

ANÁLISE DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL (AIE) DE FRAGATAS CLASSE *NITERÓI* E DA CORVETA CLASSE *BARROSO*: desenvolvimento e legados

JOÃO FELIPE COSTA **CASARES***
Capitão-Tenente (EN)

ANDRÉ GUSTAVO BARBOSA**
Capitão de Corveta (EN)

FELIPE TEIXEIRA SILVA BEZERRA***
Capitão-Tenente (EN)

SUMÁRIO

Gerenciamento de Integridade Estrutural (GIE): do ar para o mar
Aplicações na Marinha do Brasil
AIE: o Estado da Arte
Legados e desenvolvimentos na Marinha do Brasil: RB (IMR)
Tendências futuras, Considerações Finais e Agradecimentos

GERENCIAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL (GIE): DO AR PARA O MAR

Desde o momento em que o homem começou a utilizar embarcações, a necessidade de manutenções e reparos estruturais já se fazia presente de forma

empírica, sendo balizada puramente por experiência, tentativa e erro. Se a manutenção não fosse adequada, o meio acabava sendo degradado rapidamente pelas condições ambientais, sendo substituído. Caso ocorresse uma falha estrutural, realizava-se reparo permanente ou temporário. Assim, todo processo que envolvia

* Bacharel em Ciências Navais pela Escola Naval e engenheiro naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

** Bacharel em Ciências Navais pela Escola Naval, engenheiro naval pela Escola Politécnica da USP e MSc Naval Architecture pela University College London.

*** Engenheiro naval e oceânico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

a estrutura dos meios era simplesmente baseado em ações corretivas e reparos executados por prática (BEA, 1992) e (PATTOFATTO, 1991).

A evolução dos processos de projeto, construção, operação e manutenção em navios envolveu mudanças que culminaram no desenvolvimento de regras ou *guidelines* por Sociedades Classificadoras (BEA, 1992), as quais tiveram sua origem na segunda metade do século XVIII. A partir de então, as regras desenvolvidas por estas organizações acompanharam de forma paralela a evolução da ciência e tecnologia de seu tempo, passando pelo século XIX, quando a vela foi substituída pelo vapor e a madeira pelo aço, e pelo século XX, especialmente durante a Primeira e a Segunda Guerra Mundial e com a substituição do rebite pela solda, demandando grandes mudanças e evolução acelerada na indústria marítima. Até os dias de hoje, as regras, atualizadas constantemente ao passo da evolução marítima, continuam sendo desenvolvidas por diversas organizações e se fazem presentes em projetos, construção, operação, inspeção, manutenção e reparo em todo o mundo.

Na segunda metade do século XX, novas abordagens de inspeção, manutenção, reparo e gerenciamento de integridade estrutural começaram a surgir em outras áreas da indústria – até então, não experimentadas na área marítima. O *Airframe Structural Integrity Program* (ASIP), estabelecido em 1958 pela U.S. Air Force (Força Aérea dos Estados Unidos da América), tinha como propósito controlar falhas estruturais de aeronaves operacionais, determinar métodos de previsão de vida útil das mesmas e fornecer uma abordagem de projeto que evitasse problemas estruturais de fadiga em futuros sistemas de armas (LINCOLN, 1995).

Adicionalmente, outras abordagens de integridade estrutural, tipicamente baseadas em risco, tiveram origem na indústria nuclear na década de 70 e ao longo dos anos migraram para outras indústrias, como as petroquímicas, nas décadas de 80 e 90. Essas abordagens se deslocaram para o setor *offshore* na indústria de petróleo e gás e, em menor grau, para o marítimo, já na década de 90 e no início do século XXI (SERRATELLA, WANG e TIKKA, 2008).

Nesse período, em um simpósio patrocinado pela Ship Structure Committee (SSC), a U.S. Air Force e a Federal Aviation Administration (FAA) apresentaram o ASIP aos participantes da conferência, os quais se mostraram entusiasmados com a possibilidade de aplicação dos conceitos na indústria marítima, na medida em que a transferência de tecnologia da indústria aeroespacial para a marítima pareceu ser oportuna e particularmente relevante, tendo em vista muitos requisitos comuns de projeto, operação, desempenho e manutenção de estruturas de aeronaves e navios. Os importantes pontos apresentados no ASIP são (BEA, 1992):

- Seleção do material;
- Identificação de componentes críticos e potenciais modos de falha;
- Análises de tolerância de durabilidade e danos;
- Testes em escala real de componentes críticos;
- Estratégias de inspeção;
- Gestão de monitoramento de estruturas específicas;
- Armazenamento de dados de manutenção estrutural; e
- Gerenciamento de estruturas em idade avançada.

Tais métodos demonstraram claramente que a abordagem de integridade estrutural na área marítima poderia e

deveria ser evoluída. Assim, tal contexto foi fato motivador para elaboração da adaptação marítima dos conceitos do ASIP, o então chamado *Marine Structural Integrity Program* (MSIP) (BEA, 1992). A necessidade que o programa demanda de coleta de diversas informações de falhas estruturais na frota marítima norte-americana e sua união em banco de dados para gerenciamento gerou consequente desenvolvimento de um sistema denominado *Ship Structural Integrity Information System* (SSIIS), patrocinado pela U.S. Coast Guard Research & Development Center, por meio do National Maritime Enhancement Institute of the Maritime Administration (Marad). O SSIIS se tornou uma das partes componentes de um sistema de gerenciamento global do navio durante seu ciclo de vida, denominado *Ship Quality Information System* (SQIS), o qual inclui informações de gerenciamento no que tange a equipamentos, *hardware*, instalações a bordo, operações, pessoal embarcado e organizações responsáveis pelo navio e sua operação (SCHULTE-STRATHAUS e BEA, 1994), (DRY, SCHULTE-STRATHAUS e BEA, 1994) e (REEVE e BEA, 1997).

