

I-401 - MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA À RUPTURA DE ADUTORAS

Paulo Ferreira⁽¹⁾

Alfonso Pappalardo Jr

Orlando Monezi Jr.

Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

RESUMO

As interrupções frequentes no abastecimento de água são uma das grandes preocupações das empresas concessionárias de serviços de saneamento. A fim de minimizar os riscos associados, tais empresas requerem o desenvolvimento de metodologias de análise para a segurança de sistemas de adução. Neste trabalho será apresentada uma ferramenta computacional para o dimensionamento e a verificação da segurança de tubos de grande diâmetro, típicos dos sistemas de abastecimento de água. A aplicação da Tecnologia CAE (*Computer Aided Engineering*) permite a determinação da vida útil das estruturas do sistema, bem como a avaliação do desempenho e custo de técnicas de reforço estrutural. Um modelo de elementos finitos do arco auto-portante do Sistema de Adução Metropolitano da Cidade de São Paulo (SAM) é apresentado como exemplo de aplicação da metodologia proposta. O modelo desenvolvido é utilizado para investigar como os anéis de reforço, soldados externamente, poderão conferir segurança à estrutura para absorver as pressões negativas devidas ao efeito da formação de vácuo na tubulação ou compensar a perda de espessura da parede devido à processos de corrosão.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos elementos finitos, flambagem de arcos, reforço estrutural de adutoras.

OBJETIVO

O Sistema Adutor Metropolitano – SAM é um complexo sistema de tubulações de grande diâmetro destinado a aduzir água para a Região Metropolitana de São Paulo. Foi construído na maior parte na década de 70 (cujo ramo pioneiro foi o Trecho Norte e entrou em operação em 1973), e projetado com a melhor tecnologia disponível na época, utilizando-se da chamada “Teoria de Spangler para Tubos de Parede Fina” [1].

No seu caminhamento atravessa áreas com alta densidade populacional, ruas e avenidas de tráfego intenso, córregos e rios, estradas de ferro e rodovias e grande densidade de interferências de outras utilidades públicas. Para o caso específico da travessia da adutora sobre rios exigem-se projetos especiais. Quando a travessia é aérea tem sido adotado pelas companhias de saneamento básico o arco autoportante, que é uma solução econômica e elegante.

Neste trabalho, pretende-se apresentar um estudo sobre a segurança estrutural da Travessia Aérea Casa Verde, da SABESP, apresentada na Figura 1, considerando-se a formação de vácuo devida à ruptura do sistema adutor próximo ao Rio Tietê. Será levado em conta o grau de corrosão das chapas que compõe o arco autoportante. Pretende-se também apresentar um estudo econômico da técnica de reforço estrutural de tubulações com anéis de reforço soldados externamente.



FIGURA 1
TRAVESSIA AÉREA TS1 CASA VERDE DO SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO

Os principais fatores que levam à necessidade do uso de novas tecnologias capazes de prever ou mitigar os riscos de interrupções no abastecimento de água estão relacionados: (a) ao crescimento exponencial da população em torno da cidade de São Paulo, que demanda um aumento do abastecimento de água; (b) à deterioração da rugosidade interna dos condutos ao longo do tempo, que exige um aumento da pressão interna para se veicular a mesma vazão; (c) à redução da espessura por corrosão dos condutos metálicos que leva ao aumento das tensões e deformações e, conseqüentemente, à necessidade de execução de reforço; (d) à perda do confinamento lateral devida às obras de outras concessionárias, que leva à mudança de comportamento estrutural; (e) à ocorrência de diversos fenômenos naturais e operacionais (enchentes, vendavais, deslizamentos de terra, interrupção do abastecimento de energia, desarme do conjunto motor-bomba, ligações emergenciais, fenômenos transitórios hidráulicos) que devem ser considerados na fase de projeto dos sistemas de adução.

