



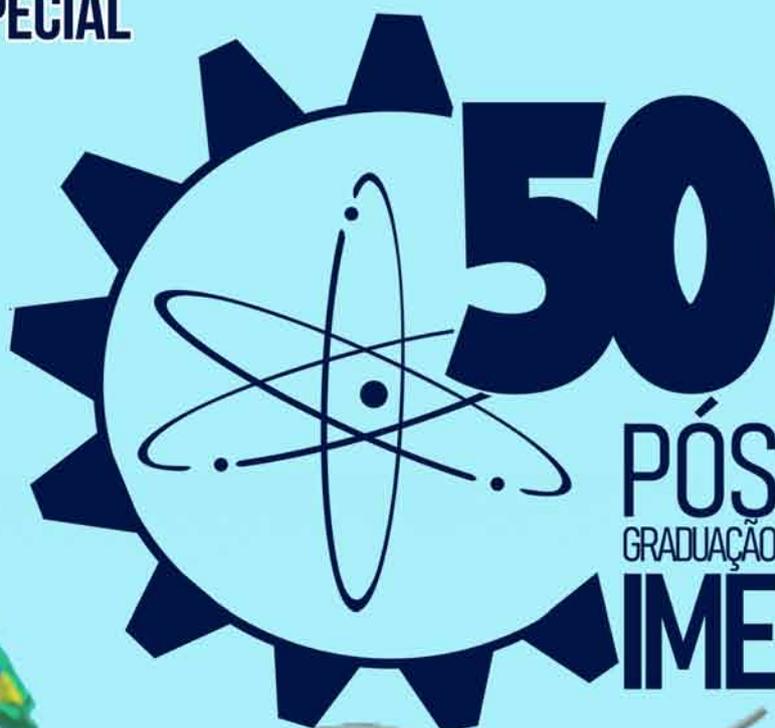
Vol. XXXVI - 3º Trimestral de 2019

REVISTA MILITAR DE

# CIÊNCIA E TECNOLOGIA

EDIÇÃO ESPECIAL

ISSN 0102-3543



Jubileu de Ouro da Pós-Graduação

1969 - 2019



IME





# Editorial

*A Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT), considerando a importância de funcionar como agente de difusão de estudos e pesquisas, realiza no âmbito das áreas de Ciências e de Tecnologia do Exército, ao longo destes anos, vem apresentando uma seleção de artigos elaborados, em sua maioria, a partir de trabalhos desenvolvidos no âmbito do programa de Pós-graduação do Instituto Militar de Engenharia (IME), nos níveis de doutorado e mestrado, programas esses que vem sendo desenvolvidos com sucesso, ao longo de 50(cinquenta) anos, e com a aprovação do Conselho Técnico-Científico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).*

*A importância do desenvolvimento de estudos e pesquisas na área de Ciências e de Tecnologia avulta quando se observa que, atualmente, se admite que a era da chamada “Revolução Industrial” está chegando ao fim. Essa revolução sem armas, ocorrida ao final do século XVIII com a introdução da máquina a vapor no processo produtivo, que permitiu às empresas da época a multiplicação de seu potencial produtivo, teve repercussão direta na estrutura sócio-econômica do mundo ocidental, podendo-se observar que seus efeitos se fazem sentir até hoje, principalmente nas relações de trabalho entre empresas e funcionários.*

*Deve-se, hoje, dedicar uma especial atenção a essa estrutura social em vista de possíveis mudanças que se apresentam. Existem pensadores em alguns países que admitem que os efeitos dessa “revolução” estão sofrendo mutações. Entre esses pensadores pode-se destacar Raghuram Rajan, professor de um dos mais importantes centros de estudos e pesquisas, na área de economia, a Universidade de Chicago. Rajan aponta, conforme se pode depreender da leitura de seu livro “O Terceiro Pilar”, que a humanidade está no limiar de uma nova era, conseqüente do que já está sendo chamado de “Revolução Digital”.*

*Essa nova “revolução” deverá ter implicações diretas sobre a atual estrutura econômica e, pode-se esperar, exigirá que os países que pretendam se manter na vanguarda, venham a dedicar uma atenção especial às áreas de ciência e de tecnologia, emergindo aqui a RMCT como um importante elemento da cadeia de Ciência, tecnologia, pesquisa e desenvolvimento. Deve-se, neste ponto, observar que a área de ciência e tecnologia, de forma geral, vem recebendo, tradicionalmente, um*



# Editorial

*grande estímulo da atividade militar, em vista das características particulares desse tipo de atividade e dos benefícios que esse desenvolvimento pode trazer em sua aplicação militar.*

*Nesta edição, a Revista Militar de Ciência e Tecnologia ganha destaque os 50 (cinquenta) anos da Pós-Graduação no Instituto. O Programa de Pós-Graduação em Química e em Ciência dos Materiais (PPG) do IME foi criado em 1969. O funcionamento dos cursos de Pós-graduação do IME é coordenado pela Subdivisão de Pós-graduação (SD/1), setor equivalente a Pró-Reitoria de Pós-graduação de uma Instituição Federal de Ensino Superior (IFES). Hoje, o IME oferece cursos de pós-graduação “stricto sensu” - mestrado ou doutorado nas áreas de Química, de Ciências dos Materiais e da Engenharia de Defesa - a militares e civis de ambos os sexos, brasileiros e estrangeiros. A celebração coincide com a comemoração do Ano Internacional da Tabela Periódica dos Elementos Químicos.*

# SUMÁRIO



ASPECTOS QUÍMICOS E TOXICOLÓGICOS DOS AGENTES LACRIMOGÊNEOS .....	6
<i>Camilla Gomes Colasso, Felipe Oppenheimer Torres</i>	
ESTUDO DA DINÂMICA LONGITUDINAL DE UM VEÍCULO LEVE MONOTRIPULADO UTILIZANDO MODELAGENS DE PNEUS EM PISO RÍGIDO.....	21
<i>Lucas C Sousa, Ricardo T C Neto.</i>	
ESTUDO COMPARATIVO DOS TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE EM POLITETRAFLÚORETILENO (PTFE) PARA APLICAÇÃO EM REGENERAÇÃO ÓSSEA GUIADA (ROG).....	28
<i>Paula A M C Gomes, Carlos N Elias</i>	
METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DE RUPTURA DE BARRAGENS .....	31
<i>Fábio L F Faria*, Matheus B Silva, Marcelo de M Reis, José C C Amorim</i>	
ANÁLISE DO COEFICIENTE ISOTÉRMICO DE REATIVIDADE DE VAZIOS PARA REATOR DE ESPECTRO RÁPIDO.....	38
<i>Fabiano P. C. Lima, Sérgio de O. Vellozo, João C. B. Fiel, Marta J. Velozo.</i>	
SALVAGUARDAS DE INFORMAÇÕES DIGITAIS EM MODELOS DE PROJETO DE INFRAESTRUTURA DE DEFESA EM BIM .....	45
<i>Giuseppe Miceli Jr, Paulo C Pellanda, Marcelo C Reisc</i>	
Interpolação de Hermite na transformação de coordenadas entre sistemas de referência geodésicos, visando à modelagem das distorções entre os diferentes sistemas adotados no Brasil.....	50
<i>Paulo Leoncio da Silva de Melo, Leonardo Castro de Oliveira</i>	
CLASSIFICADOR BINÁRIO PARA 3DES UTILIZANDO TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE INFORMAÇÃO .....	60
<i>Leandro M Ferreira*, José Antonio M Xexéo</i>	



## Revista Militar de Ciência e Tecnologia

### Comandante do Exército

Gen Ex Edson Leal Pujol

### Departamento de Ciência e Tecnologia

Gen Ex Décio Luís Schons

### Departamento de Educação e Cultura do Exército

Gen Ex Mauro Cesar Lourena Cid

### Editor

Ten Cel Cav Marco André Leite Ferreira  
Diretor da BIBLIEx

### Corpo Redatorial

- Presidente: Gen Div Luis Henrique de Andrade
- Editor executivo: Edison Conde Perez dos Santos
- Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais:  
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães – IME (SE/2)
- Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7)
- Engenharia Elétrica: Geraldo Magela Pinheiro Gomes – IME (SE/3)
- Engenharia Mecânica: André Luiz Tenório Rezende – IME (SE/4)
- Ciência dos Materiais: André Ben-Hur da Silva Figueiredo – IME (SE/8)
- Ciência da Computação: Paulo Cesar Salgado Vidal – IME (SE/9)
- Engenharia de Defesa: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/10)
- Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5)
- Engenharia Cartográfica: Heloísa Alves Silva Marques – IME (SE/6)
- Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação: Aderson Campos Passos – IME (SE/9)
- Outras áreas: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4); Raquel Aparecida Abrahão Costa e Oliveira – IME (SE/6)

### Editores associados externos

- Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP
- Dr. Artur Ziviani – Lab. Nacional de Computação Científica (LNCC), Petrópolis, RJ
- Dr. Fernando Fachini Filho – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP
- Dr. José Carlos Costa da Silva Pinto – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ
- Dr. José Carlos Maldonado – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP
- Drª. Júlia Célia Mercedes Strauch – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, RJ
- Dr. Luiz Pereira Calôba – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ
- Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ
- Dr. Richard Magdalena Stephan – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ
- Dr. Webe João Mansur – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ
- Dr. Carlos Alberto Nunes Consenza – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

### Composição

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – IME  
Praça General Tibúrcio, 80  
Praia Vermelha – Rio de Janeiro-RJ – CEP 22.290-270  
Tel.: (21) 2546-7115

### Projeto Web

Rubenildo Python de Barros  
<http://rmct.ime.eb.br>  
[rmct@ime.eb.br](mailto:rmct@ime.eb.br)

### Revisão, programação e diagramação

Coordenador: Edison Conde Perez dos Santos  
Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Suzana Marly da Costa Magalhães  
Programador Web: Rubenildo Python de Barros  
Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

### Projeto gráfico e editoração eletrônica

Luiz Tadeu Carqueija Mota – IME (SMA)  
Telefone: (21) 2546-7118  
[tadeu.mota@gmail.com](mailto:tadeu.mota@gmail.com)

### Direção, edição e distribuição

BIBLIEx  
Palácio Duque de Caxias  
Praça Duque de Caxias, 25 – 3º andar – Ala Marcílio Dias  
Rio de Janeiro, RJ – Brasil – CEP 20.221-260  
Tels.: (21) 2519-5715 – Fax: (21) 2519-5569  
[www.bibliex.eb.mil.br](http://www.bibliex.eb.mil.br)  
[bibliex@bibliex.eb.mil.br](mailto:bibliex@bibliex.eb.mil.br)



# BIBLIOTECA DO EXERCITO

## **Missão**

**Contribuir para o provimento, a edição e a difusão de meios bibliográficos e informações necessárias ao desenvolvimento e ao aperfeiçoamento da cultura profissional-militar e geral dos públicos interno e externo.**

## **Visão do futuro**

**Ser referência nacional e internacional pela excelência na publicação de acervos bibliográficos que sejam instrumentos de promoção de cultura e de cidadania para públicos interno e externo**

## **Princípios, crenças e valores**

**Culto aos valores e às tradições militares;**

**Competência técnico-profissional;  
Confiabilidade; Planejamento.**



# Aspectos químicos e toxicológicos dos agentes lacrimogêneos

Camilla Gomes Colosso<sup>a</sup>, Felipe Oppenheimer Torres<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Chemical Risk

Avenida Paulista, Av. Paulista, 726 – 16, 17° e 18° andares  
Bela Vista – São Paulo/SP – CEP: 01310-910

<sup>b</sup>Polícia Militar de Santa Catarina - Grupamento de Polícia de Choque  
Rua Lauro Linhares, 208 - Trindade

CEP: 88036-000 – Florianópolis/SC, Brasil.

\*camillacolosso@chemicalrisk.com.br

**RESUMO:** O presente artigo tem como objetivo abordar o histórico de emprego de agentes lacrimogêneos, suas características físico químicas, os mecanismos de ação no corpo humano, a ação tóxica desses agentes no organismo humano, quais os efeitos tóxicos observados nos órgãos afetados, tais como olhos, pele e pulmões, assim como descrever quais os tratamentos mais eficazes em caso de exposição. Os agentes químicos lacrimogêneos mais empregados atualmente são: Cloroacetofenona - CN, Ortoclorobenzilmalononitrilo - CS, Dibenzoxazepina - CR, Oleorresina de Capsicum - OC e Ácido Pelargônico Vanililamida - PAVA.

**PALAVRAS-CHAVE:** agentes químicos lacrimogêneos, toxicidade, tratamento.

**ABSTRACT:** The objective of this article is to discuss the history of the use of riot agents, their physical and chemical characteristics, mechanisms of action in the human body, the toxic action of these agents in the human organism, the toxic effects observed in affected organs such as ocular, dermal, respiratory, other, as well as describe the most effective treatments in case of exposure. The most commonly used tear agents are: Chloroacetophenone - CN, Orthochlorobenzylmalononitrile - CS, Dibenzoxazepine - CR, Capsicum Oleoresin - OC and Pelargonic Acid Vanililamide - PAVA.

**KEYWORDS:** riot agents control, toxicity, treatment.

## 1. INTRODUÇÃO

Remonta à época do Egito Antigo o primeiro registro que temos na História de utilização de agente químico na forma de venenos mortais. Os egípcios foram os primeiros a investigar o efeito letal do ácido cianídrico derivado de amêndoas amargas, folhas de louro-cereja e caroço de pêssego, surgindo deste último a curiosa expressão “penalidade do pêssego”, pois ele era utilizado em execuções judiciais [1].

No começo de 2.000 A.C., a Grande Dinastia da Índia utilizava fumaça com a finalidade de proporcionar cobertura para a tropa, além de utilizar fumaça tóxica sonífera durante as batalhas [1].

Já em 1.000 A.C., os chineses utilizavam em suas batalhas vapores nocivos e venenosos, incluindo o “nevoeiro caçador de almas”, um gás que continha arsênio [1].

A Grécia Antiga também teve papel importante na história dos agentes químicos. Foram utilizadas raízes de Heleborus para contaminar o suprimento de água durante o cerco da cidade de Crissa, contaminação que causou diarreia na tropa inimiga [2].

No entanto, a Grécia teve destaque por ter criado o mais famoso de todos os agentes químicos antigos, o fogo grego. Criado por Kallinikos, sua fórmula exata se perdeu na passagem do tempo, contudo, sabe-se que esse poderoso agente químico continha resina, piche, nafta ou petróleo, enxofre, cal viva e salitre. Ao ser lançado no mar, o fogo grego, quando entrava em contato com a água sofria ignição e queimava sobre a superfície da água destruindo as embarcações inimigas [1].

Entre os anos de 82 e 72 A.C., os romanos utilizavam fumaça tóxica com o objetivo de causar cegueira e sufocamento, sintoma similar ao causado pelo fogsênio [1].

A partir da Idade Média, a utilização de arsênio e agentes biológicos começou a ser intensificada. Cadáveres infectados com a peste eram catapultados para dentro de muralhas de cidades ou castelos; saliva de cachorros com hidrofobia era colocada dentro de munições usadas contra inimigos; doação

aos inimigos de cobertores e travesseiros contaminados com varíola, entre outros, são alguns exemplos de como os agentes biológicos foram utilizados [2].

Com a evolução da ciência, a utilização de agentes químicos em conflitos passa a ser uma preocupação mundial. Em 1899, durante a Convenção de Haia, a proibição de utilização de agentes químicos sufocantes foi um dos temas debatidos. Na mencionada Convenção, a proposta de proibir a utilização de agente químico foi aprovada, no entanto a Convenção não impediu os países de debaterem a respeito da utilização de armas químicas, e um país, pelo menos, França, realizou experiências publicamente com gás [3].

No início do século XX, o Exército francês testou granadas de bromoacetato de etila, um agente químico lacrimogêneo desenvolvido para ser utilizado em substituição às pequenas armas de fogo [3]. De lá para cá, com a evolução dos estudos a respeito, tais agentes também foram evoluindo e se desenvolvendo, até chegarmos aos agentes químicos atuais.

Atualmente os agentes químicos podem ser classificados em diversas categorias, além de serem empregados em diversas situações e finalidades variadas. Contudo, apesar da grande variedade de agentes químicos existentes, uma classe de agente químico se tornou bastante conhecida e utilizada nos tempos modernos, os lacrimogêneos, isto porque, além de serem muito eficientes, possuem uma toxicidade bastante reduzida se comparados com outras classes de agentes químicos, como os neurotóxicos ou hemotóxicos.

A utilização dos lacrimogêneos provavelmente ocorreu quando os países começaram a verificar a necessidade de utilizar agentes químicos como instrumentos não letais, em ocasiões diferentes dos conflitos armados envolvendo duas ou mais nações, principalmente em ocorrências envolvendo a população interna, onde não seria plausível, tampouco conveniente, a utilização de uma arma química que causasse morte ou incapacitasse de forma temporária ou definitiva a própria população. Nesses casos, deseja-se somente debilitar pessoas expostas ao agente químico.

O aumento no número de manifestações com os mais

diversos objetivos (político, religioso, étnico, entre outros) ocorrido no século passado, fez crescer também o número de manifestações não pacíficas, gerando, desta forma, diversos transtornos para a população. Restrição do direito de ir e vir do cidadão, vandalismo e depredação de prédios públicos e privados são alguns dos muitos prejuízos causados por uma manifestação que está fora de controle, ou seja, uma turba.

Com este cenário de caos instalado, as forças de segurança pública necessitam atuar de forma enérgica e precisa a fim de reestabelecer a ordem pública e a paz social. Nesse contexto, verifica-se a importância do emprego correto dos agentes químicos lacrimogêneos, uma vez que eles auxiliam, em muito, as tropas de choque a dispersarem os vândalos, sem, contudo, oferecerem riscos imediatos à saúde das pessoas que foram expostas ao agente químico, desde que utilizados da forma adequada.

O presente artigo pretende abordar os agentes químicos lacrimogêneos mais utilizados na História, traçando uma linha do tempo dos primeiros agentes lacrimogêneos utilizados até os utilizados nos dias de hoje.

## 1.1- HISTÓRICO DO EMPREGO DOS AGENTES QUÍMICOS LACRIMOGÊNEOS

Os agentes químicos lacrimogêneos (do latim *lacrima* = lágrima) se caracterizam pela dor e irritação nos olhos. Eles provocam abundante fluxo de lágrimas, rinorreia, irritação na pele, contração involuntária das pálpebras (cegueira temporária) e depressão respiratória. São debilitantes, pois diminuem a capacidade combativa do indivíduo, e possuem efeitos temporários, não causando a morte nem a incapacitação prolongada, desde que utilizados de forma adequada.

Os efeitos fisiológicos surgem praticamente de forma imediata após a exposição e, dependendo do agente químico lacrimogêneo utilizado e de sua concentração, os efeitos podem persistir por até 50-60 minutos.

Uma das principais vantagens dos lacrimogêneos é que para essa classe de agentes químicos atingir uma concentração letal, é necessário ser centenas de vezes maior do que a concentração eficiente (concentração na qual o agente químico causa os efeitos fisiológicos para o qual foi produzido), conforme Tabela 1, o que torna este tipo de compostos bastante seguro se utilizado em ambiente adequado e de forma correta.

**Tab1:** Concentração letal e eficiente dos agentes lacrimogêneos

Agente Químico	Ct L <sub>50</sub> (mg.min/m <sup>3</sup> )	Ct I <sub>50</sub> (mg.min/m <sup>3</sup> )
Cloroacetofenona (CN)	11.000	80
Ortodlorobenzilmalonitrilo (CS)	25.000	10 a 20
Dibenzoxazepina (CR)	100.000	01
Oleoresina de capsicum (OC)	INDT	INDT

Fonte: [15]

Ct L<sub>50</sub> - dosagem química considerada letal para 50% das pessoas expostas  
Ct I<sub>50</sub> - dosagem química considerada eficiente para 50% das pessoas expostas  
INDT - indeterminado

As substâncias utilizadas hoje em dia como agentes químicos lacrimogêneos, em condições normais de temperatura e pressão, apresentam-se no estado sólido. No entanto, para uma melhor utilização e eficiência, são acondicionadas em

granadas, munições ou espargidores que, ao serem utilizados, liberam o agente químico na forma de aerossol, espuma, gel ou fumaça.

Esses agentes químicos além de pertencerem à classe dos lacrimogêneos, pertencem também à classe dos inquietantes ou irritantes, uma vez que tal definição vai depender do tipo de classificação que é adotada, pois a denominação de lacrimogêneos se dá quando é utilizada a classificação em relação aos efeitos fisiológicos que estes agentes químicos causam nos cidadãos expostos, já a denominação de irritantes ou inquietantes é utilizada quando se adota a classificação em relação à aplicação tática do agente químico.

No Brasil, conceito legal de agente químico lacrimogêneo está previsto no Decreto nº 2.977 de 1º de março de 1999. Esse decreto foi o responsável por recepcionar, no Brasil, a Convenção Internacional sobre a Proibição do Desenvolvimento, Produção, Estocagem e Uso de Armas Químicas e sobre a Destruição das Armas Químicas Existentes no Mundo, que foi assinada em Paris, em 13 de janeiro de 1993.

A supracitada Convenção não faz menção à nomenclatura de agente químico lacrimogêneo, mas sim, agente de repressão de distúrbios, que seria qualquer substância química que possa rapidamente produzir nos seres humanos irritação sensorial ou efeitos incapacitantes físicos que em pouco tempo desaparecem, após concluída a exposição ao agente (Artigo II, item 7).

Por esta Convenção, fica proibido o uso de agentes químicos lacrimogêneos em guerras. Essa proibição se dá por dois motivos: primeiro, o uso de agente químico lacrimogêneo por algum dos países em guerra pode facilmente ocasionar uma retaliação por outro país com um agente químico de guerra muito mais tóxico, como por exemplo, neurotóxico ou hemotóxico; segundo, na Guerra do Vietnã, os Estados Unidos da América utilizavam agentes químicos lacrimogêneos para fazer com que os soldados do exército vietnamita, que estavam escondidos em cavernas, saíssem dos seus esconderijos, e assim, fossem mortos ou capturados.

Os agentes lacrimogêneos são classificados em 2 subclasses: estenutatórios (atuam principalmente nas vias aéreas), lacrimogêneos propriamente ditos (atuam principalmente nos olhos). No entanto, tal classificação não é muito utilizada, tampouco precisa, uma vez que os dois efeitos fisiológicos citados estão presentes em todos os agentes lacrimogêneos utilizados nos dias de hoje [4].

O primeiro registro que se tem da utilização dessa classe de agente químico remonta ao final do século XV, mais precisamente 1492, quando os índios mexicanos queimavam a pimenta em óleo com o intuito de criar uma fumaça lacrimogênea e tóxica [5].

Outro registro dos primórdios da utilização dos lacrimogêneos se deu na época do Brasil colônia, quando os índios Tupinambás, do nordeste brasileiro, descobriram que, ao queimar a pimenta, a fumaça produzida pela queima tinha o efeito fisiológico lacrimogêneo, fazendo, assim, com que os seus inimigos abandonassem posições defensivas [2].

Contudo, foi no século XX que os agentes lacrimogêneos começaram a ser utilizados em larga escala (controle de distúrbios civis, agente químico de guerra e treinamento e exercícios militares).

O primeiro agente químico lacrimogêneo utilizado nos tempos modernos foi o bromoacetato de etila, em Paris, pela polícia francesa, em 1912, portanto, antes da Primeira Guerra Mundial. Este agente químico era acondicionado em grana-

das de mão e utilizado contra criminosos e gangues [5].

No entanto, foi durante a Primeira Guerra Mundial, que os agentes lacrimogêneos foram utilizados com uma maior frequência, tornando, assim, seus efeitos conhecidos por todo o mundo.

Durante a Primeira Grande Guerra, os lacrimogêneos mais utilizados foram: bromoacetato de etila, bromoacetona (BA), cianeto de bromobenzila (BBC), cloroacetona e brometo de xilila [6].

Após o fim da Primeira Guerra Mundial, o mundo conheceria um dos principais agentes químicos lacrimogêneos já produzidos até hoje, e até aquele momento, um dos mais eficientes e menos tóxicos, o Cloroacetofenona (CN).

### a) Cloroacetofenona (CN)

Este agente químico lacrimogêneo foi sintetizado pela primeira vez pelo químico alemão Carl Graebe, em 1869. [5]. Apesar de ter sido criado no século XIX, é somente no século XX que se tem o registro da primeira utilização desse agente como lacrimogêneo. No final dos anos 1920, o CN foi utilizado nas colônias francesas para conter distúrbios civis [4].

Nas três décadas subsequentes, o CN foi adotado pelas forças de segurança do mundo como principal agente químico lacrimogêneo, sendo substituído posteriormente, após o desenvolvimento do ortoclorobenzilmalononitrilo (CS), agente químico menos tóxico e mais eficiente que o CN.

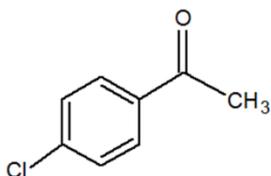


Fig 1. Estrutura química do composto Cloroacetofenona (CN)

### b) Ortoclorobenzilmalononitrilo (CS)

O CS é uma variação do bromobenzil cianeto (CA) [6]. Descoberto pelos cientistas americanos Ben Corson e Roger Stoughton, na Faculdade de Middlebury, em 1928. A sigla CS provém do sobrenome dos dois cientistas [7].

Apesar de ter sido sintetizado pela primeira vez na década de 20, o CS só foi desenvolvido e testado como um agente químico para controlar distúrbios civis nos anos de 1950, em Porton Down, Inglaterra. Foi adotado como principal agente químico lacrimogêneo pelo Exército dos Estados Unidos da América no ano de 1959 [6].

Atualmente é o agente químico lacrimogêneo mais utilizado no mundo devido à sua baixa toxicidade e alta eficiência quando comparado com os agentes químicos lacrimogêneos utilizados no passado.

Atualmente existem duas variações do CS, denominada de CS1, que em sua composição possui 95% CS e 5% de gel sílica; e CSX, que em sua composição possui 1g de CS1 diluído em 99g de trietil fosfito, possibilitando, assim, a sua utilização no estado líquido [5].

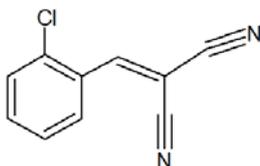


Fig 2. Estrutura química do composto Clorobenzilideno malononitrila

### c) Dibenzoxazepina (CR)

O CR foi sintetizado pela primeira vez em 1962 pelos cientistas Higginbottom e Suschitzkey [5]. É mais potente e menos tóxico que o CN e o CS, sendo considerado 5 (cinco) vezes mais potente que o CS.

O CR é o mais novo agente químico lacrimogêneo da série "C" (CN e CS) e ainda não existem dados publicados sobre o seu uso. Entretanto, um artigo publicado na The Observer, em janeiro de 2005, revelou que o governo britânico autorizou o seu uso secretamente nas rebeliões prisionais ocorridas na Irlanda do Norte, nos anos de 1970. Segundo este artigo, os efeitos fisiológicos do CR são muito parecidos com os causados pelo CS, no entanto, o CR causa uma dor mais intensa na pele e as áreas afetadas permanecem sensíveis durante alguns dias, e quando as áreas que foram contaminadas são molhadas, mesmo depois de alguns dias, o efeito fisiológico causado pelo CR na pele retorna [5].

Há relatos não confirmados de que este agente foi utilizado nos finais dos anos de 1980, na África do Sul; em 2008, no Sri Lanka; em 2011, no Egito; em 2012, na Ucrânia; e, em 2013, na Turquia.

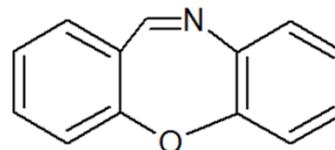


Fig 3. Estrutura química do composto Dibenzoxapina (CR)

### d) Oleoresina de capsicum (OC)

A extração da OC ocorre através da trituração da semente da pimenta do gênero *Capsicum*, de onde são retirados os capsaicinóides usando um solvente orgânico, como o álcool, por exemplo. Depois o solvente é evaporado e a resina remanescente é a oleoresina de capsicum [7].

Os efeitos fisiológicos causados pela OC ocorrem devido aos capsaicinóides. A capsaicina e a dihidrocapsaicina são os principais capsaicinóides encontrados nesse tipo de agente lacrimogêneo.

A OC foi desenvolvida nos anos de 1960 com o intuito de ser um protetor usado pelo Serviço Postal Americano contra o ataque de animais, como por exemplo, cachorros. No final dos anos 1980, o FBI aprovou a utilização da OC como um agente químico capaz de debilitar um agressor [5].

Devido à grande variedade de pimentas do gênero *Capsicum* (mais de 20) e inúmeros fatores externos envolvidos no cultivo da planta (tipo da pimenta, tempo de plantio, terreno em que foi plantada, clima, método de extração da semente, entre outros), a composição do agente químico e o seu efeito tóxico e fisiológico podem variar [5,8].

Estudos indicam que a provável dose letal oral da capsaicina para humanos varia de 0,5 a 5g da substância por kilo da pessoa que ingeriu a capsaicina, entretanto, pesquisas em ratos, identificou que a Ct L 50 seria de 270.000 mg-min/m<sup>3</sup> [4].

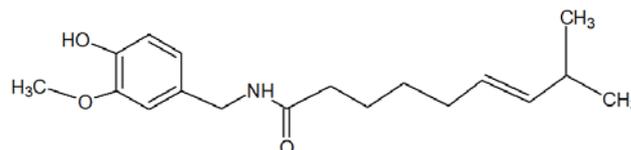


Fig 4. Estrutura química do composto químico Capsaicina

## e) Ácido pelargônico vanililamida (PAVA)

Sintetizado pela primeira vez em 1919 pelo americano Nelson Elnathan [9], o PAVA é um capsaicinóide que é encontrado em baixíssima quantidade (0,25%) em alguns tipos de pimenta. Devido a esta baixa oferta e dificuldade em sua extração de forma natural, a maior fonte de PAVA é obtida através de produção sintética, por isto este capsaicinóide é considerado um tipo sintético. O fato de ser sintético e não extraído direto da semente, torna-o mais consistente, sendo permitido estabelecer um padrão de produção, fazendo assim com que a sua efetividade seja igual em todos os agentes químicos produzidos [8].

Importante ressaltar que o fato da produção desse agente químico ser realizada de forma sintética torna a sua utilização mais segura que a OC, pois reduz consideravelmente o risco de ocorrer reações alérgicas (respiratória e dermatológica) severas provocadas pela OC.

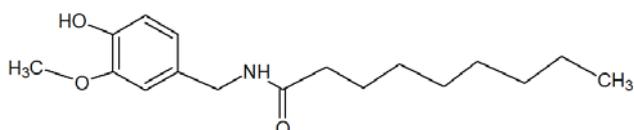


Fig 5. Estrutura química do composto PAVA

## 1.2 Restrições quanto ao uso

Apesar de em diversos países ser autorizado o uso pela população destes tipos de agentes químicos na forma de espargidores, conforme apresentado na Tabela 2, como instrumentos de defesa pessoal, no Brasil, o uso se restringe às forças de segurança, uma vez que é um produto controlado contido no Anexo 1 do Decreto 3.665/2000, considerado armamento químico da Categoria 1. Portanto, os espargidores têm a fabricação, utilização, importação, exportação, desembaraço alfandegário, tráfego e comércio sujeitos ao controle do Exército Brasileiro.

Exceção a esta regra se aplica às atividades de segurança privada praticada por empresas especializadas ou por aquelas empresas que possuem serviço orgânico de segurança, uma vez que a Portaria 001 – D Log de 5 de janeiro de 2009, do Exército Brasileiro, autoriza a aquisição de espargidores por essas empresas.

No entanto, existem no mercado espargidores utilizados para defesa pessoal que possuem em sua composição substâncias não controladas, como por exemplo, espargidores contendo gengibre, cânfora, menta, entre outros.

Tab 2: Utilização dos agentes lacrimogêneos em diversos países

Países que permitem a utilização de espargidores de agente químico por civil	Países que restringem a utilização de espargidores de agente químico por civil
Alemanha	Bélgica
Áustria	Brasil
Eslováquia	Canadá
Espanha	Dinamarca
França	Finlândia
Itália	Grécia
Letônia	Holanda
Polônia	Hungria
Portugal	Irlanda
República Tcheca	Islândia
Rússia	Luxemburgo
Sérvia	Noruega
Suíça	Reino Unido
	Suécia

Fonte: [10,11].

## 2. PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DOS AGENTES LACRIMOGÊNEOS

Os agentes mais empregados como lacrimogêneos são: ortoclorobenzilmalononitrilo ou clorobenzilideno malononitrila (CS), cloroacetofenona (CN), dibenzoxazepina (CR), oleoresina de capsicum (OC) e o ácido pelargônico vanililamida (PAVA). Os principais aspectos físicos e químicos desses agentes estão descritos na Tabela 3.

### a) Cloroacetofenona (CN)

O composto Cloroacetofenona, registrado com número CAS 532-27-4, tem como nome químico 2-cloro-1-feniletanona, também conhecido como  $\alpha$ -cloroacetofenona,  $\omega$ -cloroacetofenona, fenil clorometil cetona, e conhecido também como MACE, principalmente fora do Brasil. Militarmente o composto cloroacetofenona é conhecido como CN [6].

O CN foi inicialmente sintetizado, passando-se uma corrente de vapor de cloro em acetofenona fervente. As subsequentes sínteses foram descritas por Schaefer e Sonnenberg, que realizou a síntese de CN (54%) através da redistilação dos produtos voláteis da reação de 2g de acetofenona dissolvida em 100 mL de benzeno e 16,6 g de oxicloreto de selênio [12].

O CN é um sólido branco, com massa molecular de 154,6 dalton e fórmula molecular  $C_8H_7OCl$ . A solubilidade molar em água é  $4,4 \times 10^{-3}$  mol/L (= 68 mg/100 mL). O CN tem ponto de fusão de 58 – 59°C e ponto de ebulição de 244 – 245°C. O CN na forma sólida tem densidade de 1,318 g/cm<sup>3</sup> a 0°C, e na forma líquida a densidade é 1,187 g/cm<sup>3</sup> a 58°C. O vapor é 5,3 vezes mais pesado do que o ar. A pressão de vapor do sólido é  $2,6 \times 10^{-3}$  torr a 0°C,  $5,4 \times 10^{-3}$  torr a 20°C e  $15,2 \times 10^{-3}$  torr a 50°C [12].

### b) Ortoclorobenzilmalononitrila ou Clorobenzilideno malononitrila (CS)

O composto clorobenzilideno malononitrila, registrado com o número CAS 2698-41-1, militarmente é designado como CS. Quimicamente é conhecido [(2-clorofenil) metileno]-propandinitrila,  $\beta, \beta$  - diciano-ortocloroestireno e o-clorobenzalmalononitrila. O agente de controle antimotim CS substituiu o CN nos EUA para fins militares no final da década de 1950 [6].

O CS era preparado a partir da condensação da malononitrila com aldeídos. O CS é um sólido branco com massa molecular de 188,6 dalton, o que corresponde a fórmula molecular  $C_{10}H_5N_2Cl$ . A solubilidade molecular em água a 20°C é  $2,0 \times 10^{-4}$  mol/L (= 4 mg/100 mL) [12].

O CS dissolvido é rapidamente hidrolisado a o-clorobenzaldeído e malononitrila. A  $T_{1/2}$  (tempo de meia-vida) é de 14 minutos em pH 7,4 a 25°C. Entretanto, o CS é persistente no meio ambiente devido a uma limitada solubilidade em água. O ponto de fusão é de 95 – 96°C e o ponto de ebulição é de 310 – 315°C. A pressão de vapor é  $3,4 \times 10^{-5}$  torr a 20°C. O vapor é diversas vezes mais pesado do que o ar. A densidade de vapor real depende do tipo de composto em que o CS será dispersado [12].

### c) Dibenzoxazepina (CR)

O composto Dibenzoxazepina é registrado pelo número CAS 257-07-8, com denominação militar de CR. O CR pode ser preparado numa síntese de quatro passos que começa com

uma reação do tipo Ulman entre 1-cloro-2-nitro-benzeno e fenol. O produto nitrofenoxi benzeno foi reduzido à amina correspondente com vapor e limalha de ferro. A formulação da fenoxianilina produziu a formamida correspondente, que foi convertida na dibenzoxazepina após tratamento com ácido polifosfórico. Em estudo conduzido se utilizou esta síntese em quatro etapas para preparar mais de uma dúzia de compostos relacionados, nenhum dos quais foi significativamente mais potente do que o CR. Em suas mãos, os rendimentos para cada etapa da síntese de CR foram de 80%, 70%, 90% e 88%, respectivamente.

O CR é um sólido de cor amarela pálida com peso molecular de 195,1 dalton, corresponde à fórmula molecular de  $C_{13}H_9ON$ . Dibenzoxazepina é solúvel em acetona, benzeno, diclorometano e álcool. A solubilidade molar em água é  $3,5 \times 10^{-4}$  mol/L ( $\approx 7$  mg/100 mL) a 20°C, e o ponto de fusão de 71 – 72°C e o ponto de ebulição é de 335°C. A pressão de vapor do sólido é  $5,9 \times 10^{-5}$  torr a 20°C. O vapor do composto é 6,7 vezes mais pesado que o ar.

#### d) Oleoresina de capsicum (OC)

A oleoresina de capsicum é um líquido castanho avermelhado obtido pela extração das frutas secas e maduras de pimentas, geralmente *Capsicum annuum* e *Capsicum frutescens*. A OC é uma mistura de muitos compostos [1, 6, 13]. A composição é variável e depende de fatores como a maturidade da fruta e a condições de extração. Mais de uma centena de diferentes compostos foram identificados em OC [1, 6, 13].

A capsaicina é o composto mais pungente em muitas pimentas, e é particularmente conhecida por suas propriedades irritantes. Dependendo da variedade da pimenta, OC pode conter uma concentração de 0,01–3,0% de capsaicinóides em massa seca. Alguns dos capsaicinóides encontrados em OC são capsaicina – número CAS 404-86-4 (~70%), dihidrocapsaicina – número CAS 19408-84-5 (~20%), nordihidrocapsaicina – número CAS 28789-35-7 (~7%), homocapsaicina – número CAS 58493-48-4 (~1%), e homodihidrocapsaicina – número CAS 279-06-5 (~1%). Pesquisadores identificaram com sucesso o composto nonivamida (~0,25%) com a menor concentração de capsaicinóide em OC proveniente de *Capsicum annuum* [1, 6, 13].

Outro composto importante de OC que pode estar envolvido nas manifestações e propriedades irritantes é 3B, 3'S, 5'R-3-3'-dihidroxi- $\beta$ , k-caroteno 6'-ona [1, 13].

#### e) Ácido pelargônico vanililamida (PAVA)

O ácido pelargônico vanililamida, conhecido também por PAVA ou nonivamida, quimicamente N-[(4-hidroxi-3-metoxifenil)metil]nonanamida, com número CAS 2444-46-4, é um análogo sintético da capsaicina. O composto é um sólido com ponto de fusão de 54°C [9].

A Nonivamida foi originalmente encontrada como um componente (e menor concentração) em pimentas *Capsicum annuum*; entretanto, a maioria do PAVA é derivada da síntese química, ao invés da extração de fontes de plantas naturais [9].

O PAVA é comercialmente disponível em duas formas, como Captor I e Captor II. O Captor I contém 0,3% de PAVA com solvente etanol e água (partes iguais). O Captor II contém 0,3% PAVA com propilenoglicol, água e etanol [9].

**Tab 3.** Propriedades físicas e químicas dos agentes químicos

Componentes	CN	CR	CS	OC
Estado físico	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido
Solubilidade	Insolúvel em água	Pouco solúvel em água, solúvel em solventes orgânicos	Parcialmente solúvel em água, solúvel em solventes orgânicos	Parcialmente solúvel em água, solúvel em solventes inorgânicos
Pressão de vapor	de 0,0054 mmHg 20°C	0,00059 mmHg 20°C	0,00034 mmHg 20°C	-
Densidade de vapor	de 5,3	6,7	6,7	-
Estabilidade	Estável em recipiente fechado	Estável em armazenamento	Estável em armazenamento	Estável em armazenamento
Taxa hidrólise	Lenta	Muito lenta	Lenta	Lenta
Taxa de ação	Instantânea	Instantânea	Instantânea	Rápida

Adaptado: [6, 15].

### f) Reações químicas secundárias com ortoclorobenzimalonitrilo (CS)

Muito se fala no ambiente militar que não se pode utilizar o CS em ambiente confinado que contenha  $CO_2$ , ou ainda, misturar o CS com o hexacloretano (HC) em ambiente fechado, pois tais misturas poderiam gerar o agente químico da classe sufocante fosgênio, no entanto, tal afirmativa não procede, uma vez que para tal transformação ocorrer é preciso realizá-la em ambiente controlado e em presença de catalisadores.

O fosgênio possui dois átomos de cloro em sua fórmula, e o CS apenas um. Para que pudesse haver a transformação do CS em fosgênio seria necessário que o único átomo de cloro do CS fosse dividido para formar um segundo átomo de cloro, o que seria possível somente com um catalisador em um laboratório. Assim, não é possível de ocorrer a formação do fosgênio por meio do CS em ambiente fora de laboratório.

O que ocorre na verdade são duas situações: primeira, o CS não interage com o oxigênio, expulsando o  $O_2$  do ambiente, uma vez que o peso molecular do CS é maior; segunda, para que o CS seja utilizado em forma de fumaça, há a necessidade de que ocorra uma queima no interior da granada ou no cânter (disco metálico que contém o agente químico CS na forma sólida). Para haver a queima, é necessário que se consuma o  $O_2$  do ambiente, caso contrário a queima não ocorre. Dessa forma, o ambiente que já contém pouco oxigênio por conta da não interação do CS com o  $O_2$ , ficará praticamente com nenhum nível de oxigênio, pois o pouco  $O_2$  remanescente será utilizado para que ocorra a queima do agente químico na forma de fumaça, deixando aquele ambiente com uma quantidade muito baixa de  $O_2$ , gerando, assim, consequentemente a sensação de sufocamento.

Aliado a isso, da queima do CS surge ainda o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o cianeto de hidrogênio (HCN), substâncias que interferem negativamente no processo respiratório.

O CS quando exposto no ambiente através da combustão, numa temperatura a partir de 200°C, começa a produzir o HCN em pequena quantidade, uma vez que a alta temperatura faz com que ocorra a degradação do CS e dessa degradação resulte o subproduto malonitrila, altamente tóxico e responsável pela formação do cianeto. Quanto maior a temperatura da combustão, maior será a produção de cianeto [14].

Apesar da concentração de HCN ser pequena, importante destacar que militares sujeitos a treinamentos periódicos em câmara de gás sem a devida utilização de equipamentos de proteção individual adequados, podem, ao longo dos anos, desenvolver doenças graves como consequência dessa exposição [14].

### 3. TOXICOCINÉTICA

A absorção, distribuição e biotransformação de CS, CR e capsaicinas foram bem caracterizadas, entretanto, do CN não estão bem definidas [15].

#### a) Absorção, distribuição e biotransformação do CS

Após exposição pela via inalatória, o CS é rapidamente absorvido e distribuído por todo o corpo. Estudos de farmacocinética evidenciam que o CS é removido da circulação sanguínea rapidamente, após a cinética de primeira ordem e após exposição por inalação [6, 15].

O CS tem uma meia-vida ( $T_{1/2}$ ) de até 30 segundos. Foi evidenciado que os principais produtos de biotransformação do CS (2-clorobenzilmalononitrilo e 2-clorobenzaldeído) também apresentam meia-vida curta na circulação sanguínea [6, 15].

Atualmente, pensa-se que quantidades significativas de CS, próximo da concentração tolerável, em torno de 10 mg/m<sup>3</sup>, não serão absorvidas após inalação de CS [6, 15].