Tendo em vista as novas abordagens no final do século XX e a partir do século

XXI, programas de gerenciamento de integridade estrutural de navios começaram a ser aplicados, como, por exemplo, o denominado *Ship Structural Integrity Program* (SSIP), na Marinha do Canadá (DINOVIETZ, BASU e HOLT, 1997), e o *Service Life Assessment Program* (RDML ECCLES, DELPIZZO, *et al.*, 2010), na Marinha dos Estados Unidos, além dos usados em outras Marinhas e Sociedades Classificadoras.

Assim, o Gerenciamento de Integridade Estrutural (GIE), conhecido como *Structural Integrity Management* (SIM), é um

sistema de gerenciamento de dados que tem por propósito assegurar a adequada integridade estrutural do meio para sua missão (*fit for service*) durante todo o seu ciclo de vida, até seu desfazimento¹, sendo, portanto, considerado um subprocesso da Gestão do Ciclo de Vida (GCV). Além de permitir a melhor aplicação de recur-

O Gerenciamento de Integridade Estrutural visa assegurar a adequada integridade estrutural do meio para sua missão durante todo o seu ciclo de vida, até seu desfazimento, sendo considerado um subprocesso da Gestão do Ciclo de Vida

sos, com redução de custo de manutenção estrutural, e de aumentar a disponibilidade do meio e sua segurança e a de seu material e pessoal embarcados, a aplicação do GIE possibilita a obtenção das seguintes capacidades (RDML ECCLES, DELPIZZO, *et al.*, 2010):

– combinar análises avançadas com inspeções visuais e rastreamento de

1 O termo desfazimento, empregado de acordo com o Decreto nº 99.658, de 30 de outubro de 1990, revogado pelo Decreto nº 9.373, de 11 de maio de 2018, contempla as atividades de inutilização ou abandono do Sistema de Defesa. Significa desmilitarizar e retirar o Sistema de Defesa, ao final da sua vida útil, do seu ambiente operacional e encerrar os serviços de apoio logístico e operacionais (ESTADO-MAIOR CONJUNTO DAS FORÇAS ARMADAS, 2019).

discrepâncias observadas, para melhor direcionar o planejamento de manutenção e prover uma melhoria na disponibilidade do material;

- planejar a vida em serviço remanescente dos meios com base na condição do material;

- estabelecer um processo disciplinado de análise de risco para identificar e priorizar as áreas que não atendam aos requisitos técnicos;

- determinar a capacidade de prever onde condições críticas ou limitantes do material possam se desenvolver; e

- prover uma base analítica para orientar os recursos de investimentos e reparos para que se atinja a vida de serviço esperada.

As atividades técnicas do GIE podem ser sintetizadas nos processos descritos na Figura 1 (HSE, 2009) e (ISSC, 2009).

O GIE se inicia com a coleta de dados, que, por sua vez, se torna a entrada para a avaliação da integridade estrutural. Tal avaliação é subsídio para uma estratégia de inspeção e manutenção com diretrizes preestabelecidas que, por fim, culmina na elaboração de um programa de inspeção detalhado. Esse programa, quando executado, fornece dados de entrada para o

histórico de registros, o qual realimenta o sistema (DEN, 2020).

Outros sistemas modernos de manutenção de meios navais possuem o mesmo propósito, contudo o enfoque na integridade estrutural apresenta peculiaridades que distinguem esse sistema de gerenciamento dos demais, na medida em que prever, quantitativamente, o comportamento de estruturas, buscando interceptar não-conformidades estruturais causadas por diversos mecanismos de degradação, como fadiga e corrosão, envolve análises complexas, com utilização de ferramentas computacionais no estado da arte da engenharia e banco de dados para armazenamento de informações de inspeção, manutenção e reparo.

APLICAÇÕES NA MARINHA DO BRASIL

No ano de 2017, a Diretoria-Geral do Material da Marinha (DGMM) solicitou à Diretoria de Engenharia Naval (DEN) a implementação de sistemática de Gerenciamento de Integridade Estrutural (GIE) de quatro fragatas classe *Niterói* e da corveta classe *Barroso*. Estudos realizados pelos engenheiros da DEN naquele ano envolveram extensas pesquisas a

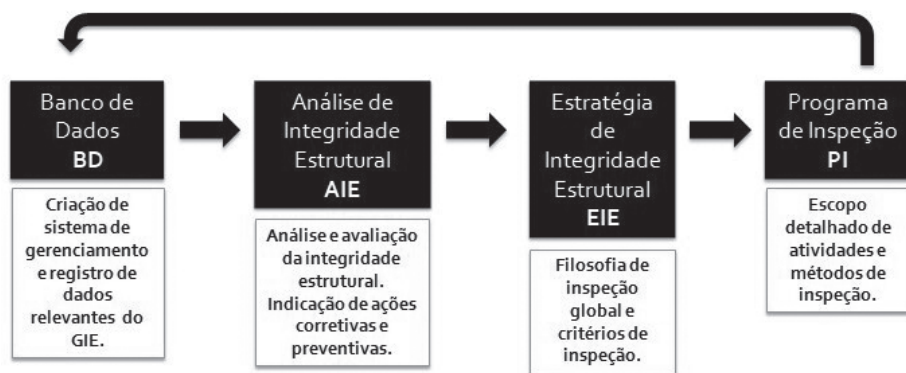


Figura 1 – Atividades Técnicas do GIE

referências modernas emitidas por órgãos consagrados no âmbito marítimo, como Society of Naval Architects and Marine Engineers (Sname), Rina, SSC, Health and Safety Executive (HSE) e Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEst), além de interações com a Universidade de São Paulo (USP) e diversas Sociedades Classificadoras, de forma a verificar as metodologias, ferramentas e possibilidades atuais existentes, com o intuito de elaborar uma sistemática de gerenciamento no estado da arte no que tange aos métodos empregados no mundo.