Diversos estudos são realizados no sentido de reparação dos danos, bem como as medidas preventivas para se evitar a reincidência de acidentes. Souza [2] apresenta um estudo sobre a corrosão em dutos para transporte de petróleo e gás. O autor defende o monitoramento contínuo, para a detecção de regiões propensas à ocorrência de acidentes, e expõe a importância do uso de sistemas computacionais para a avaliação da integridade e da capacidade estrutural de condutos afetados por corrosão. O mesmo trabalho apresenta alguns modelos matemáticos para a análise computacionais para a previsão do comportamento estrutural de condutos, empregando o programa comercial de elementos finitos ANSYS [2].

METODOLOGIA

Os critérios utilizados no dimensionamento das chapas dos tubos de aço e dispositivos de proteção baseiam-se em recomendações contidas em normas e catálogos dos fabricantes dos mesmos. A padronização de projetos propicia um controle maior da produtividade da construção e dos planos de inspeção e manutenção dos sistemas de adução. Neste sentido, o cálculo estrutural dos condutos de adução é muito conservador e, por muitas vezes, levam a situações antieconômicas.

Os casos de carregamento considerados em condutos de adução enterrados e aéreos são muito distintos. Para o caso de tubulações enterradas deve-se levar em conta os carregamentos devidos à sobrecarga de terra, além do peso próprio e da água, atuando simultaneamente à pressão interna. Outra situação que deve ser verificada corresponde à formação de vácuo na tubulação e posterior ausência de pressão interna em decorrência da ruptura da adutora nas proximidades do trecho analisado. Estes cenários de carregamento são apresentados na Figura 2. O efeito da simultaneidade das cargas internas e externas deve ser verificado segundo os fatores de combinação prescritos nas normas técnicas, de modo a se produzir as situações mais desfavoráveis de cálculo.

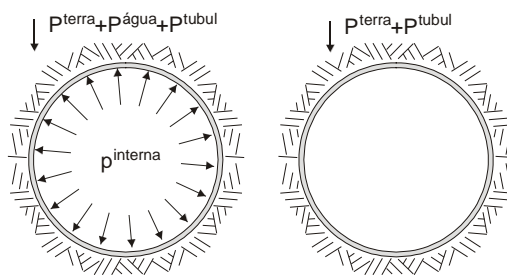


FIGURA 2
CARGAS TÍPICAS PARA PROJETOS DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS

A avaliação das cargas externas atuantes sobre tubulações enterradas devidas ao aterro pode ser feita pela Teoria de Marston que esta embasada em observações experimentais onde constatou o efeito de arco, onde parte do peso é transferido para os prismas laterais adjacentes. Preferencialmente, por razões econômicas, tem-se adotado tubulações de paredes finas. Tais condutos contam com o solo adjacente como elemento de sustentação, onde são mobilizadas pressões passivas de confinamento que impedem os deslocamentos laterais, causando um efeito enrijecedor do conduto de adução. O emprego do Método dos Elementos Finitos para a determinação da interação solo-estrutura é recomendado. Devido à grande quantidade de variáveis (dados de campo obtidos por sondagens) e aos processos dinâmicos do uso do solo levam a grandes dificuldades para o uso desta tecnologia para simulação do comportamento mecânico da interface de acoplamento solo-estrutura.

Neste tipo de análise, pode-se considerar o descolamento da interface tubulação-terra. Tal efeito implica no aumento da dificuldade do problema, pois se deve incluir elementos com não-linearidade de contato.

Por outro lado, para o caso de tubulações aéreas deve-se considerar o efeito da turbulência aerodinâmica do vento sobre tubulação de grande diâmetro. Deve-se realizar uma análise estrutural dinâmica pelo Método dos Elementos Finitos, de modo a verificar a resposta da estrutura ao longo do tempo, a partir das frequências naturais da estrutura obtidas por análise modal. Para a aplicação do carregamento de vento pode-se realizar uma análise fluido-estrutura ou, de forma conservadora, as utilizar as normas vigentes. Outra situação que merece atenção corresponde à formação de vácuo na tubulação e posterior ausência de pressão interna em decorrência da ruptura da adutora nas proximidades do trecho analisado. Neste caso torna-se necessária uma análise de estabilidade (flambagem). Estes cenários de carregamento são apresentados nas Figuras 3 e 4.