A absorção de CS pelo aparelho trato gastrointestinal através da ingestão é desconhecida até o momento. Há relatos de toxicidade sistêmica após a ingestão de pastilhas de CS [6, 15].

Em mamíferos, o CS se hidrolisa rapidamente, formando o 2-clorobenzaldeído e malononitrilo. O intermediário malononitrilo é ainda biotransformado a partir de duas frações de cianetos, que são convertidas em tiocianato. O intermediário aldeído sofre oxidação formando o ácido 2-clorobenzóico ou redução em 2-clorobenzila álcool. O CS hidrolisa-se espontaneamente para malononitrilo, que se transforma em cianeto em tecidos animais. Ele sofre biotransformação em 2-clorobenzil malononitrilo (CSH<sub>2</sub>), 2-clorobenzaldeído, ácido 2-clorohipúrico e tiocianato. Estes produtos de biotransformação são conjugados e eliminados na urina [6, 15].

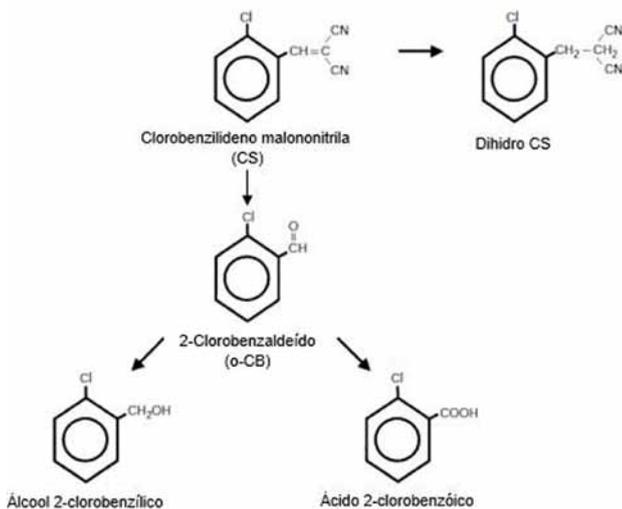


Fig 6. Processo metabólico do CS em mamíferos [6]

#### b) Absorção, distribuição e biotransformação do CR

Os aerossóis de CR são rapidamente absorvidos pelo trato respiratório e a meia-vida plasmática ( $T_{1/2}$ ) do CR após exposição por inalação ao aerossol do composto é de cerca de 5 min, o que é consistente com a meia-vida plasmática do CR após administração intravenosa (i.v.) e absorção gas-

trointestinal [4, 6, 15].

Estudos conduzidos por French *et al.* (1983) demonstram que a distribuição efetiva do CR pelo trato gastrointestinal e a taxa de biotransformação do CR absorvido é semelhante ao observado para o CR administrado via intravenosa. O tecido corneano tem demonstrado capacidade de biotransformar o CR em um composto derivado de lactama [4, 6, 15].

Um grande número de estudos tem investigado a taxa de bioconversão e eliminação do CR em diversas espécies de animais. Os estudos metabólicos em humanos relativos ao CR não foram realizados devido ao alto grau de sensibilidade que o CR provoca em tecidos humanos. A dose máxima tolerada é muito baixa para permitir a detecção em estudos metabólicos. O derivado lactama dibenz[b,f]1:4-oxazepina-11-(10H)-ona é o primeiro produto de biotransformação do CR e um precursor direto dos produtos de biotransformação hidroxilados urinário [4, 6, 15].

Em ratos, os produtos de biotransformação do CR são: lactama, dihidro-CR, aminoálcool e óxido de areno. O principal mecanismo de eliminação dos produtos de biotransformação é a conjugação com sulfato e a excreção biliar de forma limitada. A biotransformação de fase I ocorre através do sistema de oxidação de função mista e envolve a redução do CR para o aminoálcool, oxidação para formar o anel de lactama e hidroxilação para formar hidroxilactamas. As reações de fase II são reações de conjugação de sulfonação formando intermediários de hidroxilactama para eliminação renal. Os intermediários de aminoácidos são conjugados com glucurônico para secreção biliar [4, 6, 15].

#### c) Absorção, distribuição e biotransformação de CN

Inúmeros estudos foram conduzidos para determinação da toxicidade do CN, entretanto, a absorção, distribuição e biotransformação do CN após a exposição são mal caracterizadas [4, 6, 15].

Sabe-se que a inalação do CN pode ser letal, podendo ocorrer a morte devido aos efeitos secundários do CN no aparelho respiratório (congestão pulmonar, edema, broncopneumonia, degeneração do epitélio brônquico e espessamento alveolar) em ratos, cobaias e cães. O CN provavelmente reage irreversivelmente com os grupos sulfidríla livres de proteínas e enzimas. Suspeita-se que o CN seja biotransformado em um agente de alquilação com afinidade por grupos SH e alvos nucleofílicos em tecidos. Tem sido reportado que o CN sofre hidrólise e forma ácido clorídrico e hidroacetofenona ou acetofenona [4, 6, 15].

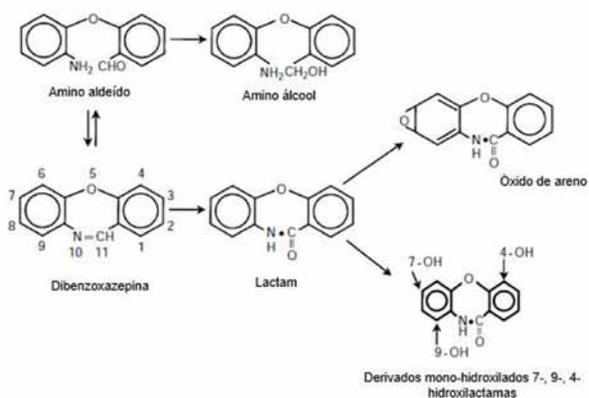


Fig 7. Vias metabólicas do CR [6]

#### d) Absorção, distribuição e biotransformação da capsaicina

A distribuição de capsaicina em tecidos de ratos após administração sistêmica foi estudado por Saria et al. (1982). Após a administração intravenosa da capsaicina, ocorreu uma rápida absorção em tecido do sistema nervoso central e foram detectados níveis elevados de capsaicina [6, 15, 16].

A administração subcutânea (s.c.) de capsaicina para avaliação da distribuição revelou uma difusão lenta no local da aplicação, no entanto, níveis detectáveis de capsaicina foram encontrados em diversos tecidos. Estudos de Kim e Park (1981) sugeriram que a capsaicina e seus análogos foram mal absorvidos no trato gastrointestinal, o que levou a Kawada *et al.* (1984) a investigar mais detalhadamente a absorção gastrointestinal de capsaicina e análogos em ratos. Os resultados demonstraram que a absorção de capsaicina e dihidrocapsaicina ocorreu rapidamente a partir do intestino delgado e do estômago. A absorção de capsaicina nesses locais foi de aproximadamente 85% da dose administrada [6, 15].

Foram investigadas diferentes regiões do trato gastrointestinal para avaliação da absorção da capsaicina e seus análogos. Os resultados indicaram que a depender da região do trato gastrointestinal há diferença na taxa de absorção. Os achados relatados por Kawada et al. (1984) estão em concordância com os resultados *in vitro* publicados por Monsereenusorn (1980) relativos à absorção intestinal *in vitro* de capsaicina [6, 15].

A avaliação da absorção da capsaicina e capsaicinóides através da via inalatória, que é uma via crítica, não foi elucidada [6, 15].

A capsaicina e capsaicinóides sofrem biotransformação que envolvem processos oxidativos e não oxidativos. A maior atividade enzimática para o processo de biotransformação ocorre no fígado, seguida de tecidos extra-hepáticos (por exemplo, rim, pulmão e intestino delgado). Kawada et al. estudaram a biotransformação *in vivo* e *in vitro* da capsaicina e da análoga dihidrocapsaicina em ratos [6, 15].

Os produtos de biotransformação foram eliminados pela urina, principalmente ligado ao ácido glucurônico. Os estudos evidenciam que ocorre a conversão dos produtos de biotransformação catecol em hidroxilação na fração do anel vanilil [6, 15].

A biotransformação da capsaicina pelo sistema hepático de oxidação de função mista forma um epóxido eletrofílico; é um exemplo de biotransformação eletrofílica. Outras vias de biotransformação envolvem reações altamente reativas. Os intermediários formados no processo de biotransformação envolvem a formação de um radical fenoxi e também formação de quinona. Acredita-se que a geração de um derivado de quinona proceda da via O-desmetilação no anel aromático com concomitante oxidação para os derivados da semiquinona e quinona via desmetilação do radical intermediário fenoxi da capsaicina. Nota-se que a via quinona envolve o radical fenoxi, o que leva à formação de um radical metil extremamente reativo. Além das vias oxidativas descritas, a cadeia lateral da capsaicina pode sofrer uma oxidação enzimática (desaminação oxidativa) [6].

A capsaicina também pode sofrer metabolismo não oxidativo por hidrólise na ligação da amida no ácido formado, e formar a vanilamina e ácido graxo [6].

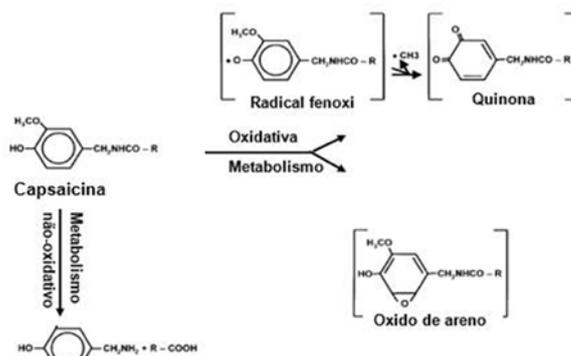


Fig 8. Via de biotransformação da capsaicina [6]

## 4. MECANISMO DE AÇÃO DOS AGENTES LACRIMOGÊNEOS

### a) CN, CS e CR

Os mecanismos de ação dos agentes antimotim não são completamente compreendidos. Além disso, os compostos CS e CN são agentes alquilantes  $SN_2$ , em contraste com o agente vesicante mostarda, que é um alquilante  $SN_1$ . As reações de substituição nucleofílica  $SN_2$  são bimoleculares, ou seja, duas espécies químicas são responsáveis para que a reação ocorra. Em particular, esses compostos reagem com grupos tiol ou SH enzimas intracelulares, assim inativando-as [15].

Macworth (1948) mostrou primeiro que o CN e outros agentes antimotim de primeira geração empregados durante a Primeira Guerra Mundial tais como bromoacetofenona, cloropicrina, cianeto de bromobenzila inibiam fortemente a enzima succinato desidrogenase que continham tiol, e a oxidase pirúvica, principais enzimas envolvidas nas vias metabólicas. Alguns estudos sugerem que a desidrogenase láctica é completamente insensível aos agentes lacrimogêneos, mas apenas os agentes lacrimogêneos a base de iodoacetato foram estudados. Outro grupo de estudo relatou que a desidrogenase láctica é de fato fortemente inibida pelo agente CS. A cloropicrina também interfere no transporte de oxigênio nos tecidos ao reagir com os grupos SH na hemoglobina [6, 15, 17].

Além disso, o CS reage com a forma disulfidrila do ácido lipóico do sistema enzimático piruvato descarboxilase. Alteração na bioquímica do ácido dihidrolipóico pode levar à diminuição dos níveis de acetil CoA, resultando em lesões celulares. Entretanto, as lesões nos tecidos parecem estar relacionadas à inativação do sistema metabólico enzimático. O dano provocado é transitório, porque as enzimas podem ser reativadas rapidamente se a exposição for encerrada [6, 15].

Com base nesses estudos, sugeriu-se que ocorre alquilação dos sítios nucleofílicos, incluindo as enzimas contendo SH, tal lesão bioquímica subjacente sendo responsável pela toxicidade induzida pelos lacrimogêneos. No entanto, a dor provocada pela exposição aos agentes antimotim pode ocorrer sem lesão tecidual. Suspeita-se que o efeito irritante e doloroso da exposição ao CS pode ser mediado pela bradicinina. O composto CS provoca liberação de bradicinina *in vivo* (humanos) e *in vitro*. A eliminação do bradicinogênio *in vivo* suprime a resposta sistêmica ao CS. Acredita-se que a formação de cianeto no processo de biotransformação possa ser o responsável pela letalidade do CS em animais. A formação de cianeto da CS tem sido objeto de vários estudos em

animais de laboratório e em humanos [6, 15].

O cianeto livre foi detectado após a administração i.v. em cães expostos a doses letais de CS, mas poucos dados experimentais foram apresentados. É interessante notar que CS e malonitrilo possuem dois resíduos de nitrila e, em teoria, poderiam originar dois íons de cianeto por molécula do composto original. Experimentos foram conduzidos para testar esse postulado, e os dados sugerem que, sob condições *in vivo*, apenas um radical cianeto é de fato convertido em cianeto, portanto, a quantidade total de cianeto gerada pode ser mínima. Estudos para determinar a produção de cianeto, medido como níveis plasmáticos de tiocianato em indivíduos humanos expostos a CS, foram conduzidos. Os resultados desses estudos indicaram níveis insignificantes de tiocianato de plasma [6, 15].

Apesar dos relatórios sobre supostos casos de letalidade, a mortalidade em seres humanos após a administração do CS não foi confirmada. Foi demonstrada a morte de cães quando expostos ao agente CS. O agente antimotim CS é hidrolisado em malonitrilo e 2-clorobenzaldeído. A biotransformação do malonitrilo pode produzir dois cianetos potenciais, que podem interagir com os tióis de enxofre para produzir tiocianato, conforme descrito acima. O cianeto geralmente causa morte imediatamente, mas os animais que foram expostos ao CS por inalação em concentração muito acima da Ct letal não apresentaram morte imediata. A morte ocorreu entre 12 a 24 h após a exposição. De fato, a morte parece estar associada aos danos provocados nas vias aéreas e pulmonares. Estudos para determinação dos níveis de cianeto produzidos após exposição ao CS em humanos evidenciaram níveis insignificantes de tiocianato de plasma. Outro estudo revelou baixos níveis de cianeto produzidos em camundongos, quando administrado CS marcado com carbono 14. Resumindo, o cianeto produzido pelo processo de biotransformação do CS não é suficiente para provocar toxicidade ou para provocar a morte [6, 15].

Embora o cianeto provoque inibição do citocromo *c* oxidase na cadeia respiratória, tal ação não é a responsável pela toxicidade por exposição ao CS. A toxicidade do cianeto também inclui uma série de reações bioquímicas, como peroxidação lipídica, liberação de opióides endógenos que provocam paralisia respiratória, interrupção da homeostase do cálcio neuronal e hidrólise de fosfolípidios [6, 15].

O mecanismo de ação do agente antimotim CN é muito semelhante ao do CS, pois ambos são compostos alquilantes. Tanto o CS quanto o CN interferem nas enzimas com grupos SH. O mecanismo de ação menos conhecido é o do CR [6, 15].

## b) Capsaicinóides

Os capsaicinóides interagem com uma população de neuropeptídeos de neurônios aferentes e que ativam receptores conhecidos como “vanilóide”. A ligação de receptor-vanilóide provoca a abertura de canais receptores de potencial transitório (TRPs), influxo de  $Ca^{2+}$  e  $Na^{2+}$ , despolarização do neurônio e liberação de neuropeptídeo. Além da excitação transitória dos aferentes primários, a ativação desses receptores leva a um período refratário prolongado, indicativo de um estado aparente não condensado e dessensibilizado do receptor. Nesse período refratário, os aferentes primários tornam-se insensíveis à ação adicional de capsaicinóides. Além disso, sugere-se que o influxo de  $Ca^{2+}$  e  $Na^{2+}$  pode levar a danos

celulares rápidos e eventual morte celular, possivelmente por atividade de proteases dependentes de  $Ca^{2+}$ . A administração de capsaicina em ratos (período neonatal) provocou destruição dos neurônios do gânglio da raiz dorsal [9, 15].

As ações biológicas da capsaicina são principalmente decorrentes da liberação da substância neuropeptídica P, com o peptídeo relacionado ao gene da calcitonina (CGRP) e neuroquinina A dos neurônios sensoriais. Esses transmissores de neurônios sensoriais primários se comunicam com outros tipos de células. Eles produzem alterações na mucosa das vias aéreas e inflamação neurogênica do epitélio respiratório, vasos sanguíneos das vias aéreas, glândulas e músculo liso [9, 15].

As alterações em múltiplos órgãos efetores levam à broncoconstrição, aumento da permeabilidade vascular, edema da mucosa traqueobrônquica, secreção de mucosa elevada e quimiotaxia de neutrófilos [9, 15].

A capsaicina induz a efeitos de broncoconstrição, vasodilatação e extravasamento de proteínas plasmáticas, mediados pela substância P. Além disso, a substância P pode causar broncoconstrição através da estimulação de fibras-c na circulação pulmonar e brônquica [9, 15].

## 5. Efeitos à saúde humana

### 5.1 Efeitos oftalmológico

#### a) CN e CS

Os olhos são um alvo importante para os efeitos tóxicos de curta duração dos agentes lacrimogêneos. A toxicidade ocular provocada pelos lacrimogêneos pode variar em severidade do eritema conjuntival à necrose ocular. Os achados mais importantes provenientes da exposição aos lacrimogêneos são: lacrimação, eritema/edema conjuntival, blefarite e eritema. Os sinais tóxicos podem incluir edema periorbital, blefarospasmo ou espasmos durante o fechamento da pálpebra, apraxia de abertura da pálpebra, oftalmódinia, lesão da córnea e necrose ocular. Os achados oculares tendem a ser mais severos em vítimas de exposição aos lacrimogêneos se elas estiverem usando lentes de contato [6, 15].

O desenvolvimento de eritema e edema pode durar até 48h e depois vascularizar. A queratite não é incomum, mas os sintomas geralmente diminuem após 30 min, a depender da concentração e duração da exposição. A recuperação ocorre dentro de 15 a 30 minutos após a exposição, mas alguns sinais como eritema das margens das pálpebras e fotofobia podem persistir por mais tempo. A conjuntiva pode parecer injetada ou até mesmo avançar para conjuntivite fulminante e visão turva para alguns lacrimogêneos, incluindo o CS [6, 15].

Os sinais tóxicos na conjuntiva da exposição ao CN podem incluir conjuntivite, isquemia limbar e formação de simbléfaro (aderência entre a superfície conjuntival das pálpebras e o bulbo ocular). A lesão ocular permanente é improvável exceto após exposição a altas concentrações de CN. Embora o dano ocular permanente seja incomum, o aumento da pressão intraocular do edema pode precipitar a um glaucoma de ângulo fechado agudo, se não for tratado. As sequelas a longo prazo, podem incluir: cataratas, hemorragia vítrea, e neuropatia óptica traumática [6, 15].

Estudos realizados envolvendo exposição humana ao CS (0,1% ou 0,25% em água, 1,0% em triocil fosfato) pulveri-

zado ou administrado como solução oftálmica, instilada nos olhos, causou a apraxia da abertura das pálpebras (Incapacidade de abrir os olhos voluntariamente na ausência de contração visível do músculo da órbita ocular) com blefarospasmo após o fechamento das pálpebras de 10 a 135 s [6, 15].

Em estudo conduzido com coelhos, foi realizada a instilação de uma solução de CS (0,5 – 10% de polietileno glicol), como um sólido ou dispersado termicamente como fumaça (6.000 mg/m<sup>3</sup>/15 min.), e apresentou uma toxicidade mais elevada. A exposição ao CS em solução provocou lacrimejamento profuso, conjuntivite, irite, quimose, queratite e vascularização da córnea, para concentrações igual ou superior a 1% [6, 15].

As lesões tendem a ser mais severas e com maior duração em doses mais elevadas. Histologicamente, a córnea apareceu com uma desnudação irregular do epitélio e infiltração de neutrófilos no local da lesão. Em geral, as exposições oculares mais severas foram provocadas pela exposição ao CN em comparação ao CS [6, 15].

O CN provoca lesões oculares e sintomas semelhantes ao CS, porém, a toxicidade provocada pelo CN nos olhos e pele é mais grave. O CN pulverizado nos olhos (com uma distância) provoca lacrimejamento, edema no epitélio da córnea (reversíveis) e conjuntiva. A pulverização do CN nos olhos a curta distância pode provocar efeitos e danos a longo prazo. Como os agentes antimotim (CS, CN, outros) são sólidos, quando dispersados, há possibilidade das partículas se aglomerarem e penetrarem na córnea ou conjuntiva [6, 15].

Os efeitos provocados pelos lacrimogêneos são de curta duração em humanos, entretanto, a exposição de coelhos a uma solução a 10% de CN provocou nos animais irite e conjuntivite com duração superior a 7 dias e opacidade da córnea com duração superior a dois meses. Em comparação, a exposição ao CS a uma solução de 10% produziu conjuntivite moderada sem irite ou opacidade na córnea, e os animais voltaram ao normal ao final de uma semana. Outra diferença entre os dois agentes é que o CN produz efeitos oculares mais graves do que CS na forma de pó ou como um spray quando aplicado a uma curta distância. Além da opacidade da córnea provocada pelo CN, efeitos adicionais incluíram possível penetração do agente no estroma corneano, ulceração severa, déficits no reflexo corneano. A penetração do CN no estroma corneano pode provocar o desenvolvimento de edema no estroma, vascularização e resultar em complicações oculares, tais como pseudopterygium, queratite infecciosa, simbléfaro, queratopatia trófica, catarata, hifema, síncera posterior, glaucoma secundário, hemorragia vítrea e neuropatia óptica traumática. Outro estudo, com formulação de CN a 4%, produziu lesão na córnea permanente nos animais, enquanto que uma formulação de CS a 10% não. Em estudos com animais em exposição a elevadas concentrações de CN, observou-se o desenvolvimento de necrose ocular [6, 15].

Segundo estudo realizado, avaliou-se um relatório sobre sete pacientes que foram expostos ao CS através da ingestão oral de um suco contaminado. Estes apresentaram dor de cabeça leve e irritação gastrointestinal, além de queixas de irritação ocular e lacrimejamento. Os sintomas desapareceram dentro das 24h após a exposição [6, 15].

## b) CR

Quando descoberto o composto CR, em 1962, um dos principais efeitos observados foi sua intensa atividade como lacrimogêneo. A aplicação de uma solução de CR (0,01 a

0,1%) provocava oftalmódinia imediata, lacrimejamento e blefarospasmo, semelhante ao CN e ao CS. Normalmente os efeitos tendem a persistir entre 15 a 30 minutos antes de diminuir. Entretanto, a blefarite (edema das pálpebras), o edema periorbital e a conjuntivite podem durar até 6 h [18].

Estudos conduzidos em macacos e coelhos com aplicação ocular de solução de CR a 0,1%, provocou nos animais o desenvolvimento de eritema leve e transitório, quimose e queratite ocular. O desenvolvimento de conjuntivite moderada foi evidenciado em soluções com concentração de CR a 5% e instilada diretamente nos olhos dos coelhos. Em estudos com animais, evidenciou-se que os efeitos oculares são transitórios à medida em que são lavados em até 1h, e produz uma toxicidade menor aos olhos do que quando comparado ao CN [18].

## c) Capsaicina

A capsaicina causa conjuntivite, edema/eritema periorbitário, oftalmódinia, blefarospasmo, blefarite, abrasões da córnea e lacrimejamento.

Um estudo publicado discorre sobre o atendimento 81 pacientes que deram entrada no serviço de emergência devido à exposição ao aerossol de OC. Foram evidenciados os seguintes sintomas: 56% dos indivíduos desenvolveram oftalmódinia, 44% conjuntivite, 40% eritema conjuntival, 13% lacrimejamento e 9% abrasão da córnea [6, 13, 15].

Em um outro estudo envolvendo a exposição de 47 voluntários expostos ao OC, foi evidenciado o desenvolvimento de efeitos na córnea essa conjuntivite. Todos os envolvidos relataram dor ocular significativa, visão turva e lacrimejamento 10 minutos após a exposição ao spray de OC; os sintomas melhoraram 1h após a exposição. Não foi evidenciado abrasões na córnea, entretanto, 21% dos indivíduos apresentaram evidências de erosão epitelial pontilhada e sensibilidade reduzida da córnea. Após uma semana da exposição os sintomas estavam ausentes [6, 13, 15].

Estudo em camundongo após uma única exposição subcutânea (12,5 mg, 25 mg ou 50 mg/kg de capsaicina) provocaram alterações nas córneas caracterizadas pela degeneração do axônio neuronal no epitélio da córnea dos animais [6, 13, 15].

## 5.2 Efeitos nasais/nasofaríngeo

Os compostos lacrimogêneos provocam sintomas orais e nasais imediatamente após a exposição. A exposição ao CN e ao CS por via inalatória provoca rinorréia, espirros e sensação de dor ardente por segundos; após o contato oral com aerossóis (pó ou solução) ocorre sensação de queimação e há aumento de salivação. A salivação, faringite e a glossalgia ocorrem em poucos minutos após a exposição [6, 15, 18].

A aplicação de uma solução de CR (0,01 a 0,1%) quando espirrado na região bucal, provoca salivação, queimação da língua e alteração do paladar durante vários minutos; o contato com a solução através de borrifos, pode provocar irritação nasal e rinorréia. Plantas de *capsicum* quando queimadas ou sprays de pimenta (OC) são altamente irritantes para a mucosa nasal e provocam rinorréia imediatamente após a exposição [6, 15, 18].

## 5.3 Toxicidade respiratória

Os compostos CS e CN podem ser disseminados na forma de aerossol em pó ou solução. A via mais comum de exposição ao CS e ao CN é através da absorção inalatória. A

inalação desses compostos provoca queimação e irritação das vias aéreas, o que causa tosse, aperto no peito, dispnéia, falta de ar, broncoespasmo e broncorreia [4, 15].

A estimativa da exposição mínima ao composto irritante e concentração/tempo, de que incapacita 50% da população exposta ( $IC_{50}$ ) é 0,004 e 5 mg min/m<sup>3</sup>, respectivamente, para o CS. Foram realizadas estimativas similares para exposição ao CN (0,3 – 1 e 20 – 50 mg min/m<sup>3</sup>). Outras estimativas relatam que o vapor de CN a 31 mg / m<sup>3</sup> é intolerável aos humanos após 3 minutos de exposição [4, 6, 15].

O laringoespasmo pode ocorrer imediatamente ou tardiamente durante 1 a 2 dias após a exposição ao CN ou CS. O desenvolvimento de laringotraqueobronquite com início após 1-2 dias da exposição, é caracterizada por sibilância, dispnéia, taquipnéia, rouquidão, febre e escarro purulento. Essas informações foram relatadas em três de oito pacientes expostos a elevada concentração de CN [4, 6, 15].

Nesse cenário, foi necessária a terapia broncodilatadora por longo período em um paciente com doença pulmonar pré-existente. O desenvolvimento de doença reativa das vias aéreas estava associado à exposição em níveis elevados de CS e CR. Os sintomas apresentados foram tosse paroxística, falta de ar e aperto no peito (característica da doença reativa das vias aéreas), que duraram várias semanas. Os efeitos pulmonares geralmente melhoram após 12 semanas após a exposição [4, 6, 15].

O desenvolvimento de edema pulmonar ocorre 24 horas após a exposição. Segundo Gonmori *et al* (1987) foi reportada uma intoxicação por clorpicrina (spray) que resultou em morte. Uma paciente com 18 anos de idade desenvolveu edema pulmonar três horas após a exposição. Outro paciente, um homem de 43 anos de idade, desenvolveu edema pulmonar agravado por pneumonia, insuficiência cardíaca e dano hepático após a intoxicação por CS. Pode ocorrer o desenvolvimento de pneumonia (início retardado) devido à exposição aos agentes lacrimogêneos em espaços confinados. Não há evidências de que o CS provoque dano permanente aos pulmões após várias exposições [4, 15].

Espera-se que um indivíduo que se exponha a um agente lacrimogêneo tenha uma exacerbação de alguma doença pulmonar subjacente, como asma, enfisema ou bronquite. Há relatos de pessoas com doença pulmonar crônica e asma e que ao serem expostas ao CS tiveram os efeitos exacerbados [4, 15].

### 5.3.1 Toxicidade do CN e CS em animais

Estudos em animais, evidenciam que a causa de morte por inalação do CN é resultado da toxicidade do sistema respiratório. Exames *post mortem* realizados para avaliar a toxicidade aguda de animais expostos ao CN evidenciaram: congestão pulmonar, edema, enfisema, traqueíte, bronquite e broncopneumonia (em cães) e congestão pulmonar, edema e broncopneumonia em ratos, camundongos e cobaias. Concentração subletal devido à exposição ao CN na forma de aerossol (62,6 mg/m<sup>3</sup>, 0,1  $CL_{50}$ ) por 60 minutos, causa degeneração celular no epitélio dos brônquios e espessamento da parede do septo alveolar devido à infiltração de mononucleócitos [15].

A exposição ao aerossol de CS (não reportada a concentração) em ratos da espécie *Wistar*, durante 20 minutos, pode causar diminuição da ventilação por minuto e induzir lesões histológicas da traqueia (vacúolos citoplasmáticos em células epiteliais) e pulmão (enfisema) [15].

### 5.3.2 CR

O agente CR não produz uma toxicidade respiratória significativa. A exposição ao CR provoca taquipnéia e respiração laboriosa em múltiplas espécies animais. Em humanos a exposição ao CR provoca irritação respiratória, asfixia e dispnéia. Em um estudo conduzido em indivíduos voluntários com exposição ao CR aerossol (0,25 mg/m<sup>3</sup>) durante 60 minutos foi observada uma diminuição da taxa de fluxo expiratório minutos após a exposição [6, 15].

O CR foi desenvolvido para estimular e provocar irritação dos receptores na porção condutora do sistema pulmonar, causando broncoconstrição. Além disso, o composto CR aumenta o volume sanguíneo nos pulmões ao conduzir o tônus simpático. Foram avaliados os efeitos da exposição ao CR aerossol em dois estudos conduzidos em animais, em relação às alterações físicas e ultraestruturas em pulmões de ratos. A exposição a elevadas concentrações do composto CR aerossol não evidenciou o desenvolvimento de danos pulmonares significativos. O exame dos pulmões em ambos os estudos não mostrou anormalidades ou alterações. O exame microscópico mostrou um congestionamento leve, hiperinflamação lobar – característica de enfisema e hemorragia. Outros danos pulmonares foram evidenciados por microscopia eletrônica; os pulmões expostos ao CR aerossol mostraram danos capilares no endotélio e edema na camada epitelial [6, 15].

### 5.3.3 Capsaicina

Em crianças, o spray de capsaicina provocou broncoespasmo severo e edema pulmonar. Em um estudo, observou-se a reação de um bebê de 4 semanas de idade exposto a um spray de OC (concentração a 5%) após uma descarga de um dispositivo de autodefesa. A criança sofreu uma insuficiência respiratória e hipoxemia, exigindo imediata oxigenação da membrana extracorpórea (ECMO). A capsaicina inalada causa um aumento imediato na resistência das vias aéreas. Essa broncoconstrição dependente da dose após a inalação de capsaicina em seres humanos é a mesma que a demonstrada em asmáticos e fumantes. A broncoconstrição induzida por capsaicina e a liberação da substância P são devidas à estimulação de fibras C aferentes não mielinizadas [15].

### 5.4 Toxicidade cardiovascular

Embora não haja evidências significativas, há indícios de que os agentes lacrimogêneos podem provocar efeitos no sistema cardiovascular. Foram observadas taquicardia e hipertensão leve logo após a exposição. Essa resposta pode resultar da ansiedade ou de uma resposta à dor em oposição a qualquer efeito toxicológico. A resposta inicial devido ao CS aerossol é a hipertensão e respiração irregular sugerindo uma resposta pseudoafectiva de Sherrington. Ignorando os receptores da dor do nariz e da via aérea superior endotraqueal, a administração de CS leva a uma diminuição da pressão sanguínea e bradipnea sendo que tais efeitos também são observados após a injeção intravenosa do composto. Isso sugere que o efeito pressor inicial e a respiração irregular são respostas generalizadas a estímulos nocivos ao invés dos efeitos farmacológicos do CS. A exposição a respingos na face ou respingo no corpo todo de uma solução diluída de CR (0,0010 e 0,0025%) provoca elevação imediata da pressão arterial e bradicardia [15].

A administração intravenosa de CR em gatos provocou

taquicardia transitória, porém dependente da dose. Esses efeitos pressores são postulados como secundários aos efeitos do CR no tono simpático do sistema cardiovascular ou o resultado de estresse e desconforto devido à irritação [15].

Os compostos lacrimogêneos demonstraram ter efeito direto no coração. Um relatório descreveu que exposição a elevadas concentrações de CS provocou insuficiência cardíaca congestiva. Além disso, a doença cardíaca subjacente mostrou exacerbar a toxicidade do CS [15].

## 5.5 Neurotoxicidade

Os agentes lacrimogêneos são irritantes para o sistema nervoso periférico. O CN e CS interagem com receptores nos nervos sensoriais nos olhos, outras membranas mucosas e pele, resultando em desconforto e dor ardente. A toxicidade neurológica pode variar de parestesias dos lábios para dor ardente nos olhos (oftalmodinia), língua (glossalgia), nariz (rinodinia), garganta (faringodinia) e pele (dermatalgia). A reação do CN com proteínas e enzimas contendo grupo sulfidril (SH) é a causa da desnaturação associada à atividade nervosa sensorial. À medida que tais compostos afetam os sentidos, pode haver provocar uma sensação de desorientação após a exposição, o que explica por que alguns indivíduos experimentam perda temporária de equilíbrio e de orientação logo após a exposição [6, 15].

Podem ser desenvolvidos também agitação e pânico em indivíduos que não estavam expostos anteriormente ao CN. Foi relatada também síncope, provavelmente atribuída ao pânico. 48% dos indivíduos expostos à clorpicrina relataram dor de cabeça [6, 15].

Quando ocorreu a liberação de CN em uma prisão, sendo 44 celas atingidas, oito presos apresentaram mal-estar e letargia. Entre os hospitalizados, um apresentou síncope e doença sistêmica severa. Um relato de caso clínico de lesões nas mãos causadas por vazamentos acidentais de canetas de gás lacrimogênio evidenciou efeitos toxicológicos neuronais específicos. Em cada caso, o CN penetrou na pele e provocou feridas. O exame neurológico indicou hiperestesia nos dedos em todos os casos. As biopsias de neurônios com hiperestesia mostraram aumento nas espessuras de epineuro e tendão. Alguns dos pacientes se queixaram de parestesias meses após a exposição. O estudo sugere uma possível ligação entre lesões químicas diretas e danos nos nervos. Os mesmos investigadores expuseram os nervos ciáticos de coelhos ao agente CN contido em canetas ou por escovação do nervo exposto com 0,2 g de pó de CN. Esses estudos em animais sugeriram que a exposição ao CN pode causar inflamação e necrose no músculo esquelético, perda de cilindros axônicos e substituição de elementos neurais com tecido de granulação e fibroblastos. Os animais expostos ao CR exibiram fasciculações, tremores, convulsões e ataxia; a administração intraperitoneal de CR também causou fraqueza muscular [6, 15].

A capsaicina ativa receptores do nervo trigêmeo (nervo craniano V) e neurônios intestinais. Esses incluem receptores de dor localizados na boca, nariz, estômago e mucosas membranas. Os neurônios trigêmeos utilizam a substância P como neurotransmissor de dor primária. A capsaicina induz pela primeira vez a liberação da substância P do neurônio e depois bloqueia a síntese e o transporte da substância P para o lado eferente. A substância P despolariza neurônios para produzir dilatação de vasos sanguíneos, estimulação do músculo liso e ativação das terminações nervosas sensoriais. Um estudo re-

alizado em 1968, caracterizou os efeitos da capsaicina como uma excitação intensa inicial de neurônios sensoriais seguida de um longo período de insensibilidade à estimulação físico-química. A substância P está associada a aferentes sensoriais (dor) ou à inflamação da pele. É também um mediador periférico de inflamação neurogênica e contração muscular lisa. Contribui para a contração do esôfago, traqueia, trato respiratório e músculo levantador da pálpebra (blefaroespasmos) e apraxia da abertura da pálpebra. A capsaicina, aplicada diretamente nos olhos, causa uma inflamação neurogênica, envolvendo vasodilatação e extravasamento de fluido e falta de resposta a estímulos químicos. A capsaicina torna a pele humana e animal insensíveis a vários tipos de estímulos químicos dolorosos. Nos seres humanos, a exposição ao OC eventualmente causa perda do reflexo do piscar da córnea, que é mediada pela entrada sensorial do nervo craniano V e pela saída do motor através do nervo craniano VII [6, 15].

## 5.6 Toxicidade gastrointestinal

Muitas análises afirmam que os efeitos gastrointestinais não ocorrem após a exposição inalatória aos agentes antimotim, com exceção do DM; no entanto, náuseas, vômitos e alterações no gosto são comuns nos casos clínicos de exposição ao CS e ao CN. O desenvolvimento de vômitos (êmetese) tende a ocorrer em indivíduos mais sensíveis, em concentração suficientemente alta, exposição prolongada, distância próxima da fonte de exposição ou em espaço confinado. Foi relatado vômito em 25% dos pacientes expostos ao CN em espaços confinados. Não foi evidenciada êmetese após uma semana de exposição. A inalação dos agentes lacrimogêneos geralmente desenvolve parageusias ou alteração do paladar. Em particular, uma sensação de sabor metálico é frequentemente relatada [6, 15].

A ingestão de CS também pode produzir episódios de náuseas, vômitos, dor abdominal e diarreia. Segundo dados descritos no estudo de Solomon, sete pacientes que ingeriram suco contaminado com pastilhas de CS desenvolveram sintomas gastrointestinais. Dentre os sete pacientes, dois relataram êmetese e diarreia e todos os pacientes relataram dor abdominal, desconforto epigástrico e refluxo gastroesofágico ardente. Os sintomas foram resolvidos 24h após a exposição. Surpreendentemente, eles não desenvolveram parageusia ou queimação na língua após a ingestão de CS, o que é frequentemente relatado após a exposição inalatória ao CS. Outro estudo projetado para que os pacientes experimentassem uma mistura de açúcar e CS (5-10 pastilhas, 500 mg cada dissolvido em 10 litros de água) indicaram que os pacientes desenvolveram paladar alterado com atraso de 30 segundos para iniciar tal efeito; provavelmente, o açúcar mascarou esse efeito. Em estudos com animais, coelhos e ratos desenvolvem gastroenterite após exposição ao CN ou CS por ingestão [15].

A ingestão ou o mascar plantas de *Capsicum* pode causar náuseas e vômitos. Foram relatadas náuseas também em indivíduos expostos ao pó tático de bolinha de pimenta contendo capsaicina. A capsaicina causa efeitos sobre a mucosa gástrica, incluindo eritema leve, edema, dano das células epiteliais e hemorragia gástrica [15].

## 5.7 Toxicidade dérmica

Os compostos CN e CS são irritantes primários do sistema tegumentar, capazes de provocar queimaduras de pri-

meiro e segundo grau. Baixas concentrações desses agentes causam eritema, prurido, edema subcutâneo, parestesias e/ou sensações de queimação em áreas expostas da pele, em poucos minutos. O desenvolvimento de eritema é frequentemente o primeiro sinal de dermatite de contato e ocorre minutos após a exposição, diminuindo em torno de uma hora após a exposição. Os danos provocados por esses agentes na pele são semelhantes aos efeitos do agente mostarda. Além disso, caso a pele esteja molhada ou machucada, os efeitos tóxicos sob a pele serão mais acentuados. A exposição a doses mais elevadas provoca uma piora no desenvolvimento do eritema, edema e vesiculação com bolhas (observadas algumas horas após a exposição) e febre. A extensão dos efeitos tóxicos sob a pele depende da espessura do estrato córneo e do tempo de exposição. Além disso, o contato com água em até 48h após a exposição pode exacerbar os sintomas dolorosos sob a pele. Elevada umidade, diaforese e temperaturas elevadas podem agravar a dermatite de contato provocada pelos agentes lacrimogêneos. Áreas que tenham adesivo oclusivo sob a pele também podem ter agravamento dos efeitos [15].

Exposições a concentrações mais elevadas ao CS ou exposição com longa duração resultam no desenvolvimento de eritema, prurido e dor ardente com maior intensidade. A formação de erupções cutâneas papulovesiculares não são incomuns em exposições a elevadas concentrações dos agentes lacrimogêneos. Normalmente, o desenvolvimento de edema e vesiculação (dermatite bolhosa) se mantém 24h após a exposição ao CS e ao CN. Os locais mais comuns para o desenvolvimento das bolhas são em áreas sob a manga de uma camisa ou luva e logo abaixo do colarinho da blusa. Um estudo examinou os efeitos nos braços de indivíduos voluntários à exposição a elevadas concentrações de CS (300 mg/m<sup>3</sup>) com duração entre 15 e 60 minutos de exposição. Todos os indivíduos relataram dor ardente por aproximadamente 5 minutos após o início da exposição. Uma faixa de Ct de 4.400 e 9.480 mg min/m<sup>3</sup>, provocou o desenvolvimento de eritema irregular imediato, que regrediu após 30 minutos. Uma outra faixa de Ct de 14.040 e 17.700 mg min/m<sup>3</sup> provocou maior toxicidade dérmica e a regressão dos sintomas demorou horas para ocorrer. O desenvolvimento de dermatite bolhosa ocorreu em 50% dos indivíduos, observada como uma reação tardia. As lesões com bolhas regrediram em duas semanas, mas a inflamação com hiperpigmentação da pele permaneceu por seis semanas após a exposição. As diferenças na sensibilidade dos indivíduos são devido à pigmentação cutânea, aspecto e a susceptibilidade às queimaduras solares [6, 15].

A exposição a outros agentes antimotim pode causar efeitos dérmicos semelhantes. O agente CN é um irritante mais potente do que CS. Em um estudo com indivíduos em que foi realizada a aplicação dérmica de CN em pó (0,5 mg), observou-se irritação e eritema quando exposto à pele por 60 minutos. A concentração de 20 mg de CS provocou efeitos semelhantes com o mesmo período de exposição. A exposição a capsaicina (5%) provocou eritema e edema na pele imediatamente após a exposição. Da mesma forma, a munição de pimenta disparada em indivíduos provoca desenvolvimento de eritema, dor e edema no local do impacto. O local afetado pelo disparo desenvolve um processo infeccioso, depois ocorre a cicatrização e pode ocorrer uma hiperpigmentação da pele [6, 15].

A exposição dérmica ao CN ou ao CS pode provocar dermatite de contato alérgica, uma reação de hipersensibilidade retardada desenvolvida a partir de uma exposição anterior

a tais compostos. Tanto o CS como o CN são considerados sensibilizantes dérmicos, entretanto, o CN é mais potente. A exposição inicial aos agentes pode não causar efeitos tóxicos, com sinais e sintomas significativos. A exposição a baixas concentrações do mesmo agente anos mais tarde provocou severa alergia eritematosa, erupção cutânea com edema, púrpura, bolha e necrose. A sensibilidade dérmica é suscetível de ocorrer após exposição a altas concentrações desses agentes. As reações de hipersensibilidade podem persistir por até 4 semanas, entretanto, tal fenômeno só foi evidenciado após a exposição ao CN e CS, não ocorrendo o mesmo após exposição ao CR [6, 15].

A exposição dérmica ao agente CR provoca uma sensação de queimação e eritema, evidenciado vários minutos após a exposição. A dor da queimação desaparece em um período de 15 a 30 minutos, mas o eritema dura até 2 horas. O composto CR não provoca indução da migração das células inflamatórias para o local da lesão, dermatite bolhosa ou sensação de contato. A aplicação repetida do agente CR na pele (aplicada 5 dias por semana durante 12 semanas), demonstrou pouco efeito tóxico. Assim como o CR não demonstra efeitos tóxicos aos olhos e aos pulmões, também não foi evidenciada toxicidade significativa sobre a pele. Os compostos CR, CS e CN podem apresentar efeitos tóxicos horas após a disseminação, pois são persistentes no meio ambiente [6, 15].