Por fim, elaborou-se uma Especificação de Serviço de Engenharia (ESE), parte componente de um processo licitatório na modalidade técnica e preço, que culminou com a assinatura de contrato com a Sociedade Classificadora Rina Brasil, de origem italiana, em junho de 2018. Tal contrato prevê a realização de uma Análise de Integridade Estrutural (AIE) visando à extensão da vida operativa de quatro fragatas classe *Niterói* e análise estrutural da corveta classe *Barroso* por um período de 15 anos, identificando as providências referentes às intervenções corretivas e preventivas decorrentes do estudo.

Atualmente, dois navios foram analisados: a Fragata *Constituição*, com inspeção realizada em 2018, e a Corveta *Barroso*, com inspeção realizada em 2019. O trabalho envolveu a análise de documentação², entre planos, metodologias e relatórios, pela Diretoria de Engenharia Naval, além do acompanhamento dos trabalhos no

escritório da contratada e das inspeções a bordo. Os reparos e monitoramentos necessários para esses dois navios foram entregues ao Setor do Material e Operativo no segundo trimestre de 2020.

Todo o desenvolvimento do trabalho envolve acompanhamento, avaliação e aprovação por parte da Marinha do Brasil (MB), por meio da DEN, sendo necessário o fornecimento de modelos e *software* pela contratada, permitindo, assim, a transferência de conhecimento. Desta forma, a Análise de Integridade Estrutural (AIE) é composta dos seguintes processos, nos quais se apresentam as soluções oferecidas pelo Rina Brasil e os conhecimentos agregados por parte da MB, considerados um legado deste processo:

Relatório da Análise Inicial (RAI)

Os resultados de uma análise inicial da estrutura do navio baseiam-se em documentação técnica e histórico de avarias, de forma a permitir a elaboração de um plano de inspeção, identificando as áreas mais críticas no meio e a vida residual preliminarmente estimada dos componentes.

Na abordagem das análises, o Rina realizou remodelagem em 2D de seções transversais do navio, com utilização do *software* Leonardo Hull 2D (LH2D). As seções transversais foram modeladas até conveses de superestrutura que fossem considerados, pela regra da classificadora, como resistentes aos carregamentos viga-navio³. Assim, os mastros e demais ex-

2 Entre os documentos utilizados, destacam-se os dados históricos registrados pelo Setor Operativo referentes a áreas marítimas e dias de mar navegados, rumos, velocidades empregadas e condições de carregamento durante toda a vida do meio. Tais dados são imprescindíveis para a metodologia aplicada, como será apresentado neste artigo, no tópico Metodologia de Análise da Estrutura (MAE).

3 Para o estudo de sua estrutura, o navio é considerado uma viga, uma caixa ou peça composta de muitas pequenas vigas reunidas, de modo que sua resistência como um todo depende da eficiência de todas as suas peças elementares. Desta consideração denominamos o casco de viga-navio, que se comporta na água como uma viga simplesmente apoiada (FONSECA, 2019).

tensões da superestrutura não modeladas no *software* foram avaliados por cálculo direto por critério de regra para espessura de chapeamento e módulo de seção dos perfis estruturais.

As seções transversais utilizadas pelo LH2D são modeladas com todo o chapeamento e reforços longitudinais com espessuras de projeto (espessuras *gross*), que, quando avaliados pelos requisitos de regra, consideram uma perda de espessura normatizada para cada tipo de compartimento (espessuras *net*). Os critérios de análise considerados são apresentados a seguir e levam em conta os valores dos carregamentos globais para as seções do navio calculados por regra:

- resistência da viga-navio;
- resistência do chapeamento sob pressões locais combinadas com as cargas globais;
- resistência dos perfis longitudinais sob pressões locais combinadas com as cargas globais;
- resistência à flambagem do chapeamento e perfis submetidos às tensões no plano induzidas pelas cargas da viga-navio; e
- resistência à fadiga dos detalhes estruturais.

Todas as análises realizadas foram submetidas à razão dos limites de regra em um índice denominado “Fator de Uso”, que, juntamente com a estimativa da vida residual em fadiga, foi utilizado como critério para avaliação de criticidade do compartimento, já considerando margens de segurança. Somando-se a essas regiões, áreas de conhecimento histórico de falhas registradas em documentação também foram consideradas, assim como avaliações de uma pré-inspeção realizada pelos representantes do Rina. Assim, com as áreas críticas mapeadas, pode-se ter subsídios para elaboração de um Plano de Inspeção.

Plano de Inspeção (PI) e Inspeção Estrutural (IE)

Planejamento e execução das inspeções baseadas no RAI. O PI determina critérios de inspeção visual com utilização de Formulário de Inspeção (FI), de ensaios não destrutivos (END) e de inspeção no sistema de proteção catódica. Ademais, fornece diretrizes para retirada de corpos de prova, com posterior realização de ensaios destrutivos (ED).

O FI adotado pelo Rina foi utilizado para registrar a inspeção visual de todos os compartimentos, tendo especial atenção as áreas críticas elencadas no RAI, identificando e avaliando o estado da pintura, presença de corrosão generalizada, *pitting*, deformação e trincas em todas as regiões do navio. O sistema de proteção catódica sofreu inspeção visual, medição de potencial com o auxílio de um eletrodo de referência e avaliação do funcionamento do retificador de bordo. Somando-se às inspeções visuais dos elementos estruturais, os END foram realizados por meio de medição de espessura por ultrassom de almas e flanges de elementos estruturais e de chapeamentos de conveses, anteparas e casco em áreas definidas pelo PI e, adicionalmente, áreas consideradas suspeitas nas inspeções visuais. Complementarmente, o levantamento de espessuras se faz necessário para alimentar as análises finais.