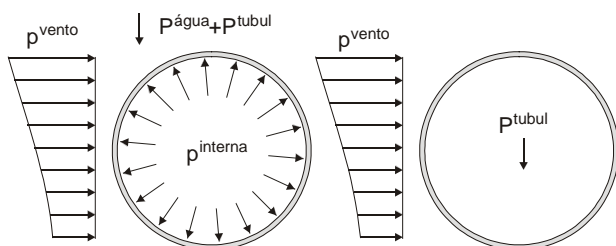


FIGURA 3: carga de vento para projetos de tubulações aéreas de tubulações

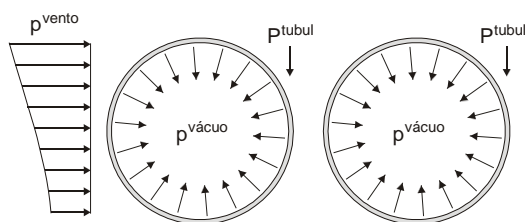


Figura 4: Cargas de Vácuo e Vento para Aéreas

A flambagem nas estruturas, que pode ocorrer de diversos modos, causa grandes deflexões na mesma. Uma vez ocorrido o fenômeno, torna-se inviável a recuperação da estrutura. Na próxima seção são apresentados modelos de elementos finitos para a análise de flambagem para o caso de presença de vácuo na tubulação. Verifica-se a influência da espessura das chapas no coeficiente de segurança à flambagem e avaliação da eficiência do uso de anéis de reforço para evitar o pronunciamento deste fenômeno.

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

As simulações computacionais baseadas na Tecnologia CAE (Engenharia Assistida por Sistemas Computacionais) permitem verificar os riscos de colapso nos pontos vulneráveis do sistema adutor e oferecer subsídios técnico-operacionais preventivos relacionados à redução de riscos.

Praticamente todos os setores da Engenharia Civil são privilegiados pelo uso de ferramentas computacionais. Especificamente para o caso da Tecnologia CAE, diversas normas nacionais e internacionais recomendam o seu uso, as aplicações são inúmeras, sendo frequentemente utilizada em: (a) **Sistemas Estruturais**: projetos de estruturas de concreto, aço, madeira, metálicas em geral, materiais compósitos, concreto protendido, pontes, grandes estruturas, pré-fabricados e pré-moldados; (b) **Geotecnia**: projetos de fundações, obras de terra, obras em rocha, contenções, túneis, poços, estabilidade de taludes, rebaixamento de lençol freático, exploração de jazidas; (c) **Transportes**: projetos de rodovias, ferrovias, aeroportos, heliportos e helipontos; (d) **Hidrotecnia**: sistemas de abastecimento de água, esgotos e rejeitos e resíduos sólidos (captação, adução, tratamento, reservatórios), barragens, diques, obras fluviais e marítimas, portos, canais, hidrovias; (e) **Construção civil**: simulação de patologias, recuperação e restauração das construções civis, tecnologia do concreto, infra-

estrutura territorial e urbana, industrialização da construção civil, ciência e tecnologia dos materiais, sistemas de drenagem, dentre outras.

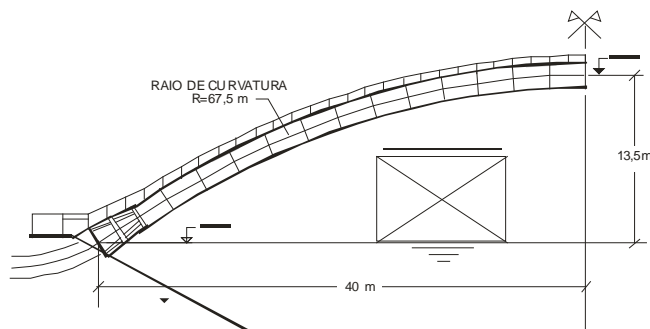


FIGURA 5
PROJETO DO ARCO AUTOPORTANTE DA TRAVESSIA AÉREA DA CASA VERDE DO SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO [1]

A análise estrutural de estabilidade (flambagem) permite a obtenção da sucção crítica para a ocorrência do fenômeno da instabilidade e formas modais associadas.