Os capsaicinóides podem ter um efeito vesicante, dependendo do tempo de exposição, sendo que na maioria dos casos produz uma sensação de queimação e eritema leve. As capsaicinas podem causar eritema e dor ardente sem vesiculação quando aplicado topicamente na pele humana. Exposições crônicas ou prolongadas à capsaicina podem provocar bolhas e erupções cutâneas [6, 15].

## 5,8 Outros efeitos tóxicos

Foi observado o desenvolvimento de nefrite tubular em um trabalhador, morto após explosão dentro de uma fábrica que produzia CS. Há descrição de desenvolvimento de lesão hepatocelular que foi associada à exposição inalatória do agente CS. Não há evidências de efeitos teratogênicos em animais de experimentação devido à exposição aos agentes lacrimogêneos (CS e CN). Foram realizados testes de Ames e não foi evidenciado potencial mutagênico do composto CS e CN. Não há evidência de potencial carcinogênico do CS [15]. Os agentes lacrimogêneos CN, CS, CR e OC não estão listados na *International Agency for Research on Cancer*.

A utilização do OC em situações em que o agressor está sob o efeito de droga ou álcool se mostrou mais eficaz que o CS, isso porque o OC atua no corpo humano através de um processo inflamatório, o que faz com que os efeitos fisiológicos sejam mais imediatos e eficazes do que os causados pelo CS, que atuam através da indução pela dor. Nesta situação, como o agressor estará com o sistema nervoso sensorial menos sensível, por conta da sensação de anestesia causada pela droga ou álcool, o CS poderá não causar o efeito desejado [4].

O CS tem pouca eficácia se utilizado contra os cachorros e a maioria dos animais, não produzindo os mesmos efeitos fisiológicos que nos seres humanos, isto porque além dos animais possuírem pelagem que os protegem do contato do agente químico na pele, os canais lacrimais dos animais são menos desenvolvidos do que os dos seres humanos [4]. Por outro lado, o OC tem uma eficácia melhor que o CS nos ani-

mais, uma vez que como ocorre nos seres humanos, o OC age através de um processo inflamatório e não pela indução da dor.

Importante ressaltar que os efeitos fisiológicos causados nos animais dizem respeito à utilização do espargidor de OC diretamente na face do animal, uma vez que os cachorros se adaptam a um ambiente contaminado com CS ou OC, inclusive não interferindo no trabalho de faro em busca de droga ou arma, por exemplo, exercido pelo cachorro.

A Tabela 4 descreve os principais efeitos clínicos da exposição aos agentes lacrimogêneos.

**Tab4:** Principais efeitos clínicos da exposição aos agentes lacrimogêneos

Órgão/local afetado	Efeitos clínicos
Olhos	Queima, irritação Injeção conjuntival Dilatação Blefarospasmo Fotofobia
Vias aéreas	Espirros Tosse Aperto no peito Irritação Secreções
Pele	Queimadura Eritema
Nariz	Rinorréia Queimadura
Trato gastrointestinal	Enjoo Náuseas Vômito
Boca	Queimadura nas membranas mucosas Salivação

Fonte: Sidell et al (1997) [19]

## 6. TRATAMENTO MÉDICO E DESCONTAMINAÇÃO

Apesar do uso dos agentes químicos lacrimogêneos ser seguro quando utilizado na forma correta e em ambiente adequado, existe um risco pequeno do seu uso causar lesões na pele e/ou olhos caso alguém seja exposto a esse agente químico em uma concentração alta ou na hipótese de a pessoa exposta ser alérgica a algum componente da formulação dos gases lacrimogêneos, ou ainda, possuir alguma doença respiratória crônica pré-existente.

No entanto, quando alguém é exposto a algum tipo de agente lacrimogêneo, alguns cuidados devem ser tomados para a descontaminação, e na hipótese de alguma complicação mais grave, algumas medidas devem ser adotadas, conforme descrito.

Deve-se remover as roupas contaminadas, assim que possível, colocando-as em um saco plástico até serem lavadas, preferencialmente, em água fria para reduzir a vaporização do agente. O uso de roupa contaminada irá aumentar o contato da pele com o agente químico, aumentando, assim, o risco de efeitos fisiológicos mais graves.

Deve-se descontaminar a pele com sabão neutro ou detergente e água em grande quantidade para se obter um alívio imediato dos efeitos fisiológicos. A lavagem somente com água não é totalmente eficaz, pois somente a água não é capaz de retirar por completo o agente químico da pele, mas o sabão ajuda a retirar as partículas secas do agente químico e removê-las adequadamente da superfície da pele.

Apesar do OC ser solúvel em óleo vegetal e outros hidrocarbonetos, e tais soluções serem mais facilmente lavadas da pele, hidrocarbonetos não devem ser utilizados com OC ou

outros agentes químicos lacrimogêneos [4].

Deve-se remover todos os cosméticos e lentes de contato durante a descontaminação, pois o agente químico lacrimogêneo pode ficar impregnado neles.

Quando a contaminação ocorrer em ambiente confinado, uma ventilação mais severa, como por exemplo, com o auxílio de um ventilador ou correr contra o vento de braços abertos, ajuda a remover o agente químico.

Exposição ao agente químico lacrimogêneo pode resultar em danos na córnea, uma vez que a pessoa exposta ao agente químico, ao esfregar os olhos, pode ocasionar pequenas ranhuras na córnea. Desta forma, o indivíduo exposto ao agente químico em hipótese alguma deve esfregar os olhos. Se os sintomas perdurarem mais de uma hora, é recomendável a consulta a um oftalmologista. Na hipótese de haver alguma lesão na córnea, a administração de glicocorticoide não se mostrou eficaz em aliviar os sintomas de irritação nos olhos, podendo inibir a regeneração do colágeno da córnea. No entanto, se houver alguma perda epitelial ou se houver necessidade de se utilizar glicocorticóides devido a uma inflamação permanente no olho, deverá ser usado anticolagenase, que inclui 10% acetilcisteína, 0,25M 1-cistina e 0,2 M EDTA cálcico [4].

Uma avaliação de eventual lesão nos olhos deve incluir o exame de lâmpada de fenda (biomicroscópio ocular) usando coloração com fluoresceína para examinar se houve alguma lesão na córnea.

Pode ser utilizado um anestésico local para dores mais intensas nos olhos, no entanto, o uso continuado deve ser restrito.

O contato mais prolongado com algum tipo de agente lacrimogêneo ou em concentração elevada pode acarretar uma dermatite primária de contato, apresentando uma queimadura química. Neste caso, o tratamento administrado deverá ser para queimadura química. Quando houver apenas vermelhidão, não há necessidade de tratamento específico. Erupções vesiculares ou bolhas deverão ser tratadas com antibióticos tópicos para prevenir infecções secundárias. Na hipótese de ocorrer queimaduras extensas, grandes bolhas ou queimaduras de segundo ou terceiro grau, deverá ser aplicada solução de sulfadiazina de prata. Em casos mais graves de exposição, deverá ser ministrada prednisona via oral. Na hipótese de uma dermatite de contato alérgica, glicocorticoide tópico na maioria das vezes tem um efeito eficaz no tratamento [4].

As soluções para descontaminação da pele não devem ser cáusticas. Uma solução contendo 10% de bicarbonato de sódio se mostrou adequada em aliviar os efeitos fisiológicos causados na pele.

Quando o indivíduo for exposto a OC, o uso de cremes ou pomadas deverá ser retardado por um período de 6 horas após a exposição.

Os pacientes que apresentarem formação de com bolhas deverão ser tratados como havendo queimaduras de segundo grau.

Pacientes com dermatite aguda de contato com produção secreção deverão ser tratados com curativos molhados (umedecidos com fluidos na proporção de 1:40 solução de acetato de alumínio ou solução coloidal) por 30 minutos, três vezes ao dia. Esteroides tópicos devem ser aplicados imediatamente após os curativos molhados. Antibióticos devem ser ministrados para evitar infecções secundárias, bem como anti-histamínicos para as coceiras. Lesões vesicantes vêm sendo tratadas com sucesso com compressas de solução de nitrato de prata (1:1,000) por 1 hora, aplicado seis vezes por

dia. Pomada antibiótica foi aplicada no local, mas antibiótico sistêmico não foi utilizado [4].

A inalação dos lacrimogêneos pode resultar na irritação das vias aéreas, e em casos de exposição aguda, produzindo danos no pulmão e edema pulmonar, ou até mesmo parada respiratória. Algumas terapias foram desenvolvidas em ambientes controlados e se provaram ineficazes em prevenir irritação nas vias aéreas, incluindo antibióticos profiláticos e atropina.

Os lacrimogêneos inalados em elevada concentração provocarão broncoespasmo. Os broncodilatadores (exemplo, salbuterol 0,5%) são eficazes no tratamento de broncoespasmo. No entanto, se um broncodilatador for inalado e não for imediatamente eficaz, então deverá ser administrada aminofilina sistêmica seguido por glicocorticóide sistêmico deverá ser considerado [4].

Os indivíduos com problemas respiratórios crônicos (asma, bronquite, entre outros), não devem ser submetidos aos agentes lacrimogêneos, no entanto, esta restrição só é possível em ambiente controlado, como por exemplo, instrução, uma vez que em situações de controle de distúrbio civil tal preocupação com os integrantes da multidão não ocorre.

A administração de glicocorticóide sistêmico pode ser eficaz no tratamento de edema pulmonar causado por uma exposição a elevada concentração de algum lacrimogêneo. Pacientes com parada respiratória, tratados com uma ventilação em alta pressão e alta tensão de oxigênio podem apresentar dano irreversível no pulmão. A utilização de uma membrana extra corporal de oxigenação se demonstrou eficaz no tratamento de dano causado ao pulmão pelos lacrimogêneos [4].

O indivíduo com inflamação das vias aéreas causada pela exposição ao agente lacrimogêneo pode desenvolver uma síndrome de disfunção reativa das vias aéreas (RADS), ocorrendo broncoespasmo quando o indivíduo é exposto a um irritante e/ou exposição ao ar frio ou praticando exercício. O tratamento é feito com inalação de broncodilatadores de longa ação, glicocorticóide, brometo de ipratrópio e cromolínio sódico. Inibidores de leucotrienos oral também são eficazes [4].

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificamos que os agentes químicos sofreram uma significativa evolução ao longo da História, passando de substâncias utilizadas para causar mortes em inimigos para o desenvolvimento de agentes a serem utilizados em ocorrências de distúrbios civis, tais ocorrências por serem provocadas pela população interna de um país, não considerada tropa inimiga, demandam, por isso, a utilização de agentes químicos debilitantes, os lacrimogêneos.

Atualmente, os agentes químicos lacrimogêneos são os agentes químicos mais utilizados em todo o mundo, o que faz com que se tenha uma constante pesquisa e desenvolvimento nesta classe de agente, buscando tornar a sua utilização cada vez menos tóxica e mais eficiente, visando torná-los mais seguros.

A utilização dos lacrimogêneos sempre causou preocupação em relação ao sistema respiratório humano, no entanto, essa preocupação deve ser apenas uma das muitas que devem ser consideradas, uma vez que esta classe de agente pode ser nociva também a outras estruturas do corpo humano, como, lesões olhos, pele e outras demonstradas ao longo do artigo. Atualmente existe uma banalização muito grande em se utilizar esta classe de agente, justamente por ela ser considera-

da de menor potencial ofensivo, ou seja, que não tem como principal intuito causar a morte.

Pensando dessa forma, o operador que está utilizando o agente químico se esquece que a letalidade é apenas uma das consequências que o mal emprego deste tipo de agente pode causar, o operador deve se ater também às outras consequências que tais agentes podem causar, como as citadas neste trabalho, visando à segurança e ao propósito para o qual ele foi desenvolvido, ou seja, não ser letal, a utilização de tais agentes deve sempre respeitar regras básicas de segurança, uma vez que apesar da classe de agentes lacrimogêneos ser considerada a menos tóxica dentre as classificações fisiológicas existentes, a má utilização deles, negligenciando as normas de segurança e as técnicas existentes, poderá provavelmente acarretar consequências desastrosas, podendo, inclusive, levar à morte dos cidadãos expostos.

## 8. LISTA DE ABREVIATURAS

BA	Bromacetona
BBC	Cianeto de bromobenzila
CA	Bromobenzil cianeto
CN	Cloroacetofenona
CR	Dibenzoxazepina
CS	Ortochlorobenzilmalononitrilo
CT	Concentração
DM	Adamsita
HC	Hexacloretano
HNCN	Cianeto de hidrogênio
OC	Oleoresina de <i>capsicum</i>
PAVA	Ácido pelargônico vanililamida
SH	Sulfidril

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hilmas, C. J.; Smart, J. K.; Hill, B. A., History of Chemical Warfare. In: S. D. Tuorinsky (Org.), Medical Aspects of Chemical Warfare, Washington, Borden Institute, 2008, cap. 2, pgs. 09-76.
- [2] França, T. C. C.; Silva, G. R.; Castro, A. T., Defesa Química: Uma Nova Disciplina no Ensino de Química, Revista Virtual de Química, 2010, pgs. 84-104.
- [3] Heller, C. E., Chemical Warfare in World War I: The American Experience, 1917 – 1918. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20070704205655/http://www-cgsc.army.mil/carl/resources/csi/Heller/HELLER.asp#1>>. The Introduction of Gas Warfare in World War I. Acesso em: 09 fev. 2018.
- [4] Olajos, E. J.; Stopford, W., Riot Control Agents. Issues in Toxicology, Safety, and Health. Florida, CRC Press, 2004.
- [5] Salem, H.; Gutting, B. W.; Kluchinsky, T. A.; Boardman, C. H.; Tuorinsky, S. D.; Hout, J. J., Riot Control Agents. In: Tuorinsky, S. D. (Org.). Medical Aspects of Chemical Warfare. Washington, Borden Institute, 2008, capítulo 13, pgs. 441-483.
- [6] Olajos, E. J.; Salem, H., Riot Control Agents: Pharmacology, Toxicology, Biochemistry and Chemistry, Journal of Applied Toxicology, n. 21, 2001, pgs. 355-391.
- [7] Niyousha, MR; Panahi, Y; Golzari, S., Acute and Chronic Effects of Disturbance Control Factors, Complications and Treatment Method, Environmental Analytical Chemistry, issue 3, vol 2, 2015, pgs. 138.
- [8] Haber, L.; Nance, P.; Maier, A., Human Effectiveness and Risk Characterization of Oleoresin Capsicum - (Oc) and Pelargonic Acid Vanillylamide (PAVA or Nonivamide) Hand-Held Devices - Toxicology Excellence For Risk Assessment (TERA), 2007.
- [9] Patocka, J.; Kuca, K., Review article pelargonic acid vanillylamide (PAVA): riot control agent, Military Medical Science Letters, V. 80, 2011, pgs. 72-79.
- [10] EUROPEAN Law's Pepper Spray. Disponível em: <<http://mace-europe.com/eu-pepper-spray-laws/>>. Acesso em: 13 fev. 2018.
- [11] Mock, M., Fact or Fiction: Owning Pepper Spray Is Illegal in Most

- of Europe?. Disponível em: <<http://www.robertreeveslaw.com/blog/pepper-spray-europe/>>. Acesso em: 13 fev. 2018.
- [12] Katz, S. A; Salem, H., Synthesis and Chemical Analysis of Riot Control Agents. In: Riot Control Agents: Issues in toxicology, Safety and Health. In: Olajos, E.; Stopford, W., capítulo 3, 2004.
- [13] Legin, YA., Drugs capsaicin and its analogs: properties, preparation and applications (a review), *Pharmaceutical Chemistry Journal*, v. 30, n° 1, 1996, pgs 60-68.
- [14] Kanapathy, E. J., Quantification of Hydrogen Cyanide Generated at Low Temperature O-Chlorobenzylidene Malononitrile (CS) Dispersal, *Dissertação (Mestrado em Ciência da Saúde Pública)*, Uniformed Services University, 2013.
- [15] Hilmas, C. J.; Poole, M. J.; Katos, A. M.; Williams, P.T., Riot Control Agents. In: *Handbook Toxicology of Chemical Warfare Agents*, capítulo 12, 2009.
- [16] Saria, A.; Skofitsch, G.; Lembeck, F., Distribution of capsaicin in rat tissue after systemic administration, *J. Pharm, Pharmacol*, vol 32, issue 4, pgs 273–275, 1982.
- [17] Macworth, J. F., The inhibition of thiol enzymes by lachrymators, *Biochem, J.* 42: 82–90, 1948.
- [18] Frederick, S., Riot Control Agents In: *Medical aspects of chemical and biological warfare*, capítulo 12, Office of the Surgeon General, Walter Reed Army Medical Center, Washington, 1997.
- [19] Sidell, F. R.; Takafuji, E. T.; Franz, D. R., *Medical Aspects of*

# Estudo da dinâmica longitudinal de um veículo leve monotripulado utilizando modelagens de pneus em piso rígido

Lucas C Sousa\*, Ricardo T C Neto\*\*  
Instituto Militar de Engenharia (IME) –  
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
\*lucascastro.mec@ime.eb.br  
\*\*ricardo@ime.eb.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas modelagens de pneus, Fórmula Mágica de Pacejka e Teoria de Julien, aplicados ao estudo da dinâmica longitudinal de um veículo leve monotripulado. Dessa forma é utilizado um veículo com tração traseira CVT e caixa redutora com relação fixa de engrenagens. Dados relativos ao veículo, parâmetros dos modelos e equações de movimento são empregados no programa Simulink®, obtendo-se um modelo computacional, com resultados a partir da solução pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem. O desempenho das modelagens é analisado quanto à força trativa desenvolvida e a velocidade adquirida. Assim, os resultados obtidos foram satisfatórios e demonstram a importância do estudo da interação entre pneu-solo para o entendimento da dinâmica longitudinal de um veículo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dinâmica longitudinal. Veículo Off-road. Fórmula Mágica. Teoria de Julien

**ABSTRACT:** This paper presents a comparative study of two tire models, Pacejka's Magic Formula and Julien's Theory, applied to the study of the longitudinal dynamics of a lightweight single-seat vehicle. In this way, a Rear-Wheel Drive (RWD) vehicle is used, with CVT transmission and a gearbox with fixed ratio of gears. Vehicle data, model parameters and motion equations are used in the Simulink® program, resulting in a computational model, with results from the 4th-order Runge-Kutta method. The modeling performance is analyzed for the developed tractive force and speed acquired. Thus, the results obtained were satisfactory and demonstrate the importance of the study of the interaction between tire-soil for the understanding of the longitudinal dynamics of a vehicle.

**KEYWORDS:** Longitudinal dynamics. Off-road Vehicles. Pacejka's Magic Formula. Julien's Theory

## 1. INTRODUÇÃO

A aceleração e a frenagem de um veículo são influenciadas pela transferência de esforços ao piso e da capacidade de um pneu se aderir ao solo, visto que, eliminando as forças aerodinâmicas e gravitacionais, as forças que afetam a movimentação de um veículo terrestre são decorrentes da interação pneu-solo [1, 2].

Assim, operações de aceleração e frenagem envolvem um fenômeno conhecido como deslizamento, presente na interface de contato entre o pneu e o solo, tornando possível o travamento de rodas, ao se tratar da frenagem ou deslizamento maior que o rolamento, na aceleração [3, 4]. Dessa forma, o entendimento dessa interação é de extrema importância para a compreensão do comportamento dinâmico do veículo [2].

Para o entendimento da interação veículo-terreno, é necessário o conhecimento de Dinâmica Veicular, sendo que este trabalho é concentrado no estudo da dinâmica longitudinal, vinculado às forças decorrentes da aceleração.

Dentro do âmbito da dinâmica longitudinal, o sistema de transmissão adotado influencia diretamente o comportamento do veículo. No entanto, devido aos impactos ambientais, sua aplicação segue sendo amplamente questionada. Assim, com o objetivo de mudar esse ponto de vista, estudos e projetos de soluções que diminuam o consumo e a emissão de combustíveis, permitindo dessa forma um melhor rendimento do motor, têm sido desenvolvidos. Dentre essas soluções, a transmissão CVT (Transmissão Continuamente Variável), permite alterar de forma contínua a relação de transmissão da caixa de mudança de marchas, tornando possível que o motor opere em condições próximas à de máxima potência, resultando, assim, na diminuição do consumo de combustível, além de melhorar o rendimento [3, 6, 7].

Com o avanço alcançado pelo desenvolvimento computacional, grande parte dos projetos veiculares tem optado por aumentar o tempo em experimentos computacionais compa-

rativamente ao tempo destinado a experimentos com protótipos. Isso se deve em grande parte ao fato de que protótipos e seus testes possuem um custo alto para realização, além de elevado tempo de preparação e conclusão, sendo atualmente utilizados em testes finais para validação dos modelos e testes computacionais realizados. Dessa forma, quando bem executados, os testes computacionais possuem resultados bastante próximos à realidade.

Uma das técnicas de modelagem que tem se mostrado bastante eficiente devido à possibilidade de se representar matematicamente diversos sistemas das mais variadas áreas da ciência é a metodologia de Fluxo de Potência [8]. Essa metodologia possui característica modular, permitindo dessa forma a criação de subsistemas isolados para uma posterior representação do sistema como um todo [2, 8].

A metodologia de fluxo de potência vinculada à montagem em diagrama de blocos é utilizada neste trabalho na modelagem computacional da dinâmica longitudinal do veículo estudado.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Motor e trem de força

A linha de propulsão do veículo é comumente denominada *Driveline* ou linha de força e engloba o conjunto do motor e o sistema transmissão de potência denominado *Powertrain* ou Trem de Força [7, 9].

A principal fonte de esforços no sistema do trem de força é o torque produzido pelo motor, forçando-o a vencer as resistências impostas ao movimento [3]. O torque de propulsão entregue às rodas tratoras é definido como o torque oriundo do motor, sendo transmitido pelo conjunto da transmissão [1, 4, 10].

O veículo estudado neste trabalho apresenta um motor à

gasolina com potência de 7,457 kW e 305 cc, possuindo como máxima rotação, 4000 rpm (419 rad/s).

A curva de torque de um motor ( em função de sua velocidade angular pode ser aproximada por um polinômio de 2ª ordem [1].

$$T_m = P_1 + P_2\omega_m + P_3\omega_m^2 \quad (1)$$

Sendo e respectivamente, a máxima potência do motor e rotação do motor em que essa máxima potência é alcançada, é

$$P_1 = P_{max}/\omega_{max} \quad (2)$$

$$P_2 = P_{max}/\omega_{max}^2 \quad (3)$$

$$P_3 = -P_{max}/\omega_{max}^3 \quad (4)$$

A CVT é caracterizada por variar de forma contínua a relação de transmissão por meio de um sistema constituído por duas polias, onde tem-se a abertura de uma das polias e o fechamento da outra de forma simultânea alterando-se a multiplicação do torque transmitido [3, 6, 11].

Duas hipóteses ideais podem ser adotada, em projetos de CVT's. Permitir que o motor trabalhe o tempo todo em sua curva de mínimo consumo de combustível ou permitir que funcione em sua máxima potência [3, 11]. A segunda hipótese é adotada neste trabalho.

Com o objetivo de alcançar a hipótese selecionada, deve-se conhecer a potência máxima desenvolvida pelo motor e em que rotação ela é alcançada, de tal forma que, durante o maior tempo possível, o motor opere nessa rotação máxima (  $\omega_{CVT} = \omega_{max}$  ) Assim, a relação de transmissão envolvendo a transmissão CVT, pode ser definida pela Eq. 5 e relaciona a rotação de entrada (  $\omega_{CVT}$  ) e a rotação de saída da CVT (  $\omega_{cx}$  )

$$i_{CVT} = \frac{\omega_{max}}{\omega_{cx}} \quad (5)$$

A relação de transmissão da CVT apresenta, pela hipótese adotada portanto, uma curva hiperbólica característica da hipérbole de tração ideal, tendo como limites de curva os valores de máximo. Para a CVT utilizada foram definidos como relação máxima e mínima as relações 3,71:1 e 0,69, respectivamente.

Vale ressaltar que a função definida para a relação de transmissão da CVT é considerada ideal, devido ao fato de não considerar inúmeros fatores presentes durante sua operação real, tais como deslizamento da correia, histerese, dinâmica do mecanismo, dentre outros, fatores esses que fazem com que na prática, a curva apresentada não seja seguida a rigor durante sua operação.

Assim, segundo a metodologia de fluxo de potência, o equacionamento aplicado à CVT, é apresentado a seguir:

$$T_{CVT} = i_{CVT}T_m \quad (6)$$

$$\omega_{max} = \omega_{CVT} = i_{CVT}\omega_{cx} \quad (7)$$

Onde,  $T_{CVT}$  é definido como o torque da CVT e  $\omega_{cx}$  é a rotação angular também da CVT, os quais são saídas do sistema.

Devido ao fato da redução fornecida pela transmissão primária CVT não gerar redução de velocidade angular necessária para o veículo em estudo, utilizam-se comumente as denominadas transmissões secundárias para o cumprimento

deste objetivo. Em veículos leves, correntes ou caixa redutora de engrenagens com relação fixa são bastante utilizadas. Esta última é a utilizada neste trabalho.

A transmissão definida como secundária recebe, no eixo de entrada, o torque advindo da CVT. Em seguida, o torque é transmitido para um eixo intermediário por meio de um primeiro par de engrenagens e posteriormente, o torque é transmitido para o eixo final através de um segundo par de engrenagens, conforme, Fig. 1. A Tabela 1 apresenta as relações de transmissão fixas definidas para a caixa de redução.

Assim, segundo a metodologia de fluxo de potência, o equacionamento aplicado à caixa redutora, passa a ser:

$$T_{cx} = i_{red1}i_{red2}T_{CVT} \quad (8)$$

$$\omega_{cx} = i_{red1}i_{red2}\omega_{roda} \quad (9)$$

Onde,  $T_{cx}$  e  $\omega_{cx}$  são definidos como torque de saída e velocidade angular de saída da caixa de redução, respectivamente,  $i_{red1}$  refere-se à redução do primeiro par de engrenagens e  $i_{red2}$  refere-se à redução do segundo par de engrenagens. Considerando um rendimento ( $\eta$ ) de 85% do sistema de transmissão e que não haja redução de torque nos semieixos, tem-se que o torque a chegar no eixo trator é dado é dado por  $T_{roda} = 0,85T_{cx}$ . Um esquema do motor e trem de força do veículo utilizado é verificado na Fig. 2.

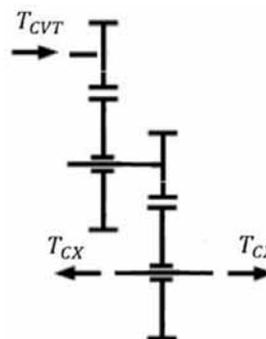


Fig. 1 – Fluxo de Potência caixa redutora de engrenagens.

Tab 1: Reduções dos pares de engrenagens

Par de Engrenagem	Relação de Transmissão
1	3,18:1
2	3,18:1

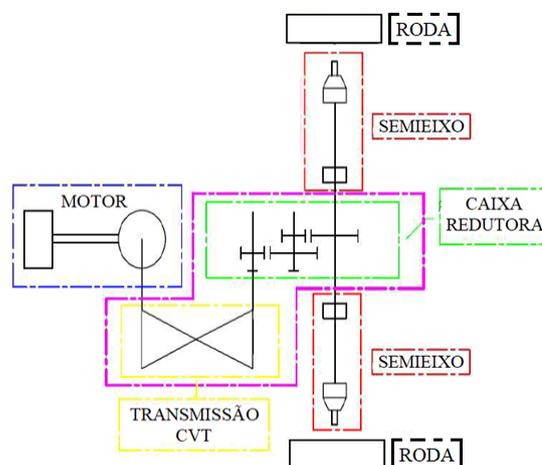


Fig. 2 – Esquema da linha de propulsão utilizada.

## 2.2 Modelagem de pneus

Ao chegar às rodas, o torque desenvolvido deve ser convertido em força de tração de modo a fornecer propulsão ao veículo. Dessa forma, diversos modelos físico-matemáticos foram desenvolvidos no intuito de fornecer uma aproximação mais fiel ao valor da força trativa.

Os modelos, Fórmula Mágica de Pacejka e Teoria de Julien são adotados neste trabalho e consideram o deslizamento longitudinal. Efêito este presente quando o pneu é submetido ao torque na roda trativa, dando origem a uma força de tração na interface de contato entre o pneu e o solo, provocando assim uma compressão na região anterior da região total de contato [1, 2, 13].

Dessa forma, a distância percorrida pelo pneu se torna menor que a desenvolvida quando ele se encontra em rolamento puro [3]. Esse fenômeno recebe o nome de deslizamento [1, 2, 4, 13]. O deslizamento longitudinal ( $i$ ) é definido como:

$$i = \left(1 - \frac{v_v}{r_e \omega_{roda}}\right) * 100\% \quad (10)$$

Onde  $v_v$  é definido como velocidade longitudinal do veículo,  $r_e$  o raio estático da roda e  $\omega_{roda}$  a velocidade angular da roda.

Como forma de representar o fenômeno físico de interação entre pneu e solo, foram desenvolvidos modelos de previsão deste comportamento. Dentre eles destacam-se o Modelo de Pacejka e a Teoria de Julien.

O Modelo de Pacejka é capaz de produzir curvas próximas aos dados experimentais, além de descrever a variação da carga vertical sobre os pneus, bem como os efeitos de diferentes condições do piso [17, 18, 19]. A fórmula geral (Eq. 11) que define o modelo pode ser utilizada no cálculo da força longitudinal, força lateral e momento de auto alinhamento, sendo composta por sete parâmetros (A, B, C, D, E,  $s_v$  e  $s_h$ ) os quais variam para cada uma das aplicações desejadas [14, 15, 17]. Neste trabalho é abordado o cálculo da força longitudinal.

$$y(x) = D \operatorname{sen}\{C \arctan[Bx - E(Bx - \arctan(Bx))]\} + s_v \quad (11)$$

Onde:

$$x = X + s_h \quad (12)$$

$$Y(X) = y(x) + s_v \quad (13)$$

Onde para a força longitudinal,  $i$  é o deslizamento longitudinal, variando entre  $0 \leq X \leq 100$ . A Tabela 2 apresenta os parâmetros que definem o equacionamento geral da Fórmula Mágica.

**Tab 2:** Parâmetros da fórmula mágica

Parâmetros
$Y(X) = F_x$
$X = i$
$\mu = b_1 W + b_2$
$D = \mu W$
$C = b_0$
$BCD = (b_3 W^2 + b_4 W) \exp(-b_5 W)$
$E = (b_6 W^2 + b_7 W + b_8)(1 - b_{13} \operatorname{sn}g(i + s_h))$
$B = BCD / CD$
$s_h = b_9 W + b_{10}$
$s_v = b_{11} W + b_{12}$

**Tab 3:** Coeficientes da fórmula mágica

Coeficientes
$b_0 = 1,4$
$b_2 = 0,9$
$b_4 = 0,3$
$b_{10} = 10$
$b_{1,3,5...13} = 0$

Onde  $W$  é a carga vertical sobre cada roda trativa. Os coeficientes  $b_n$  são estimados de acordo com [2] e são apresentados na Tabela 3.

Diferente da Fórmula Mágica que pode ser utilizada para o cálculo da força de tração, força lateral e do momento de auto alinhamento, o equacionamento da Teoria de Julien somente é aplicado para o cálculo da força de tração [2].

Nesse método é assumida a presença de duas regiões que definem a interface de interação pneu-solo, denominadas região de adesão e região de escorregamento [2, 3].

A primeira é dependente das propriedades elásticas do pneu e a segunda, além disso, é dependente ainda das propriedades da interface pneu-solo. A força trativa total ( $F_x$ ) desenvolvida é dada pela Eq. 14 e é dependente de coeficiente de aderência ( $\mu_p$ ), carga vertical sobre cada roda trativa ( $l$ ), comprimento total da região de interface rigidez tangencial do pneu ( $k$ ) deslizamento longitudinal ( $i$ ) variando entre  $0 \leq i \leq 1$  e o coeficiente  $\lambda$ , dado pela Eq. 15.

$$F_x = \mu_p W - \frac{\lambda (\mu_p W - lk\lambda i)^2}{2l^2 k \lambda i} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{\mu_p W + \sqrt{2(1 - \mu_s / \mu_p) \mu_p W l^2 k}}{lk} \quad (15)$$

Onde,  $\mu_s$  é o coeficiente de escorregamento do pneu.

Foram adotados os valores de  $\mu_p = 0,8$ ,  $\mu_s = 0,75$  e  $k = 3930000$  kN/m<sup>2</sup>, baseados em [2].

## 3. EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

O motor e o sistema de transmissão, quando operantes, possuem o objetivo de promover propulsão ao veículo (força trativa), de modo a vencer as resistências impostas ao seu movimento [1, 4, 20]. Dessa forma, de modo a promover maior fidelidade ao modelo computacional, são consideradas neste trabalho, a resistência aerodinâmica, resistência ao gradiente e a resistência ao rolamento.

A Resistência Aerodinâmica deve-se ao arrasto provocado pela passagem do ar sobre o veículo [3, 20]. Devido ao fato de a resistência aerodinâmica ser um movimento complexo, um modelo semiempírico é comumente utilizado.

$$R_A = \frac{1}{2} c_d \rho A v_v^2 \quad (16)$$

Onde,  $c_d$  é denominado coeficiente de arrasto aerodinâmico, e é definido com o valor de 1,1 para o veículo utilizado. A densidade do ar,  $\rho$ , é assumida como igual e constante a

1,255 kg/m<sup>3</sup>,  $A$  é a área frontal do veículo (0,98 m<sup>2</sup>) e  $v_v$  é a velocidade do veículo (em m/s).

Uma força paralela e contrária ao movimento, agindo no centro de gravidade do veículo surge durante a subida de um aclave, sendo caracterizada por ser uma componente da força peso [4]. Essa força é denominada Resistência ao Gradiente ou Aclive ( $R_g$ ).

$$R_g = W_t \text{sen}(\alpha) \quad (17)$$

Onde,  $W_t$  é o peso total do veículo e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da pista.

Quando a roda está em repouso, a distribuição de tensão encontra-se distribuída uniformemente sobre a ela. No entanto, quando o movimento da roda começa a se fazer presente, essa distribuição deixa de se comportar de maneira uniforme, de modo a surgir uma força contrária ao movimento denominada força de resistência ao rolamento ( $R_R$ ), a qual pode ser determinada por meio de um fator de resistência ao rolamento ( $f_{RR}$ ), proporcional ao peso total do veículo,  $W_t$ .

$$R_R = f_{RR} W_t \quad (18)$$

O fator de resistência ao rolamento ( $f_{RR}$ ) é influenciado por inúmeros fatores, como temperatura, material, pressão interna dos pneus bem como a velocidade do veículo [2, 3, 4]. Dessa forma, considerando um pneu de 0,3 m trafegando em asfalto seco e com pressão interna próxima à 20 psi (69,5 kPa), têm-se o valor de 0,05 para esse fator [2].

Dessa forma a equação de movimento da roda é apresentada a seguir.

$$J_{Roda} \dot{\omega} = T_{Roda} - F_x r_d - R_R r_d \quad (19)$$

Onde,  $J_{Roda}$  é o momento de inércia do conjunto da roda,  $\dot{\omega}$  é a aceleração longitudinal,  $T_{Roda}$  é o torque dado na roda,  $F_x$  a força trativa, a resistência ao rolamento e o raio dinâmico da roda.

Assim, para o veículo em estudo, a equação de movimento contempla a diferença entre a força trativa ( $F_x$ ) e a soma das resistências ao movimento ( $F_R$ ).

$$m_t \ddot{x} = F_x - R_a - R_g - R_R = F_x - F_R \quad (20)$$

Onde  $m_t$  é a massa total do veículo e  $\ddot{x}$  a aceleração longitudinal do veículo.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISE

Para a comparação entre os modelos, é utilizado um veículo leve com demais propriedades dispostas na Tabela 4. Considera-se que ele esteja em todo o tempo de simulação em WOT, ou seja, com a borboleta do acelerador aberta ao máximo. Além disso, considera-se uma distribuição de 55% da carga sobre o eixo traseiro e 45% sobre eixo dianteiro e que o veículo trafega em um terreno constituído de asfalto seco. Dessa forma, a modelagem desenvolvida em diagrama de blocos é apresentada na Fig. 3.

Primeiramente é realizado um estudo considerando uma pista reta, com ângulo de aclive igual a zero.

A hipótese para o sistema de transmissão primária CVT é a da hipérbole de tração ideal. Dessa forma, a Fig. 4 apresen-

ta a evolução da relação de transmissão da CVT em função do tempo, onde pode-se notar o comportamento hiperbólico dessa curva, característico da modelagem empregada. Em aproximadamente 2,5 s, verifica-se uma mudança (cume) na curva apresentada devido ao emprego das modelagens de pneus adotadas.

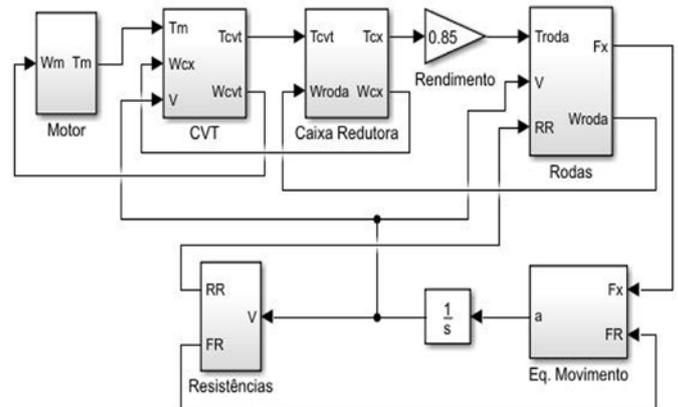


Fig. 3 – Diagrama de blocos do driveline utilizado.

Tab 4: Outras propriedades do veículo

Parâmetro	Valor
Massa	320 kg
Raio estático do pneu	0,30 m
Momento de inércia do conjunto roda-pneu	1,5 kg.m <sup>2</sup>

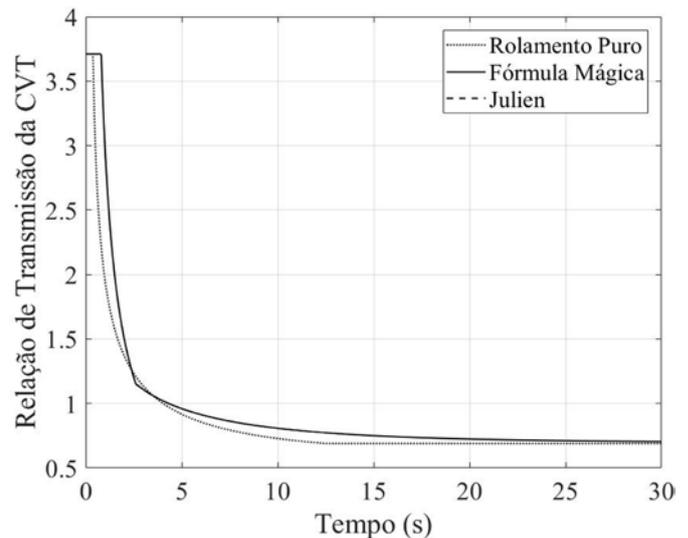


Fig. 4 – Relação de transmissão x tempo (s).

Como forma de comprovar tal afirmação, foi realizada a modelagem de pneus em rolamento puro, e notou-se a ausência desse cume. Além disso, verificou-se que a curva de rolamento puro se encontrava abaixo da curva que engloba os modelos da Fórmula Mágica e Julien, visto que é uma modelagem ideal e não considera a presença de deslizamento longitudinal. Dessa forma, mais rapidamente a relação de transmissão mínima foi atingida.

As curvas para ambos modelos de pneu comportaram-se de forma muito semelhante, tendo como limites da curva os valores de máxima (3,71:1) e mínima (0,69:1) relação fornecida pela CVT.

Verifica-se na Fig. 5 que as curvas de velocidade do veículo, tanto para a Fórmula Mágica, como para a Teoria de Julien, se comportaram de maneira que as curvas se confun-

diram no intervalo de tempo apresentado. A velocidade alcançada pelo veículo trafegando em uma pista sem inclinações foi de aproximadamente 53 km/h, valor este comumente encontrado para veículos com estas características, os quais são empregados na competição Baja SAE Brasil, em que a velocidade de veículos dessa categoria encontram-se na faixa entre  $35 \leq v \text{ (km/h)} \leq 53$  [21].

As modelagens adotadas levam em consideração a presença de deslizamento na interface pneu-solo, a qual pode levar a uma velocidade angular da roda, mas sem velocidade linear da mesma (deslizamento 100%), durante o movimento de aceleração.

Pode-se notar na Fig. 6 que, para ambos os modelos de pneu, o deslizamento máximo adquirido foi de aproximadamente 85%, o qual diminuiu com o tempo, devido ao fato da velocidade linear do veículo começar a se fazer presente e a força de tração começar a diminuir com o tempo (Fig 7).

As curvas da força trativa se comportaram de maneira muito semelhante. No entanto, devido às modelagens serem diferentes e a modelagem da Fórmula Mágica ser de caráter bastante empírico, sem muitos parâmetros com real significado físico, uma maior discrepância pôde ser observada nos instantes iniciais, o que pode ser corroborado pela Fig. 8, onde é apresentada a variação da força trativa em função do deslizamento longitudinal.

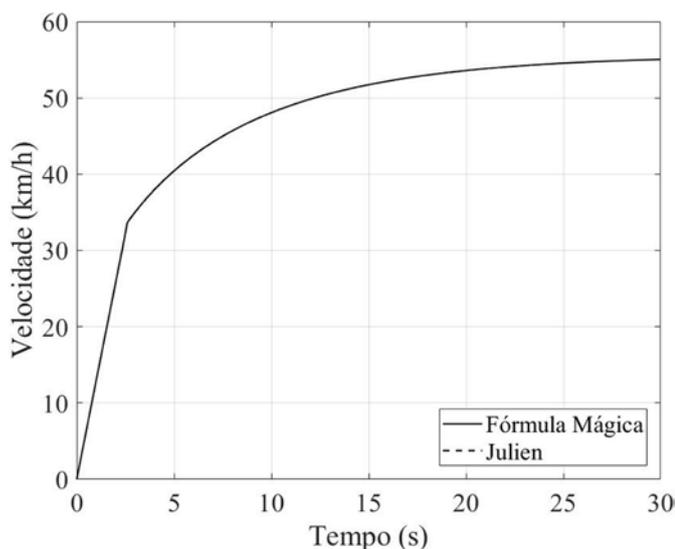


Fig. 5 – Velocidade do veículo x tempo (s).

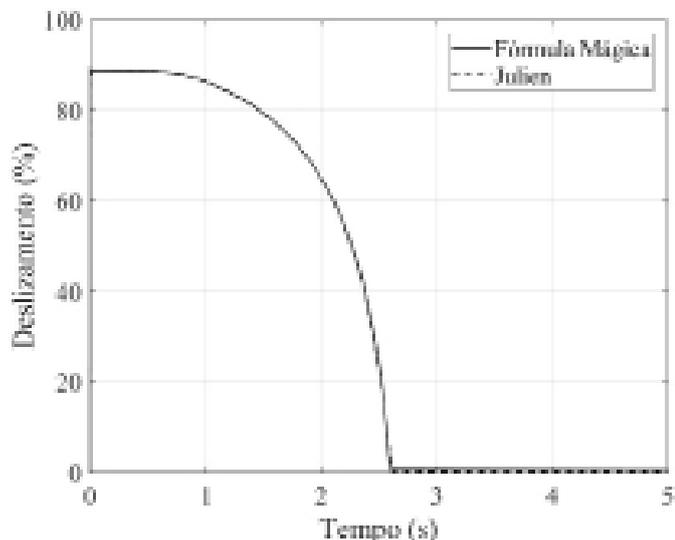


Fig. 6 – Deslizamento longitudinal (%) x tempo (s).