O PI também elencou diretrizes e premissas para a retirada de corpos de prova de aço no fundo, costado e convés e corpos de prova de alumínio no mastro e na superestrutura. Tais elementos foram avaliados em ensaios laboratoriais para determinação de propriedades mecânicas e químicas, além de ensaios de corrosão.

Tanto o PI quanto a execução da inspeção estrutural permitiram a percepção da profundidade de levantamento de dados

necessários para realização de inspeção dedicada a uma análise computacional na complexidade de uma AIE. Adicionalmente, todos os envolvidos no processo participaram do gerenciamento de uma inspeção de grande vulto, tendo em vista as dificuldades encontradas em virtude das necessidades de preparação/liberação dos compartimentos e retirada de interferências para medições de elementos estruturais de difícil acesso.

Relatório de Inspeção Estrutural (RIE)

Compilação dos dados recolhidos nas inspeções visuais, laudos de medição ultrassônica de espessura de componentes e resultados dos ensaios laboratoriais dos corpos de prova.

Metodologia de Análise da Estrutura (MAE)

Baliza uma análise computacional global do casco do navio por elementos finitos *Finite Element Method* (FEM), sendo facultada a análise da superestrutura e de mastros juntamente ao casco. A análise possui como subsídio dados do setor operativo, como rumos, velocidades, dias de mar e áreas marítimas navegadas desde o início da vida operativa do meio. A abordagem deve considerar análise de fadiga da estrutura baseando-se nos dados hidrostáticos e no perfil operativo do navio com o propósito de indicar as regiões que necessitam de reparos ou constante monitoramento, de forma a possibilitar uma operação segura do meio por mais 15 anos.

O Rina propôs uma abordagem em duas vertentes:

a) Etapa 1

Análise de integridade estrutural do casco, da superestrutura e dos mastros e suas fundações, elaborada em conjunto, a partir do desenvolvimento de um modelo global de elementos finitos dessas estruturas, com foco na verificação da vida em fadiga da embarcação.

O desenvolvimento desta abordagem inicia-se com a modelagem da geometria tridimensional da estrutura do navio no *software* Napa Designer, com consequente modelagem de malha *coarse mesh* de elementos finitos no *software* MSC Patran/Nastran em um modelo com espessura reduzida. A obtenção do campo de pressões na malha do casco é

realizada por meio de análise hidrodinâmica do modelo pelo método dos painéis no *software* Ansys Aqwa-Line e validado em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) no *software* SC/Tetra, da MSC. Os carregamentos atribuídos

Todos os envolvidos no processo participaram do gerenciamento de uma inspeção de grande vulto, tendo em vista as dificuldades encontradas

ao modelo consideram:

- áreas e ambientes de navegação adotados no projeto;
- áreas e seus períodos de navegação registrados em histórico, de forma a se obter um diagrama representativo de dispersão de ondas;
- velocidades representativas;
- probabilidades de direções relativas de onda;
- tempo total de operação; e
- condições de carregamento típicas do navio.

A compatibilização dos arquivos entre os *softwares* distintos foi realizada por meio de *scripts* desenvolvidos pelo Rina.

Após a aplicação dos carregamentos, é feita uma análise preliminar de fadiga no modelo global em malha *coarse mesh*, e uma vez que, nesta etapa, o modelo ainda não se encontra com malha refinada, utiliza-se a tensão máxima principal no centroide dos elementos para cálculo de dano total. As regiões identificadas com dano acumulado próximo a 1 (um) e cujo ciclo de tensão estivesse acima do limite de fadiga foram avaliadas por meio de um refinamento local da malha, em *fine mesh*, para identificação das faixas de tensão de *hot spot*⁴, juntamente com áreas já consideradas com histórico de trincas.

Com a obtenção das áreas refinadas, estas foram agrupadas de acordo com seus detalhes em comum, e, para cada grupo, foi feito o cálculo de dano, utilizando um *script* de pós-processamento desenvolvido pelo Rina. Os resultados são reinsertos no *software* Patran/Nastran para obtenção dos mesmos em formato de *plots* para serem avaliados nas etapas finais da AIE.

b) Etapa 2

Análise de resistência última, *Ultimate strength*, de fadiga e confiabilidade da seção a meia-nau da embarcação. Essa etapa não está vinculada à anterior, na medida em que não se utilizam os modelos computacionais anteriormente descritos.

Primeiramente, é realizada a identificação de um modelo de corrosão adequado a ser aplicado à seção avaliada. O modelo não linear de Soares-Garbatov (SOARES e GARBATOV, 1999) e (SOARES, GARBATOV, *et al.*, 2008) foi utilizado e considera a possibilidade de ajuste da predição de corrosão com novas medições, incluindo a interrupção da degradação em caso de substituição de elementos estruturais durante a vida operativa da

embarcação. A aplicação deste modelo foi feita por meio de planilhas eletrônicas, e os resultados obtidos foram inseridos no *software* LH2D, sendo o mesmo empregado para calcular a resistência última da seção de meia-nau, usando o método de Smith (SMITH, 1977). Adicionalmente, foram realizados o cálculo de fadiga para elementos desta seção e um estudo de confiabilidade de resistência última e fadiga com emprego de técnica *First Order Reliability Method* (Form).

Metodologia de Predição e Monitoramento da Corrosão (MPMC)

Documento que explicita a técnica para realizar a predição de corrosão dos elementos estruturais, considerando práticas modernas de previsão de degradação do material e técnicas para monitoramento.

