- BAKER, N. A. Improving implicit solvent simulations: a Poisson-centric view. *Curr. Opin. Struct. Biol.*, v. 15, n. 2, p. 137-143, 2005.
- BOSTRÖM, M.; LIMA, E. R. A.; BISCAIA, E. C.; TAVARES, F. W.; LO NOSTRO, P.; PARSONS, D. F.; DENIZ, V.; NINHAM, B. W. Anion-specific partitioning in two-phase finite volume systems: possible implications for mechanisms of ion pumps. *J. Phys. Chem. B*, v. 113, n. 23, p. 8124-8127, 2009.
- FEIG, M.; BROOKS, C. L. I. Recent advances in the development and application of implicit solvent models in biomolecule simulations. *Curr. Opin. Struct. Biol.*, v. 14, n. 2, p. 217-224, 2004.
- LIMA, E. R. A.; BISCAIA, E. C.; TAVARES, F. W. Modelagem computacional de sistemas coloidais. In: NETO, M. F.; PLATT, G.; BASTOS, I.; ROCHA, M.; HENDERSON, N. Modelagem computacional em materiais. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.
- MOREIRA, L. A. Cálculo de propriedades físico-químicas de sistemas coloidais via equação de Poisson-Boltzmann: efeito da inclusão de potenciais não-eletrostáticos. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Programa em Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- NINHAM, B. W. On progress in forces since the DLVO theory. *Adv. Colloid Interface Sci.*, v. 83, n. 1-3, p. 1-17, 1999.
- NINHAM, B. W.; LO NOSTRO, P. *Molecular Forces and Self Assembly*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- PINTO, J. C.; LAGE, P. L. C. Métodos numéricos em problemas de engenharia química. Série escola piloto em engenharia química, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro: e-papers, 2001.
- TAVARES, F. W.; BRATKO, D.; BLANCH, H. W.; PRAUSNITZ, J. M. Ion-specific effects in the colloid-colloid or protein of mean force: role of salt-macroion van der Waals interactions. *J. Phys. Chem. B*, v. 108, n. 26, p. 9228-9235, 2004.