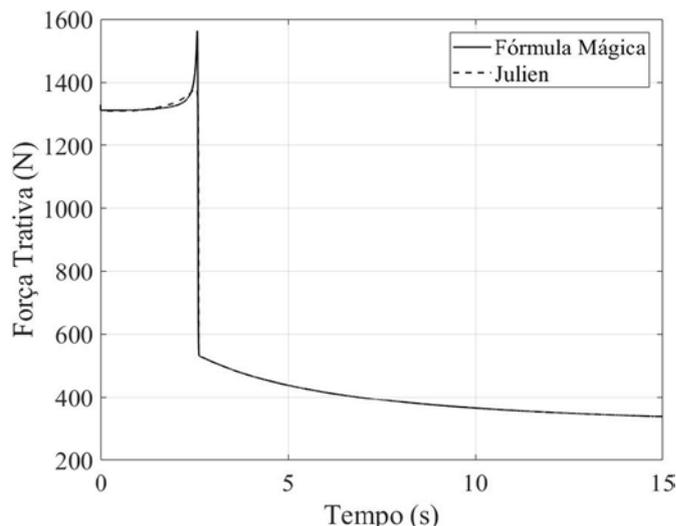


Fig. 7 – Força trativa (N) x tempo (s).

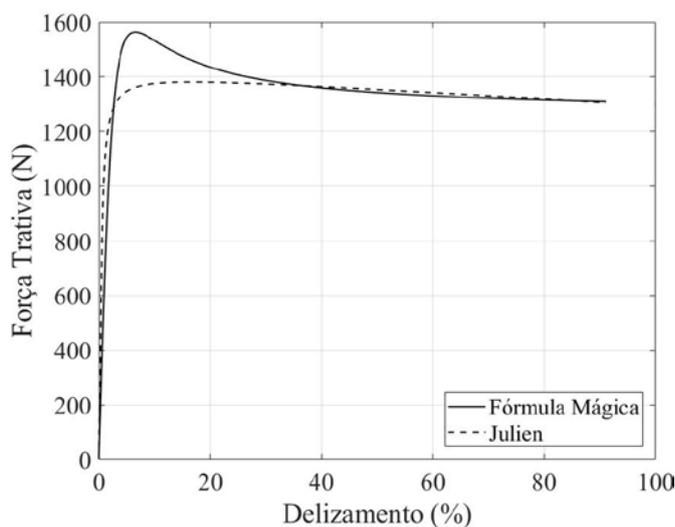


Fig. 8– Força trativa (N) x deslizamento longitudinal (%).

A seguir são apresentados os resultados variando-se os ângulos de aclave da pista. Para isso, foram realizados quatro testes, para os quais foi definido que após 5 s, o veículo sobe um aclave de 5 e 10 graus de inclinação (0,087 rad e 0,175 rad, respectivamente), como primeiro e segundo testes.

Como terceiro teste foi definido também que após 5 s, o veículo desceria uma pista com inclinação de 5 graus (0,087 rad) e como quarto teste que o veículo desceria uma pista com 10 graus de inclinação (0,175 rad). Vale ressaltar que a todo momento o veículo encontrou-se em WOT, ou seja, com a borboleta do acelerador em sua abertura máxima.

Os resultados estão apresentados nas figuras a seguir, onde primeiramente nota-se na Fig. 9 a evolução da relação de transmissão da CVT em função do tempo. Verificou-se que com o aumento do aclave da pista (curvas A e B), ocorreu o aumento da relação de transmissão devido ao fato de o veículo tentar a retomada de velocidade longitudinal, a qual foi reduzida devido ao aumento da resistência ao gradiente com o aumento do aclave. Dessa forma, a relação mínima de transmissão (0,69:1) não foi atingida para ambos os casos de aclives.

Nota-se ainda que quanto maior o declive, mais rapidamente a relação mínima de transmissão foi atingida (curvas C e D). Isso se deve ao fato de acontecer uma mu-

dança repentina da velocidade do veículo, a qual aumenta de forma drástica visto que o condutor a todo momento pisa no acelerador, o que pode ser corroborado pela Fig. 10, onde verifica-se que quanto maior o aclave, maior redução tem-se na velocidade longitudinal do veículo e ainda que, quanto maior o declive, maior a velocidade alcançada pelo carro. Além disso, da mesma forma que a Fig. 9, as curvas geradas pela Fórmula Mágica e pela Teoria de Julien confundem-se, mostrando a convergência entre os resultados apresentados.

A Fig. 11 apresenta os resultados para a força trativa desenvolvida na interface pneu-solo na presença de aclave e declive na pista. Analisando em conjunto com a Fig. 10, nota-se que com o aumento da velocidade longitudinal, uma menor força de tração foi desenvolvida. Além disso, nota-se que com o aumento do aclave, uma maior força de tração foi requerida, visto que a velocidade longitudinal diminuiu. Da mesma forma, com o aumento do declive, uma menor força trativa foi requerida, devido ao fato de a velocidade longitudinal aumentar consideravelmente. Assim, constata-se que a velocidade longitudinal e a força trativa são grandezas inversamente proporcionais.

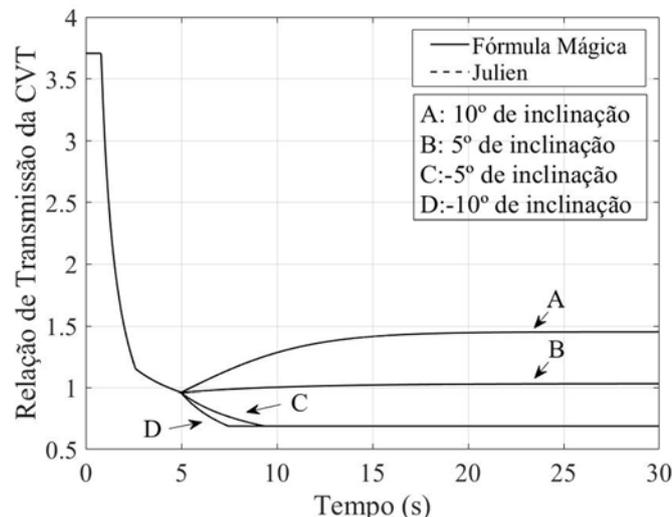


Fig. 9 – Relação de transmissão x tempo (s) para os quatro testes realizados.

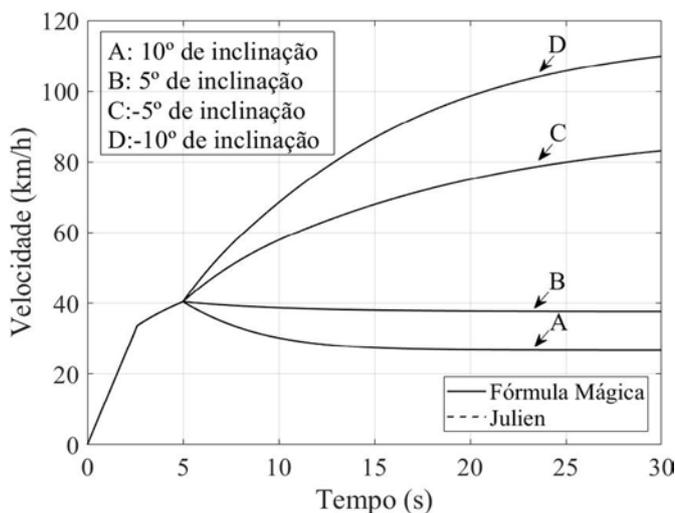


Fig. 10 – Velocidade do veículo x tempo (s) para os quatro testes realizados.

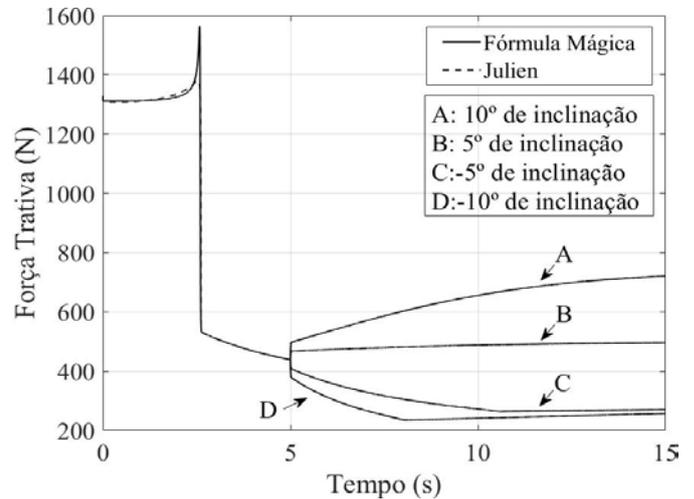


Fig. 11 – Força trativa (N) x tempo (s) para os quatro testes realizados.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho descreve um modelo computacional desenvolvido utilizando modelagem por fluxo de potência, para a previsão do comportamento da dinâmica longitudinal de um veículo leve monotorripulado de quatro rodas trafegando em um piso rígido. Para isso, fez-se sua modelagem, utilizando o sistema de transmissão primária CVT e uma caixa redutora de engrenagens, vinculadas a semieixos e rodas. Nessas últimas, duas diferentes modelagens de pneus foram utilizadas: Fórmula Mágica e Teoria de Julien.

As modelagens de pneus foram utilizadas para melhor entendimento do comportamento da dinâmica longitudinal do veículo, devido ao fato de melhor caracterizar a interface de contato pneu-solo.

Os resultados gerados por ambos os modelos são comparados por meio dos gráficos de velocidade e força trativa em função do tempo e esta última ainda em função também do deslizamento longitudinal, onde variando-se ainda a inclinação da pista, puderam ser gerados resultados satisfatórios do modelo proposto.

Dessa forma, os resultados serviram como validação da viabilidade da utilização do modelo da dinâmica longitudinal utilizado, bem como das duas metodologias apresentadas, na modelagem de pneus em pisos rígidos, podendo ser utilizado como base para futuros testes físicos experimentais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. N. Jazar. Vehicle dynamics: theory and application. Springer: New York, 2008.
- [2] J. Y. Wong. Theory of ground vehicles. 4ª ed, John Wiley & Sons: New York, 2008.
- [3] E. D. R. Lopes. Análise do comportamento dinâmico de um veículo leve 4 x 4 com sistema de controle de tração. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
- [4] T. D. Gillespie. Fundamental of vehicle dynamics. SAE: Warrendale, 1992.
- [5] G. Rill. Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modelling. CRC Press: Boca Raton, 2012.
- [6] H. Naunheimer et al. Automotive transmissions. 2ª ed. Springer: New York, 2011.
- [7] D. A. Crolla. Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body. Butterworth-Heinemann: Burlington, 2009.
- [8] D.C. Karnopp et al. System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems. 4ª ed. John Wiley & Sons: Hoboken, 2006.
- [9] Bosch. Manual de Tecnologia Automotiva. Tradução da 25ª edição alemã. São

Paulo: Edgar Blücher, 2005.

- [10] M. S. Gomes. Contribuição ao controle de tração aplicado a veículos terrestres em solos deformáveis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [11] A. A. Albuquerque. Caracterização da resposta dinâmica de uma CVT por polias expansíveis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- [12] A. Sanchawat, R. Agarwal, Chandrasekar, R. and Baskar P. Simulation of a Drivetrain of a Vehicle comprising Continuously Variable Transmission, International Journal of Engineering and Technology, vol. 5 nr. 3, 2013, pg 3041-4050.
- [13] W. F. Milliken and D. L. Milliken. Race Car Vehicle Dynamics. SAE: Warrendale, 1995.
- [14] H. B. Pacejka. Tyre Mechanics and Vehicle Dynamics. 2ª ed. Butterworth-Heinemann: Burlington, 2006.
- [15] M. Blundell and D. Harty. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. Butterworth-Heinemann: Oxford, 2004.
- [16] A. López, P. Vélez and C. Moriano. Aproximations to the Magic Formula, International Journal of Automotive Technology, vol. 11 nr. 2, 2010, pg 155-166.
- [17] B. Maclaurin. A skid steering model using the Magic Formula, Journal of Terramechanics, vol. 48 nr. 1, 2011, pg 247-263.
- [18] Y. Babulal, M. J. Stallmann and P. Schalk Els. Parameterisation and modelling of large off-road tyres for on-road handling analyses, Journal of Terramechanics, vol. 61 nr. 1, 2015, pg 77-85.
- [19] C. Canudas-De-Wit et al. Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction, Vehicle System Dynamics, vol. 39, nr. 1, 2003, pg 189-226.
- [20] M. Short, M. J. Pont and Q. Huang, Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics, Embedded Systems Laboratory, University of Leicester, 2004, Tech. Rep.
- [21] SAE. 24ª Competição Baja SAE BRASIL. 2018. Disponível em: <[https://bajasaebrazil.online/prova.php?id=18BR\\_VEL](https://bajasaebrazil.online/prova.php?id=18BR_VEL)>. Acesso em: 28 de Mar. 2018.

# ESTUDO COMPARATIVO DOS TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE EM POLITETRAFLUORETILENO (PTFE) PARA APLICAÇÃO EM REGENERAÇÃO ÓSSEA GUIADA (ROG)

Paula A M C Gomes(1)\*, Carlos N Elias  
Instituto Militar de Engenharia (IME) –  
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
\*pcairogomes@gmail.com

**RESUMO:** Amostras de politetrafluoroetileno (PTFE) foram tratadas por duas técnicas de exposição: ao plasma com gás não polimerizável de argônio (Ar) em um reator a plasma com arranjo capacitivo dos eletrodos excitados por radiofrequência (rf); e radiação ultravioleta (UV) numa câmara escura. O objetivo foi investigar os efeitos dos tratamentos nas propriedades superficiais do substrato, verificar a variação da rugosidade e quantificar a molhabilidade. Os parâmetros de rugosidade foram quantificados no rugosímetro e o ângulo anatômico foi medido por meio do goniômetro de ângulo de contato. Como resultado, as caracterizações demonstraram que apenas a técnica de tratamento superficial por plasma altera as características superficiais do PTFE.

**PALAVRAS-CHAVE:** Superfície. Ultravioleta. Tratamento. Plasma. Politetrafluoretileno (PTFE).

**ABSTRACT:** Polytetrafluoroethylene (PTFE) samples were treated by two exposure techniques: to plasma with argon (Ar) unpolymerizable gas in a plasma reactor with capacitance arrangement of the electrodes excited by radiofrequency (rf); and ultraviolet (UV) radiation in a darkroom. The objective was to investigate the effects of the treatments on the surface properties of the substrate, to verify the variation of the roughness and to quantify the wettability. The roughness parameters were quantified in the rugosimeter and the anatomical angle was measured by means of the contact angle goniometer. As a result, characterizations have shown that only the plasma surface treatment technique alters the surface characteristics of PTFE.

**KEYWORDS:** Surface. Ultraviolet. Treatment. Plasma. Polytetrafluoroethylene (PTFE)

## 1. INTRODUÇÃO

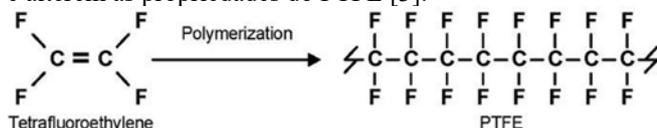
As membranas são classificadas como absorvíveis e não absorvíveis em Regeneração Óssea Guiada (ROG). As membranas de celulose e de e-PTFE (politetrafluoretileno expandido) classificadas como não absorvíveis são as mais utilizadas nos procedimentos regenerativos. A membrana ideal deve ser inerte, mecanicamente resistente, biocompatível, semipermeável, esterilizável, não alergênica e não cancerígena. Caso uma dessas características não esteja presente na membrana, a regeneração dos defeitos periimplantares pode ser comprometida [1,2].

A fim de melhorar as propriedades mecânicas, a biocompatibilidade e a durabilidade modificações têm sido feitas nas membranas [4].

O politetrafluoretileno (PTFE) é um polímero amplamente estudado no campo biomédico e da engenharia para ser utilizado como biomaterial [3].

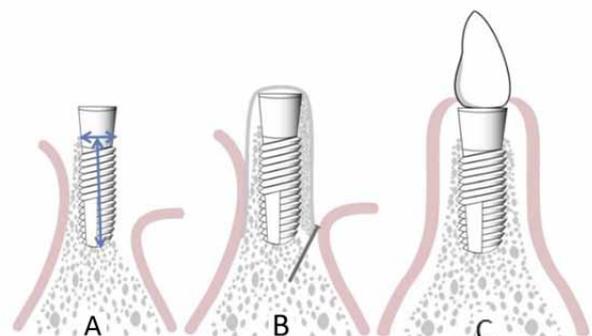
Ainda que seja uma área pouco pesquisada, a influência da rugosidade e de heterogeneidades das superfícies sólidas na molhabilidade têm sido origem de diversos estudos durante os últimos anos [4,5,6].

O estudo a seguir foi desenvolvido no intuito de averiguar as alterações ocorridas na superfície do material. Nesse contexto, é importante a investigação da modificação causada por tratamentos com plasma de argônio (Ar) e ultravioleta (UV) [2]. Por exemplo, tal tratamento com plasma pode oferecer outros meios que controlem a modificação da superfície e alterem as propriedades do PTFE [3].



**Fig. 1** - Reação de polimerização do politetrafluoroetileno (PTFE) a partir do seu monômero (CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>)<sub>n</sub>.

De acordo com Miyamoto (2012), a membrana de PTFE é eficaz no auxílio de tais regenerações ósseas pois em tese elimina o risco de contaminações, aumenta a estabilidade e o controle no momento de aplicá-las no defeito, reduzindo os efeitos nocivos desse tipo de intervenção [8].



**Fig. 2** - (a) Volume adequado do osso (altura e largura) é um pré-requisito para o tratamento com implante bem-sucedido. (b) Membrana e enxerto ósseo são colocados como substituto ósseo para acelerar a formação óssea. (c) Após a formação do novo osso, a prótese final é colocada.

Neste trabalho, foram realizadas modificações na superfície do PTFE por meio do ultravioleta (UV) e tratamento por plasma, visando investigar os efeitos nas propriedades superficiais do substrato. Com isso, pretende-se analisar a rugosidade e a molhabilidade das amostras de PTFE para possíveis aplicações em cirurgias buco-maxilo-facial.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras comerciais de PTFE com dois acabamentos, ambos na forma de filme: o primeiro é o politetrafluoretileno denso (d-PTFE), laminado, que recebeu a denominação “barreira”; e o segundo, politetrafluoretileno

expandido (e-PTFE), o qual foi denominado “membrana”. Ambas as amostras foram fabricadas pela empresa Zhenjiang Chunhuan Sealing Materials Co. Ltda., do grupo Chunhua, Cidade de Yangzhong, Província de Jiangsu, China.

A superfície das amostras de PTFE foi analisada da maneira como foi recebida, comparando-a com as propriedades após os tratamentos de superfície por UV e plasma.

Cumpriram-se as seguintes etapas: envelhecimento em câmara ultravioleta e modificação por plasma de argônio (Ar); quantificação da rugosidade e molhabilidade em um goniômetro.

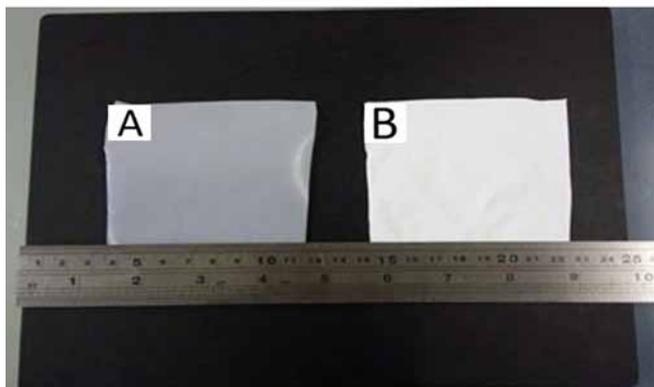


Fig. 3 - Imagens da (a) barreira e (b) membrana de PTFE como recebidas, respectivamente.

## 2.1 Tratamentos Superficiais Estudados

### 2.1.1 Tratamentos Por Exposição à Radiação Ultravioleta

As amostras de PTFE foram submetidas ao envelhecimento em uma câmara escura ultravioleta modelo SL-204, com 2 lâmpadas emissoras de raio UV (ação germicida), com comprimentos de onda de 254 e 365 nm. A membrana e a barreira foram submetidas ao envelhecimento por 24h.

### 2.1.2 Tratamentos por Plasma.

As superfícies das amostras de PTFE também foram tratadas por plasma com gás de Argônio com correntes de 32,5 e 25 mA para barreira e membrana, respectivamente, por 10 minutos. Aplicou-se uma pressão de gás de 0,05 mbar. O equipamento utilizado foi o Balzers Union, modelo FL-9496B.

## 2.2 Técnicas de caracterização Experimental

### 2.2.1 Rugosidade

Medidas de ângulo de contato foram realizadas em um goniômetro FTA 200 (FirstAngle) na membrana e na barreira de PTFE.

## 3 RESULTADO E DISCUSSÕES

Comparando ambas as técnicas, UV e plasma, percebe-se que em virtude da energia empregada e de outros fatores,

como o tempo de exposição, a corrente e a pressão interna da câmara [9] a técnica de tratamento por plasma mostrou provocar maiores mudanças de rugosidade em relação a de UV.

Para verificar a eficiência dos tratamentos de modificação da superfície das amostras barreira e membrana, foram realizados ensaios de rugosidade e de molhabilidade. Os resultados obtidos a partir das análises das amostras de PTFE, antes e após o tratamento de modificação da superfície estão na Tabela 1.

Tab 1: Resultados dos ensaios de rugosidade.

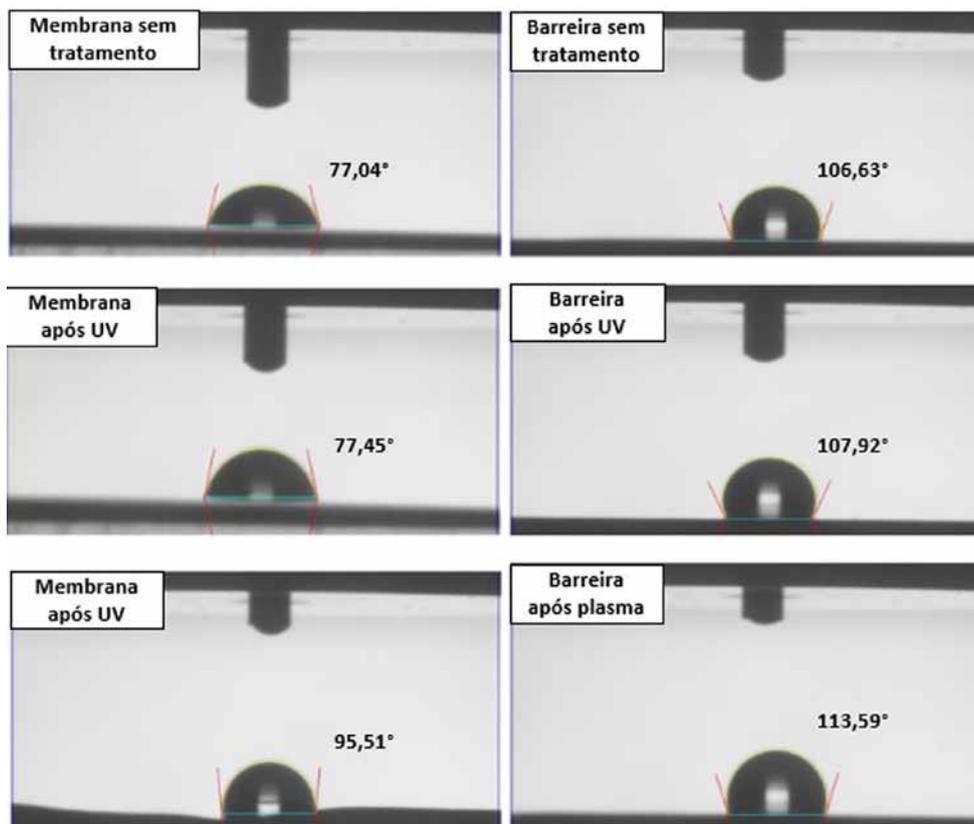
Amostra	Barreira( $\mu\text{m}$ )	Membrana( $\mu\text{m}$ )
sem tratamento	0,3001	1,0002
após 24h UV	0,3152	1,1031
após 10 min plasma	1,0002	2,7351

Com base nos resultados da Tabela 1 pode-se afirmar que antes de serem submetidas ao tratamento da superfície a amostra membrana já apresentava maior rugosidade do que a barreira. Tal fato se justifica pela maneira como o material é processado, nesse caso, laminação e extrusão, respectivamente [9,10]. Após serem submetidas ao tratamento da superfície com o UV por 24h, não houve alteração significativa na rugosidade dos materiais em comparação ao estado anterior ao tratamento.

A partir da análise da rugosidade, a expectativa era de que após o tratamento na câmara de UV o material pudesse apresentar resultados de rugosidade diferentes. Entretanto, esse tipo de tratamento de superfície não se mostrou eficiente na Barreira, uma vez que o próprio substrato já apresenta rugosidade pré-tratamento (0,3001) muito parecida com o substrato tratado (0,3152). O mesmo pode ser dito da Membrana, cuja rugosidade pré-tratamento (1,0002) também se assemelha à da amostra tratada (1,1031) [11].

As amostras foram submetidas ao tratamento com plasma por 10min pois, testadamente, em tempos maiores houve perfuração nos materiais devido à maior incidência de plasma naquela região. Após esse tratamento, foram observadas alterações nas energias superficiais (gota-material) - assim como na membrana com poros presentes na superfície [12]. Tal resultado pode ser comprovado pelos valores dos ângulos de contato, uma vez que a rugosidade aumentada no tratamento pode contribuir com a histerese do ângulo devido à presença de ar aprisionado.

O fato da amostra membrana, tanto antes como depois dos tratamentos, possuir poros na superfície do substrato graças ao processo de extrusão é um dos fatores que contribuem com a histerese do ângulo de contato. Com o decorrer do tempo, infiltrações do líquido ocorrem nos poros do substrato, o que resulta na obtenção de ângulos de contato menores do que  $90^\circ$ , indicando uma grande molhabilidade em sua superfície. Pode-se verificar, através desses ângulos, que a amostra Barreira que não possui porosidade é mais hidrofóbica que a Membrana (Figura 4), em virtude de apresentar valores de ângulos médios superiores a  $90^\circ$  [13,14,15].



**Fig. 4** - Imagens da análise de molhabilidade das amostras barreira e membrana antes e depois dos tratamentos. Na análise de ângulo de contato da gota um ponto importante a ser observado são os principais fatores que podem causar a histerese do ângulo de contato: não topográfica - causada pela rugosidade do substrato ou porosidade superficial; e não homogeneidade química devido a presença de contaminantes, segregação e inclusões na superfície do sólido [16].

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem concluir que:

- a membrana e a barreira de PTFE possuem características morfológicas diferentes, as quais podem ser associadas ao processamento (laminação e extrusão);
- as diferenças nas morfologias influenciaram nas propriedades do material, o que altera o comportamento durante o uso em aplicações para ROG;
- Após o tratamento em câmara de UV não foram observadas modificações significativas na superfície das amostras barreira e membrana, mesmo após um tempo prolongado de exposição ao UV. No entanto, notou-se uma maior influência nas propriedades superficiais utilizando tratamento por plasma de Ar. Estes resultados foram observados pelas técnicas de caracterização (rugosidade e molhabilidade);
- A partir das análises da molhabilidade na amostra membrana, o ângulo foi menor comparado ao da barreira, indicando assim uma maior molhabilidade na sua superfície. Após o tratamento por plasma, verificou-se que tanto a barreira quanto a membrana são hidrofóbicas, apresentando valores próximos ou maiores que 90°;
- A amostra membrana apresentou maior rugosidade na sua superfície, sendo assim ela seria mais indicada para o uso como biomaterial para aplicação em ROG.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GAUER, L.; Takemoto, M.; Camila, D. Regeneração óssea guiada associada a membrana de politetrafluoretileno expandido (ptfe-e). *Revista Tecnológica*, v. 3, n. 2, p. 60-67, 2015.
- [2] CAMPOS L, SIPES E. Laparoscopic hernia repair: use of a fenestrated PTFE graft with endoclips. *Surg Laparosc Endosc*. 3(1): 35-8, 1993.
- [3] JAKUS SM, SHAPIRO A, HALL CD. Biologic and synthetic graft use in pelvic surgery: a review. *Obstet Gynecol Surv*. 63(4): 253-66, 2008.
- [4] CRUZ M., Reis C.C., Silva V.C. Utilização da Allumina® (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) como filtro biológico na regeneração guiada dos tecidos. *Odontol Mod*. V18, N 5, p20. 1991.
- [5] PIRES, A.L.R., Bierhalz, A.C., Moraes, Â.M., Biomaterials: Types, Applications, And Market. *Química Nova*, 38(7): 957-971 (2015).
- [6] ZHANG, Y., Zhang, X., Shi, B., & Miron, R. J. (2013). Membranes for guided tissue and bone regeneration. *Annals of Oral & Maxillofacial Surgery*, 1(1), 10.
- [7] WADHAWAN, A. et al. Gore-tex versus resolut adapt GTR membranes with perioglas in periodontal regeneration. *Contemporary Clinical Dentistry*, v.3, n.4, p.406-411, 2012;
- [8] MIYAMOTO, I. et al. Alveolar ridge reconstruction with titanium mesh and autogenous particulate bone graft: Computed tomography-based evaluations of augmented bone quality and quantity. *Clin. Impl. Dent. Relat. Res*. v.14, n.2, p.304-31, 2012.
- [9] TSENG, D. Y., Edelman ER. J. *Biomed. Mater. Res*. 1998; 42: 188.
- [10] BADEY, J. P., Espuche E, Saga D, Chabert B. *Polymer (London)* 1996; 37: 1377.
- [11] GARBASSI F, Morra M, Occhiello E. *Polymer Surfaces from Physics to Technology*. JohnWiley: Chirchester, 1994.
- [12] WILSON, D. J.; Willians, R. L.; Pond, R. C. Plasma modification of PTFE surfaces. Part I: Surfaces immediately following plasma treatment. *Surface and Interface Analysis*, 31: 385-396 (2001).
- [13] JOLY, J.; Bazan, D.; Martorelli A. Clinical and radiographic evaluation of periodontal intrabony defects treated with GTR: A pilot study. *J. periodontol*. 2002;73: 353-354.
- [14] POMIN, E.. Efeito do tratamento a plasma do Politetrafluoroetileno (PTFE) das suas propriedades eletrostáticas e superficiais, 134p, Sorocaba, 2011.
- [15] AGOSTINHO, O. L.; Rodrigues, A. C. S.; Lirani, J. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de Dimensões. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 2004.
- [16] LAI, C. L.; Liou, R. M.; Chen, S. H.; Huang, G. W.; Lee, K. R. Preparation and characterization of plasma-modified PTFE membrane and its application in direct contact membrane distillation. *Desalination*, v. 267, p. 184-192, 2011.

# Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens

Fábio L F Faria\*, Matheus B Silva, Marcelo de M Reis, José C C Amorim  
Academia Militar das Agulhas Negras  
Rodovia Presidente Dutra Km 306 S/N, 27534-970, Resende, RJ, Brasil.  
\*fabiofaria82@gmail.com

**RESUMO:** Os danos consequentes de eventos de ruptura de barragens normalmente têm resultados catastróficos. A simulação computacional do rompimento de barragens tem como um dos parâmetros de entrada um hidrograma de ruptura. Tradicionalmente, esse hidrograma de ruptura é confeccionado a partir de equações empíricas para determinação da vazão de pico ( $Q_p$ ) e de valores de tempo de pico ( $T_p$ ) definidos em função das características da barragem e da evolução da brecha de ruptura. As diversas equações empíricas encontradas na literatura geram resultados muito discrepantes para a mesma barragem. Como alternativa à metodologia tradicional esse artigo propõe a definição do hidrograma de ruptura a partir da vazão de pico determinada através do volume escoado do reservatório para um tempo de pico ( $T_p$ ) pré-estabelecido. A metodologia proposta agiliza os cálculos e chega a resultados mais confiáveis em função da certeza topográfica do volume escoado até a cota do ponto mais baixo a jusante da ruptura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rompimento. Barragem. Hidrograma de Ruptura.

**ABSTRACT:** The dam break event usually has catastrophic results. The hydrograph of rupture is one of the inputs for a computational dam break simulation. Traditionally this hydrograph is made using empirical equations to determine the peak flow and values of peak time, these values depend on the dam characteristics and the evolution of the rupture breach. The different empirical equations found in the literature generate very different results of peak flow for the same dam. As an alternative to the traditional methodology, this article proposes the preparation of the hydrograph of rupture from the peak flow that was determined by the volume drained from the reservoir and the pre-established peak time. The proposed methodology accelerates the calculations and have reliable results, since, according to the topography, the drained volume will move to the lowest point downstream of the rupture.

**KEYWORDS:** Dam break. Rupture hydrograph

## 1. INTRODUÇÃO

Grandes barragens ultrapassam geralmente outras construções em volume e em custo, bem como em importância social e em risco. O rompimento de uma estrutura desse porte, ou de barragens de resíduos perigosos, quase sempre apresenta grandes impactos tanto materiais quanto relacionados à perda de vidas. Somente no século XX foram registrados no mundo cerca de 200 acidentes graves com barragens com altura superior a 15 metros, que causaram a morte de mais de 8.000 pessoas e deixaram outras milhares desabrigadas [1]. Os acidentes recentes de maior magnitude são as rupturas da Barragem de Sítu Gintung, na Indonésia, em março de 2009, no caso de barragens de rejeito, há o destaque negativo brasileiro das Barragens do Fundão no subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 km do município de Mariana, e da Barragem do Córrego do Feijão no Município de Brumadinho ambas no estado de Minas Gerais.

Nos estudos mais antigos, quando os conhecimentos e pesquisas sobre o assunto eram ainda bastante incipientes, admitia-se a hipótese de que o rompimento das barragens se dava de forma completa e instantânea. De acordo com [2], tal hipótese é razoável nos casos de estruturas de concreto em forma de arco ou sustentadas por contrafortes, entretanto, ela se torna inadequada quando a análise envolve o colapso de barragens de concreto tipo gravidade (concreto massa ou compactado de diversas formas) ou ainda nas barragens de aterro. Nesse caso deve ser modelada uma ruptura gradual.

Uma brecha de ruptura é caracterizada por três parâmetros: a sua configuração geométrica, as suas dimensões (nomeadamente a largura) e o tempo de ruptura, fatores que, no seu conjunto, influenciam os valores das vazões, dos níveis e dos tempos de chegada da onda de inundação às diferentes

planícies de inundação.

Atualmente reconhece-se a necessidade de se avaliar, sobretudo nos casos onde a ruptura é gradual, os efeitos gerados pela liberação dos volumes retidos de forma mais lenta, e que resultam em inundações a jusante com elevado tempo de permanência, causando danos tão importantes quanto os causados nas situações hipotéticas de ruptura instantânea.

A geometria e o tempo de abertura da brecha são parâmetros fundamentais para estimar o hidrograma que deve efluir da barragem em uma eventual ruptura. A escolha adequada destes parâmetros é de crucial importância quando se trata de barragens cuja região de estudo de jusante se encontra em distâncias consideradas pequenas, menores que 25 km. Para regiões situadas em distâncias maiores, os resultados de vazão e nível de água tendem a convergir, independentemente dos parâmetros utilizados [3].

Segundo [4], para simular o evento de ruptura, é necessário primeiramente elaborar o hidrograma da vazão efluente no momento da ruptura. As características principais a serem determinadas referem-se à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma. O hidrograma de ruptura representa graficamente a variação da vazão efluente da barragem no tempo, sendo que a vazão de pico está caracterizada no topo do hidrograma em um determinado instante.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 RUPTURA DE BARRAGENS

Barragens podem romper de forma gradual ou instantaneamente. O tipo de ruptura depende principalmente da causa da falha e do tipo da barragem. Os principais mecanismos de

rompimento são citados a seguir:

- ruptura da fundação (fratura da rocha, deslizamento de camadas, etc.);
- overtopping ou galgamento, normalmente por um evento hidrológico extremo;
- piping ou ruptura por entubamento, em função de falhas no corpo da barragem.

As falhas ocorridas nas fundações das barragens são consideradas falhas estruturais oriundas das acomodações geológicas quando da saturação do material da fundação por infiltração [5]. O terreno sobre o qual a barragem está e a ligação da barragem ao terreno podem deslizar sob o efeito das acomodações geológicas que resultam do enchimento do reservatório ou da saturação do material da fundação por infiltração. Outra ameaça às fundações são as cheias extraordinárias que causam o galgamento, quando a água que passa sobre a barragem provoca a erosão da base da estrutura.

Segundo [2], o piping corresponde ao fenômeno de erosão interna de uma massa de solo, iniciada sob condições de gradiente hidráulico crítico, provocando a abertura progressiva de canais dentro da massa de solo em sentido contrário ao do fluxo d'água. O processo erosivo provoca a remoção de partículas do interior do solo ou da estrutura, formando "tubos" vazios que resultam em colapsos e escorregamentos laterais do terreno. Fatores determinantes como o grau de compactação do solo, o adequado dimensionamento do sistema de drenagem interna do maciço e o monitoramento de parâmetros geotécnicos são importantes para evitar o processo de formação de piping em barragens de terra [6].

A Figura 1 mostra o mecanismo de progresso do piping, passando à formação de entubamento concentrado no maciço até o progresso e o alargamento na forma de brecha, com consequente ruptura da barragem.

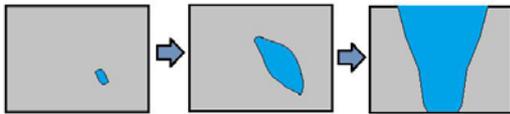


Fig 1: Formação de brecha por piping

O overtopping corresponde ao fenômeno de galgamento ou transbordamento da barragem, ou seja, a passagem das águas sobre a estrutura da mesma, resultado da chegada de uma onda de cheia excepcional ou de uma falha operacional do reservatório. Este fenômeno está normalmente associado a um evento hidrológico extremo, onde o volume do reservatório e as estruturas de descarga da barragem não são suficientes para armazenar e extravasar a quantidade de água [7]. Pode-se citar ainda como situações que levam ao galgamento de uma estrutura de barramento problemas operacionais oriundos do mau funcionamento de comportas e válvulas de descarga e obstrução das mesmas por material de assoreamento.

A Figura 2 descreve a formação da brecha por overtopping na sequência: início em um ponto mais fraco, brecha em forma de "V", aprofundamento da brecha, aumento lateral por erosão seguida de ruptura.



Fig 2: Formação de brecha por overtopping

Além dos mecanismos de ruptura citados também podem ser considerados outros mecanismos como: sismos, terremotos, falhas de projeto, construção e operação bem como ações de guerra.

## 2.2 HIDROGRAMA DE RUPTURA

Segundo [4], para simular o evento de ruptura, é necessário primeiramente elaborar o hidrograma da vazão efluente no momento da ruptura. As características principais a serem determinadas referem-se à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma. O hidrograma de ruptura representa graficamente a variação da vazão efluente da barragem no tempo, sendo que a vazão de pico está caracterizada no topo do hidrograma em um determinado instante. Pelas Figuras 3, 4 e 5 observa-se que esses hidrogramas são construídos a partir dos valores de vazão de pico ( $Q_p$ ) e do tempo de pico ( $T_p$ ).

Para obter a vazão de pico efluente devido à ruptura, vários autores estabeleceram expressões matemáticas relacionando a máxima vazão de descarga com características da barragem (altura do barramento, comprimento da crista, volume do reservatório, etc.). A Tabela 1 apresenta algumas das equações utilizadas para o cálculo da vazão de pico.

Tab 1: Diferentes formulações matemáticas para a determinação da vazão de pico [4]

AUTOR	VAZÃO DE PICO	CARACTERÍSTICA
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	$Q_p = 7,683H_d^{1,909}$	Equação baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa.
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_dV)^{0,48}$	Equação baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura.
Saint-Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g} V_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Equação desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
Schoklitsch (1917) apud ICOLD (1998)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_d}{B_b}\right)^{1/2} B_b \sqrt{g} V_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Equação considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem.
Bureau of Reclamation (1982) apud Bureau of Reclamation (1987)	$Q_p = 19H_d^{1,85}$	Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da ruptura.
Vertedor de Soleira Espessa (Singh, 1996)	$Q_p = 1,7B_b H_b^{3/2}$	De acordo com Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor retangular de soleira espessa.
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	$Q_p = 1,7B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[ \frac{1,94A_s}{(B_b \sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$	Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t).

Onde:  $Q_p$  = vazão máxima defluente da barragem em ruptura ( $m^3/s$ );

$V$  = volume máximo do reservatório para o nível de água máximo ( $m^3$ );

$A_s$  = área do reservatório para o nível de água máximo ( $m^2$ );

$B_d$  = largura da barragem (m);  
 $H_d$  = altura da barragem (m);  
 $B_b$  = largura final da brecha (m);  
 $H_b$  = altura final da brecha (m);  
 $Y_{\text{médio}}$  = profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m); e  
 $T_p$  = tempo para desenvolvimento da brecha (s).

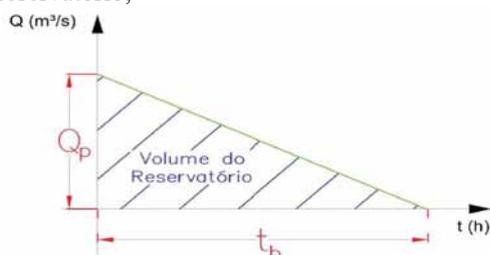
O tempo de pico está relacionado ao tempo de evolução da brecha e normalmente é definido a partir de tabelas relacionadas as características das barragens e do tipo da brecha, baseado em casos históricos similares ou formulações mais robustas que consideram o desenvolvimento da brecha com base em princípios da hidráulica, do transporte de sedimentos e da mecânica dos solos [11]. A Tabela 2 apresenta um resumo de parâmetros propostos, onde H corresponde à altura da barragem e L ao comprimento de crista da mesma.

**Tab 2:** Possíveis valores para as características das brechas [12]

Tipo de Barragem	Comprimento da brecha (Bb)	Componente horizontal da declividade dos taludes da brecha (H):1V	Tempo de ruptura $t_f$ (horas)	Referência
Concreto Gravidade	Blocos monolíticos	Vertical	0,1 a 0,5	USACE (1980)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,3	FERC (1988)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,2	Fread (2006)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,3	ELETROBRÁS (2003)
Concreto em arco	L	Declividade do vale	<0,1	USACE (1980)
	L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	FERC (1988)
	0,8L a L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	Fread (2006)
	L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	ELETROBRÁS (2003)
Terra/Enrocamento	(0,5 a 0,3) x H	Entre 0 e 1	0,5 a 4,0	USACE (1980)
	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	FERC (1988)
	(2,0 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	Fread (2006)
	(2,0 a 4,0) x H	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	ELETROBRÁS (2003)

De posse da vazão de pico, tempo de pico e tempo de base, pode-se confeccionar o hidrograma de ruptura. De acordo com [8] pode-se utilizar os seguintes tipos de hidrogramas para simulação da propagação da onda de cheia:

1) *Hidrograma Simplificado* é o método mais simples, em que um hidrograma de ruptura é obtido a partir das estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório. Pode adequar-se para o caso de ruptura instantânea, possuindo forma triangular, sendo que a área do hidrograma deve igualar-se com o volume total do reservatório;

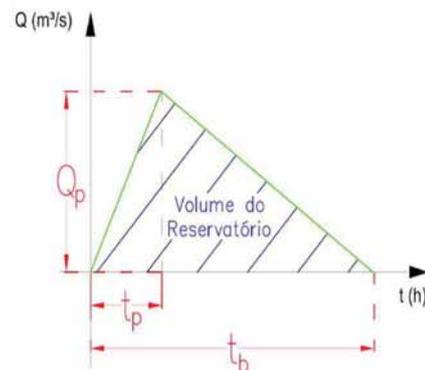


**Fig 3:** Hidrograma simplificado [9]

$$t_b = \frac{2V}{Q_p} \quad (1)$$

Onde: V = volume total do reservatório no momento do rompimento; e  
 $Q_p$  = Vazão de pico.