A proposta do Rina aprovada pela Marinha do Brasil prevê três processos:

a) Descrição do estado atual

Identificação do material dos componentes por meio das análises laboratoriais dos corpos de prova, verificação do estado da pintura e proteção catódica, definição do ambiente e tipos de carga em cada componente, além da consideração das não-conformidades elencadas no RIE.

b) Definição dos modelos

Com as informações agrupadas no primeiro processo, pôde-se determinar os mecanismos de dano esperado para os componentes e definir os modelos adequados, com suas leis que descrevem a evolução da corrosão e/ou dos defeitos no tempo, aplicados para cada grupo de compartimentos submetidos ao mesmo mecanismo de dano. Nota-se que mais de um modelo pôde ser aplicado no caso

⁴ *Hot spot*: região de concentração de tensão com a maior extrapolação da distribuição geométrica de tensões para a perna da solda, imediatamente fora da região afetada pela sua geometria (RIGO e RIZZUTO, 2004).

da ocorrência de mais de um mecanismo atuante de forma simultânea, no caso de interfaces de compartimentos de natureza distinta. Os modelos utilizados são baseados no modelo não linear de Soares-Garbatov (SOARES e GARBATOV, 1999) e (SOARES, GARBATOV, *et al.*, 2008); adicionalmente, os tanques de lastro também são avaliados, segundo modelo de Gudze e Melchers (MELCHERS, 2003):

- . Modelos de Corrosão para Aço
 - Modelo de Corrosão para Tanques de Lastro
 - Modelo de Corrosão para Tanques de Óleo e Borra
 - Modelo de Corrosão para Espaços Fechados
 - Modelo de Corrosão para Ambientes Externos (Atmosféricos e Marinheiros)
 - . Modelo de Corrosão para Alumínio
- Para corrosão localizada, os mesmos modelos foram aplicados com um fator de aceleração.

Com as medições de espessura levantadas a bordo, foi realizado tratamento estatístico dos dados para cada tipo de ambiente, de forma a se obter uma perda de espessura representativa desses ambientes, a qual é utilizada para ajustar o modelo de corrosão durante todo o monitoramento. Adicionalmente, o modelo de predição é corrigido para caso de repintura do compartimento, reparo estrutural e alterações com respeito à eficácia do sistema de proteção catódica.

Em seguida, é proposta uma avaliação de fadiga em elementos sujeitos a cargas cíclicas considerando a perda de espessura ao longo do tempo, proposta pela metodologia. Para tal, utilizam-se resultados da análise de elementos finitos, espessuras medidas na campanha de inspeção e o modelo de corrosão aplicado ao compartimento. O efeito da corrosão é levado em consideração modificando-se adequada-

mente o valor da faixa de tensão equivalente aplicada, a qual varia com a redução de espessura experimentada ao longo dos anos. A metodologia propõe uma distinção entre o tipo de material (“junta soldada” ou “material base”) e o tipo de ambiente (“em ar ou sob proteção catódica” ou “em ambiente corrosivo”) para a definição dos parâmetros da curva S-N.

Por fim, todos os cálculos e resultados da metodologia são apresentados em planilhas eletrônicas.

c) Monitoramento

O monitoramento é regido pelo escopo do Plano de Inspeção Futura, abordado mais adiante, e se faz necessário para acompanhar a evolução dos modelos de predição de corrosão, em que podem ser necessários ajustes e atualização da vida residual dos elementos. Este monitoramento se dará por meio de medições de espessuras, inspeções visuais da pintura e inspeção do sistema de proteção catódica.

Análise de Integridade Estrutural (AIE)

Aplicação das metodologias previstas na MAE e na MPMC, tendo como subsídio os dados colhidos durante campanha de inspeção e registrados no RIE.

Metodologia da Análise do Defeito (MAD)

Visando à solução e/ou mitigação de defeitos não previstos e problemas identificados na inspeção estrutural, este documento explica a metodologia de uma análise dedicada e deverá considerar a possibilidade de não-reparo imediato do defeito ao término da análise. Desta forma, deverá ser aplicada uma MPMC e uma MAE com as devidas considerações ao defeito em estudo.

Extraordinariamente, para a Fragata *Constituição*, foi realizada análise de

ambos os lemes. Para tanto, procedeu-se, primeiramente, à análise de um modelo de elementos finitos por meio do *software* MSC Patran/Nastran, utilizando espessuras de projeto e condições de contorno estabelecidas por regra, de forma a obter as tensões resultantes nos elementos estruturais. Em seguida, foi feita a análise das condições atuais por meio do mesmo *software* e com os mesmos procedimentos, considerando as espessuras medidas durante campanha de inspeção.

Tendo em vista os resultados de tensão de ambos os modelos, foi estabelecido um fator de amplificação de tensão devido à perda de espessura. Adicionalmente, foi adotado o modelo de corrosão não linear para estimativa de perda de espessura proposto por Soares e Garbatov (SOARES e GARBATOV, 1999) e (SOARES, GARBATOV, *et al.*, 2008), conforme apresentado no MPMC, e aplicado aos lemes ao longo de 15 anos. O Rina validou essa abordagem realizando a análise de um terceiro modelo, com as espessuras previstas para 15 anos, e comparou os resultados das tensões obtidas na análise com a extrapolação da tensão no modelo de projeto por meio do fator de amplificação.

Por fim, com as tensões previstas anualmente para cada elemento estrutural dos lemes, as mesmas foram comparadas com critérios de tensões admissíveis; adicionalmente, os elementos foram avaliados segundo perda de espessura admissível adotada pelo Rina. Para os critérios não atendidos, foram definidos reparos e/ou monitoramentos, constantes no Relatório de Análise do Defeito (RAD).

Relatório de Análise do Defeito (RAD)

Este documento explicita todos os resultados obtidos durante a Análise de Defeito (AD), as soluções para a correção/

mitigação do defeito encontrado e soluções de engenharia para o acompanhamento da não-conformidade, sendo necessário justificar tecnicamente o motivo do reparo, em contrapartida ao monitoramento da evolução do defeito em lide.

Relatório Final de Serviços (RFS)

Apresentação em relatório e compilação dos resultados das análises em banco de dados, indicando quais áreas do navio deverão ser reparadas, segundo critérios predefinidos, dentro de cinco, dez e 15 anos, de forma a manter o nível adequado de confiabilidade estrutural da embarcação durante este período.

Para atender aos requisitos da MB, o Rina avalia a necessidade de reparo nos seguintes critérios:

a) Inspeções Realizadas durante a AIE (RIE)

Neste critério são consideradas não-conformidades observadas durante a campanha de inspeção, que já demandavam reparo imediato (furos, trincas, corrosão localizada severa, problemas em soldas e sinais de infiltração no momento da inspeção).

b) Análise Espectral (MAE [Etapa 1])

Este critério considera análise de fadiga em locais considerados críticos no navio (obtidos na pré-análise e no histórico do navio), com utilização de refinamentos por meio de metodologia de elementos finitos (FEM).

c) Tensão última e fadiga (MAE [Etapa 2] + MPMC)

Este critério observa avaliação de outros modos de falha por meio da resistência última do navio, considerando a seção a meia-nau e a metodologia de predição de corrosão aplicada na mesma. Ademais, também é realizada análise de fadiga.

d) Perda de espessura prevista (critério de referência do Rina + MPMC)

Este critério determina substituição estrutural para elementos que apresentem perda de espessura superior ao admissível pelo Rina.

e) Fadiga (RIE + MAE [Etapa 1] + MPMC)

Este critério baseia-se na verificação da vida residual por fadiga em elementos susceptíveis a cargas cíclicas e sujeitas a defeitos devido à corrosão. Para tanto, foi considerada a metodologia de predição de corrosão para os compartimentos que contêm tais elementos.

Os resultados são apresentados em banco de dados e em *software* visualizador/gerenciador dedicado, em que é possível navegar em um modelo tridimensional da estrutura do navio, realizando cortes transversais e/ou longitudinais enxergando reforços, chapas e aberturas, suas espessuras e os elementos que necessitam de reparo. O *software* também fornece uma linha do tempo em que é possível visualizar as previsões de espessuras residuais para os próximos 15 anos e possibilita a inserção de comentários e

registros fotográficos para os elementos estruturais, incluindo a capacidade de recalibração do modelo de predição de corrosão a partir das novas medições obtidas nas campanhas de inspeção futuras, já que é integrado ao banco de dados que se apresenta em planilha eletrônica.

Plano de Inspeção Futura (PIF)

Documento que indica o nível de monitoramento de todas as áreas do navio e define o escopo das inspeções que deverão ser realizadas visando garantir integridade estrutural do meio por mais 15 anos.

Neste documento foram elencados os critérios para a classificação e reclassificação das áreas/compartimentos em baixa, média e alta necessidade de monitoramento, bem como a periodicidade de inspeção associada a cada classificação. Adicionalmente, são definidos os escopos das inspeções anuais, intermediárias, globais e especiais, além dos requisitos, recursos humanos e materiais mínimos para a realização destas inspeções.

A proposta do Rina, de maneira a atender aos requisitos de gerenciamento

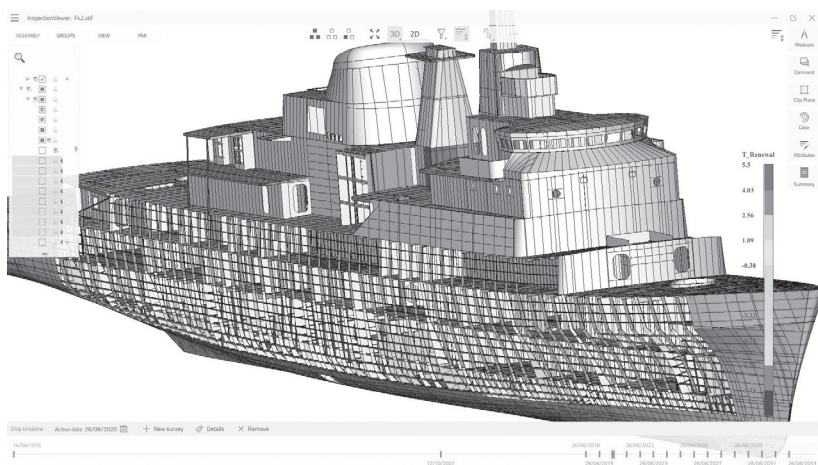


Figura 2 – *Software* de GIE para a FCN

da MB, inclui um arquivo digital que permite a elaboração semiautomática dos planos de inspeção, considerando as variações dos dados armazenados devido à realimentação das inspeções planejadas. Assim, permite-se que as inspeções futuras tenham seus escopos alterados automaticamente com a reclassificação de monitoramento dos compartimentos devido às variações do banco de dados.

AIE: O ESTADO DA ARTE

Em junho de 2018, quando da assinatura do contrato, a Ship Structure Committee (SSC) emitiu o *paper* SSC-474

– *Structural Assessment of Aged Ships* (WALKER, CONNELL e KERY, 2018), que aborda uma análise computacional em elementos finitos com uma metodologia semelhante à AIE no aspecto em que propõe uma análise

na qual é realizado cálculo hidrodinâmico em um modelo tridimensional do casco do navio (por meio de método de painéis), com consequente atribuição de carregamentos a um modelo de elementos finitos degradado por corrosão, em que são avaliadas falhas estruturais segundo regras da IACS. Não obstante, a AIE considera uma análise mais profunda na medida em que examina fadiga em *hot spots*, considera as medições de espessuras de elementos estruturais em suas condições atuais, contempla modelos de corrosão para cada compartimento, explora mais dados operativos para alimentação do modelo

hidrodinâmico e, adicionalmente, valida os carregamentos estimados por meio de análise de CFD.