2) *O Hidrograma para ruptura gradual linear* permite a representação do tempo de formação da brecha que é caracterizado pelo tempo de pico ( $t_p$ ). Por esse motivo adequa-se melhor à ruptura não instantânea, possuindo duas equações de reta que o caracterizam, uma ascendente (até o tempo de pico) e outra descendente;

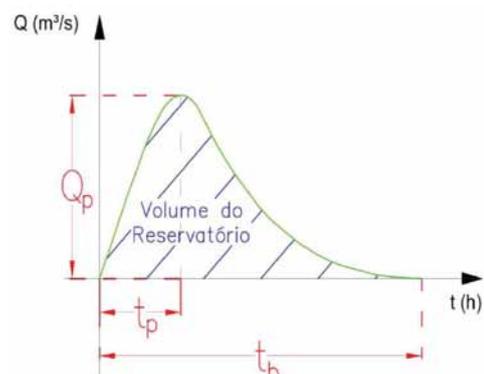


**Fig 4:** Hidrograma de ruptura gradual linear [9]

$$Q(t) = \begin{cases} Q_p \left( \frac{t}{t_p} \right), & 0 \leq t \leq t_p \\ Q_p - Q_p \left( \frac{t - t_p}{t_b - t_p} \right), & t > t_p \end{cases} \quad (4)$$

Onde:  $Q_p$  = Vazão de pico;  
 $t_p$  = tempo de pico; e  
 $t_b$  = tempo de base;

1) *O Hidrograma com Decaimento Parabólico*, foi introduzido por [10] e representa o tempo de esvaziamento de forma mais gradual que o triangular, sendo mais condizente com casos já ocorridos em barragens de terra, em que os trechos de descida procuram representar um decaimento aproximadamente exponencial.



**Fig 5:** Hidrograma de decaimento parabólico [9]

$$Q(t) = Q_p \left[ \left( \frac{t}{t_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (3)$$

Onde:  $Q_p$  = Vazão de pico;  
 $t_p$  = tempo de pico; e

$k$  varia de 0,1 a 0,5 sendo calibrado de tal modo que o volume do hidrograma de ruptura seja igual ao volume do reservatório no momento do rompimento.

Pela análise dos tipos de hidrogramas e estudos de outros autores conclui-se que para um rompimento gradual da barragem onde são simuladas brechas originadas por piping e galgamento (formação gradual), o hidrograma com decaimento parabólico representa de forma mais próxima da realidade o fenômeno de formação da brecha e é utilizado para o desenvolvimento da metodologia proposta.

Como alternativa à solução tradicional esse artigo propõe o procedimento descrito no item 3.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida teve como premissa buscar um parâmetro para obter a vazão de pico de modo que ela esteja relacionada somente ao volume total, ou volume útil do reservatório, e ao tempo de pico. O volume total do reservatório será o volume propagado à jusante, e de acordo com o tempo de pico essa propagação será mais ou menos lenta. Considerando que o hidrograma com decaimento parabólico é o que melhor representa o esvaziamento do reservatório, parte-se da Equação (3) para obtenção da vazão de pico.

De acordo com o hidrograma com decaimento parabólico a área do gráfico sob a curva, deve ser igual ao volume total do reservatório, ou seja, a integral definida da função  $Q(t)$  no intervalo de zero até o final do tempo de base é igual ao volume do reservatório. A função  $Q(t)$  é exponencial e tem seu valor máximo quando  $t = t_p$ , independentemente do valor de  $k$ .

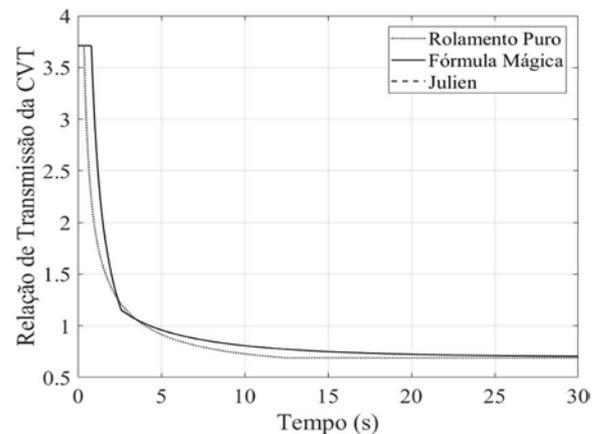
$$V = \int_0^{t_b} Q(t) = \int_0^{t_b} Q_p \left[ \left( \frac{t}{t_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (4)$$

De acordo com a formulação matemática para confecção do hidrograma,  $k$  varia entre 0,1 e 0,5 de modo a ajustar a área do gráfico ao volume do reservatório. Conclui-se que para um mesmo volume de reservatório e mesmo tempo de pico, variando-se a vazão de pico, alcança-se a maior vazão de pico com  $k=0,5$  como pode ser visto no exemplo a seguir, para um reservatório com volume de 53,45 hm<sup>3</sup>, sendo que os tempos de pico usados a seguir são para fins de exemplificação.

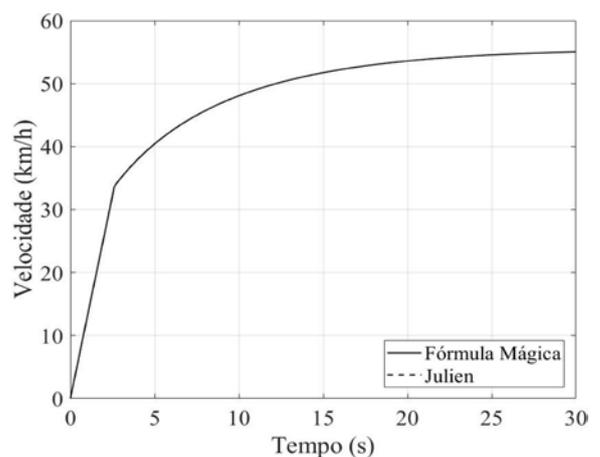
**Tab 3:** Variação do parâmetro  $k$  e para um mesmo  $T_p$

TEMPO DE PICO (s)	$k$	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)
360	0,1	11.615
	0,2	20.275
	0,3	27.412
	0,4	33.543
	0,5	38.943
720	0,1	5.700
	0,2	9.828
	0,3	13.168
	0,4	16.005
	0,5	18.488

Com o valor máximo de  $k$  obtém-se as maiores vazões de pico com menores tempos de base, como pode ser exemplificado nas *Figura 6* e *Figura 7*, para hidrogramas com mesmo tempo de pico de 720 segundos.



**Fig 6:** Hidrograma para  $k=0,1$



**Figura 7:** Hidrograma para  $k=0,5$

Uma informação relacionada à barragem que possui exatidão é o volume do reservatório, esse mesmo volume será propagado, total ou parcialmente, à jusante com o rompimento. Diante do exposto, para obter a vazão de pico propõe-se que seja fixado um tempo de pico ( $T_p$ ), e um  $k$ , e varie-se a vazão de pico ( $Q_p$ ) até que a área do gráfico coincida com o volume do reservatório. Para um pior cenário, onde tem-se a maior vazão com menor tempo de base, usamos  $k=0,5$  e variamos  $Q_p$ .

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar a aplicação da metodologia proposta no item 3, será feito o cálculo da vazão de pico utilizando-se os métodos empíricos, já mencionados, para fins de posterior comparação. Observando-se as equações da *Tabela 1* para obtenção da vazão de pico, percebe-se que essas podem ser bastante discrepantes em relação ao resultado final ( $Q_p$ ) considerando os mesmos parâmetros de entrada. Para ilustrar a referida afirmação pode-se utilizar dados reais de barragens para obtenção de  $Q_p$  e verificar os valores obtidos. Serão utilizadas as Barragens do Funil, localizada no município de Itatiaia-RJ, e a barragem de Capoeira, localizada no município de Santa Teresinha-PB, como objeto de estudo.

As *Tabela 4* e *Tabela 5* descrevem respectivamente os dados de entrada utilizados para cálculo de  $Q_p$  para as barragens do Funil e de Capoeira.

**Tab 4:** Dados de entrada Barragem do Funil

V(m <sup>3</sup> )	Volume máximo reservatório	605.700.000
A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	Área do reservatório para altura máxima	39.730.000
B <sub>d</sub> (m)	Largura da barragem na Crista	385
H <sub>d</sub> (m)	Altura da barragem	85
B <sub>p</sub> (m)	Largura final da brecha(80%)	308
H <sub>p</sub> (m)	Altura final da brecha (considerada 80%)	68
Y <sub>medio</sub> (m)	Profundidade média (considerado 33.3%)	28,3
T <sub>p</sub> (s)	Tempo desenvolvimento da brecha	360

**Tab 5:** Dados de entrada Barragem de Capoeira

V(m <sup>3</sup> )	Volume máximo reservatório	53.000.000
A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	Área do reservatório para altura máxima	5.110.000
B <sub>d</sub> (m)	Largura da barragem na Crista	104
H <sub>d</sub> (m)	Altura da barragem	36
B <sub>p</sub> (m)	Largura final da brecha (considerada 90%)	93,6
H <sub>p</sub> (m)	Altura final da brecha (considerada 90%)	32,4
Y <sub>medio</sub> (m)	Profundidade média (considerado 50%)	18
T <sub>p</sub> (s)	Tempo desenvolvimento da brecha	1800

A seguir temos as *Tabela 6* e *Tabela 7* que trazem os valores de Q<sub>p</sub> obtidos para as duas barragens utilizando-se as equações apresentadas na *Tabela 1*.

**Tab 6:** Obtenção da vazão de pico pelas equações empíricas - Funil

EQUAÇÃO	VAZÃO DE PICO – Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Lou	37.050
Hagen	166.952
Saint Venant	53.762
Schoklistch	60.108
Bureau of Reclamation	70.498
Singh	293.604
Wetmore e Fread	394.422

**Tab 7:** Obtenção da vazão de pico pelas equações empíricas - Capoeira

EQUAÇÃO	VAZÃO DE PICO – Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Lou	7.186
Hagen	34.329
Saint Venant	7.367
Schoklistch	7.765
Bureau of Reclamation	14.385
Singh	29.346
Wetmore e Fread	25.684

Para Barragem do Funil, considerou-se a remoção de 80% do barramento no rompimento com tempo de desenvolvimento da brecha de 0,1 horas ou 360 segundos. Observa-se que as vazões de pico obtidas variam muito sendo a menor 37.050 m<sup>3</sup>/s e a maior 394.422 m<sup>3</sup>/s, uma variação de 1065%. As vazões que se aproximaram mais foram as de Saint Venant e Schoklistch, visto que a diferença entre a formulação de ambas é a multiplicação de uma relação entre a largura final da brecha e a largura da barragem na equação de Schoklistch. No caso de remoção total onde a largura final da brecha é igual à largura da barragem, ambas as equações chegarão ao mesmo resultado. Na formulação de Singh, obtém-se vazões muito grandes quando a porcentagem removida do barramento for próxima de 100% por se considerar o

escoamento análogo ao que passa por um vertedor retangular de soleira espessa. A formulação de Wetmore e Fread leva em consideração o tempo de formação da brecha, logo, para tempos pequenos, como no exemplo estudado, tem-se vazões muito grandes.

Para Barragem de Capoeira, considerou-se a remoção de 90% do barramento no rompimento com tempo de desenvolvimento da brecha de 0,5 horas ou 1800 segundos. As vazões de pico variaram em uma proporção menor do que na Barragem do Funil devido ao maior tempo de pico e menor volume do reservatório, mas, ainda assim, há uma diferença considerável entre a menor vazão de 7.186 m<sup>3</sup>/s e a maior de 25.684 m<sup>3</sup>/s, uma variação de 357%.

Nas *Tabelas 8 a 11*, a seguir, segue uma demonstração feita em planilha de cálculo utilizando a metodologia proposta e os dados da barragem de Capoeira, com posterior explicação.

**Tab8:** Situação inicial para determinação da vazão de pico

Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>p</sub> (s)	k	Área total do Gráfico	Volume total (m <sup>3</sup> )
0	1440	0,5	0	53.450.000

**Tab 9:** Situação inicial da planilha para o cálculo das áreas e confecção do hidrograma

Q (t)	t (h)	Áreas Parciais
0	0	0
0	0,2	0
0	0,4	0
0	0,6	0
0	0,8	0
0	1	0
0	1,2	0
0	1,4	0
0	1,6	0
0	1,8	0
0	2	0
0	2,2	0
0	2,4	0
0	2,6	0
0	2,8	0
0	3	0
0	3,2	0
0	3,4	0
0	3,6	0
0	3,8	0
0	4	0
0	4,2	0
0	4,4	0
0	4,6	0
0	4,8	0
0	5	0

**Tab 10:** Planilha após o cálculo da vazão de pico

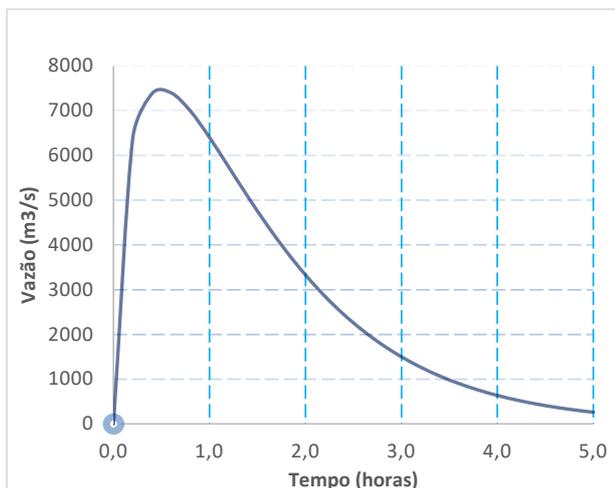
Qp (m <sup>3</sup> /s)	Tp(s)	k	Área total do Gráfico	Volume total (m <sup>3</sup> )
7464	1800	0,5	53.450.000	53.450.000

Tab 11: Planilha após o cálculo das áreas para confecção do hidrograma

Q (t)	t (h)	Áreas Parciais
0	0,0	2294025
6372	0,2	4950185
7378	0,4	5319588
7398	0,6	5181403
6994	0,8	4822851
6402	1,0	4372061
5742	1,2	3895259
5078	1,4	3428114
4445	1,6	2989507
3860	1,8	2588602
3331	2,0	2228823
2860	2,2	1910211
2446	2,4	1630872
2084	2,6	1387873
1771	2,8	1177804
1501	3,0	997132
1269	3,2	842401
1071	3,4	710362
902	3,6	598034
759	3,8	502727
638	4,0	422050
535	4,2	353895
448	4,4	296424
375	4,6	248039
314	4,8	207363
262	5,0	94396

Na Tabela 8, tem-se a situação inicial do cálculo, onde os campos  $T_p$ ,  $k$  e *Volume total* devem ser preenchidos. O campo Área Total do gráfico é preenchido automaticamente com a soma das Áreas parciais provenientes da Tabela 9. O campo  $Q_p$  será variável sendo alterado automaticamente de modo a fazer com que a Área total do gráfico seja igual ao *Volume total*. Na Tabela 9 tem-se o campo da função  $Q(t)$  que corresponde a Equação (4) sendo que os valores de  $t$  são as frações de tempo, discretizado em períodos de 0,2 horas. As áreas parciais são as integrais definidas de cada intervalo, calculadas pelo método dos trapézios. Para obter-se o valor de  $Q_p$  aplica-se o teste de hipóteses, que é uma ferramenta que testa vários valores para as fórmulas da planilha, até que a igualdade proposta seja atingida, gerando as Tabelas 10 e 11, sendo que a Tabela 11 já permite a confecção do hidrograma (Figura 8). Observa-se que o valor encontrado para vazão de pico,  $Q_p=7.464\text{m}^3/\text{s}$  é próximo aos valores encontrados nas formulações empíricas de *Lou*, *Saint Venant* e *Schoklistch*.

Fig 8: Hidrograma gerado



## 5. CONCLUSÃO

O estudo do rompimento de barragens é um assunto muito amplo que abrange diversas áreas do conhecimento. A metodologia proposta no presente artigo para determinação da vazão de pico e confecção do hidrograma de ruptura é parte integrante de um estudo maior que abrange não só o rompimento estrutura bem como seus efeitos no vale a pena jusante e ações emergenciais a serem desencadeadas.

A utilização das equações empíricas para determinação da vazão de pico pode ser problemática devido à grande variação de valores finais encontrados para os mesmos parâmetros de entrada, o que dificulta a escolha de qual equação utilizar para simular um rompimento. Ao utilizarmos como parâmetro a equação do hidrograma com decaimento parabólico, considerando o tempo de pico e o volume a ser escoado, temos características que podem ser mensuradas de maneira mais prática. Pode-se criar vários cenários com diferentes hidrogramas de ruptura, variando o tempo de pico e o volume a ser escoado, podendo ser mais ou menos conservador de acordo com a quantidade de informações que se possui. A montagem do hidrograma é simples e feita em planilha de cálculo, que depois é exportada para o software de simulação.

A metodologia proposta busca promover o desenvolvimento de ferramentas que podem facilitar o processo de simulação de rompimento, podendo ser amplamente utilizadas, e ser um fator contribuinte para o aumento da segurança dessas estruturas de elevada importância nacional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges", *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, vol. 8, nr. 1, 2006, pg 24-37.
- [2] SINGH, V. P. *Dam Breach Modeling Technology*. Kluwer Academic Publishers. Louisiana, 1996, 242 p.
- [3] UEMURA, S. *Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 160 p.
- [4] USACE - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center (HEC), Version 4.1, 2010, 417 p.
- [5] LAURIANO, A. W., PALMIER, L. R., MONTE-MOR, R. C. A., BRASIL, L. S. S., NASCIMENTO, N. O., SOUZA, N. E CANELLAS, A. V. B. *Mapeamento de áreas Potencialmente Inundáveis Face à Ruptura Hipotética de Barragens - Estudos de Caso: Barragem de Funil e Barragem de Manso*. In: XXIII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Cartagena de Indias, Colúmbia, 2008b, 15 p
- [6] COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M., *Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 1997, vol. 2, nº 2, 191-206p.
- [7] LADEIRA, J. E. R. *Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE - São Simão*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007, 210 p.
- [8] UEMURA, S. *Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 160 p.
- [9] MASCARENHAS, F. C. B. *Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990, 291 p.
- [10] SILVA JUNIOR J. C. *G. Estudo Comparativo Entre Modelos Unidimensionale Pseudo-bidimensional para Simulação da*

- Propagação de Ondas Provocadas Pela Ruptura de Barragens. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2013, 147p.
- [11] BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas. Oklahoma Technical Press, 1981, pp. 104-108.
- [12] WAHL, T. L. The Uncertainty of Embankment Dam Breach Parameter Predictions Based on Dam Failure Case Studies in USDA/FEMA, Workshop on Issues, Resolutions and Research
- [13] Needs Related on Dam Failure Analysis. Oklahoma, Jun. 2001, 16 p.
- [14] LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 251p.

# Análise do Coeficiente Isotérmico de Reatividade de Vazios para Reator de Espectro Rápido

Fabiano P. C. Lima<sup>a,b</sup>, Sérgio de O. Vellozo<sup>b</sup>, João C. B. Fiel<sup>b</sup>, Marta J. Velozo<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República – GSI/PR

<sup>b</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME) –

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha,

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

fabiano.petrucci@presidencia.gov.br

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise do comportamento isotérmico do coeficiente de reatividade de vazios para um reator de espectro rápido em desenvolvimento no Instituto Militar de Engenharia (IME). A principal peculiaridade do projeto reside no uso de óxido misto [MOX - PuO<sub>2</sub> + U(urânio natural)O<sub>2</sub>] como núcleo do combustível. Para essa tarefa, o sistema Scale 6.1 foi utilizado para calcular a reatividade de várias distribuições de vazios geradas por bolhas no sódio, na temperatura de projeto de operação do reator, a 523K. Os resultados mostraram que o coeficiente de reatividade de vazios é bastante dependente do teor de vazios no núcleo, e principalmente, da localização desses vazios pelo núcleo, alcançando resultados positivos em alguns casos. Contudo, a ordem de grandeza das variações na reatividade do sistema foi baixa (10<sup>-4</sup> a 10<sup>-3</sup>), sendo tais efeitos compensados por outros efeitos de realimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reator de espectro rápido, coeficiente de reatividade de vazios, óxido misto de urânio e plutônio.

**ABSTRACT:** This study aims to present an analysis of the isothermal void reactivity coefficient for a fast spectrum reactor in development at the Engineering Military Institute (IME). The main design peculiarity lies in using mixed oxide [MOX - PuO<sub>2</sub> + U(natural uranium)O<sub>2</sub>] as fuel core. For this task, SCALE system was used to calculate the reactivity for several voids distributions generated by bubbles in the sodium, at the design temperature of the reactor, 523K. The results showed that the void reactivity coefficient is very dependent on the content of voids in the core, and mainly, on the location of these voids throughout the core, reaching positive results in some cases. However, the order of magnitude of the changes in system reactivity was low (10<sup>-4</sup> to 10<sup>-3</sup>), such effects being compensated by other feedback effects.

**KEYWORDS:** fast breeder reactor, void reactivity coefficient, mixed oxide.

## 1. INTRODUÇÃO

A grande maioria das usinas nucleares existentes hoje no mundo usa combustível à base de urânio, já que o <sup>235</sup>U é o único nuclídeo fissil existente na natureza. No entanto, este existe apenas na proporção de 0,72% do urânio natural. O restante consiste principalmente de <sup>238</sup>U, que é um nuclídeo fértil e quase não fissionável nas atuais Usinas Nucleares de 2<sup>a</sup> Geração.

Os recursos de urânio conhecidos e extraíveis a um custo viável estão atualmente estimados em menos de 6,5 milhões de toneladas. Considerando que atualmente as necessidades globais de urânio natural das centrais nucleares são de aproximadamente 70 mil toneladas por ano, haverá combustível nuclear disponível por apenas cerca de 100 anos, se considerada uma taxa de consumo constante pelas usinas [1]. Obviamente, essa quantidade de urânio não poderá garantir uma contribuição sustentável para a demanda mundial de energia.

Dessa forma, a fim de assegurar o futuro da energia nuclear, o desenvolvimento dos reatores rápidos regeneradores se torna necessário e constituem-se, indubitavelmente, na resposta definitiva que se pode dar ao problema energético através da fissão nuclear.

A principal importância não se deve tanto à capacidade de produzir energia a custo competitivo, mas no fato de permitir à fonte nuclear de se tornar praticamente inexaurível. Esses reatores produzem, durante seu funcionamento, um novo material fissil às custas da parte não-fissil (<sup>238</sup>U) do urânio natural, permitindo a ampliação do potencial energético das reservas uraníferas em cerca de 70 vezes, o que possibilitaria o uso da energia nuclear por um período praticamente indefinido [2].

Os reatores rápidos também possuem potencialidade para ser um sistema radiologicamente limpo, resultado do esquema de reprocessamento, que recupera os elementos transurânicos (e.g. plutônio) com alta eficiência e estes, por sua vez, retornam ao núcleo para serem “queimados”. No espectro rápido, esses elementos transurânicos são utilizados como combustíveis. Por consequência, o gerenciamento do rejeito de alta atividade seria facilitado, visto que a necessidade de armazenamento seria diminuída de milhões para algumas centenas de anos. Então, o risco de contaminação do meio ambiente por rejeito radioativo além do risco de proliferação de material para a fabricação de artefatos nucleares seria menor.

Contudo, para qualquer projeto nessa área, o controle efetivo da reatividade do sistema e da segurança do reator é um fator importante e crucial de projeto. Em um reator nuclear, as variações sofridas pela reatividade são decorrentes não apenas de condições impostas, tais como posição de barras de controle, arranjo de refletores ou inserção de fontes ou absorvedores de nêutrons, mas também devido a fatores inerentes de cada reator, os quais temporariamente causarão alterações na reatividade, muito embora o reator tenha sido posto em operação a uma potência fixa.

No caso de um reator de água fervente, por exemplo, a formação de bolhas de vapor no caroço afeta a reatividade causando uma redução na absorção de nêutrons pela água e aumentando a fuga de nêutrons do caroço. Testes efetuados em reatores desse tipo mostraram serem eles seguros e autorregulados, de modo que uma súbita excursão de potência induz à formação de bolhas no líquido moderador, reduzindo a termalização de nêutrons e aumentando a probabilidade de fuga. Em consequência, a taxa de fissão diminuirá, e, portanto também a potência.

No caso dos reatores rápidos, o material mais utilizado como refrigerante é o metal na fase líquida, sendo muitas vezes escolhido o sódio (Na) para essa função. O ponto de ebulição do sódio, em pressão ambiente, é cerca de 800°C. Apesar da temperatura de ebulição estar bem acima da temperatura típica de operação desses reatores, em torno de 250°C, é possível, em caso de descontrole, que ocorra a formação de vazios, que podem influenciar tanto positivamente quanto negativamente no coeficiente de reatividade global.

Caso os vazios estejam localizados nas bordas do núcleo, esse efeito contribui para saída dos nêutrons do núcleo ativo, acarretando num coeficiente negativo. Porém, dependendo da localização desses vazios (e.g. na região central do núcleo), o coeficiente pode ser positivo. Nesse sentido, é importante e necessária a determinação precisa do coeficiente de vazios em diferentes posições e do coeficiente global de vazios, para que se possa garantir que os efeitos inerentes por si só mantenham o reator em um patamar mínimo de segurança.

## 2. SEGURANÇA E CONTROLE DE REATORES RÁPIDOS: INFLUÊNCIA E EFEITO DOS VAZIOS NO REFRIGERANTE

Um dos aspectos mais polêmicos atualmente com relação às instalações nucleares é a questão de segurança. Dessa forma, conhecer o comportamento do reator em relação à presença de vazios é de extrema importância, pois está diretamente ligado à segurança do projeto.

A avaliação dos parâmetros neutrônicos é de suma importância na análise da segurança de reatores nucleares. Deve-se garantir que os parâmetros neutrônicos estabeleçam uma condição de operação intrinsecamente segura, através da obtenção de coeficientes de reatividade negativos que permitam a realimentação negativa e estável de excursões de potência no núcleo. Para reatores operando no espectro rápido, coeficientes positivos são aceitáveis em determinadas condições de operação, desde que as somatórias dos parâmetros sejam negativas e levem ao retorno das condições de estabilidade. As análises de segurança devem prever a condição de operação segura e o desligamento do núcleo em qualquer condição operacional ou nos eventos postulados de acidentes.

No caso de um reator operando com nêutrons de espectro rápido do tipo LMFBR, a perda de sódio (refrigerante) pode resultar em um grande efeito de reatividade positiva. O sódio pode ser retirado do núcleo ou evaporar-se em um evento de um transiente descontrolado. Tal condição apresenta um importante problema de segurança para um LMFBR, problema esse que não existe para reatores térmicos ou reatores rápidos refrigerados a gás.

O efeito de reatividade da perda de refrigerante é extremamente dependente do espaço. A perda de sódio no centro do núcleo produz um efeito de reatividade altamente positivo, enquanto que a perda de sódio perto da borda produz um efeito negativo. A compreensão de tal comportamento é revelada observando individualmente os quatro fenômenos que contribuem para o efeito total do vazio de sódio [3]:

- a. endurecimento do espectro;
- b. aumento da fuga de nêutrons;
- c. eliminação da captura do sódio;
- d. alteração na auto blindagem.

Os dois primeiros efeitos são grandes e de sinais opostos. Os dois últimos são pequenos. Assim, a maior parte da reatividade de vazios resulta da diferença de dois grandes números, como ilustrado na Figura 1, e esta situação torna difícil um cálculo preciso do efeito líquido.

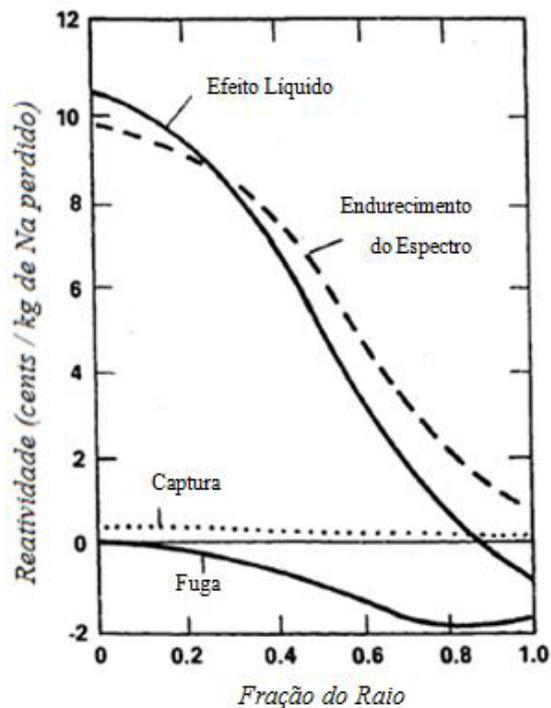


Fig 1: Componentes do coeficiente de vazio de sódio para um LMFBR [3]

Um método alternativo para calcular o efeito da perda de sódio é usar a teoria da perturbação e calcular as quatro contribuições separadamente [3]. O valor absoluto do efeito dos vazios na operação do reator é fortemente influenciado por todas as causas que podem modificar o espectro do fluxo neutrônico, tais como: produto de fissão emitidos durante a queima, isótopos superiores do Plutônio, materiais estruturais, localização das barras de controle, teores diferenciados de combustível, temperatura, dentre outras. Todas estas considerações permitem compreender que o valor absoluto em reatividade de vazio do sódio depende fortemente do reator e da situação considerada. Dessa forma, a determinação integral do efeito de todas as contribuições apresentadas torna-se mais factível e útil frente ao cálculo individualizado e complexo de cada um desses fenômenos separadamente através da Teoria da Perturbação. Essa determinação da influência total do vazio é geralmente realizada por programas e softwares computacionais, como foi feito neste trabalho, através do sistema SCALE, que utiliza o Método de Monte Carlo para resolver problemas por meio de amostragem aleatória.

## 3. COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE VAZIOS

Existem fatores inerentes a cada reator que podem também perturbar o sistema e acarretar um aumento ou diminuição da reatividade, mesmo que o reator tenha sido posto em operação a uma potência fixa. São eles: a variação de temperatura do núcleo e a geração de espaços vazios no refrigerante. Tais efeitos são mensurados pelos coeficientes de reatividade de temperatura e de vazios, e a fim de assegurar o controle do reator, todo projeto de reator deve apresentar um estudo desse tipo [4].

Nos cálculos de segurança de uma ampla classe de reatores, é importante saber qual é o efeito de reatividade introduzida por um volume de vazio no núcleo e o conhecimento do coeficiente de vazio é também importante durante o projeto inicial e durante a operação diária dos reatores.

O coeficiente de vazios ( $\alpha$ ), objeto de estudo desse trabalho, é a medida da reatividade introduzida por um volume de vazios igual a um por cento (1 %) do volume do refrigerante, e é definido pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{(\rho_{vazio} - \rho_0) V_{vazio}}{V_{refrigerante}}$$

Do ponto de vista de segurança de reatores, o coeficiente de vazios quando é negativo é considerado um aspecto de segurança, porque uma excursão que causaria o borbulhamento do refrigerante/moderador reduziria a reatividade. O reator é dito auto limitante, isto é, tem uma proteção contra acidentes de fuga. O coeficiente de vazios negativo proporcionará também condições de auto regulação, e consequentemente, estabilidade e segurança.

#### 4. O REATOR FBR COMO INSTRUMENTO DE ESTUDO NO IME

O projeto do FBR, objeto de estudo deste trabalho, refere-se a um Reator Rápido Regenerador com núcleo heterogêneo, abastecido com mistura de óxido de plutônio - PuO<sub>2</sub> e óxido de urânio - UO<sub>2</sub> (MOX) e refrigerado a Metal Líquido (sódio - Na). A principal peculiaridade desse reator reside no fato de seu combustível ser independente de urânio enriquecido.

O projeto apresenta três diferentes combustíveis, que se diferem na porção de óxido de plutônio na massa total de combustível. No combustível mais interno é usado o de menor teor de plutônio, correspondente a 25% de óxido de plutônio e 75% de óxido de urânio (Combustível 1). No combustível intermediário (Combustível 2), a parcela de urânio é de 33%, enquanto no combustível localizado mais externamente ao núcleo (Combustível 3) a parcela é de 42%. Esse conceito foi utilizado visando obter um fluxo neutrônico normalizado no núcleo do reator, de forma que o canal quente não tivesse uma amplitude térmica e neutrônica muito superior à das regiões, o que poderia interferir negativamente na segurança e eficiência do reator.

**Tab1:** Fração em Massa dos Isótopos

	Isótopo	Fração em Massa (%)
UO <sub>2</sub>	U-234	0,005
	U-235	0,710
	U-238	99,283
PuO <sub>2</sub>	Pu-238	0,100
	Pu-239	77,316
	Pu-240	19,351
	Pu-241	2,677
	Pu-242	0,553

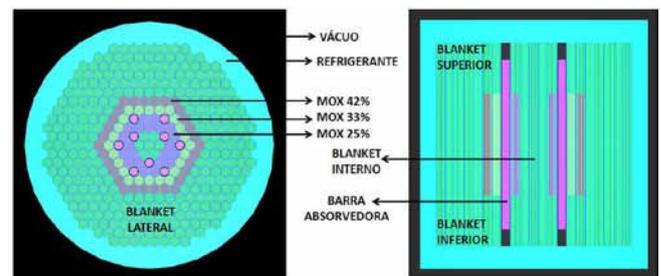
**Tab 2:** Composição do núcleo do reator FBR-IME

Combustível	Óxido	Fração (%)	Densidade MOX (g/cm <sup>3</sup> )
1	UO <sub>2</sub>	75	11,01
	PuO <sub>2</sub>	25	
2	UO <sub>2</sub>	67	11,05
	PuO <sub>2</sub>	33	
3	UO <sub>2</sub>	58	11,09
	PuO <sub>2</sub>	42	

Com base nesses dados, foi projetado um núcleo simples com 91 elementos de combustível com a mesma geometria dos elementos do reator Joyo (projeto japonês que serviu de base para o início deste estudo) [5]. Da mesma forma, os dados de geometria do revestimento e do envoltório do modelo do reator Joyo foram mantidos, além da temperatura em 523K.

Em seguida, diminuiu-se o teor de <sup>235</sup>U do combustível ao passo que se elevava a fração de dióxido de plutônio no MOX, a fim de compensar a perda de criticalidade em função da redução do <sup>235</sup>U. Dessa forma, chegou-se a um Modelo Definitivo do Reator composto por um núcleo heterogêneo com 75 elementos combustíveis, 9 barras de controle constituídas de Carbetto de Boro (B<sub>4</sub>C) e 7 de blanket interno, o envoltório fértil (onde predomina a conversão de <sup>238</sup>U em <sup>239</sup>Pu) apresentando 6 camadas laterais num total de 295 elementos. O núcleo central possui 90cm de diâmetro, enquanto que todo o reator (com o envoltório lateral) possui 180cm. A altura do reator é de 180 cm, sendo que o núcleo fissil ocupa os 90cm centrais. O tempo de dobramento do reator foi estimado em aproximadamente 28 anos [6].

Esse modelo final foi o projeto utilizado como instrumento de estudo para este trabalho, sendo todas essas informações necessárias para o desenho do reator e a realização das demais simulações através do Sistema SCALE.

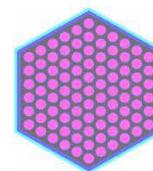


**Fig 2:** Modelo Definitivo do Reator

#### 5. METODOLOGIA DE INSERÇÃO DOS VAZIOS

Este trabalho estipulou a inserção de vazios através da retirada completa do sódio interno aos elementos combustíveis. De fato, esse não é a definição mais real, contudo, como os elementos combustíveis eram pequenos (apótema igual a 3,75cm), o valor absoluto do volume de vazios inserido não era muito grande, mas o teor em relação ao volume total do moderador era significativo.

Dessa forma, o vazios era mais concentrado, resultando em uma melhor análise de sua influência, podendo-se assim analisar o seu efeito (em iguais teores) ao longo das regiões do núcleo, sem a necessidade de aumentar expressivamente o teor nas regiões mais periféricas. A Figura 2 apresenta o modelo do elemento combustível sem vazios que foi utilizado nas simulações deste trabalho, apresentadas nas subseções seguintes. De fato, outras três unidades de elementos combustíveis tiveram de ser definidas no SCALE, pois cada elemento combustível possuía composição diferente de MOX em suas varetas.



**Fig 3:** Elemento Combustível sem Refrigerante

O cálculo do coeficiente de reatividade de vazios requer, contudo, a quantificação do volume de vazios que foi inserido em relação ao volume total de moderador no sistema. Dessa forma, foi determinado qual o volume total de sódio existente no núcleo FBR-IME, e qual o teor de vazios referente à inserção de um elemento combustível sem sódio. Assim, o teor de sódio interno em um elemento combustível é equivalente a aproximadamente 0,98% do volume de sódio total do sistema.

## 6. AVALIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO E DA INCERTEZA ESTATÍSTICA

A incerteza é um parâmetro que indica a qualidade de uma medida de uma forma quantitativa. O cálculo da incerteza estatística referente ao valor do coeficiente de vazios  $\alpha$  calculado baseou-se na propagação das incertezas das grandezas de influência desse coeficiente. As únicas grandezas que influenciam no valor de  $\alpha$  são o volume de vazios  $V$ , que provém de definição e não apresenta incerteza, e a Reatividade  $\rho$ , que por sua vez depende apenas do valor do Fator de Multiplicação keff. Sendo assim, a incerteza nos valores de  $\alpha$  foi obtida a partir da formulação matemática abaixo.

$$\alpha \pm \delta_\alpha = \frac{1}{\Delta V} \left( \frac{k_{(\%V)} - 1}{k_{(\%V)}} - \frac{k_0 - 1}{k_0} \right)$$

Após manipulação matemática, temos que:

$$\delta_\alpha = \left| \frac{1}{\Delta V} \left\{ \frac{\bar{\rho}\delta}{\bar{k}(\bar{k}-1)} - \frac{\bar{\rho}_0\delta}{\bar{k}_0(\bar{k}_0-1)} \right\} \right| = \left| \frac{1}{\Delta V} \left\{ \frac{\delta}{\bar{k}^2} - \frac{\delta_0}{\bar{k}_0^2} \right\} \right|$$

Como visto, o valor da incerteza final depende unicamente do valor de keff e seu respectivo desvio padrão, ambos obtidos pelas simulações do SCALE. O desvio calculado pelo programa refere-se a um intervalo de confiança de 95%, ou seja, dois desvios padrões.

## 7. AUMENTO DO NÚMERO DE HISTÓRIAS E SIMULAÇÕES

Com o objetivo de se obter melhor avaliação estatística dos valores encontrados para o coeficiente de vazios, a incerteza estatística configuração de inserção de vazios foi obtida a partir da aplicação de duas ações: aumentar o número final de histórias e aumentar o número de simulações.

O aumento do número final de histórias, aumentando-se os parâmetros *default* de nêutrons por geração (NPG) e número de gerações (GEN) do SCALE (203 GEN x 1000 NPG) visava reduzir o desvio padrão encontrado até um valor aceitável, sem, contudo, demandar grande processamento computacional desnecessariamente, de forma a evitar que valores de coeficiente próximos de zero pudessem gerar dúvidas quanto a sua positividade (incursão de potência) ou negatividade (excursão de potência). Após definido o número médio de histórias necessárias para cada simulação (em torno de 812.000), procedeu-se com a variação de GEN e NPG em três combinações (406GEN x 2000NPG, 403GEN x 2015NPG, 400GEN x 2030NPG), de forma a se obter um número de histórias final em cada combinação próximo ao definido anteriormente. Dessa forma, alterando-se os parâmetros GEN e NPG, a semente inicial de propagação neutrônica no Método Monte Carlo era alterada e diferentes valores de keff com as respectivas incertezas eram obtidos. De fato, os valores desses parâmetros sofriam pequenas variações entre si, já que o número

de histórias finais eram praticamente os mesmos. Dessa forma, as médias aritméticas simples do valor de keff e seu desvio padrão foram obtidas, visando manter as quantidades finais de histórias suficientemente grandes e próximas para se obter valores médios coerentes que fornecessem resultados mais confiáveis para a análise de segurança necessária.

**Tab 3:** Simulações realizadas por configuração de inserção de vazios

Simulação	Gerações (GEN)	Nêutrons por Geração (NPG)	Número de Histórias
1	406	2000	812.000
2	403	2015	812.045
3	400	2030	812.000

## 8. INSERÇÃO DE VAZIOS

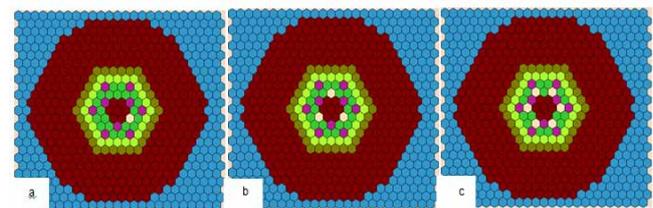
Para uma análise mais apurada da influência dos vazios na reatividade do sistema na temperatura padrão de operação do reator (523K), foi definido um conjunto de simulações que se baseava na variação de alguns parâmetros, mantendo-se os demais constantes, tais quais:

- Porcentagem de vazios inseridos no núcleo; e
- Distância e localização dos vazios;

### 8.1 Alterando o teor de vazios no núcleo

O primeiro grupo de simulações consistiu na variação do teor de vazios por meio do aumento do número de elementos sem sódio na primeira camada de elementos combustíveis do núcleo. Ou seja, substituiu-se elementos do combustível MOX 1 com refrigerante, por elementos do mesmo combustível, porém sem refrigerante.

Inicialmente realizou-se a simulação com a presença de apenas um elemento sem sódio (teor de vazios equivalente a 0,98%) na região mais central do núcleo. Em seguida, replicou-se o número de elementos sem sódio ao redor dessa região, de forma a se obter mais cenários alterando-se apenas o teor de vazios: núcleo com 3 elementos sem sódio (2,93% de vazios) e núcleo com 6 elementos sem sódio (5,87% de vazios).



**Fig 4:** Variação do teor de vazios: a) núcleo com 1 (um) elemento sem sódio; b) núcleo com 3 (três) elementos sem sódio; c) núcleo com 6 (seis) elementos sem sódio.

Tomou-se o cuidado para que o teor de vazios não alcançasse um valor muito alto, dispondo um maior número de elementos sem sódio pelo núcleo, de forma que a simulação não representasse uma quantidade irreal de bolhas no sódio, uma vez que o ponto de ebulição do sódio em pressão ambiente (1073K) é muito superior ao da temperatura média de operação do reator (523K).

### 8.2 Alterando a distância e a localização dos vazios

O passo seguinte do estudo consistiu na alteração da posição dos elementos sem sódio, fixando-se, nesse caso, o teor de vazios total do sistema em cada grupo de simulações.

Fixados os teores de vazios, as simulações seriam agrupadas

em quatro configurações relativas à posição: Região 1, Região 2, Região 3 e Região 4. A Região 1 corresponderia ao anel de Elemento Combustível 1 mais interno, e a Região 4 corresponderia ao anel de Elemento Combustível 3, mais externo, sendo a Região 2 e 3 referentes aos anéis intermediários de Elemento Combustível 1 e 2, respectivamente. Cabe ressaltar que os elementos sem vazio de cada região são diferentes uns dos outros em alguns casos, uma vez que a concentração de MOX varia entre as regiões.