Compete considerar o renome da SSC, organização norte-americana formada por dez membros notoriamente reconhecidos na área marítima, que tem o propósito de identificar lacunas no conhecimento estrutural e elaborar planos de pesquisa e desenvolvimento, abordando questões atuais de desempenho estrutural e avaliação de segurança de navios (SSC, 2020). Assim, tendo em vista que o *paper* divulgado por esse órgão é recente e considerando a abordagem definida pela Especificação de Serviço de Engenharia (ESE) para o

contrato da AIE uma análise mais profunda, ratifica-se que o trabalho que vem sendo realizado pela Marinha do Brasil se coloca no estado da arte com respeito à análise de integridade estrutural de navios.

O trabalho que vem sendo realizado pela MB se coloca no estado da arte com respeito à análise de integridade estrutural de navios

LEGADOS E DESENVOLVIMENTOS NA MB: RB (IMR)⁵

Todos os engenheiros envolvidos no processo absorveram novos conhecimentos no que tange às inspeções estruturais e metodologias modernas que utilizam ferramentas computacionais de última geração.

Tal experiência possibilitou o desenvolvimento, pela própria DEN, de um processo disciplinado de análise de risco que permite a definição de escopo de inspeção estrutural, armazenamento e tratamento estatístico de dados de inspe-

⁵ RB (IMR): Metodologia de análise de risco denominada *Risk Based Inspection, Maintenance & Repair*.

ção, denominado *Risk Based Inspection* (RBI), e priorização de manutenções e de reparos necessários, denominadas de *Risk Based Maintenance* (RBM) e *Risk Based Repair* (RBR), respectivamente, os quais compõem a metodologia RB (IMR), que possibilita a otimização de recursos aplicados em inspeção, manutenção e reparo. Os planos de inspeção elaborados por meio do RBI permitem priorizar componentes de alto risco (o que inspecionar); saber os mecanismos esperados de falha (onde inspecionar), frequência de inspeção (quando inspecionar) e seleção do método de inspeção (como inspecionar); e determinam os requisitos dos dados inspecionados (o que reportar).

Além do mais, estabelecem-se critérios objetivos de inspeção estrutural, considerando os possíveis fatores envolvidos, de forma a se obter um juízo de valor global da estrutura do navio, com adicional atribuição de graduação ao estado estrutural do meio, em uma escala de zero a dez. Este juízo de valor estabelece

recomendações de ações a serem tomadas pela administração com relação ao navio, baseando-se em julgamentos de engenharia associados à análise de risco semiqualitativa, contribuindo, desta forma, com informação sintetizada para tomada de decisão, considerando equilíbrio entre recursos e níveis de necessidade de reparo (DEN, 2020).

O método também permite estabelecer um índice de confiabilidade de inspeção, que reforça a necessidade de os meios se prepararem para as inspeções estruturais,

com a liberação dos compartimentos necessários para possibilitar uma inspeção adequada, baseada na coleta de dados confiáveis. Tal ação também visa elevar a segurança do pessoal embarcado, do navio e do meio ambiente.

A abordagem de risco do tipo RBR foi adaptada pela MB e utilizada de forma complementar ao objeto do contrato da AIE, de maneira a orientar as prioridades dos reparos a serem realizados nos navios envolvidos no projeto.

TENDÊNCIAS FUTURAS, CONSIDERAÇÕES FINAIS E AGRADECIMENTOS

O contrato da AIE, ainda em vigor, abrangerá mais três fragatas classe *Niterói*. Mesmo ainda não concluído, este trabalho já permitiu uma grande mudança no ponto de vista de inspeção, manutenção, reparo (IMR) e seus gerenciamentos no âmbito da instituição, possibilitando aplicações em outros meios na MB,

O contrato da AIE já permitiu na MB uma grande mudança no ponto de vista de inspeção, manutenção, reparo e seus gerenciamentos no âmbito da instituição

atribuindo as seguintes vantagens:

- equilíbrio de recursos com níveis de necessidade de reparo, permitindo elevação da segurança do pessoal embarcado, do navio e do meio ambiente;
- redução dos prazos de inspeção e avaliação, com melhor planejamento das intervenções;
- padronização das inspeções e avaliações estruturais, reduzindo a subjetividade do processo;
- maior confiabilidade e detalhamento dos relatórios de inspeção e intervenções;

– atribuição de um processo racional para avaliação da estrutura do meio em uma escala de zero a dez, com atribuição de juízo de valor de forma a melhor subsidiar tomadas de decisão;

– possibilidade de melhor avaliar compras por oportunidade e postergações de baixa;

– priorização de reparos/manutenções a serem realizados em ordem de risco de forma a otimizar a aplicação de recursos, especialmente em cenário de restrição orçamentária; e

– permissão do armazenamento em banco de dados de todas as inspeções realizadas nos meios da MB, de forma a possibilitar análises estatísticas para o gerenciamento de integridade estrutural e/ou outros interesses da instituição.

Adicionalmente, vislumbram-se as seguintes tendências futuras, algumas das quais já em desenvolvimento:

– trabalhos no âmbito da Gestão do Conhecimento de maneira a possibilitar a manutenção contínua das análises e o monitoramento dos navios ao longo dos 15 anos em nível satisfatório; adicionalmente, solidificar a mentalidade de gestão moderna de IMR;

– normatização do Gerenciamento de Integridade Estrutural (GIE) balizado pela metodologia RB (IMR) no âmbito da MB;

– elaboração de *software* de suporte ao GIE/RB (IMR) integrado a um banco de dados dedicado; e

– elaboração de aplicativo de dispositivo móvel para registro de inspeção estrutural sob as regras de um manual de inspeção estrutural balizado pelo GIE/RB (IMR).