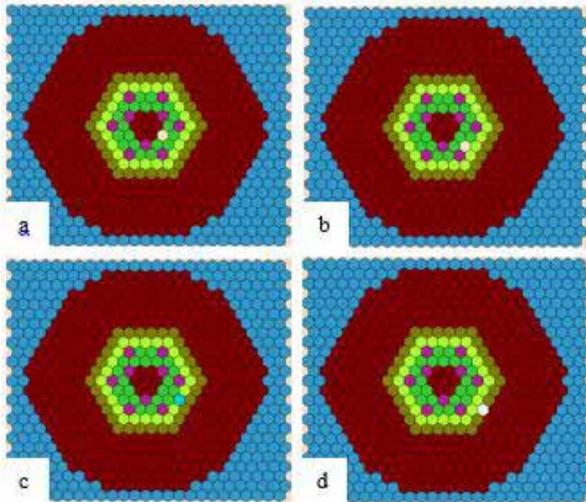


Fig 5: Variação da posição para 1 (um) elemento sem sódio: a) Região 1; b) Região 2; c) Região 3; d) Região 4;

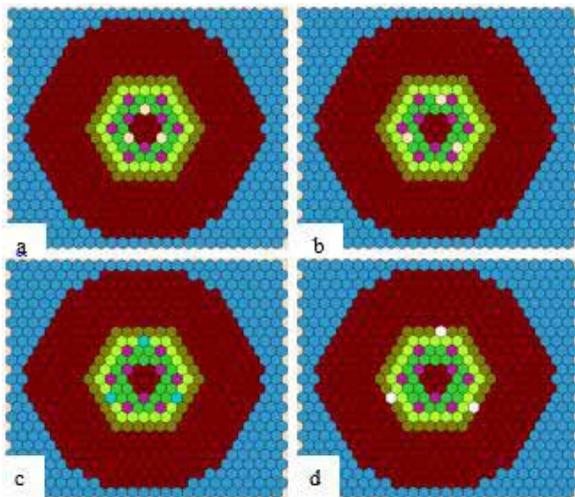


Fig 6: Variação da posição para 3 (três) elementos sem sódio: a) Região 1; b) Região 2; c) Região 3; d) Região 4;

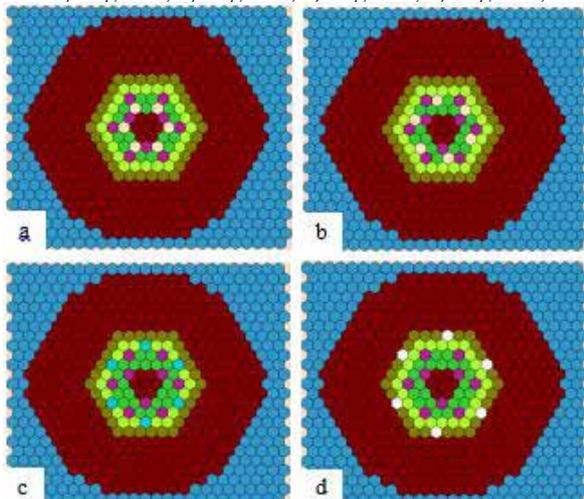


Fig 7: Variação da posição para 6 (seis) elementos sem sódio: a) Região 1; b) Região 2; c) Região 3; d) Região 4;

Tais elementos foram posicionados em regiões dispersas ao núcleo de forma a se obter uma gama de resultados mais abrangentes e coerentes, uma vez que o modelo definitivo do reator possui diversas particularidades.

## 9. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE VAZIOS PARA O REATOR

As seções a seguir apresentarão as médias obtidas pela alteração da combinação GEN e NPG (alteração da semente inicial de propagação) para cada configuração estabelecida pelos parâmetros variáveis (a porcentagem de vazios inseridos e a distância/localização dos vazios), as quais serão as bases para as análises de segurança.

Tab 4: Configurações e resultados médios de inserção de vazios a 523K

%Vvazio	Região	keff	δkeff	ρ	Δρ	α	δα
FBRIME	-	1,1400	0,0008	0,12281	-	-	-
0,98%	1	1,1408	0,0007	0,12342	0,00062	0,06277	0,00793
2,93%	1	1,1403	0,0008	0,12304	0,00023	0,00788	0,00176
5,87%	1	1,1402	0,0008	0,12299	0,00018	0,00306	0,00088
0,98%	2	1,1405	0,0008	0,12317	0,00036	0,03663	0,00267
2,93%	2	1,1402	0,0008	0,12296	0,00015	0,00525	0,00176
5,87%	2	1,1396	0,0008	0,12247	-0,00033	-0,00568	0,00087
0,98%	3	1,1397	0,0009	0,12260	-0,00021	-0,02094	0,00265
2,93%	3	1,1394	0,0007	0,12232	-0,00049	-0,01664	0,00260
5,87%	3	1,1388	0,0008	0,12191	-0,00090	-0,01531	0,00002
0,98%	4	1,1396	0,0007	0,12250	-0,00031	-0,03142	0,01305
2,93%	4	1,1388	0,0008	0,12191	-0,00090	-0,03067	0,00083
5,87%	4	1,1379	0,0008	0,12119	-0,00162	-0,02758	0,00084

### 9.1 Análise da variação da porcentagem de vazio

Os resultados da análise da influência do teor de vazios para a variação da reatividade e para o coeficiente de reatividade de vazios a 523 K encontram-se apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.



Fig 8: Análise do teor de vazios a 523K:  $\Delta\rho \times \%Vvazio$



Fig 9: Análise do teor de vazios a 523K:  $\alpha \times \%Vvazio$

Foi verificado inicialmente o comportamento do coeficiente de vazios ao se alterar o teor de vazios, mantendo-se a distância média dos vazios inseridos em relação ao eixo central do núcleo. Para isso, como apresentado no capítulo anterior, foi retirado todo o sódio interno de um, três e seis elementos combustível em quatro diferentes regiões do núcleo, o que gerou teores de vazios em torno de 0,98%, 2,93% e 5,87%, respectivamente.

Observando a Figura 8 é possível perceber uma tendência negativa para a variação da reatividade do sistema para a existência de até 6% de vazios no volume do refrigerante, ou seja, o aumento do teor de vazios acarreta uma diminuição na reatividade do sistema a 523K, independentemente da região onde as bolhas foram formadas. Isso pode ser explicado pelo aumento da fuga ocasionada pelo aumento da ausência de sódio.

Contudo, verifica-se também que a taxa de redução é menor nas regiões mais centrais (Região 1 e 2) do que nas regiões mais periféricas (Região 3 e 4). Isso ocorre porque a perda de sódio de uma unidade de volume do núcleo perto do centro do núcleo aumenta pouco a contribuição da fuga porque o gradiente de fluxo é baixo e, portanto, a fuga por centímetro cúbico é pequena [3].

A alteração na taxa de variação da reatividade em função da porcentagem de vazios existente no núcleo é a definição matemática do coeficiente de reatividade de vazios, e pode ser analisada pela Figura 9.

Para a análise da influência dos vazios na temperatura de operação do reator, verificou-se que a existência de vazios na Região 1 ocasionaria valores positivos para  $\Delta\rho$  e  $\alpha$  em qualquer porcentagem de vazios dentro do intervalo analisado inseridos no refrigerante. Além disso, valores positivos para esses parâmetros também poderiam ser encontrados para inserções de vazios de até 3% aproximadamente na Região 2 do núcleo. Isso ocorre porque a perda de sódio no núcleo resulta na diminuição da moderação dos nêutrons (endurecimento do espectro), de modo que a energia média de nêutrons aumenta. Isso produz um efeito de reatividade positivo devido ao aumento da importância do nêutron com o aumento da energia para reatores de espectro rápido como o FBR-IME [3]. Esse efeito é acentuado nas regiões mais centrais do núcleo, visto que, além de o fluxo neutrônico ser maior nessas regiões, o grande efeito de endurecimento espectral não é contrabalançado por uma grande contribuição da fuga para esses casos.

Apesar de a variação da reatividade do sistema ser negativa com o aumento do teor de vazios, ou seja, o aumento da porcentagem de vazios ocasiona redução da reatividade do sistema, a taxa de variação dessa reatividade é cada vez menor para maiores teores de vazio nas Regiões 1 e 2 do núcleo do reator. Nesses casos, sugere-se que a importância do efeito de endurecimento espectral vai sendo neutralizada pelo aumento da importância do efeito fuga. Contudo, esse aumento é suficientemente grande para tornar os valores de  $\Delta\rho$  e  $\alpha$  negativos apenas a partir da inserção de mais de 3% de vazios no sistema na segunda região do núcleo.

De fato, o valor absoluto do efeito dos vazios na operação do reator é fortemente influenciado por todas as causas que podem modificar a importância neutrônica de cada região do núcleo, como materiais estruturais, localização das barras de controle, teores diferenciados de

combustível, presença de envoltório, geometria do núcleo, dentre outras. Esse fato justifica as peculiaridades não-lineares do sistema, requerendo a análise caso-a-caso para as diferentes configurações propostas, ratificando ainda mais a necessidade da análise global do coeficiente de reatividade de vazios para o reator FBR-IME.

## 9.2 Análise da variação da posição e distância

Os resultados da análise da posição e da distância para a variação da reatividade e para o coeficiente de reatividade de vazios a 523K encontram-se apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

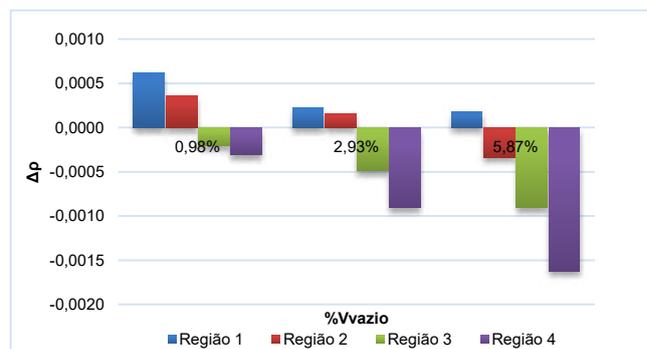


Fig 10: Análise da posição/distância a 523K:  $\Delta\rho \times \%V_{vazio}$

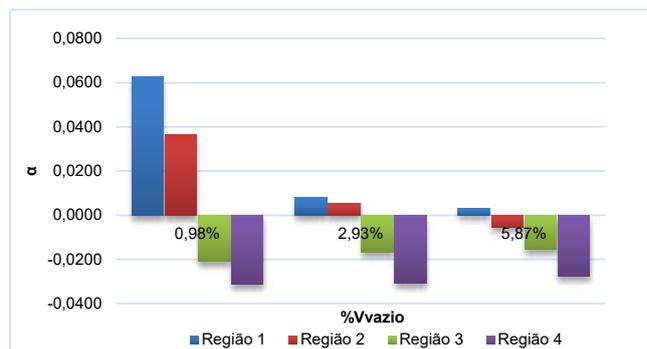


Fig 11: Análise da posição/distância a 523K:  $\alpha \times \%V_{vazio}$

Ao se analisar a formação de teores estabelecidos de vazios em diferentes regiões do núcleo pelas Figuras 10 e 11, verifica-se claramente a redução da variação da reatividade e, conseqüentemente, do coeficiente de reatividade de vazios a medida que o vazio “se desloca” da região central para a região mais periférica, independentemente da dimensão desse vazio. Conforme explicado anteriormente, um mesmo vazio perto da borda do núcleo aumenta a fuga consideravelmente, tornando maior a contribuição negativa da fuga e menor a contribuição positiva do endurecimento espectral [3].

## 10. CONCLUSÃO

Nos cálculos de segurança de qualquer reator, conforme discutido, é importante saber qual o efeito da reatividade introduzida por um volume de vazio no núcleo, fator esse altamente dependente de parâmetros como espaço e fração de vazios.

Conforme discutido anteriormente, verificou-se que, em termos gerais, o coeficiente de reatividade de vazios assumia valores críticos ( $\alpha > 0$ ) para as configurações com as seguintes características:

baixo teor de vazios no refrigerante;

predomínio da formação de vazios nas regiões centrais;

Cabe ressaltar que os valores de variação de reatividade para o sistema são da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$ , ou seja, são valores ainda considerados baixos ( $\Delta\rho < 1\%$ ), tanto positiva quanto negativamente, não sendo capazes de alterar severamente a reatividade final do sistema nessas condições de operação.

Espera-se, contudo, que, em caso de emergência, os efeitos inerentes por si só mantenham o reator em um patamar de segurança. Nesse sentido, numerosos métodos têm sido implementados para reduzir a reatividade devido aos vazios no refrigerante. A maioria das modificações de projeto tem se concentrado em aumentar a componente de fuga da reatividade de vazios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SUN, Kaichao. Analysis of Advanced Sodium-cooled Fast Reactor Core Designs with Improved Safety Characteristics. Suíça, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012.
- [2] ISHIGURO, Yuri. Uma Opção de Projeto Nuclear Brasileiro: Necessidade de Reatores Regeneradores Rápido e Projetos de Núcleos de um Reator Rápido Experimental. Itaipava, IV EN-FIR, 1983..
- [3] WALTAR, Alan E., REYNOLDS, Albert B. Fast Breeder Reactors. USA, University of Virginia. Pergamon Press, 1981.
- [4] DUDERSTADT, James J., HAMILTON, Louis J. Nuclear Reactor Analysis. Department of Nuclear Engineering. The University of Michigan, 1976.
- [5] JUUTILAINEN, Pauli. Simulating the Behaviour of the Fast Reactor JOYO. Interlaken, Suíça. IYNC, 2008.
- [6] OLIVEIRA, Aline Alves. Reator rápido regenerador independente de urânio enriquecido. Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia, 2014.

# Salvaguardas de informações digitais em modelos de projeto de infraestrutura de defesa em BIM

Giuseppe Miceli Jr\*, Paulo C Pellanda, Marcelo C Reisc (1) G  
Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais – SE/4  
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
\*giuseppe.pged@ime.eb.br

**RESUMO:** A adoção crescente do Building Information Modeling (BIM) no gerenciamento dos processos de projeto de Arquitetura, Engenharia e Construção estimulou a intensificação do fluxo de informações digitais entre os stakeholders de projeto. Entretanto, no caso onde projetos estratégicos e sensíveis estão sendo desenvolvidos, como construções militares e instalações de apoio à segurança pública, vazamentos e falhas de segurança de dados sensíveis podem comprometer objetivos estratégicos associados à segurança. Este artigo tem como objetivo trazer à luz algumas considerações sobre o uso de salvaguardas de informações digitais para o projeto de instalações públicas e sensíveis em BIM e sobre a possibilidade de sua implantação ao Sistema de Obras Militares, pela adaptação da norma inglesa PAS 1192-5:2015. Entretanto, ainda são necessárias uma maior proficiência no domínio do BIM e a manutenção de uma infraestrutura mínima para que projetos sejam enfim desenvolvidos segundo essa nova abordagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** PAS 1192-5. Modelagem da Informação da Construção. Construções de uso sensível.

**ABSTRACT:** The increasing adoption of Building Information Modeling (BIM) in the management of Architecture, Engineering and Construction design processes has stimulated the intensification of digital information flow among project stakeholders. However, in the case where strategic and sensitive projects are being developed, such as military constructions, and support facilities for public security, leakages and security breaches of sensitive data may compromise associated strategic objectives. This paper aims to bring to light some considerations about the use of digital information safeguards for the project of sensitive public activities in BIM, and about its implementation to the Civil Works Department by the adaption of the British standard PAS 1192-5:2015. However, there is still necessary a greater proficiency in BIM and the maintenance of a minimum infrastructure so that projects to be developed under this new approach.

**KEYWORDS:** PAS 1192-5. Building Information Modeling. Sensitive Use Buildings

## 1. INTRODUÇÃO

O ambiente construído passa por um período de evolução e de mudança de paradigmas. A adoção do BIM (Building Information Modeling) e o crescente uso de tecnologias digitais terão um efeito marcante no projeto, construção e gestão de construções e de ativos, impulsionado, no Brasil, pela Estratégia Nacional de Disseminação do BIM (BIM BR), criada pelo Governo Federal (Decreto nº 9377, de 17 de maio de 2018). [1]

A BIM BR, assim como outras estratégias nacionais de disseminação do BIM, (cujo exemplo mais latente é a estratégia britânica [2]) tem incentivado o aumento de *software* que suportam BIM. Destaca-se ainda a utilização, pelas partes interessadas, de ambientes comuns de dados (CDE, de *Common Data Environment*) de projetos em benefício de melhores práticas de gestão do ambiente construído, cujo exemplo mais claro no Brasil é a plataforma OPUS (Sistema Unificado de Planejamento de Obras), do Exército Brasileiro [3].

Como consequência de uma intensificação de fluxo de informações e de dados, surge a necessidade da concepção de uma abordagem voltada para a segurança dos dados de modelos da informação da construção e aplicada ao processo de projeto, principalmente quando se tratar do desenvolvimento de projetos estratégicos e sensíveis como construções militares e instalações de apoio à justiça.

A primeira norma técnica que trata do assunto é a PAS 1192-5:2015 (*Specification for security-minded building information modelling, digital built environments and smart asset management*), criada em 2015 com o objetivo de apresentar requisitos para o gerenciamento de projetos desenvolvidos em tecnologias digitais, com vistas à segurança da

informação. [4]

Este artigo trata de algumas considerações da aplicação dessa norma no projeto de construções governamentais que envolvem informações estratégicas e sensíveis cuja salvaguarda é um requisito desejável na elaboração de projetos em plataformas BIM. Faz parte do desenvolvimento, que ainda está em andamento, de um procedimento para gestão de obras militares utilizando a plataforma BIM a ser adotado pelas Comissões Regionais de Obras (CRO) do Exército; desse modo, o método a ser apresentado é adaptado para a realidade do Exército Brasileiro.

## 2. SALVAGUARDA DE INFORMAÇÃO EM MODELOS DE PROJETOS SENSÍVEIS

### 2.1 Modelos da informação da construção

No âmbito da indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação, o principal paradigma para a melhoria da gestão do processo de projeto é a modelagem da informação da construção (BIM)

Define-se sinteticamente BIM como uma representação digital de características físico-funcionais de um ativo, com um conjunto associado de processos que capacitam múltiplos interessados a projetar, construir e operar colaborativamente uma instalação [5-7].

A implantação do BIM no Exército Brasileiro ganhou expressão com o desenvolvimento e a adoção do OPUS, que surgiu com a necessidade do Sistema de Obras Militares (SOM) de melhor gerir as informações referentes ao ambiente construído do EB [3].

A adoção de modelos da informação da construção na Di-

retoria de Obras Militares (DOM) só veio a surgir a partir de 2010, com o objetivo de melhoria da qualidade dos projetos principalmente em relação a novas construções [3]-[8]. Em um estágio de adoção crescente desde então, em 2017, uma diretriz do Diretor de Obras Militares definiu, para o biênio 2017-2018, a utilização de uma ferramenta de modelagem BIM como obrigatória para elaboração de projetos de obras militares por todo o SOM [9].

Com o aumento da utilização de modelos da informação da construção em projetos de obras militares, torna-se necessário um conjunto de regras para salvaguardar as informações sensíveis a serem inseridas nos modelos de projeto.

## 2.2 A norma PAS 1192-5:2015

Em maio de 2011, o governo britânico editou a “BIM Strategy”, com diretrizes a serem tomadas a fim de possibilitar que os projetos de construção públicos estivessem usando, a partir de 2016, o chamado “BIM Level 2”, ou seja uma gestão de informação multidisciplinar do projeto no âmbito de um CDE. [2]

Para tanto, o British Standards Institute (BSI) iniciou o desenvolvimento da família 1192 de suas normas, com o intuito de normatizar a forma como o BIM deveria ser utilizado tanto na fase de construção [2] como na fase de operação [10].

Dentre elas, a norma PAS 1192-5:2015 tem como objetivo apresentar requisitos para o gerenciamento de projetos desenvolvidos em tecnologias digitais, com vistas à segurança da informação em modelos da informação da construção, ambientes digitalmente construídos e gerenciamento inteligente de ativos [4].

Trata-se sobretudo de garantir que uma boa segurança da informação tenha uma boa avaliação de risco para identificar ameaças e como mitiga-las no âmbito de um orçamento pequeno.

Segundo [4], ativos construídos sensíveis são aquelas instalações que obedecem a uma função diplomática, de segurança, de defesa nacional ou de aplicação da lei, bem como aquelas instalações que foram julgadas que pudessem ser utilizadas para comprometer a integridade do ativo construído como um todo ou sua capacidade para funcionar.

Ainda de acordo com [4], os atributos específicos que devem ser considerados como sensíveis dentro de um projeto incluem minimamente a locação e os dados sobre:

- Sistemas de controle e vigilância;
- Maquinários permanentes;
- Salas de controle, acesso e segurança;
- Cabeamentos e instalações relacionados aos sistemas anteriores;
- Detalhes estruturais de projeto;
- Espaços regulados, ou que guardem substâncias ou informações reguladas;
- Especificações técnicas de produtos e características de segurança.

Desta forma, o modelo de gestão do processo de projeto de instalações sensíveis a ser apresentado no próximo item é baseado em grande parte pelas definições e requisitos de [4] e na sequência sugerida por [7] para a gerência da segurança de informações de um projeto de uso sensível.

## 3. MODELO DE GESTÃO DO PROCESSO DE INSTALAÇÕES SENSÍVEIS

Os trabalhos do desenvolvimento da abordagem segura iniciam-se na fase de planejamento da obra, junto à decisão pelo desenvolvimento do projeto. Em resumo, o fluxo das

atividades relacionadas à salvaguarda de informações pode ser verificado na Figura 1.

Didaticamente, para este trabalho, as atividades do fluxo da Figura 1 ao longo do ciclo de vida do ambiente construído de uma obra pública foram divididas em cinco fases: planejamento, projeto, licitação, construção e operação [8], de acordo com a sequência executiva do desenvolvimento de um projeto de qualquer aquartelamento no âmbito das Comissões Regionais de Obras.

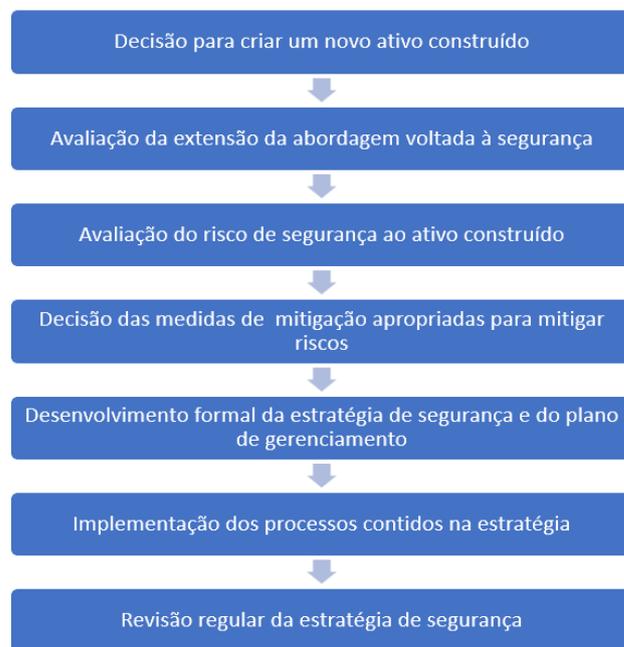


Fig 1 – Fluxo simplificado da abordagem segura do ambiente construído. Fonte: adaptado de [11].

## 3.1 PLANEJAMENTO

Entende-se como planejamento a fase do projeto que se inicia com a decisão pela construção até a determinação para início dos trabalhos do projeto [8]. É nela que se concentram os principais esforços da estratégia de segurança.

Os cuidados com a gestão de salvaguardas de informações sensíveis, que envolve um modelo de informações, iniciam-se por iniciativa do empreendedor ou do cliente, com duas tarefas.

A primeira é a nomeação de um gerente de segurança que será responsável por todo o assessoramento e acompanhamento dos procedimentos de segurança a serem desenvolvidos em seguida.

A segunda é a realização de uma triagem de segurança para avaliar a extensão da abordagem voltada à segurança, apontando a três perguntas que devem ser respondidas pelo patrocinador:

- Se o ativo construído é sensível, como um todo ou em parte;
- Em que fase da obra está sendo feita esta triagem (Se antes ou durante a realização do projeto);
- Se os ativos contidos na vizinhança são sensíveis e o modelo de informação do projeto envolverá informações sobre eles.

A partir da avaliação de risco realizada, deve ser feito um levantamento detalhado de seus requisitos de segurança junto ao cliente, para que seja elaborada formalmente uma Estratégia de Segurança do Ativo Construído (ESAC), que

deve definir os necessidades de segurança determinadas pela triagem, uma lista das pessoas a serem informadas sobre o risco residual e a definição dos mecanismos para sua revisão e atualização.

Junto à ESAC deve ser realizada uma avaliação completa dos riscos, das ações potenciais, das vulnerabilidades e dos impactos potenciais relacionada à segurança física de instalações, de pessoas, de processos, da propriedade intelectual ou de informações sensíveis comerciais ou militares [4].

Derivada da ESAC, o desenvolvimento formal do Plano de Gerenciamento de Segurança do Ambiente Construído (PGSAC) encerra as medidas necessárias para que sejam gerenciados e mitigados os riscos de segurança ou as combinações de riscos identificadas na ESAC, de forma consistente e holística [4].

Para tal, os aspectos a serem considerados no desenvolvimento de um PGSAC são:

- Aspectos contidos em documentos pessoais referentes ao projeto/ativo construído;
- Aspectos de processos referentes ao projeto/ativo construído;
- Aspectos físicos referentes ao projeto/ativo construído;
- Aspectos tecnológicos referentes ao projeto/ativo construído.
- Requerimentos de segurança de logística do projeto;
- Medidas de auditoria e monitoramento seguro do projeto;
- Medidas de gerenciamento de confiabilidade e responsabilidade pela segurança.

Por outro lado, os Requisitos de Informações de Segurança do Ambiente Construído (RISAC) devem detalhar as necessidades do ativo com respeito aos arranjos para a captura segura, manuseio, disseminação, guarda, acesso e uso de todos os dados e informação relativos a ativos sensíveis e sistemas.

As informações definidas nos RISAC serão muito úteis para instruir o Plano de Execução BIM (PEB) do projeto e serão definidas pelo gerente de segurança em conjunto com o gerente de implantação BIM ou do projeto.

Desta forma, toda a documentação deve ser analisada de forma que os requisitos sejam obedecidos nas fases seguintes

do ciclo de vida do ativo auxiliando na elaboração do PEB. Igualmente, devem ficar definidas no PGSAC e no RISAC as funções-chave do processo, que terão acesso integral aos planos de segurança supracitados e a todas as informações produzidas no âmbito do projeto. Todas as outras funções só terão acesso às informações necessárias e suficientes para a execução do projeto.

Ressalvando os contratados e os colaboradores que assinem termo de compromisso de sigilo de informação para o desenvolvimento de um projeto, intercâmbios de informação com terceiros devem ser excluídos.

Em todos os documentos citados, a gerência da segurança da informação no CDE, tendo em vista que nele são desenvolvidos os projetos em BIM, ganha muito importância. É recomendado separar no ambiente as informações consideradas sensíveis (modelos, arquivos IFC ou mesmo planilhas com dados de equipamentos e facilidades) das não-sensíveis [4].

A organização do arranjo de colaboração definido no PEB deve considerar que as informações consideradas sensíveis (modelos, arquivos IFC ou mesmo planilhas com dados de equipamentos e facilidades) sejam separadas dos não-sensíveis [4]. Uma forma de dividir os arquivos de trabalho para o projeto está ilustrada na Figura 2, onde os círculos amarelos representam modelos com informações ostensivas e os círculos verdes representam modelos com informações sensíveis executados pelos mesmos profissionais ou por profissionais diferentes.

### 3.2 Projeto

Essa fase engloba todo o desenvolvimento do projeto básico e do projeto executivo, até o início da fase externa da licitação.

A prioridade nesta fase é o desenvolvimento e o acompanhamento do projeto e do modelo de construção, tendo como base a ESAC e o PGSAC. Desenvolvem-se os principais esforços de implementação da mentalidade de segurança ditados pela ESAC estendendo-se na utilização dos softwares, do CDE e também aos relacionamentos interpessoais.

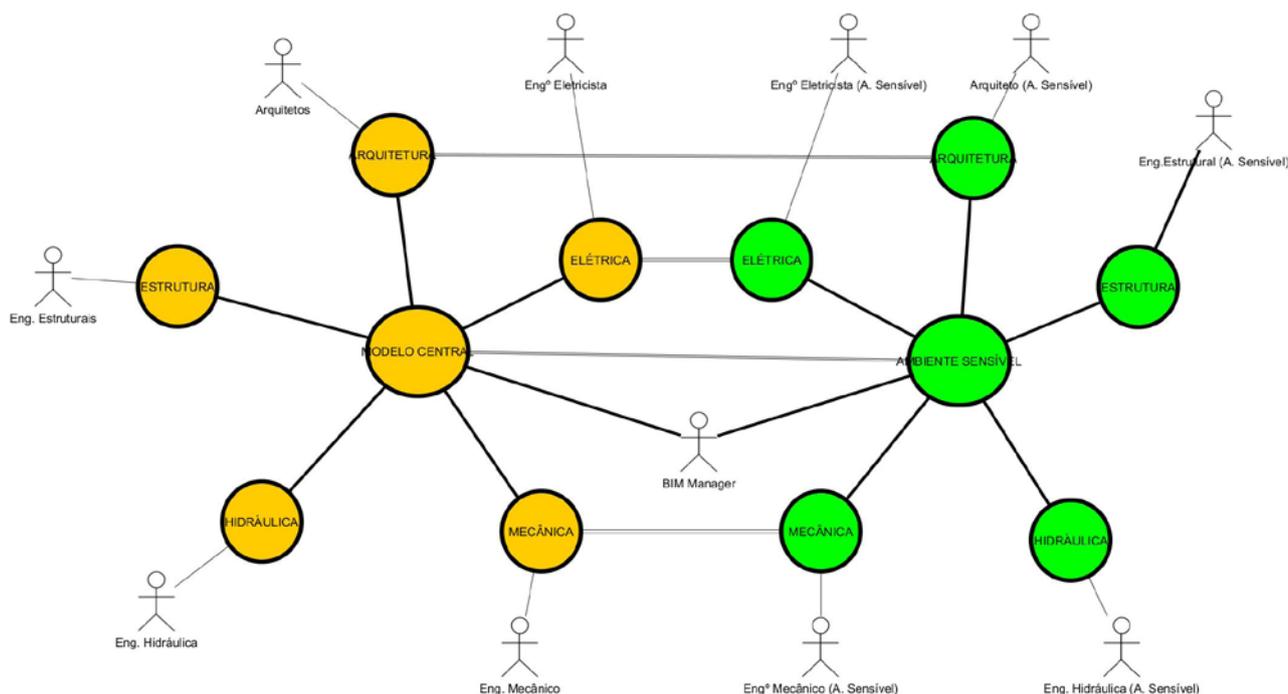


Fig 2 – Divisão possível dos worksets para projetos de áreas sensíveis. Fonte: autor

Deve-se garantir ainda, nesta fase, o gerenciamento apropriado do detalhamento de informação, dos dados e dos modelos nos projetos desenvolvidos, descritos nos RISAC e que sempre devem incluir:

- Medidas para supervisão, armazenamento e acesso seguro a todos os dados e informações relativas a bens sensíveis;
- A quantidade máxima de informações relativas a ativos ou sistemas sensíveis para ser contido no modelo;
- A gestão e monitoramento do acesso às informações sobre ativos e sistemas sensíveis contido dentro de qualquer arquivo ou banco de dados, onde os empreiteiros só tenham acesso a informação que é relevante e necessária para a realização das suas tarefas;
- Procedimentos para armazenagem e manutenção de operações para ativos e sistemas sensíveis na CDE ou bancos de dados de gestão de ativos dentro de um projeto;
- Inclusão da notificação da exigência de qualquer manejo ou proteção de informações especial dentro do CDE para os dados que possuem sensibilidade de segurança.

Os cuidados referentes à contratação de pessoal especializado mencionados no item 3.1 devem ser mantidos e revisados de forma a desenvolver continuamente uma mentalidade de salvaguarda de informações.

### 3.4 Licitação

Este item envolve a fase externa da licitação, que abrange o processo de contratação da obra. Trata-se de seguir um planejamento das aquisições que já deve ter sido realizado na ESAC e no PGSAC, levando-se em conta o sigilo dos sistemas e instalações que servem ao ativo.

Em contratos deste tipo, não só o modelo ou os dados dele constantes são descaracterizados, mas principalmente o edital e o contrato terão que apresentar cláusulas específicas de salvaguarda de informações, como confidencialidade e de obediência aos requisitos de informações. Exemplificando, nunca a concorrência para a construção da obra civil (cujo sigilo se resume a descaracterizar dados de salas e do material ali armazenado, como na Figura 3), terá os mesmos requisitos de sigilo que as licitações para subcontratados especializados.

Deve ser feito o possível para que os desenhos sejam disponibilizados em formatos como cópia impressa, imagens ou formatos PDF não interativos, ao invés de acesso a modelos que possam conter informações que não devam ser divulgadas. Exceções a essas regras devem obrigatoriamente estar contidas nos requisitos de informações do ambiente construído e no plano de execução BIM.

Devem ser previstas, no contrato de licitação ainda cláusulas que preveem as condições de destruição e/ou de retorno

dos modelos e documentos de licitantes que não assinaram contrato com a Administração, ressalvadas as disposições legais e arquivísticas de cada organização.

### 3.5 Construção

Esta fase envolve os esforços de execução da obra por parte da empresa contratada e de sua fiscalização por parte do ente público. Nesta fase, deve-se confirmar que o canteiro de construção seja gerenciado de forma segura, levando em consideração o grau de sigilo e de segurança da informação definido na ESAC.

As medidas para a contratação em empresas para a instalação de ativos e sistemas sensíveis a serem instaladas devem ser acompanhadas desde o início da obra, por meio previsão contida em contrato.

Os cuidados com os modelos e os correspondentes arquivos devem ser intensificados para evitar o vazamento de informações sensíveis tendo em vista o aumento do fluxo de pessoas no canteiro e no escritório de projeto.

A quantidade de informações e de dados referentes ao projeto armazenadas no CDE, bem como seu acesso e atualização, deve ser acompanhada e ser intervinda se houver risco à segurança.

### 3.6 Operação

A operação se inicia na entrega da obra ao cliente até seu descomissionamento, mudança de destinação ou demolição do ativo.

Deve-se preparar as informações para serem acrescentadas aos sistemas gerenciais da organização a fim de integrar o modelo de informação do ativo. As medidas apropriadas para a salvaguarda destas novas informações devem ser aplicadas na transição entre o modelo de construção e o sistema de ativos do cliente. Neste momento, arquivos com características de operação de equipamentos sensíveis devem ser dispostos separados dos outros equipamentos.

Todos os documentos referentes à obra devem ser avaliados; é salutar que documentos que tiverem como destino o descarte ou destruição devam ser arquivados pelo tempo previsto no plano de segurança ou em uma tabela de temporalidade de arquivos.

As condições da vida útil do ativo que ensejam uma nova avaliação de segurança e assim, um novo ciclo, são as seguintes:

- Mudança de uso da instalação;
- Mudança de propriedade;
- Mudança de ocupação;
- Fim da vida da instalação.

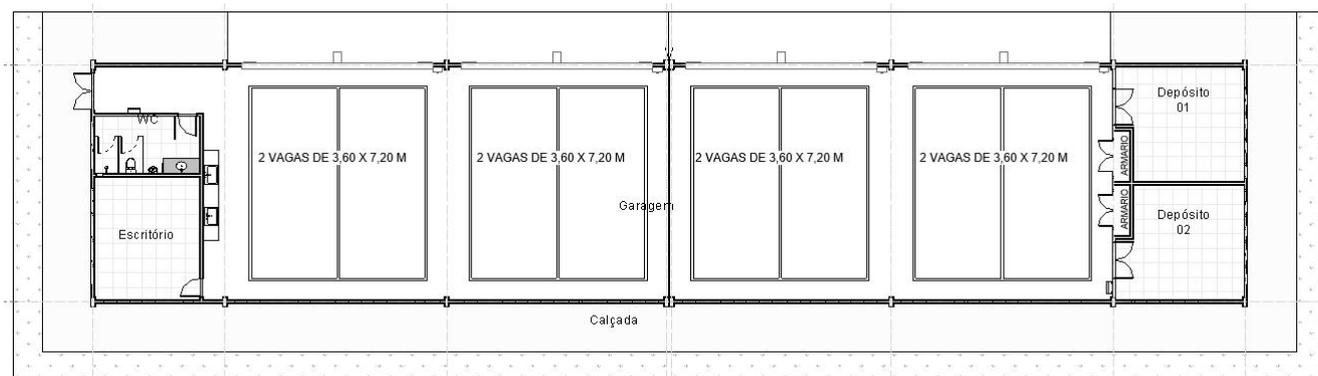


Fig 3 – Projeto de garagem de blindados descaracterizado para garagem comum. Fonte: DOM, alterado pelo autor.

Em qualquer uma das condições citadas, o ciclo deve ser reiniciado com a nomeação de um novo gerente de segurança e um novo processo de triagem.

#### 4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A IMPLANTAÇÃO NO EB

As disposições contidas no item anterior referem-se a uma situação genérica de uma construção que possua ativos ou instalações sensíveis.

Para que uma mentalidade de salvaguarda de informações no desenvolvimento de modelos de construção seja desenvolvida no âmbito do Exército, seria necessário o envolvimento das diretorias que cuidam de obras e projetos de engenharia, bem como daquelas que cuidam da telemática e da administração de redes de computadores.

No primeiro caso, embora os documentos citados no item 3.1 refiram-se a cada projeto e até, em teoria, pudessem ser desenvolvidos completamente pelas Comissões e Serviços Regionais de Obras (CRO/SRO), a responsabilidade para o estabelecimento de diretrizes gerais para a disposição de informações sensíveis dentro do modelo de construção deveria ser assumida pela DOM e pela Diretoria de Projetos de Engenharia (DPE).

Por outro lado, o envolvimento das CRO/SRO com a organização militar que é cliente da obra ainda é necessário, pois pode trazer subsídios importantes para desenvolvimento, tanto de um estudo de viabilidade adequado às necessidades de segurança orgânica, como de um modelo de informações do projeto voltado a uma mentalidade de segurança.

O desenvolvimento do projeto do novo Comando de Operações Terrestres (como ilustrado na Figura 4) pela DPE, utilizando processos colaborativos e integrados que utilizam o BIM [12], pode trazer subsídios para o estabelecimento de uma cultura de salvaguarda de informações em um modelo de construção, como os cuidados adicionais na modelagem e na organização dos arquivos de projeto no âmbito de um trabalho colaborativo em um CDE.



Fig 4– Panorama do projeto do novo Comando de Operações Terrestres. Ao fundo, o Quartel-General do Exército. Fonte: [12]

Quanto às necessidades de telemática, as organizações militares que prestam o apoio nacional e regional (os Centros de Telemática de Área e os Centros de Telemática) teriam a responsabilidade de garantir o tráfego de dados e de informações nas redes.

No caso da ocorrência de quebra de segurança, deve ser desenvolvido o Plano de Gerenciamento de Incidentes e Violações de Segurança em auxílio do trabalho do gerente de segurança do projeto, que vai descrever as ações de recuperação e contenção no caso de um evento de violação de segurança via ataque cibernético às redes colaborativas.

#### 5. CONCLUSÃO

A adoção de modelos BIM em todas as etapas do ciclo de vida de uma construção propicia o aumento do fluxo e do intercâmbio de informações entre as partes interessadas e em consequência o risco de vazamento de dados.

Como visto neste trabalho, a adoção de uma mentalidade voltada para a proteção das informações de um modelo deve se refletir desde as etapas de planejamento da obra. Tais medidas especiais se refletem na adoção de medidas de triagem e de avaliação de risco de segurança, no estabelecimento de uma estratégia de segurança do ativo e em um plano de gerenciamento para sua execução.

Grande parte do que é estabelecido no conteúdo da PAS 1192-5:2015 pode ser sintetizada no gerenciamento do acesso e do fluxo das informações necessárias para o trabalho de cada profissional e no gerenciamento contínuo da segurança da informação, desde a decisão pelo empreendimento até a mudança de destinação do ativo ou sua demolição.

Entretanto, uma implantação destas medidas no âmbito do Exército Brasileiro passa pela adaptação e pelo envolvimento dos sistemas de obras militares e de telemática a uma realidade de um intercâmbio intenso de informações e de dados.

Por fim, a implementação de uma mentalidade de contra inteligência de informações só se desenvolverá de forma satisfatória com uma maior proficiência no domínio da plataforma BIM, pelo emprego de profissionais mais experientes e pela manutenção de uma infraestrutura mínima para o desenvolvimento de projetos de obras militares de forma a salvaguardar os dados neles contidos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Brasil; Decreto nº 9377, de 17 de maio de 2018; Institui a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling, Brasil, 2018.
- [2] British Standards Institute; PAS 1192-2:2013: Specification for information management for the capital & delivery phase of construction using BIM. Reino Unido, 2013.
- [3] Nascimento, A.F.; Miceli Junior, G.; Pellanda, P.C.: Built environment lifecycle management by using large-scale BIM: a Brazilian Army study; 4th BIM Internacional Conference, São Paulo, Brasil, 2016.
- [4] British Standards Institute. PAS 1192-5:2015: Specification for security-minded building information modelling, digital built environment, digital built environments and smart asset management. Reino Unido, 2015.
- [5] Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K.: Manual da BIM: um guia de modelagem de informação na construção para arquitetos, gerentes, construtores e incorporadores, 1ª edição: Bookman, São Paulo: 2014
- [6] Succar, B.: Building Information modeling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. In: Automation in Construction, 2009, vol. 18, n.3 maio 2009, pages. 357-375, Netherlands, ISSN: 0926-5805
- [7] National Building Specification; NBS BIM Toolkit; <http://toolkit.thenbs.com>. Acessado em junho de 2018.
- [8] Miceli Junior, G.; Modelagem da informação da construção para gestão de projetos de obras de infraestrutura de defesa; Exame de qualificação ao doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2018.
- [9] Diretoria de Obras Militares; Diretrizes do Diretor de Obras Militares, Biênio 2017-2018; Brasília, Brasil, 2018.
- [10] British Standards Institute. PAS 1192-3:2014: Specification for the information management for the operational phase of assets using building information modelling. Reino Unido, 2014.
- [11] British Standards Institute. PAS 1192-5:2015: High-level navigational flowchart. Reino Unido, 2015.
- [12] Diretoria de Projetos de Engenharia; A implantação do BIM - planejando a sua contratação; 1º Simpósio BIM no SISCEAB, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

# Interpolação de Hermite na transformação de coordenadas entre sistemas de referência geodésicos, visando à modelagem das distorções entre os diferentes sistemas adotados no Brasil.

Paulo Leoncio da Silva de Melo\*, Leonardo Castro de Oliveira  
Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia Cartográfica – SE/6  
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 222290-290  
paulo.leoncio@yahoo.com.br

**RESUMO:** O objetivo foi de investigar a qualidade posicional resultante da Interpolação de Hermite, aplicada no processo de transformação de coordenadas, modelando as distorções das redes geodésicas. A transformação foi realizada operando-se diretamente as diferenças de coordenadas entre as redes geodésicas, sendo, convertidas a resultante da transformação entre sistemas e as distorções. Devido ao cálculo das derivadas nas estações, tornou-se primordial construir um procedimento para realizá-lo. Pois, a função matemática geradora das diferenças de coordenadas era desconhecida. Os coeficientes do Polinômio de Hermite foram calculados através da resolução da matriz de Vandermonde. Os experimentos foram: simulando as diferenças e o outro com dados reais. Na simulação, tanto para 3, quanto para 6 parâmetros, a discrepância foi de 50 milímetros. Com dados reais, os resultados da amostra apresentaram magnitudes centimétricas de erro posicional, em todos os casos. A Interpolação de Hermite apresentou erros com magnitudes superiores aos mesmos do ProGrid, sem outliers.