Naturalmente, a nova abordagem proposta apresenta mudanças que demandarão tempo de elaboração, implementação e solidificação de nova mentalidade para alteração do escopo de IMR até então realizado na instituição. Para tal contexto, “*est modus in rebus*” (moderação em todas as coisas) (PATTOFATTO, 1991) e “*nothing worthwhile is quick, easy, or free*” (nada que valha a pena é rápido, fácil ou gratuito) (BEA, 1992).

Agradecimentos: Destaca-se a importante colaboração técnica dos seguintes oficiais, em diversas etapas do trabalho desenvolvido: CC (EN) Thiago da Silva Lopes, CC (EN) Brenno Moura Castro, CC (EN) Eduardo de Araujo Zumba, CT (EN) Idalba Souza dos Santos, CT (EN) João Gabriel G. de Farias, 1º Ten (RM2-EN) Juliana Aguilar Guimarães, 1º Ten (EN) Lorenzo Liguori Bastos e 1º Ten (EN) Lucas Osório e Castro Portes.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<APOIO>; Construção Naval; Manutenção de Navios;

REFERÊNCIAS

- BEA, R. G. *SSC-365: Marine Structural Integrity Programs (MSIP)*. Ship Structure Committee (SSC), Washington, DC, p. 222, oct. 1992.
- DEN. DEN-EST-MEIOS_DIV-841-001: Estudo de Implementação de Inspeção Baseada em Risco (RBI), Reparo Baseado em Risco (RBR), Plano de Inspeção e Avaliação Estrutural de Navios de Superfície. Diretoria de Engenharia Naval (DEN). Rio de Janeiro, p. 41. 2020.

- DINOVITZER, A.; BASU, R.; HOLT, K. “A Hybrid Approach to Warship Structural Maintenance”. *Sname Transactions*, Vol. 105, 1997. 16.
- DRY, M. J.; SCHULTE-STRATHAUS, R.; BEA, R. G. “SSC-388: Ship Structural Integrity Information System Phase II”. *Ship Structural Committee (SSC)*, Washington, D.C., p. 107, sep. 1994.
- ESTADO-MAIOR CONJUNTO DAS FORÇAS ARMADAS. Manual de Boas Práticas para a Gestão do Ciclo de Vida de Sistemas de Defesa. Ministério da Defesa. [S.l.], p. 107. 2019. (MD40-M-01).
- FONSECA, M. M. *Arte Naval*. 8. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, v. 1, 2019.
- HSE. *Guidance on management of ageing and thorough reviews of ageing installations*. Health and Safety Executive. Aberdeen, UK, p. 24. 2009. (Offshore Information Sheet nº 4/2009).
- ISSC. Condition Assessment of Aged Ships and Offshore Structures. 17th International Ship and Offshore Structures Congress. Seoul, Korea: ISSC. 2009. p. 365.
- LINCOLN, J. W. “Case Studies in Aircraft Structural Integrity”. In: BATRA, R. C. *Contemporary Research in Engineering Science*. Heidelberg: Springer, 1995. p. 289-300.
- MELCHERS, R. E. “Modelling of marine immersion corrosion for mild and low alloy steels – Part 1: Phenomenological model”. *Corrosion (NACE)* 59 (4), 2003. 319-334.
- PATTOFATTO, G. “The Evolution of Inspection and Repair Procedures for Ship Structures”. Marine Structural, Inspection, Maintenance and Monitoring Symposium. Arlington, Virginia, US: Society of Naval Architects and Marine Engineers (Sname) & Ship Structure Committee (SSC). 1991. p. 9.
- RDML ECCLES, T. J. *et al.* *The U.S. Navy/ABS Service Life Assessment*. Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST), p. 10, 2010.
- REEVE, H. P.; BEA, R. G. SSC-404: Ship Structural Integrity Information System: Phase III SSIIS III. Ship Structure Committee (SSC), Washington, D.C., p. 134, jun. 1997.
- RIGO, P.; RIZZUTO, E. “Analysis and Design of Ship Structure”. In: LAMB, T. *Ship Design and Construction*. Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2004. Cap. 18, p. 76.
- SCHULTE-STRATHAUS, R.; BEA, R. G. SSC-380: Ship Structural Integrity Information System. Ship Structure Committee (SSC), Washington, D.C., p. 198, Sep. 1994.
- SERRATELLA, C.; WANG, G.; TIKKA, K. “Risk-based inspection and maintenance of aged structures”. In: PAIK, J. K.; MELCHERS, R. E. *Condition assessment of aged structures*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2008. Cap. 17, p. 497-528.
- SMITH, C. S. “Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull”. Proceedings of 3th International Symposium on Practical Design in Shipbuilding. [S.l.]: [s.n.]. 1977. p. 73-79.
- SOARES, C. G. *et al.* “Corrosion wastage model for ship crude oil tanks”. *Corrosion Science*, v. 50, p. 3.095-3.106, 2008.
- SOARES, C. G.; GARBATOV, Y. “Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to nonlinear corrosion and compressive loads”. *Marine Structures*, v. 12, p. 425-445, 1999.
- SSC. Ship Structure Committee, 2020. Disponível em: <http://www.shipstructure.org/>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- WALKER, G.; CONNELL, B.; KERY, S. SSC-474: Structural Assessment of Aged Ships. Ship Structure Committee (SSC), Washington, DC, p. 75, feb. 2018.