**PALAVRAS-CHAVE:** Interpolação Polinomial de Hermite. Transformação de coordenadas geodésicas. Redes Geodésicas

**ABSTRACT:** The objective was to investigate the positional quality from Hermite Interpolation applied in the coordinate transformation process. In this process of transformation was modeled the distortions of the geodesic points. The transformation was performed between the coordinate differences the geodetic structures. The resulting from inter-system transformation and distortion was converted. It was essential to construct a procedure to perform the calculation of the derivatives in the geodetic stations because the mathematical function generating the coordinate differences was unknown. The coefficients of the Hermite polynomial were calculated through the resolution of the Vandermonde matrix. The experiments were simulating the differences and the other with real data. The discrepancy was 50 millimeters for both 3 and 6 parameters in the simulation. The results of the sample presented centimetric magnitudes of positional error in all cases with real data. Hermite interpolation presented errors with magnitudes higher than those of ProGrid without outliers.

**KEYWORDS:** Hermit Polynomial Interpolation. Transformation of geodetic coordinates. Geodetic Networks.

## 1. INTRODUÇÃO

Quando as técnicas de posicionamento espacial começaram a serem difundidas no Brasil, por volta dos anos 90, não havia um referencial geodésico materializado que fosse geocêntrico. Esse deveria ser semelhante ao Sistema Geodésico de Referência (SGR) adotado pelas tecnologias e técnicas espaciais.<sup>1</sup> Com isso, surgiu a necessidade de novas realizações dos referenciais geodésicos já existentes, de maneira a se compatibilizar com o sistema usado pelas técnicas espaciais. Ou, a definição e materialização de novos sistemas de referência, que nesse caso, quase que obrigatoriamente de natureza geocêntrica.

A Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão responsável pela definição e a realização do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), tendo em vista a solução da demanda que as novas tecnologias e técnicas de posicionamento espacial criaram no país, adotou o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, realização de 2000) em 25 de Fevereiro de 2015.<sup>2</sup> Até a adoção oficial houve um período de transição em que foi permitida a utilização dos SGB SAD 69 (*South American Datum of 1969*) e Córrego Alegre (CA), independente de suas realizações, em todos os trabalhos desenvolvidos no Brasil.<sup>3</sup>

Com isso, surgiu uma necessidade de determinar os parâmetros de transformação que permitissem a melhor preservação dos valores das coordenadas nos referenciais geodésicos. A partir daí a Fundação IBGE em parceria com a *University of New Brunswick* (UNB), do Canadá, desenvolveu o *software* ProGrid. Ele permitiu a migração de banco de dados e mapas entre os SGB CA (realizações de 1961 e 1970+1972), SAD 69 (rede clássica e realização feita através da técnica

Doppler ou *Global Positioning System* - GPS), SAD 69/96 e o SIRGAS2000.<sup>4</sup>

O programa representou um avanço significativo para a transformação de coordenadas entre os referenciais geodésicos, pois antes as conversões eram feitas considerando apenas as diferenças entre os sistemas de coordenadas, ou seja, através de transformações geométricas que utilizavam apenas translações. Com o ProGrid, a modelagem de distorções das redes geodésicas foi associada à transformação de coordenadas.

As mudanças nas redes geodésicas são constantes e acompanham a evolução tecnológica. Com isso, o processo de avaliação de métodos para a transformação de coordenadas entre os referenciais geodésicos deve ser constantemente avaliado e aprimorado.<sup>5</sup>

Um dos fatores que influenciam na precisão das coordenadas das redes geodésicas é o processo de materialização do SGR na superfície terrestre. Esse processo é constituído por modelos, constantes e observações que não são exatos e, conseqüentemente, apresentam algum tipo de erro agregado. Como efeito, esses erros geram uma distorção nas coordenadas das estações das redes geodésicas.

A distorção nas coordenadas ocorre em todos os pontos que pertençam à rede, sem exceções, ou seja, ela é contínua por toda superfície terrestre. Um recurso utilizado para dimensionar esse fenômeno é a utilização de uma modelagem matemática.

A modelagem matemática pode ser realizada através de diversas metodologias, uma delas é a Interpolação. A Interpolação de um determinado fenômeno pode proceder-se através de algumas formas, como a Interpolação: Linear, de Lagrange, de Newton, de Hermite, entre outras.<sup>5,6,7,8</sup> Utilizou-se a Interpolação de Hermite, pois a mesma considera em seus cálculos a continuidade, essa que é uma característica do fenômeno das distorções nas redes geodésicas.

Ao avaliar o fenômeno das distorções através da Interpolação Polinomial de Hermite fez-se necessário considerar um recorte da Rede Geodésica Brasileira (RGB), assim, diminuiu-se o custo computacional no processamento do código-fonte e, também, avaliou-se a questão da homogeneidade do fenômeno. Esse recorte da RGB foi possível graças à Triangulação de Delaunay (TD), essa que se baseia no critério do circuncírculo e na maximização dos ângulos mínimos para a criação dos triângulos.

O Exército Brasileiro é um dos pioneiros no uso e na produção de produtos cartográficos do país. E, por isso, através da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), possui diversos dados geoespaciais e produtos cartográficos do território brasileiro, que não estão referenciados ao SIRGAS2000. Esses insumos podem ser reaproveitados através da transformação de coordenadas com modelagem de distorções. Assim, evita-se o descarte dos produtos cartográficos confeccionados e o gasto de recursos com mapeamentos desnecessários.

A hipótese é a de que a Interpolação Polinomial de Hermite modela as distorções das coordenadas, latitude e longitude, entre os diferentes SGB, com qualidade posicional suficiente e adequada a várias aplicações.

O objetivo desse artigo é investigar a aplicabilidade e a qualidade posicional produzida ou obtida pela Interpolação Polinomial de Hermite para a modelagem de distorções das redes geodésicas, através do processo de transformação de coordenadas  $\phi$ ,  $\lambda$  (latitude, longitude) entre os diferentes referenciais geodésicos materializados na superfície terrestre.

## 2. TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS ENTRE AS REALIZAÇÕES DOS SGB E AS DISTORÇÕES NA REDE GEODÉSICA

### 2.1 Sistema geodésico de referência - SGR

A base do controle geodésico de um país é formada por um SGR ou Geodetic Reference System (GRS). Daí a importância da definição e da materialização desse SGR apresentarem como resultado final um conjunto de coordenadas bem definidas e estimadas.<sup>9</sup>

- As etapas do processo de construção de um SGR são:<sup>10</sup>
- A concepção ou a idealização, princípio conceitual;
- A definição ou a convenção; idealização do sistema, onde são estabelecidos a estrutura, os processos, os dados e as informações necessárias à correlação do espaço físico (realização) com o espaço abstrato (sistema de coordenadas);
- A realização ou materialização, concretização do sistema através do estabelecimento das estações de referência e; A densificação, que é a expansão da realização do sistema.

As duas primeiras etapas referem-se ao espaço abstrato (Fig.1) e as duas últimas ao espaço físico (Fig.2).

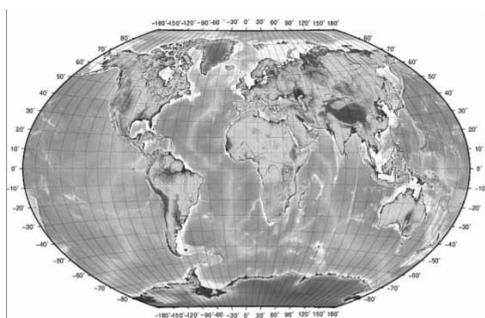


Fig. 1 – Espaço abstrato. Fonte:[11].



Fig. 2 – Ponto de uma rede geodésica materializado no espaço físico. Fonte: [12].

Um SGR traduz a natureza física e geométrica da superfície da Terra. Se a origem estiver em repouso ou em movimento retilíneo uniforme tem-se um referencial inercial. Esta ideia conceitual caracteriza um SGR ideal, que é imprescindível nas atividades que envolvem posicionamento geodésico, ou informações georreferenciadas.<sup>1,5,6</sup>

Existem dois conceitos que são relacionados com a definição e a materialização desses sistemas, são eles: o *reference system* e o *reference frame*. O *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS) diferencia esses dois conceitos como: *Reference System* (sistema de referência), definido pelo conjunto de todas as convenções, algoritmos e constantes que proporcionam a origem, a escala e a orientação de um sistema e sua evolução temporal; e o *Reference Frame* (rede de referência), definido pelo conjunto de pontos físicos com coordenadas precisamente determinadas e associadas a uma determinada época de referência, em um específico sistema.<sup>13</sup>

### 2.2 O Sistema Geodésico Brasileiro - SGB

A Fundação IBGE é a instituição responsável pela determinação das dimensões, da forma e do campo de gravidade da Terra em território brasileiro. Um SGR definido e materializado no Brasil é conceituado pelo IBGE por Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). A realização do SGB ocorre através de pontos, com coordenadas geodésicas, determinados na superfície terrestre dentro do território brasileiro. Esses pontos são utilizados para conectar os posicionamentos realizados na superfície terrestre ao SGB.

Em maio de 1944, o Conselho Nacional de Geografia (CNG), atual IBGE, iniciou o estabelecimento do primeiro SGB através da medição da base de Goiânia. A partir disso, as primeiras cadeias de triangulação do Brasil foram determinadas.<sup>10</sup>

O processo de construção de um SGB teve duas fases diferentes, tendo como divisor o desenvolvimento dos sistemas de posicionamento por satélites.<sup>14</sup> Dentre os sistemas de referência associados ao SGB desde o seu estabelecimento estão: o Sistema Córrego Alegre; o SAD 69; e atualmente o SIRGAS2000. Para mais detalhes sobre a cronologia dos SGB, recomendam-se as seguintes literaturas: [5],[9],[10].

Como qualquer ponto materializado possui distorções, as coordenadas das estações geodésicas atualizadas também apresentam esses erros, porém as magnitudes são diferentes. Quando é realizada uma rede, onde há observações de tecnologias distintas, o resultado final é um SGB mais heterogêneo no sentido das distorções. Isso gera regiões com diferentes magnitudes de distorção na mesma rede geodésica.

### 2.3 Distorções nas redes geodésicas

As distorções existentes nas materializações dos referenciais geodésicos podem ser oriundas de erros, e a magnitude e os efeitos destes devem estar em níveis aceitáveis aos objetivos da rede.<sup>10</sup> O caso ideal seria a não ocorrência das distorções nas coordenadas geodésicas da rede de um SGR, ou seja, as coordenadas na realização de origem poderiam ser associadas à realização de destino apenas com a aplicação de uma transformação geométrica.

O método de modelagem das distorções, independentemente de como seja realizado, deve garantir ao conjunto de pontos escolhidos da rede geodésica a integridade das coordenadas após sua realização. Quando aliado a um processo de transformação de coordenadas entre as redes geodésicas de um SGR, ele assegura uma transformação confiável. O processo conjunto (transformação de coordenadas com a modelagem das distorções) deve atentar para a simplicidade, a eficiência, a unicidade e o rigor do modelo. Esse deve ser de fácil entendimento e utilização pelos usuários (simplicidade), apresentar eficiência no processamento das informações (eficiência), gerar o melhor resultado possível (rigor) e fornecer uma solução única (unicidade).<sup>15</sup>

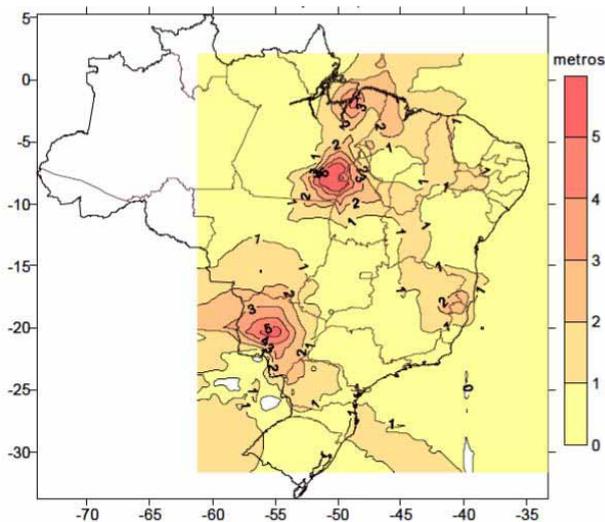
As coordenadas geodésicas (latitude, longitude) possuem magnitudes diferentes de distorção e estão em função uma das outras, como mostram as equações Eq 1 e Eq 2.

$$\text{Distorção } \varphi_{destino} = f(\varphi_{origem}, \lambda_{origem}) \quad (1)$$

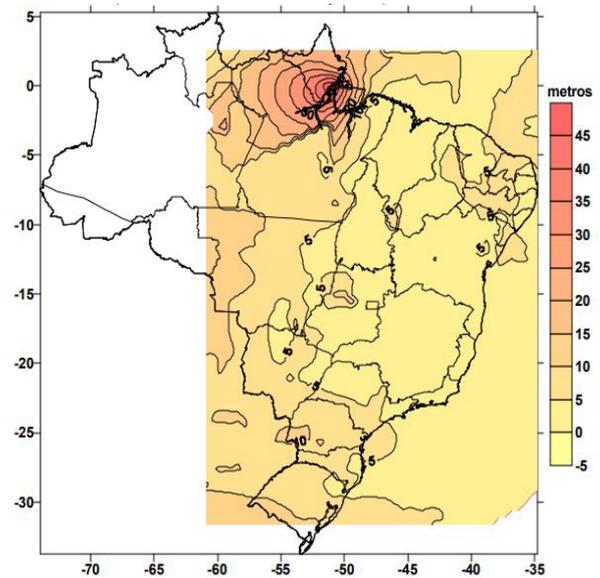
$$\text{Distorção } \lambda_{destino} = f(\varphi_{origem}, \lambda_{origem}) \quad (2)$$

Sendo:  $\varphi_{destino}$ , coordenada latitude da materialização do SGB de  $\lambda_{destino}$ ; e  $\lambda_{destino}$ , coordenada longitude da materialização do SGB de destino.

A Fundação IBGE realizou um estudo sobre o ajustamento da rede planimétrica brasileira em SIRGAS2000.<sup>16</sup> Nessa mesma análise, ela divulgou mapas de diferenças entre as coordenadas transformadas do SGB SAD 69, com ambas as realizações, para o SIRGAS2000. Esses mapas são ilustrados pelas figuras Fig.3 e Fig.4.



**Fig. 3** - Diferenças entre as coordenadas do SAD 69 (realização 1996) transformadas para SIRGAS2000 e SIRGAS2000 ajustadas para a Rede Clássica. Fonte: [16].



**Fig. 4** - Diferenças das coordenadas do SAD 69 (realização anterior a 1996) transformadas para SIRGAS2000 e SIRGAS2000 ajustadas para a Rede Clássica. Fonte: [16].

O valor da diferença entre as coordenadas de dois SGB foi dado pela equação Eq. 3.<sup>16</sup> Por convenção, os parâmetros de conversão entre os SGB foram fixados; isso permitiu concluir que a variação dos valores de diferença de coordenadas foi influenciada pela magnitude das distorções da rede geodésica considerada.

$$\text{Dif} = D + \text{Dist} \quad (3)$$

Sendo D o valor do parâmetro de conversão entre os sistemas, ou realizações de um mesmo sistema e Dist, o valor da distorção da rede geodésica.

Com uma maior disponibilidade de informações e dados ou apenas para mudar o referencial geodésico, diversos países necessitaram de algum método de transformação de coordenadas com modelagem de distorções. Nações como Estados Unidos da América (EUA) e Canadá desenvolveram soluções específicas conforme as características das redes geodésicas do SGR adotado.<sup>5</sup>

Nos EUA, a NGS (*National Geodetic Survey*) *Coordinate Conversion and Transformation Tool* (NCAT) é uma ferramenta que permite aos usuários converter as coordenadas de um conjunto de pontos, ou apenas de um único ponto, entre diferentes sistemas de coordenadas e/ou transformá-los entre diferentes redes geodésicas, em uma única etapa. Para as transformações de coordenadas com modelagem de distorções, o NCAT usa o *North American Datum Conversion Utility* (NADCON), versão 5.0. Inicialmente o NADCON foi desenvolvido para a conversão entre o NAD27, antigo sistema de referência, e o NAD83, adotado oficialmente em 1993. Mais detalhes em: [17], [18] e [19].

A *Natural Resources Canada's Canadian Geodetic Survey* (CGS) disponibiliza uma ferramenta chamada *The National Transformation Version 2* (NTv2), a qual permite a transformação de coordenadas, com modelagem de distorções entre os sistemas de referência NAD27, ATS77, NAD83 (Original) e NAD83 (CSRS) usando arquivos binários de Grid Shift (formato .GSB), quando disponíveis. Essa ferramenta foi desenvolvida, na época, para promover um padrão nacional de transformação de coordenadas entre os sistemas NAD27 (*North American Datum of 1927*) e NAD83 (*North American Datum of 1983*). Maiores informações em: [5],

[20] e [21].

### 2.4 Interpolação Polinomial de Hermite

Considere n pontos distintos, o objetivo é encontrar uma função interpolante p(x,y), tal que:

$$p(x_1, y_1) = f(x_1, y_1) \tag{4}$$

$$p(x_2, y_2) = f(x_2, y_2) \tag{5}$$

$$p(x_n, y_n) = f(x_n, y_n) \tag{6}$$

Sendo n, a quantidade de pontos interpoladores.

A classe de funções escolhida para a interpolação é a priori arbitrária e deve ser adequada às características pré-determinadas. A interpolação polinomial pode ser desadequada se os pontos interpoladores não forem escolhidos convenientemente. De um modo geral, o conjunto das funções interpoladoras é determinado por um número finito de parâmetros (no caso dos polinômios, são os seus coeficientes) que deverá ser igual ao número de condições impostas (ou seja, ao número de pontos interpoladores) para que haja apenas uma solução.

O polinômio interpolador deve ter a seguinte forma genérica:

$$p(x_n, y_n) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6x^2y^2 + \dots + a_{(m-2)}x^{Cx} + a_{(m-1)}y^{Cy} + a_mx^{Cx}y^{Cy} \tag{7}$$

A resolução do polinômio apresentado na equação Eq. 7 pode ser feita através da matriz de Vandermonde, apresentada pela Eq. 8.

$$\begin{Bmatrix} 1 & x_0 & y_0 & x_0^{Cx} & y_0^{Cy} & x_0^{Cx}y_0^{Cy} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^{Cx} & y_n^{Cy} & x_n^{Cx}y_n^{Cy} \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} a_0 \\ \dots \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(x_0, y_0) \\ \dots \\ p(x_n, y_n) \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Sendo a os coeficientes do polinômio; x e y as variáveis; n, o número de pontos interpoladores; m, o número de coeficientes do polinômio; Cx, o número de coeficientes do polinômio multiplicando somente a variável x e Cy, o número de coeficientes do polinômio multiplicando somente a variável y.

Dados n pontos interpoladores e os respectivos valores da função, existe um e somente um polinômio interpolador de grau G para esses valores. <sup>22,23</sup> O grau do polinômio pode ser obtido através da equação Eq. 9:

$$G = \frac{n-1}{3} \tag{9}$$

A Interpolação Polinomial de Hermite (IPH) consiste em aproximar uma função contínua f(φ,λ), definida em um determinado intervalo conhecido, por um polinômio P(φ,λ), em que eles devem satisfazer as seguintes condições:

$$P(\phi, \lambda) = f(\phi, \lambda) \tag{10}$$

$$\frac{\partial P(\phi, \lambda)}{\partial \phi} = \frac{\partial f(\phi, \lambda)}{\partial \phi} \tag{11}$$

Há diversas formas de realizar a IPH multivariada; uma delas é através de derivadas direcionais. Outra, ao invés de interpolar os valores pontuais das funções ou suas derivadas, interpolam-se os valores de segmentos de linhas ou triângulos, que levam a esquemas de interpolação através da teoria dos grafos.<sup>24</sup>

Nesse artigo o Polinômio de Hermite é gerado através da matriz de Vandermonde, visto que os métodos das Derivadas Direcionais e o da Teoria dos Grafos requerem o conhecimento da Lei de Formação da função a ser interpolada, enquanto que o Método da Matriz de Vandermonde não obriga tal conhecimento. As equações Eq. 12 e Eq. 13 mostram o sistema que foi resolvido para o cálculo dos coeficientes do Polinômio de Hermite.

$$p(\phi, \lambda) = a_0 + a_1\phi_n + a_2\lambda_n + a_3\phi_n\lambda_n + a_4\phi_n^2 + a_5\lambda_n^2 \tag{12}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \phi_A & \lambda_A & \phi_A\lambda_A & \phi_A^2 & \lambda_A^2 \\ 1 & \phi_B & \lambda_B & \phi_B\lambda_B & \phi_B^2 & \lambda_B^2 \\ 1 & \phi_C & \lambda_C & \phi_C\lambda_C & \phi_C^2 & \lambda_C^2 \\ 0 & 1 & 1 & \phi_A + \lambda_A & 2\phi_A & 2\lambda_A \\ 0 & 1 & 1 & \phi_B + \lambda_B & 2\phi_B & 2\lambda_B \\ 0 & 1 & 1 & \phi_C + \lambda_C & 2\phi_C & 2\lambda_C \end{pmatrix} \times \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(\phi_A, \lambda_A) \\ f(\phi_B, \lambda_B) \\ f(\phi_C, \lambda_C) \\ \frac{f(\phi_A, \lambda_A)}{\partial \phi + \partial \lambda} \\ \frac{f(\phi_B, \lambda_B)}{\partial \phi + \partial \lambda} \\ \frac{f(\phi_C, \lambda_C)}{\partial \phi + \partial \lambda} \end{Bmatrix} \tag{13}$$

Sendo: A, B e C, pontos pertencentes a algum sistema de coordenadas.

### 3. PROPOSTA METODOLÓGICA DE TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS GEODÉSICAS COM MODELAGEM DE DISTORÇÕES POR HERMITE

#### 3.1 Transformação geométrica de coordenadas do sistema R para o sistema K considerando 3 parâmetros

Em um primeiro momento pensou-se em utilizar um conjunto de dados simulados, ou seja, dados construídos matematicamente. Essa opção teve por fundamento tanto verificar o comportamento da Interpolação de Hermite na modelagem das distorções da rede geodésica quanto avaliar a robustez dos códigos-fonte gerados. Para esse fim, dois conjuntos ordenados, denominados de R e K, foram especificados. Essa mudança de sistemas de coordenadas R para o sistema K foi feita através de uma transformação geométrica.

Com os valores das coordenadas no sistema R transformadas para o sistema K, obteve-se a diferença entre ambas as coordenadas mais o valor das distorções da rede geodésica R e K. Então, a partir disso, aplicou-se a metodologia proposta nesses valores de diferença para encontrar o valor de um ponto de interesse qualquer do sistema R para o sistema K.

Após a definição das coordenadas dos sete pontos escolhidos, determinou-se que o ponto D teria as coordenadas transformadas para o sistema K, baseado no conhecimento destas no sistema R e, também, no conhecimento das coordenadas do sistema K de todos os outros pontos. Em seguida procedeu-se com o cálculo da transformação das coordena-

das de todos os pontos do sistema R para o sistema K.

As coordenadas dos pontos definidas no sistema R foram transformadas para o sistema K através da aplicação de uma Transformação Geométrica considerando três parâmetros. Esses parâmetros foram: um fator de escala ( $\lambda$ ), uma rotação ( $\beta$ ) e duas translações ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ). Houve uma alternância entre os dois primeiros parâmetros, como mostram as equações Eq. 14 e Eq. 15, utilizadas para os cálculos.<sup>27</sup>

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \lambda_x \\ y \lambda_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sendo:  $\beta$ , o ângulo de rotação dos sistemas;  $\Delta x$ , o valor da translação na componente x;  $\Delta y$ , o valor da translação na componente y;  $\lambda_x$ , o fator de escala para a componente x; e  $\lambda_y$ , o fator de escala para a componente y.

As equações Eq. 14 e Eq. 15 consideram apenas coordenadas cartesianas e os dados iniciais estão em coordenadas geodésicas, com isso fez-se necessário transformar as coordenadas dos pontos para coordenadas métricas no sistema R. Esse processo deu-se transformando as coordenadas de graus sexagesimais para graus decimais, de graus decimais para radianos e, por fim, multiplicando os resultados por um fator R, que nesta simulação foi o valor do raio médio da Terra em cada ponto.

Os valores dos parâmetros rotação, translação e fator de escala utilizados neste artigo foram definidos de acordo com as recomendações da Fundação IBGE e, quando não se tinha informação sobre o valor de algum parâmetro, pesquisaram-se valores de experiências mundiais de transformação de sistemas de coordenadas.

Todos os valores para os parâmetros de transformação geométrica mais a distância entre os vértices do triângulo tiveram um acréscimo de 50%. Essa margem adicional nos valores dos parâmetros deu-se para garantir uma cobertura da simulação em todos os casos da transformação. A distância entre os vértices do triângulo foi definida com base na Resolução n° 22, de 21 de Julho de 1983 (Boletim de Serviço 1602) da Fundação IBGE.<sup>28</sup>

Os valores de fator de escala, rotação e translação dos eixos foram definidos de acordo com a experiência do Reino Unido na transformação das coordenadas do SGR WGS84 para o SGR OSGB36.<sup>29</sup>

### 3.2 Transformação geométrica de coordenadas do sistema R para o sistema K considerando 6 parâmetros.

Para esse teste, foram utilizados os seguintes parâmetros: dois fatores de escala ( $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ), um fator de não ortogonalidade entre os eixos ( $\delta$ ), uma rotação ( $\beta$ ) e duas translações ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ). Com isso a função utilizada para a realização da transformação é apresentada pela equação Eq. 16.<sup>27</sup>

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \delta & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \lambda_x \\ y \lambda_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (16)$$

O valor da não ortogonalidade foi associado ao desvio da vertical do ponto devido à não existência de informação homogênea sobre a grandeza no território brasileiro. Então, partindo disso adotou-se o maior valor dos Estados Unidos da América, obtido através do NGS, que foi de um segundo.<sup>30</sup>

### 3.3 Etapas da metodologia.

Algumas etapas foram pensadas. Em geral, elas foram caracterizadas da seguinte forma:

- As transformações consideraram os SGB SAD 69 e SIRGAS;
- A transformação foi realizada operando-se diretamente as diferenças de coordenadas entre as redes sendo que, nesse caso, foi convertida a resultante da transformação entre sistema (espaço abstrato) e das distorções. E para uma melhor apresentação dos dados, convencionou-se que o caso A seria a diferença entre SAD69 e SIRGAS2000 e o caso B, SAD69/96 e SIRGAS2000.
- De maneira a se minimizar as regiões de distorções (de modo análogo, de diferenças) heterogêneas foi realizada uma Triangulação de Delaunay (TD);
- Através da TD, para uma dada estação geodésica, identificou-se qual vizinhança foi utilizada para a construção do Interpolador de Hermite, para tanto, dado uma vizinhança de 6 estações, o interpolador foi um polinômio completo de 2° grau;
- Devido ao fato da necessidade de calcular as derivadas nas estações, tornou-se primordial construir um procedimento para avaliação desse requisito, dado que a função matemática geradora das diferenças de coordenadas era desconhecida;
- Os experimentos ocorreram em duas fases, uma simulando as diferenças, de maneira a comprovar a consistência da solução e da robustez do código-fonte, ambos propostos, para um efetivo processamento dos dados. Outra com dados reais, para essa última foi feito um recorte da Rede Geodésica Brasileira (RGB).
- Realizou-se a transformação das coordenadas dos mesmos pontos no programa ProGrid. E, após isso, fez-se a comparação dos resultados obtidos com a Interpolação de Hermite e com o ProGrid.

A Fig.5 ilustra o fluxograma da pesquisa.



Fig. 5 – Fluxograma da metodologia

### 3.4 Materiais.

Para essa pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: um notebook e dois programas para o processamento dos dados bem como um programa para a análise dos dados. Os programas são: QGIS, Octave e LibreOffice.

O Octave foi escrito pelos professores James B. Rawlings da Universidade de Wisconsin-Madison e John G. Ekerdt da Universidade do Texas com o propósito de ser um programa complementar aplicado aos cálculos de reatores químicos. Por ser um *software* bem próximo ao funcionamento e comandos do MatLab, surgiu como uma alternativa para ins-

tuições e empresas. Ele é um programa de código aberto, gratuito e possibilita que os usuários enviem contribuições para a evolução do mesmo.<sup>25</sup>

Como todo programa, ele não considera em seus cálculos valores em graus decimais e nem em graus sexagesimais. Esses deverão ser transformados para radianos, para então ser possível resolver questões trigonométricas neste *software*. Nesse programa também é possível calcular e realizar a Triangulação de Delaunay (TD). Isso é permitido porque o Octave utiliza a biblioteca do QHULL; esse é um programa específico para a realização da TD e de outras triangulações.<sup>25,26</sup>

## 4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 Transformação geométrica de coordenadas do sistema R para o sistema K considerando 3 parâmetros

A simulação dos dados considerou algumas formas em que os SGR topocêntricos foram implantados. Essas formas consideradas foram realizadas de maneira a se ajustar o SGR a uma dada região de abrangência. Além disso, a materialização estava em função das técnicas e recursos disponíveis. Portanto, os parâmetros de transformação entre SGR são específicos para cada caso.

Considerando rotação e translação e com os dados iniciais, passou-se para a aplicação do código-fonte. Apesar dos valores das diferenças das coordenadas latitude e longitude do ponto D (entre sistemas) serem conhecidos, estes foram ignorados no processo e se utilizou somente o mesmo para fins de validação dos resultados obtidos após a aplicação da metodologia nos dados construídos matematicamente.

De posse do valor da diferença das coordenadas do ponto D, para a validação da metodologia, foi possível comparar os mesmos com o valor obtido pela diferença real entre os pontos, calculada anteriormente à aplicação dos códigos-fonte. A tabela 1 mostra os valores obtidos para as coordenadas, Latitude e Longitude, e as devidas comparações.

**Tab 1:** Valores obtidos para o erro das coordenadas latitude e longitude por Hermite e por diferença.

Pontos	Latitude	Longitude
D <sub>-R-K</sub> por Her. (m)	45.900,894	2.550.730,004
D <sub>-R-K</sub> por dife (m)	45.900,944	2.550.729,954
Discrep (m)	0,050	0,050

Este resultado mostra que em um ambiente matematicamente construído através da Transformação Geométrica com os parâmetros de rotação e translação, para as coordenadas, obteve-se uma discrepância posicional aproximada de 50 milímetros. Ou seja, em um ambiente onde os pontos utilizados para o cálculo da Transformação das Coordenadas, latitude e longitude, estão espaçados aproximadamente 50 quilômetros de distância, o erro posicional em latitude e longitude foi de 50 milímetros.

A diferença entre a aplicação de ambos os parâmetros está nos resultados das derivadas. Considerando a rotação com a translação, os valores das derivadas foram próximos entre os pontos considerando latitude e longitude separadamente. Com o fator de escala e a translação, os valores das derivadas foram iguais para as duas coordenadas, latitude e

longitude, considerando o mesmo ponto, e foram diferentes considerando outros pontos.

O valor de diferença de coordenadas do ponto D no sistema R para o sistema K foi comparado ao valor obtido pela diferença calculada anteriormente a aplicação do código-fonte. A tabela 2 mostra os valores obtidos.

**Tabela 2:** Valores obtidos para a diferença de coordenadas por Hermite e por subtração.

Pontos	Latitude	Longitude
D <sub>-R-K</sub> por H. (m)	1080,230	986,193
D <sub>-R-K</sub> por Dif. (m)	1080,180	986,143
Discrep. (m)	0,050	0,050

A discrepância do que foi calculado por Hermite com o que foi calculado pela diferença das coordenadas do ponto D foi de 50 milímetros, mesmo valor encontrado quando a rotação e a translação são consideradas. Isso caracteriza a homogeneidade dos dados inseridos, o que já era esperado.

Analisando os resultados obtidos através dos testes realizados anteriormente, percebe-se que a simulação considerando três parâmetros, sendo eles rotação, fator de escala e translação, conseguiu construir um cenário próximo da realidade das regiões de distorção da Rede Geodésica. Isso é baseado nos resultados iguais de discrepâncias entre todos os testes realizados. Parte disso deve-se a igual atribuição de valores para os parâmetros de transformação, em Latitude e Longitude, o que gerou magnitudes homogêneas de diferenças entre as coordenadas dos pontos.

### 4.2 Transformação geométrica de coordenadas do sistema R para o sistema K considerando 6 parâmetros

Para este cenário utilizaram-se os mesmos pontos que o cenário anterior. Atentou-se para os problemas impostos pelo programa Octave<sup>25</sup> e pela própria Transformação Geométrica. O valor da diferença de coordenada do ponto D foi calculado inserindo as coordenadas métricas de latitude e longitude nos Polinômios de Hermite calculados. A tabela 3 mostra os resultados obtidos com a comparação entre Hermite e a diferença entre as coordenadas calculadas anteriormente.

**Tab 3:** Valores obtidos para a diferença de coordenadas por Hermite e por subtração.

Pontos	Latitude	Longitude
D <sub>-R-K</sub> por Her (m)	30087,0042	59295,7729
D <sub>-R-K</sub> por Dif.(m)	30087,0540	59295,7230
Discrepância (m)	0,050	0,050

Analisando os resultados obtidos através dos testes realizados anteriormente, pode-se concluir que a simulação considerando 3 parâmetros e 6 parâmetros conseguiu construir um cenário semelhante à homogeneidade das regiões de distorção da Rede Geodésica, em geral. Isso é baseado nos resultados iguais de discrepâncias entre todos os testes realizados. Parte disso deve-se, também, a igual atribuição de valores para os parâmetros de transformação, o que gerou magnitudes de diferenças homogêneas entre as coordenadas dos pontos. De qualquer forma esses cenários serviram para comprovar a robustez e o comportamento da metodologia perante a igualdade de valores de parâmetros nas coordenadas latitude e longitude.

### 4.3 Experimentos com dados reais

Os dados reais foram aqueles que representaram as coordenadas geodésicas dos pontos, onde os mesmos pertencem aos SGB SIRGAS2000, SAD69 e SAD69/96. Após a definição dos pontos a serem utilizados, formou-se um conjunto de dados. Esse conjunto foi separado em dois subconjuntos, a saber: um conjunto diz respeito aos pontos para realizar a modelagem (conjunto M) e o segundo conjunto é composto pelos pontos a terem suas coordenadas transformadas (conjunto T). A tabela 4 mostra os pontos do conjunto T. Após definidos os pontos do conjunto M, fez-se a Triangulação de Delaunay pelo programa Octave.<sup>25</sup>

**Tab 4:** Estações oficiais escolhidas para terem suas coordenadas transformadas.

Estado	Estação
AMAPÁ	10024
AMAPÁ	10031
MATO GROSSO	2307
MATO GROSSO	2300
RIO GRANDE DO SUL	3103
RIO GRANDE DO SUL	4013
MINAS GERAIS	1512
PERNAMBUCO	9289
GOIÁS	1925

As distorções tanto em latitude, quanto em longitude, possuem magnitudes diferentes, então, os cálculos foram feitos separadamente. Após isso, as coordenadas geodésicas em questão foram transformadas para coordenadas métricas, sendo utilizado o raio médio da Terra em cada ponto da amostra.

Para avaliar as derivadas nos pontos do triângulo principal, obtiveram-se dois polinômios em que a derivada da função não foi levada em consideração no cálculo dos coeficientes, um para o caso da latitude e outro para a longitude. Com os polinômios construídos, avaliaram-se as derivadas, visando à construção dos polinômios de Hermite. Foram inseridas as coordenadas, latitude e longitude, do ponto a ser transformado e então se obtiveram as coordenadas transformadas de uma rede para outra.

A validação da metodologia aplicada em dados reais deu-se através da comparação entre os valores das diferenças de coordenadas geodésicas, obtidos por meio da Interpolação de Hermite, e os valores obtidos por meio da diferença entre as mesmas coordenadas geodésicas. A tabela 5 mostra esses valores para o erro cometido pela Interpolação de Hermite.

**Tab 5:** Erro cometido pela Interpolação de Hermite.

UF	EST	Caso A		Caso B	
		Lat (cm)	Lon (cm)	Lat (cm)	Lon (cm)
AP	10024	-	-	2,41	15,35
AP	10031	-	-	20,74	28,06
MT	2307	3,48	7,81	24,30	22,92
MT	2300	-	-	3,52	0,44
RS	3103	30,85	45,90	0,51	4,52
RS	4013	37,72	47,41	14,68	2,37
MG	1512	3,24	4,53	1,54	0,08
PE	9289	-	-	0,33	0,50
GO	1925	1,91	0,69	0,09	0,64

Como se pode observar, a maioria dos erros apresentados pela tabela TAB. 5, tanto para o caso A quanto para o caso B, foram da ordem dos centímetros. Na amostra também houve alguns pontos que tiveram erros menores que 1 centímetro e não houve pontos que tiveram erros nas coordenadas maiores que 48 centímetros.

O BDG da Fundação IBGE não informa os valores de outros SGB, a não ser do SIRGAS2000, esses valores foram obtidos através de um pedido para a própria Fundação. Os cálculos referentes à transformação dos pontos 10024, 10031, 2300 e 9289 considerou apenas o caso B, visto o insucesso na obtenção das coordenadas em SAD 69.

Analisando os mapas de diferenças de coordenadas (Fig. 3 e Fig. 4), o estado do Amapá apresentou várias regiões com valores distintos considerando a diferença entre SAD 69 e SIRGAS2000 (caso A). Já no caso B, o mapa de diferenças entre SAD 69/96 e SIRGAS2000, nesse estado, apresenta apenas uma região. Nos casos de 10024 e 10031, todos os pontos do conjunto M pertenciam à mesma região de valor de diferença de coordenadas, isso foi feito para avaliar o comportamento do polinômio na questão da homogeneidade dos valores de distorção das redes geodésicas (SAD 69/96 e SIRGAS2000). O Polinômio de Hermite conseguiu obter valores de erro das coordenadas menores que 30 centímetros. Isso pode ter ocorrido por conta da geometria dos triângulos resultantes da TD, principalmente no ponto 10031, que apresentou os maiores erros nas coordenadas.

No estado do Mato Grosso, o ponto 2307 foi avaliado para o caso A. Já para o caso B, foram avaliados os pontos 2307 e 2300. O ponto 2300 teve os dados do conjunto M escolhidos numa mesma região de valor de diferenças de coordenadas, com isso, obteve-se um erro de 3,52 centímetros em Latitude e 4,4 milímetros em Longitude. Esse resultado teve influência da geometria dos triângulos oriundos da TD, na homogeneidade das distorções e pelo fato de que ambas realizações tiveram um mesmo controle geodésico. Considerando o caso do ponto 2307, tem-se que: no caso A, os pontos do conjunto M estavam na mesma região; no caso B, os pontos de M estavam em diferentes regiões caracterizando, desse forma, uma situação heterogênea para a transformação.

De acordo com a tabela 5, os erros no caso A foram menores que no caso B, isso é justificado pela diferença de tipos de regiões, pois os triângulos utilizados para analisar ambos os casos obtiveram a mesma geometria, através da TD. Isso também pode ser justificado pela forma como o controle geodésico das materializações do SAD 69 foi feito: a realização SAD 69/96 com o mesmo controle do SIRGAS2000; e a outra, mais antiga (SAD 69), com o controle diferente.

No estado do Rio Grande do Sul, os pontos 3103 e 4013 resultaram em erros abaixo dos 48 centímetros e acima dos cinco milímetros nos dois casos analisados. Comparando os dois casos, percebe-se que os erros cometidos no caso A foram maiores que os mesmos no caso B. Ambos os pontos apresentaram a heterogeneidade das distorções no conjunto M, no caso A. No caso B, o ponto 3103 apresentou a homogeneidade do fenômeno no mesmo conjunto e o ponto 4013 manteve a condição de heterogeneidade das distorções do conjunto M. Parte dessa melhora tem ligação com a geometria do triângulo resultante da TD e com relação ao controle geodésico que foi feito na realização dos SGB.

Os pontos da amostra 1512 (MG) e 1925 (GO), tiveram os dados em regiões homogêneas de distorção em ambos os casos, e a geometria dos triângulos obtidos com a TD foi a

mesma. Então, o fato dos erros serem menores no caso B está justificado apenas pelo controle geodésico realizado nos SGB considerados.

Já o ponto 9289 (PE) apresentou resultados menores que um centímetro no caso B, isso também pelo fato da homogeneidade do conjunto M, pela geometria do triângulo obtido pela TD e pelo mesmo controle geodésico feito nas materializações do SAD 69/96 e do SIRGAS2000.

Com os valores dos erros cometidos pelo polinômio de Hermite nas coordenadas Latitude e Longitude de cada ponto da amostra, foi calculada a discrepância planimétrica. A tabela 6 mostra os valores calculados para a discrepância planimétrica de cada ponto em cada cenário avaliado.

**Tab 6:** Valores da discrepância planimétrica dos pontos.

UF	EST.	Discrep Planim. (cm)	
		Caso A	Caso B
AP	10024	-	15,54
AP	10031	-	34,90
MT	2307	8,56	33,40
MT	2300	-	3,55
RS	3103	55,30	4,55
RS	4013	60,59	14,87
MG	1512	5,57	1,54
PE	9289	-	0,60
GO	1925	2,03	0,64

Como se pode observar na tabela 6, os maiores valores para a discrepância planimétrica, considerando o caso A, foram os pontos 3103 e 4013. A explicação para a ocorrência de tal fato segue a mesma informada nos parágrafos anteriores.

Já considerando o caso B, os pontos que apresentaram as maiores discrepâncias planimétricas foram: 10024, 10031, 2307 e 4013. A explicação para a ocorrência de tais magnitudes difere entre alguns conjuntos dos pontos citados anteriormente, como mostrado nos parágrafos anteriores.

Para fins de comparação, a mesma transformação de coordenadas foi feita através do programa ProGrid. Em seguida, foi realizada uma comparação com os dados reais para obter o erro cometido por esse *software*. A tabela 7 mostra os erros cometidos em latitude, longitude de cada ponto, para cada caso. E a tabela 8 mostra os valores de discrepância planimétrica para cada caso.

**Tab 7:** Apresentação do erro cometido pelo ProGrid.

UF	EST	Erro ProGrid (cm)		Erro ProGrid (cm)	
		Caso A		Caso B	
		Lat	Lon	Lat	Lon
AP	10024	-	-	0,00	0,31
AP	10031	-	-	4,01	4,62
MT	2307	5,25	20,64	10,49	6,51
MT	2300	-	-	0,62	264,65
RS	3103	22,29	12,22	0,93	2,16
RS	4013	2,48	6,19	2,17	1,86
MG	1512	1,23	6,16	0,31	0,93
PE	9289	-	-	0,62	1,85
GO	1925	16,97	447,74	3,09	2,48

**Tab 8:** Discrepância planimétrica calculada para o ProGrid.

UF	EST.	Erro ProGrid (cm)	
		Caso A Disc. Pla.	Caso B Disc. Pla.
AP	10024	-	0,31
AP	10031	-	6,12
MT	2307	21,30	12,35
MT	2300	-	264,65
RS	3103	25,42	2,35
RS	4013	6,67	2,86
MG	1512	6,29	0,98
PE	9289	-	1,95
GO	1925	448,06	3,96

Comparando os dados apresentados pela tabela 7 e a tabela 5, para o caso A, o erro cometido pela modelagem das distorções através da Interpolação de Hermite foi em 40% dos pontos da amostra menor do que comparado com a modelagem realizada pelo *software*, isso para Latitude. Já para Longitude, o erro cometido pela modelagem por Hermite foi em 60% dos pontos da amostra menor que a mesma realizada no ProGrid. Como consequência disso a discrepância planimétrica dos pontos na amostra, por Hermite, foi menor em 60% dos mesmos comparados com a discrepância dos pontos transformados pelo programa, tabelas 8 e 6.

Analisando novamente as tabelas 7 e 5, para o caso B, a quantidade de pontos que tiveram o erro cometido por Hermite menor que o mesmo cometido pelo ProGrid foi de 33,3% e 44,4% dos pontos da amostra para as coordenadas Latitude e Longitude, respectivamente. Como consequência disso, em 33,3% dos pontos da amostra apresentaram valores para discrepância planimétrica calculada por Hermite menor que a mesma calculada pelo *software*, tabelas 8 e 6.

As tabelas 9 e 10 mostram as análises estatísticas calculadas para os conjuntos de dados da amostra.

**Tab 9:** Média amostral (M), desvio-padrão amostral (D) e variância amostral (V) dos resultados das amostras.

	E. He. (cm)		E. Pro. (cm)		E. He. (cm)		E. Pro. (cm)	
	Caso A				Caso B			
	Lat	Lon	Lat	Lon	Lat	Lon	Lat	Lon
M	15,4	21,3	9,6	98,6	7,6	8,3	2,5	31,7
D	17,4	23,3	9,4	195,3	9,6	10,9	3,3	87,4
V	302,2	543,7	88,8	38131	92,7	119,1	10,9	7634,1

**Tab 10:** Média amostral (M), desvio-padrão amostral (D) e variância amostral (V) dos resultados das amostras e erro médio quadrático das amostras (E) da discrepância planimétrica (D.P).

	E. He. (cm)		E. Pro. (cm)	
	Caso A		Caso B	
	D. P.	D. P.	D. P.	D. P.
M	26,41	101,55	12,18	32,83
D	28,94	193,90	13,68	87,01
V	837,60	37596,51	187,27	7569,96
E	36,98	200,97	17,74	88,36

Observando as tabelas 9 e 10, o erro médio quadrático (RMSE) das incorreções cometidas por Hermite foi menor que o RMSE calculado para os resultados do ProGrid, assim como todos os outros parâmetros estatísticos estimados. Isso ocorreu não pelo fato da maioria dos erros produzidos pela Interpolação serem menores que os erros do programa, mas pela presença de dois *outliers* nos resultados obtidos pelo *software*, que influenciou negativamente nos parâmetros estatísticos do mesmo.

As tabelas 11 e 12 mostram as análises estatísticas realizadas sem a presença dos pontos que apresentaram *outlier* nos resultados.

**Tab 11:** Média amostral (M), desvio-padrão amostral (D) e variância amostral (V) dos resultados das amostras, sem os pontos com *outlier*.

	E. He. (cm)		E. Pro. (cm)		E. He. (cm)		E. Pro. (cm)	
	<b>Caso A</b>				<b>Caso B</b>			
	Lat	Lon	Lat	Lon	Lat	Lon	Lat	Lon
M	18,8	26,4	7,8	11,3	9,2	10,5	2,7	2,6
D.	18	23,4	9,8	6,9	10,4	11,5	3,7	2,2
V	326,7	548,5	96	46,9	108,4	132,8	13,9	4,8

**Tab 12:** Média amostral (M), desvio-padrão amostral (D) e variância amostral (V) dos resultados das amostras e erro médio quadrático das amostras (E) da discrepância planimétrica (D.P), sem os pontos com *outlier*.

	E. He. (cm)	E. Pro. (cm)	E. He. (cm)	E. Pro. (cm)
	<b>Caso A</b>		<b>Caso B</b>	
	D. P.	D. P.	D. P.	D. P.
	32,50	14,92	15,06	3,84
	29,48	9,89	14,33	4,18
	869,13	97,87	205,42	17,51
	41,33	17,20	20,07	3,30

Apesar dos dados estatísticos para Hermite terem apresentado resultados menores que os mesmos para o ProGrid, isso não é refletido quando comparados os erros que a Interpolação cometeu contra os erros produzidos pelo programa. Comparando a tabela 9 com a tabela 11 e comparando a tabela 10 com a tabela 12, percebeu-se que a presença dos *outliers* interfere na análise comparativa entre os dois métodos. Deve ser registrado que o *software* utilizou todas as estações da rede geodésica considerada para o cálculo das distorções das coordenadas. Diversamente, a Interpolação de Hermite considera apenas os pontos próximos da rede geodésica. Por isso, seria um tanto injusto considerar o ProGrid melhor em qualidade posicional na amostra que o Hermite.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O processo de simulação de dados mostrou-se importante para avaliar a qualidade da metodologia proposta através dos códigos-fonte gerados. Os resultados obtidos pela Interpolação de Hermite independentemente da quantidade de parâmetros usados na Transformação Geométrica foram iguais, 50 centímetros de erro.

Esse efeito foi esperado, pois se trabalhou com os mesmos parâmetros para ambas as coordenadas, simulando uma situação homogênea. Isso também foi notado pelos coeficientes dos polinômios de Hermite, em que para cada caso

de transformação foram diferentes em parte, havendo alguns iguais em valor absoluto. Com isso, a metodologia aplicada através dos códigos-fonte gerados apresentou uma eficiência no processamento das informações, gerou o melhor resultado possível para as condições impostas e apresentou uma única solução para cada situação.

Mesmo havendo situações em que as distorções eram homogêneas, o método encontrado para avaliar as derivadas nos pontos vértices do triângulo principal teve como resultado valores próximos entre si. Isso prova que o fenômeno estudado não é linear e o modelo conseguiu representar em seus cálculos essa condição.

No processamento considerando dados reais, foram previstas três situações: a) geometria dos triângulos oriundos da Triangulação de Delaunay; b) modos de realização do controle geodésico de cada materialização dos SGB considerados e c) homogeneidade e heterogeneidade das regiões de distorção representadas nos mapas de diferenças obtidos pela Fundação IBGE (Fig. 3 e Fig. 4). Com os resultados obtidos, é possível afirmar que a modelagem das distorções pela Interpolação de Hermite é prejudicada pelos seguintes fatores: a) a avaliação de pontos em regiões heterogêneas de distorções; b) a qualidade geométrica dos triângulos obtidos pela TD, ou seja, a disposição espacial dos pontos considerados; e c) o controle geodésico de cada materialização dos SGB que foram considerados nos cálculos. Ou seja, as magnitudes dos erros cometidos na transformação das coordenadas geodésicas bidimensionais pela Interpolação de Hermite foram maiores na presença de um ou mais desses fatores apresentados.

Para fins de comparação e mais uma forma de validação deste modelo, foram realizadas as mesmas transformações de coordenadas no programa fornecido pela Fundação IBGE, o ProGrid, que, na época de lançamento, representou um marco para os estudos de transformação de coordenadas.

Na amostra estudada nessa pesquisa, considerando a transformação de coordenadas de SAD 69/96 para SIRGAS2000, o ProGrid apresentou erros em latitude que foram menores em 66,7% dos pontos da amostra, comparados com os da Interpolação de Hermite. Em longitude a porcentagem foi de 55,6% da quantidade de pontos com erros menores comparados com Hermite, para a mesma transformação. Já considerando a transformação das coordenadas de SAD 69 para SIRGAS2000, o ProGrid apresentou 60% da quantidade de pontos da amostra com erros em Latitude menores que os erros cometidos por Hermite, já em Longitude essa porcentagem foi de 40% da quantidade de pontos com erros menores que Hermite.

Essa comparação é um tanto injusta, pois o ProGrid utiliza todos os pontos da rede geodésica para calcular essa transformação de coordenadas. Com isso, surgem amostras que possuem a presença de *outliers*, o que estatisticamente inviabiliza qualquer conclusão acerca da comparação desse programa com qualquer outro método. Já a Interpolação de Hermite, nessa pesquisa, utilizou apenas os pontos da amostra.

Os *outliers* foram retirados para uma nova análise em que se chegou a resultados melhores para o ProGrid. Realizou-se uma nova comparação e estatisticamente o programa foi melhor que a interpolação. Portanto, deve ser feita uma análise com todos os dados da rede geodésica disponíveis para haver uma comparação justa e conforme entre as duas metodologias.

Após todas as análises feitas é possível afirmar que a mo-

delagem das distorções pela Interpolação de Hermite gerou coordenadas bidimensionais com erros menores que 48 centímetros. Isso ocasionou uma discrepância planimétrica dos pontos avaliados menores que 61 centímetros, apresentado assim a qualidade posicional que a modelagem das distorções por essa Interpolação, na amostra selecionada, produz no resultado final.

Aos trabalhos futuros, nessa temática, recomenda-se:

- Aplicar a metodologia empregando toda a Rede Geodésica Brasileira nas suas mais diversas materializações, para aprofundar a avaliação desta em diferentes regiões de distorção de coordenadas;
- Ampliar o estudo para a componente altimétrica, pois futuramente o SIRGAS 2000 terá essa componente adequada ao IHRG/IHRF;
- Desenvolver um programa que realiza a Transformação de Coordenadas empregando a metodologia desenvolvida de forma que o usuário insira as coordenadas sem a necessidade de trabalhar diretamente com o código-fonte em algum processador e;
- Determinar os valores dos coeficientes do Polinômio de Hermite através de iterações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. F. G. Monico, Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. Presidente Prudente: Unesp, 2008.
- [2] IBGE. Proposta preliminar para adoção de um Referencial Geocêntrico no Brasil. [online] 2002. Disponível: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/apresentacoes\\_artigos/2000/seminario\\_2000\\_proposta\\_a.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/apresentacoes_artigos/2000/seminario_2000_proposta_a.pdf). Acessado em 11 Set 2017
- [3] IBGE. FAQ. 2018a. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm#2>. Acesso em: 29 abr. 2018.
- [4] IBGE. ProGrid: Guia do Usuário. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/sirgas/aplicativos/transformacao\\_coordenadas/progrid\\_guiado\\_usuario.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/sirgas/aplicativos/transformacao_coordenadas/progrid_guiado_usuario.pdf). Acesso em: 10 jan. 2018.
- [5] J. P. Magna Júnior, O uso de thin-plate splines na transformação de coordenadas com modelagem de distorções entre realizações de referenciais geodésicos. 2012. 118 f. tese (Doutorado) - Curso de Ciências Cartográficas, Unesp, Presidente Prudente, 2012.
- [6] P. R. C. S. Benevides, Metodologia para avaliar a exatidão de transformação entre coordenadas geodésicas. 2005. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Cartográfica, Seção de Ensino de Engenharia Cartográfica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: [http://www.cartografia.ime.eb.br/trabalhos/MESTRADO/2005\\_PAULO ROBERTO CORREA DE SA E BENEVIDES/Tese.pdf](http://www.cartografia.ime.eb.br/trabalhos/MESTRADO/2005_PAULO%20ROBERTO%20CORREA%20DE%20SA%20E%20BENEVIDES/Tese.pdf). Acesso em: 08 ago. 2017
- [7] N. M. B. Franco, Cálculo Numérico. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [8] J. C. Chaves, M. C. Santos, F. G. Nievinski, M. R. Craymer, Fontes de distorções da rede geodésica brasileira. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 14, n. 2, p.186-199, abr. 2008.
- [9] C. L. C. Anciães, Transformação entre redes geodésicas: uso de coordenadas 3D, 3D com restrição e 2D. 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Cartográfica, Seção de Ensino de Engenharia Cartográfica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003.
- [10] L. C. Oliveira, Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro associadas ao SAD 69: Uma Proposta Metodológica de Transformação. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1998
- [11] QGIS. Sistemas de Coordenadas. 2018. Disponível em: [https://docs.qgis.org/2.8/pt\\_PT/\\_images/geographic\\_crs.png](https://docs.qgis.org/2.8/pt_PT/_images/geographic_crs.png). Acesso em: 02 jun. 2018.
- [12] R. J. A. SILVA, Amapá e IBGE concluem revitalização da rede geodésica do estado. 2016. Disponível em: <https://tecterra.com.br/amapa-ibge-concluem-revitalizacao-rede-de-mapeamento/>. Acesso em: 02 jun. 2018.
- [13] IERS. IERS Conventions (2010). Frankfurt: Gérard Petit And Brian, 2010. 179 p. Disponível em: [https://www.iers.org/SharedDocs/Publicationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publicationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1). Acesso em: 29 abr. 2018.
- [14] IBGE. Geodésia. 2018. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default.shtm>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- [15] P. Collier, Development of Australia's National GDA94 transformation GRIDS: consultant's report to the Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. Department of Geomatics, The University of Melbourne, Melbourne – Australia, 2002.
- [16] IBGE. Ajustamento da Rede Planimétrica Brasileira em SIRGAS2000. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_planialtimetrica/relatorio/rel\\_sirgas2000.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planialtimetrica/relatorio/rel_sirgas2000.pdf). Acessado em: 02 de Jun, 2017.
- [17] NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. The application of Minimum-Curvature-Derived Surfaces in the transformation of positional data from the North American Datum of 1927 to the North American Datum of 1983. NOAA Technical Memorandum NOS NGS-50. Rockville – U.S.A., 1990. Disponível em: [https://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/NOSNGS-50.pdf](https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/NOSNGS-50.pdf)
- [18] B. Tran, NADCON - North American Datum Conversion Utility. 2018. Disponível em: <https://www.ngs.noaa.gov/TOOLS/Nadcon/Nadcon.shtml>. Acesso em: 14 maio 2018.
- [19] K. Tadepalli, NGS Coordinate Conversion and Transformation Tool (NCAT). 2018. Disponível em: <https://www.ngs.noaa.gov/NCAT/>. Acesso em: 14 maio 2018.
- [20] D. Junkins e C. Erickson, Version 2 of the National Transformation between NAD27 and NAD83 and its importance for GPS positioning in Canada. Draft Report, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, 1996. 7 p. [13] Marcus B. Medeiros, Ronaldo M. Salles, Utilização de MANETS – DTN em Sistemas de Comunicações Militares, 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, I2TS'09, Florianópolis, Brasil, 2009.
- [21] NATURAL RESOURCES CANADA. Tools and Applications. 2018. Disponível em: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ntv2>. Acesso em: 19 maio 2018.
- [22] M. A. G. Ruggiero, V. L. R. Lopes, Cálculo Numérico: Aspectos teóricos e computacionais. 2. ed. Campinas: Pearson, 2005. 408 p.
- [23] I. B. Menezes, M. A. Q. Duarte, Métodos de interpolação polinomial. ANAIS DO ENIC, v. 1, n. 2, 2015.
- [24] R. Lorentz, Multivariate Hermite interpolation by algebraic polynomials: A survey. Journal Of Computational And Applied Mathematics. Sankt Augustin, Germany, p. 167-201. fev. 2000.
- [25] OCTAVE: Delaunay Triangulation. 2018. Disponível em: <https://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter/Delaunay-Triangulation.html#Delaunay-Triangulation>. Acesso em: 05 jan. 2018.
- [26] QHULL. 1995. Disponível em: <http://www.qhull.org/>. Acesso em: 08 set. 2016.
- [27] D. R. SANTOS, Sistemas referenciais e transformações geométricas nos espaços 2d e 3d. 2013. Apostila da disciplina de Fotogrametria II da UFPR. Disponível em: [https://docs.ufpr.br/~danielsantos/Fotoll-capII\\_A5.pdf](https://docs.ufpr.br/~danielsantos/Fotoll-capII_A5.pdf). Acesso em: 21 jun. 2017.
- [28] IBGE. Resolução nº 22, de 1983. Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos, Rio de Janeiro, 1983.
- [29] ORDINANCE SURVEY. A guide to coordinate systems in Great Britain. 2018.
- [30] NGS. Computation of deflections of the vertical. 2017. Disponível em: [https://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/GEOID\\_STUFF/deflec12A\\_prompt.prl](https://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/GEOID_STUFF/deflec12A_prompt.prl). Acesso em: 20 out. 2017.

# Classificador binário para 3DES utilizando técnicas de Recuperação de Informação

Leandro M Ferreira\*, José Antonio M Xexéo  
Instituto Militar de Engenharia (IME) –  
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
\*leandroferreira@ime.eb.br

**RESUMO:** Este artigo descreve a criação de um classificador binário para criptogramas que distingue entre as classes “3DES” ou “não 3DES” usando técnicas de Recuperação de Informação. O criptograma é dividido em “palavras” de 8 bits e, através do cálculo de similaridade com documentos pré-processados, é previsto se o criptograma foi gerado pelo Triplo DES (3DES), em modo ECB, em cifras de pelo menos 100KB de tamanho. Essa classificação é possível devido à existência de pequenas diferenças de similaridades apresentadas por documentos gerados pelo 3DES quando comparados com alguns dos finalistas do concurso do AES: Rijndael (AES), Serpent, Twofish e RC6 (utilizando chaves de mesmo tamanho). Esse classificador pode ser utilizado como um primeiro passo para a criptoanálise: identificação do algoritmo que gerou uma dada cifra.

**PALAVRAS-CHAVE:** Classificação binária. Recuperação de Informação. Triplo DES.

**ABSTRACT:** This paper describes the creation of a binary classifier for cryptograms that distinguishes between the classes “3DES” or “not 3DES” using Information Recovery techniques. The cryptogram is divided into 8 bit “words” and, by calculating the similarity to preprocessed documents, it is predicted which cryptograms have been generated by Triple DES (3DES), in ECB mode, for ciphers of at least 100 KB in size. This classification is possible due to the existence of small differences in similarities shown by documents ciphered using 3DES when compared against some of the AES contest finalists: Rijndael (AES), Serpent, Twofish and RC6 (using same size keys). This classifier can be used as a first step in cryptanalysis: identification of the algorithm that generated a given cipher.

**KEYWORDS:** Binary classification. Information Retrieval. Triple DES.

## 1. INTRODUÇÃO

A criptografia busca tornar uma mensagem legível (chamada de texto em claro) em uma mensagem ilegível (chamada criptograma ou cifra) que apenas o destinatário da mensagem possa tornar novamente legível. Para consegui-lo utiliza-se um algoritmo criptográfico e uma chave. A dificuldade de um atacante em descobrir a mensagem através do criptograma se dá pelo fato de esse não conhecer a chave, ao contrário do destinatário, que a possui.

Através da história, diversos algoritmos para obter tal resultado foram desenvolvidos, desde a mais simples cifra de substituição monoalfabética (conhecida como Cifra de César) até os modernos sistemas computacionais como o “Advanced Encryption Standard” (AES). Após o surgimento de computadores capazes de testar por força bruta um grande número de chaves em pouco tempo, a criptografia passou a utilizar-se de algoritmos que criam problemas de difícil solução computacional sem a chave correta, mas de fácil solução caso se possua a chave.

Segundo [1], a presença de redundância no texto em claro é propagada pelo processo de cifragem, de tal modo que os padrões do texto se propagam para os criptogramas. Esses padrões ainda encontram-se ocultos como resultado da confusão e difusão presentes no processo de cifragem. A presença destes padrões permite o agrupamento segundo os pares (algoritmo, chave) utilizando-se o cálculo de similaridade como proposto por [2]. A classificação de uma cifra desconhecida segundo apenas o algoritmo que a originou é um problema mais complexo, pois esse método necessitaria de um esforço computacional similar ao de testar por força bruta todas as chaves possíveis, e um dicionário contendo

exemplos de cifras geradas por cada chave possível.

A técnica de Recuperação de Informação (RI) que permite o agrupamento pelo par (algoritmo, chave) é o cálculo de similaridade entre documentos cujas palavras são os blocos de cifragem (64 bits por exemplo). Utilizando a divisão da “palavra” em tamanhos menores do que o bloco de cifragem (como 32, 16 ou 8 bits), foi possível obter-se um classificador binário capaz de separar os criptogramas desconhecidos gerados em modo ECB (“Electronic CodeBook”) em duas classes: “3DES” contendo as cifras geradas pelo algoritmo “Triple Data Encryption Standard” (3DES) ou “não 3DES” contendo as cifras geradas por alguns dos algoritmos finalistas do concurso para o “Advanced Encryption Standard” (AES). - Rijndael ou AES, Serpent, Twofish ou RC6. Essa classificação é feita apenas considerando-se o algoritmo, e não o par (algoritmo, chave). O algoritmo MARS, o outro finalista do concurso, não foi elencado por restrições de escopo dos experimentos realizados.

## 2. MOTIVAÇÃO

A criptoanálise busca recuperar a mensagem original através de falhas no algoritmo de cifragem ou descobrindo a chave correta. Segundo os princípios descritos em [3], a segurança do sistema deve ser baseada no desconhecimento da chave e não na ignorância sobre o processo de cifragem. Dessa forma, é geralmente assumido que o atacante conhece tudo sobre o processo de cifragem, suas peculiaridades e vulnerabilidades. Ainda em uma situação real, para que o atacante seja capaz de explorar essas deficiências, se faz necessário descobrir qual algoritmo foi utilizado para realizar a cifragem. Assim, um processo de classificação de ci-

fras desconhecidas pode ser o primeiro passo no processo de criptoanálise caso essa informação não possa ser obtida por outros meios.

Este artigo propõe um classificador binário que identifica cifras geradas pelo algoritmo 3DES, que é como um primeiro passo em direção a criar um classificador *capaz de identificar as cifras de acordo com o algoritmo de cifragem e possivelmente também pelo modo de operação*.

### 3. TRABALHOS RELACIONADOS

Estudos anteriores como [2, 4 e 5] conseguiram agrupar criptogramas baseados nos pares (algoritmo, chave) usados para criá-los. Em uma situação real, a hipótese de apenas uma chave ser utilizada é restritiva. Com a presença de múltiplos algoritmos e múltiplas chaves o problema se torna mais complexo e relevante para uso em ambientes práticos.

Deste modo um classificador binário, que distingue entre cifras geradas pelo algoritmo 3DES ou por alguns dos finalistas do AES independente de chave utilizada, traz um passo importante para se obter um classificador de múltiplas classes entre os diversos algoritmos.

Em outro trabalho, [6] realizou uma análise do uso de técnicas de Recuperação de Informação para agrupar cifras de acordo com o algoritmo de cifragem. [7] e mais recentemente [8] buscaram identificar os algoritmos e métodos de cifragem que geraram determinada cifra utilizando-se de “Support Vector Machines” (SVM) e conseguiram resultados com acurácia superiores a 80% quando as chaves utilizadas nas bases de treino e teste eram as mesmas.

### 4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

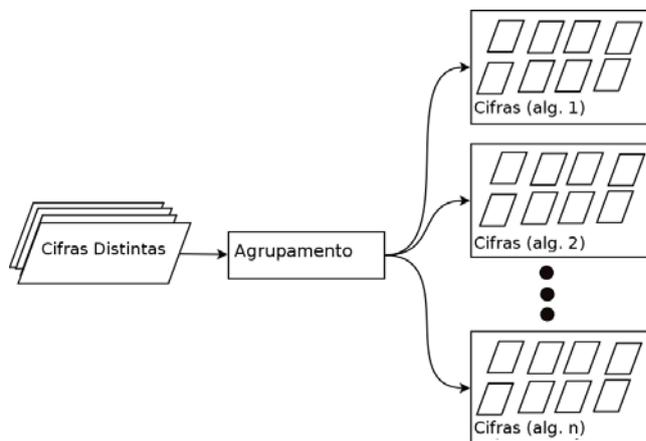
Diferentes textos (que contêm redundância), quando cifrados por um mesmo algoritmo e chave usando o modo ECB, fazem padrões emergirem nos criptogramas resultantes. Através da semelhança entre estes criptogramas (ou seja a repetição de padrões entre eles) pode-se então agrupá-los segundo os algoritmos que os geraram. O objetivo do algoritmo de agrupamento de criptogramas é: dado um conjunto de criptogramas como entrada, separar tais criptogramas em diferentes grupos, onde cada grupo conterà os elementos cifrados por determinado algoritmo. O esquema do problema de agrupamento está apresentado na Figura 1. Por exemplo, caso o conjunto de entrada seja composto dos seguintes elementos:

{C1(T1, AES, k1), C2(T2, AES, k1), C3(T2,3DES, k2), C4(T3, 3DES, k3), C5(T1, RSA, k3), C6(T2, RSA, k4), C7(T1, Serpent, k1),C8(T3, Serpent, k5) }

Onde C1(T1, AES, k1) representa uma cifra C1 gerada usando-se AES e chave k1 sobre o texto T1. Os 4 grupos que devem ser encontrados estão dispostos na Tabela 1

**Tab 1:** Exemplo de agrupamento de cifras.

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
C1(T1, AES, k1)	C3(T2, 3DES, k2)	C5(T1, RSA, k3)	C7(T1, Serpent, k1)
C2(T2, AES, k1)	C4(T3, 3DES, k3)	C6(T2, RSA, k4)	C8(T3, Serpent, k5)



**Fig.1** – Caracterização do problema de agrupamento.

A segunda parte do problema é realizar a classificação. Neste problema a entrada é um criptograma cujo método de cifragem é desconhecido. Através de uma base de treino composta por um conjunto de textos cifrados por diferentes algoritmos, o criptograma é classificado dentro de alguma das classes. Um classificador binário apenas distingue a cifra entre duas possíveis classes, já um classificador múltiplo faz a classificação dos criptogramas entre vários algoritmos distintos.

No caso específico do classificador binário apresentado neste trabalho existem duas classificações possíveis: Classe «3DES» ou “não 3DES”. A eficácia do classificador será avaliada utilizando-se as medidas de precisão, abrangência e acurácia.

### 5. DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS DE TREINAMENTO

A base de dados utilizada foi criada a partir da base Reuters-21578, Distribuição 1.0 (disponível em: <http://www.daviddlewis.com/resources/testcollections/reuters21578>) composta de 22 arquivos de documentos contendo textos de notícias em inglês. Cada um dos documentos tem tamanho próximo a 1,4 MB, gerando uma base de textos em claro de 30MB. Esta escolha se baseou na facilidade de obtenção, tamanho e quantidade de uso em pesquisa científica. O tamanho dos arquivos gera bastante repetição, permitindo a classificação. Entretanto testes foram realizados com cifras de tamanhos menores, geradas a partir do truncamento dos textos originais em tamanhos menores. A análise do impacto da redução do tamanho das cifras apresentadas ao algoritmo é realizada na seção 7.

Foram então gerados conjuntos de 5 chaves distintas, um conjunto para cada algoritmo de cifragem elencado nos experimentos (AES, Serpent, Twofish, RC6 e 3DES). Assim foram nomeadas as chaves AES1 ate AES5, Serpent1 ate Serpent5 e assim por diante. Todas essas chaves foram geradas aleatoria e independentemente, além de possuírem tamanho de 128 bits.

Posteriormente, cada algoritmo citado anteriormente foi executado sobre cada arquivo de texto em claro, em modo ECB, uma vez com cada chave distinta pertencente ao próprio algoritmo gerando 660 arquivos cifrados. Além disso, para fins de testes com mesmas chaves, as 5 chaves do AES (AES1 ate AES5) foram elencadas como chaves globais (que também seriam empregadas nos outros algoritmos para uso quando se quisesse testar com diferentes algoritmos e mesma chave). E os demais algoritmos de cifragem foram exe-

cutados com essas chaves sobre todos os arquivos gerando mais 440 arquivos cifrados. Este esquema está apresentado na Figura 2.

Ao final do processo a base de dados consiste de 990 arquivos de aproximadamente 1,4MB cada. Destes arquivos 110 foram cifrados pelo algoritmo AES, 220 pelo algoritmo Serpent (110 com chaves Serpent1 a Serpent5 e 110 com chaves AES1 a AES5), 220 pelo algoritmo Twofish (110 com chaves Twofish1 a Twofish5 e 110 com chaves AES1 a AES5), 220 pelo algoritmo RC6 (110 com chaves RC6\_1 a RC6\_5 e 110 com chaves AES1 a AES5) e 220 com o algoritmo 3DES (110 com chaves 3DES1 a 3DES5 e 110 com chaves AES1 a AES5).

## 6. DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

### 6.1 Técnicas de Recuperação de Informação

A linguagem natural em qualquer idioma apresenta redundância. Essa característica, explicada por [9] faz com que padrões emergjam nos textos escritos. As cifras de bloco atuais separam um texto em claro em blocos de tamanho iguais para cifragem e possuem alguns modos de operação. O modo de operação ECB preserva esses padrões, pois cada bloco cifrado depende apenas do bloco de entrada e da chave. Ou seja, blocos em claro iguais, cifrados com a mesma chave, geram blocos cifrados iguais.

Para realizar o processo de separação, o algoritmo utiliza um modelo vetorial para textos calculando em sequência a matriz de similaridade entre os textos cifrados. Trabalhando com cifras em bloco, o dicionário de palavras possíveis na verdade são sequências binárias do tamanho do bloco. Isso faz com que existam  $2^m$  possíveis palavras, onde  $m$  é o número de bits de um bloco. Assim, se a matriz de similaridade apresentar um número não nulo entre dois criptogramas quaisquer já é grande a chance de terem sido cifrados por um mesmo par (algoritmo, chave). A Tabela 2 mostra um exemplo de matriz de similaridade e a Figura 3 mostra o esquema do cálculo da matriz de similaridade.

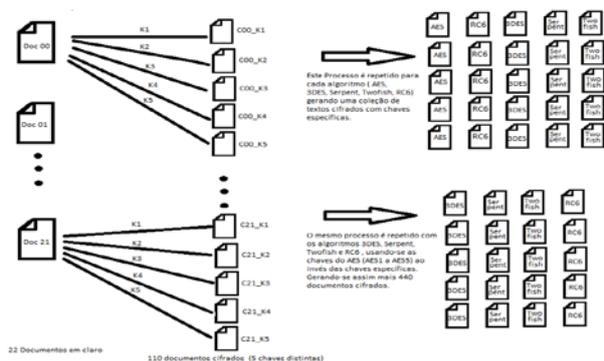


Fig.2 – Criação da base de dados.

Tabela 2: Exemplo de matriz de similaridade.

	Doc 1	Doc 2	Doc 3	Doc 4
Doc 1	1	0,183	0	0,350
Doc 2	0,183	1	0	0,400
Doc 3	0	0	1	0
Doc 4	0,350	0,400	0	1

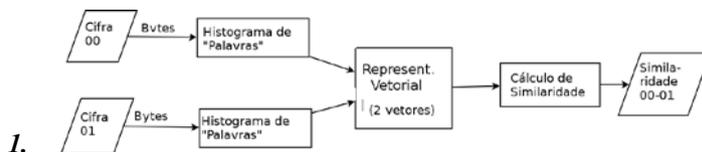


Fig.3 – Cálculo da Matriz de Similaridade.

Tab 3: Valor médio de similaridade por tamanho de palavra considerado.

Tam. palavra	Mesmos (algoritmo, chave)	(algoritmo, chave) distintos	3DES X não 3DES
64 bits	0,88	0	0
32 bits	0,91	3,5x10-6	1,25x10-6
16 bits	0,95	0,43	0,28
8 bits	0,9997	0,9975	0,9950

### 6.2 Considerando a divisão do bloco de cifragem como palavra

Ao considerar-se as palavras com tamanhos divisores do bloco de 64 bits (32, 16 e 8 bits), notou-se que as cifras geradas por conjuntos distintos de (algoritmo, chave) apresentavam similaridades diferentes de zero embora ainda muito inferiores à similaridade entre pares gerados pelo mesmo par (algoritmo, chave). Além disso, foi possível perceber que a similaridade entre documentos cifrados por um dos finalistas do concurso AES testados e documentos cifrados por 3DES apresentava valores relativamente menores, o que possibilitou a criação do classificador apresentado neste trabalho.

A Tabela 3 demonstra as similaridades médias encontradas entre cifras que foram criadas pelo mesmo par (algoritmo, chave), entre cifras que foram geradas por pares (algoritmo, chave) distintos mas com ambos os algoritmos pertencentes ao grupo de cifras não geradas por 3DES e, por fim, entre uma cifra gerada por 3DES e outra gerada por um algoritmo diferente do 3DES.

A partir da percepção de comportamento distinto das cifras geradas pelo 3DES, quando comparadas com cifras da base geradas pelos finalistas do AES testados, criou-se o classificador binário entre as classes “3DES” e “não 3DES”. O motivo dessa aparente diferença de comportamento para cifras geradas pelos algoritmos 3DES ainda está sob estudo e as hipóteses levantadas são: menor tamanho efetivo da chave (112 bits para 3DES) em relação aos 128 bits dos demais algoritmos, possível menor proximidade de sequência aleatória nas cifras geradas pelo esquema de cifragem utilizado pelo 3DES ou diferenças entre as funções intrínsecas de cada algoritmo.

### 6.3 Classificador binário proposto

O classificador consiste em duas etapas. Na fase de treino são calculados os histogramas de todos os documentos considerando-se um tamanho de palavra escolhido. O modelo recebe estes histogramas para que na fase de teste seja possível calcularem-se as similaridades entre os documentos da base e a cifra a ser classificada.

Na fase de teste, o classificador recebe uma cifra sem a classe identificada, calcula a similaridade com os documentos da base e aplica sobre estes dados o algoritmo de classificação. No caso da presença de classe verdadeira disponível, é então verificada a correta classificação ou não desta cifra de

teste. O esquema do classificador está representado na Figura 4.

Na tentativa de se obter um classificador mais preciso e capaz de classificar textos cifrados de tamanhos menores, optou-se pela criação de um modelo de classificação próprio levando-se em conta a diferença de similaridade entre o texto a ser classificado com relação a documentos cifrados por algoritmos diferentes do 3DES e com relação a documentos cifrados pelo 3DES.

O processo inicia-se com a separação do texto cifrado em blocos de 8 bits, e a contagem de cada ocorrência destas 256 “palavras” possíveis, gerando um histograma. Para poder classificar documentos de tamanhos distintos, este histograma é normalizado multiplicando-se pela relação de tamanhos entre o documento da base de dados e o documento a ser classificado. O histograma normalizado é então comparado com o histograma similar pré-calculado para cada documento da base de testes.

Procede-se então o cálculo de similaridade (distância cosseno) entre os dois documentos. Munido da similaridade do documento a ser classificado com cada um dos documentos da base, calcula-se a média de similaridade entre a cifra e os documentos não 3DES da base de treino e entre a cifra e os documentos gerados pelo 3DES da base de treino. O resultado dessas médias é comparado com os limiares de classificação. Após sucessivas iterações, chegou-se à conclusão que os limiares que separavam as duas classificações (3DES ou não 3DES) diminuía com o tamanho do texto a ser classificado. Esse efeito é mostrado na Figura 5, e em escala logarítmica na Figura 6, para mais fácil visualização.

Para solucionar tal problema, o limiar de classificação é ajustado por uma interpolação entre os valores de limiar medidos mais próximos (superior e inferior ao tamanho de arquivo em questão), conforme mostrado na Equação 1 (L representa limiar de classificação e T é tamanho do arquivo).

$$L_{aj} = \frac{(L_{alto} \times |T - T_{baixo}|) + (L_{baixo} \times |T - T_{alto}|)}{|T_{alto} - T_{baixo}|} \quad (1)$$

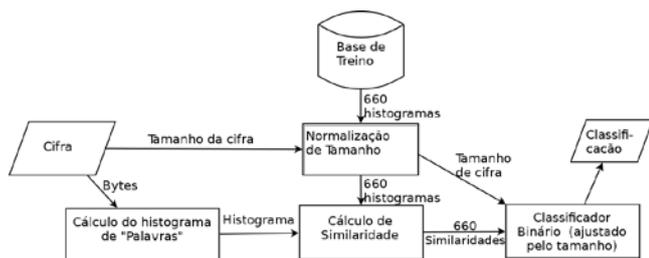


Fig.4 – Esquema do classificador binário.

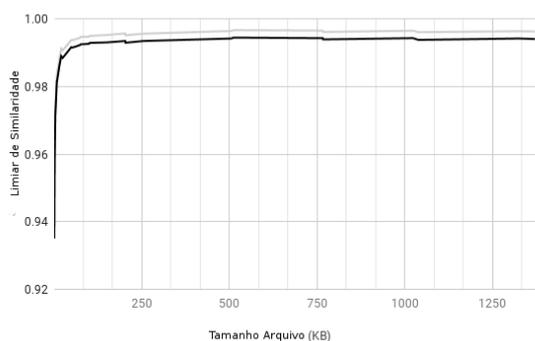


Fig.5 – Gráfico de ajuste do Limiar de classificação. A linha clara mostra comparação contra não 3DES, e a linha escura comparação com o 3DES.

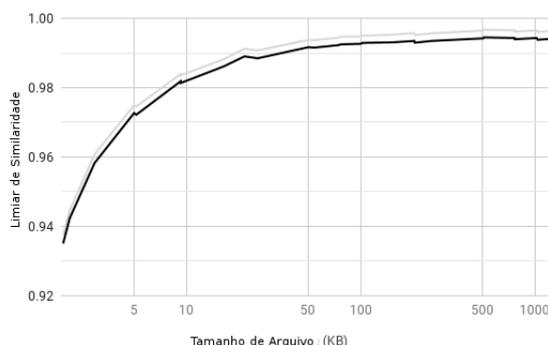


Fig.6 – Gráfico de ajuste do Limiar de classificação (Em escala log). A linha clara mostra comparação contra não 3DES, e a linha escura comparação com o 3DES.

## 7. TESTE DO CLASSIFICADOR

O teste do classificador foi conduzido da seguinte maneira: Um dos 22 textos da base de treino foi escolhido e truncado para o tamanho desejado. Em seguida, o texto em claro resultante foi cifrado usando 4 algoritmos (AES, Serpent, Twofish e RC6) cada um com uma chave distinta, gerada pseudo aleatoriamente durante a execução do teste. De maneira similar foi feita a cifragem usando o 3DES, mas com duas chaves distintas. Estas 6 cifras eram então submetidas ao classificador. Esse processo foi repetido até que o número desejado de classificações fosse alcançado para cada tamanho de arquivo. (Foi escolhido o valor de 36 tentativas). O tamanho foi reduzido e o processo repetido. Os tamanhos escolhidos foram de 1.4MB, 1 MB, 500KB, 200KB, 100KB, 50KB, 25KB, 10KB (aproximadamente 1000 palavras de texto).

### 7.1 Resultados dos testes

Obteve-se acurácia de 100% com os tamanhos: 1.4MB, 1 MB, 500KB e 200KB. O resultado para 200KB foi de acurácia de 100%, com precisões e abrangências iguais a 1, conforme demonstra a Tabela 4. Todavia, conforme o tamanho de texto reduziu-se abaixo de 200KB, a acurácia reduziu-se como demonstram as Tabelas 5 a 8.

Tab 4: Resultado do classificador com textos de 200KB de tamanho.

Matriz de confusão	Real Não 3DES	Real 3DES	Precisão
Predito Não 3DES	24	0	1
Predito 3DES	0	12	1
Abrangência	1	1	
Acurácia	100%		

Tab 5: Resultado do classificador com textos de 100KB de tamanho.

Matriz de confusão	Real Não 3DES	Real 3DES	Precisão
Predito Não 3DES	24	1	0,96
Predito 3DES	0	11	1
Abrangência	1	0,9167	
Acurácia	97,22%		
Matriz de confusão	Real Não 3DES	Real 3DES	Precisão
Predito Não 3DES	24	1	0,96
Predito 3DES	0	11	1
Abrangência	1	0,9167	

Acurácia	97,22%		
----------	--------	--	--

**Tab 6:** Resultado do classificador próprio com textos de 50KB de tamanho.

Matriz de confusão	Real Não 3DES	Real 3DES	Precisão
Predito Não 3DES	22	1	0,9565
Predito 3DES	2	11	0,8461
Abrangência	0,9167	0,9167	
Acurácia	91,67%		

**Tab 7:** Resultado do classificador próprio com textos de 25KB de tamanho.

Matriz de confusão	Real Não 3DES	Real 3DES	Precisão
Predito Não 3DES	22	5	0,8148
Predito 3DES	2	7	0,7777
Abrangência	0,9167	0,5833	
Acurácia	80,56%		

**Tab 8:** Resultado do classificador próprio com textos de 10KB de tamanho.

Matriz de confusão	Real Não 3DES	Real 3DES	Precisão
Predito Não 3DES	14	0	1
Predito 3DES	10	12	0,5454
Abrangência	0,5833	1	
Acurácia	72,22%		

## 8. CONCLUSÃO

Mediante uso de técnicas de Recuperação de Informação sobre os criptogramas, foi possível, através da escolha de tamanhos de palavras divisoras do bloco de 64 bits (8 bits no caso específico em estudo), gerar um classificador binário para identificar os criptogramas gerados pelo algoritmo 3DES usando o modo de operação ECB.

Os testes comprovaram a viabilidade do classificador com o uso de uma base de treino de 550 cifras geradas a partir de 22 documentos de texto, usando-se 5 algoritmos distintos e 5 chaves específicas por algoritmo. Foi possível obter classificação 100% correta para documentos incluindo uma base de testes com cifras geradas por chaves pseudoaleatórias de no mínimo 200KB. A acurácia reduziu para 97,22% quando tratando cifras desconhecidas de tamanho 100KB. A acurácia para cifras de tamanhos menores foi menor embora

ainda acima do valor de escolha aleatória. A redução da acurácia coincide com o brusco decréscimo no valor de limiar, mostrado anteriormente nas Figuras 5 e 6.

### 8.1 Trabalhos futuros

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, evidencia-se a possibilidade de buscar, em trabalhos futuros, classificadores binários para outros algoritmos ou um possível classificador de múltiplos algoritmos. Além disso, pode-se verificar a possibilidade de classificar corretamente textos oriundos de outras linguagens ou até mesmo documentos cifrados a partir de documentos não textuais (como imagens, áudio ou vídeo).

As hipóteses que justifiquem a diferença de comportamento das cifras geradas pelo algoritmo 3DES em relação aos “não 3DES” podem ser testadas a fim de descobrir o motivo de tal diferença. Ainda como trabalho futuro, elenca-se a melhoria do classificador 3DES visando a classificar com maior acurácia os textos cifrados de tamanhos menores do que 100 KB.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] C.E. Shannon, Communication Theory of Secrecy Systems, Bell Labs Technical Journal, vol. 28, 1948, pg 656.
- [2] C. Oliveira, J.A.M. Xexéo, C.A.B. Carvalho, Clustering and categorization applied to cryptanalysis, Cryptologia, vol 30, 2006, pg. 26.
- [3] A. Kerckhoffs, La Cryptographie Militaire, Journal des Sciences Militaires, vol IX, 1883, pgs 5-83,161-191.
- [4] W.A.R. Souza, L.A.V. de Carvalho, J.A.M. Xexéo, Identification of n block ciphers, IEEE Latin America Transactions, vol. 9, 2011, pg. 184
- [5] R.H. Torres, G.A. Oliveira, Identification of keys and cryptographic algorithms using genetic algorithm and graph theory, IEEE Latin America Transactions, vol 9, 2011, pg 178.
- [6] S.Nagireddy, A pattern Recognition Approach to Block Cipher Identification, Dissertação de mestrado, Indian Institute of Technology Madras, Madras, India, 2008.
- [7] A.D. Dileep, C.C. Sekhar, Identification of block ciphers using support vector machines, Proc. International Joint conference on Neural Networks, 2006 Vancouver, BC, Canada, pg. 2696.
- [8] C. Tan, Y Li, S. Yao, A novel identification Approach to Encryption Mode of Block cipher, Advances in Intelligent Systems Research, vol. 136, 2016, pg 586.
- [9] Shannon, C.E. A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, vol. 27, 1948, pgs 379-423,623-656.



# PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

## Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

## Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa



Apoio:



Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – [www.ime.eb.br](http://www.ime.eb.br) – [sd1@ime.eb.br](mailto:sd1@ime.eb.br)