O desenvolvimento do modelo de elementos finitos da estrutura aérea é feito a partir do uso do programa ANSYS/Multiphysics (versão acadêmica). A geometria da estrutura foi concebida no módulo de CAD (Projeto Geométrico Assistido por Sistemas Computacionais), integrado ao programa ANSYS, a partir dos dados fornecidos pela SABESP (Figura 5). A discretização da estrutura é feita utilizando-se elementos finitos de casca (SHELL63), conforme mostra a Figura 6. O aço utilizado é o ASTM A-283, que apresenta módulo de elasticidade $E=206,8$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu=0,25$ e limite de escoamento $f_y=227,5$ MPa. Adota-se o diâmetro médio da tubulação $D=1800$ mm com espessura variável de acordo com o grau de deterioração considerado, partindo-se da espessura de projeto igual a 14mm.

De modo a se verificar a influência da redução da espessura da chapa devida à corrosão no coeficiente de segurança à flambagem e a avaliação da eficiência da técnica de reforço utilizando-se anéis de aço soldados externamente, mostrados na Figura 6, adotam-se as seguintes hipóteses simplificadoras: (a) grau de deterioração por corrosão é uniforme em toda a extensão e perímetro do conduto de adução e (b) desconsideração das imperfeições geométricas locais produzidas por soldas, desalinhamentos ou amassamentos dos tubos.

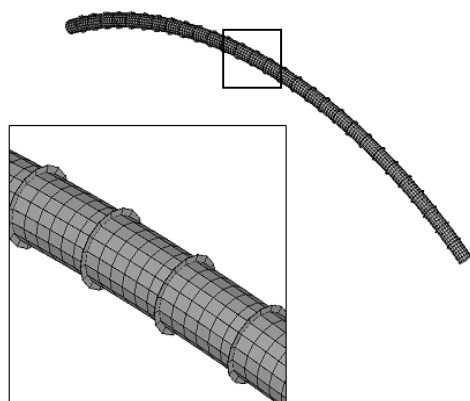


FIGURA 6
Modelo de Elementos Finitos de Casca
SEGURANÇA À FLAMBAGEM EM FUNÇÃO DA
e Detalhe dos Anéis de Reforço
ESPESSURA POR CORROSÃO

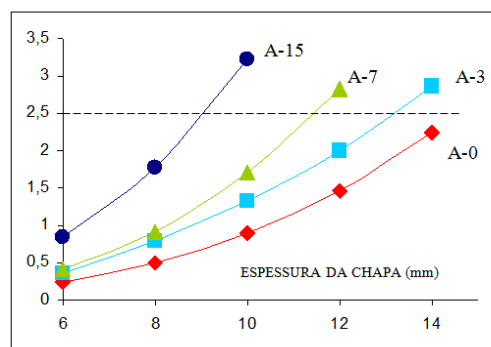


FIGURA 7
COEFICIENTE DE
DETERIORAÇÃO DA

A Tabela I apresenta a variação do coeficiente de segurança à flambagem em função do grau de deterioração produzido pela corrosão realizada num modelo hipotético de estudo. De maneira simplificada, adota-se o coeficiente de segurança à flambagem mínimo igual a 2.

Analisando-se os dados da coluna A-0 da Tabela I, referente à estrutura original, sem anéis de reforço, observa-se que o avanço da frente de corrosão compromete a segurança da estrutura. A espessura de parede de 14 mm é considerada mínima para atender o critério de instabilidade. Com a diminuição da espessura, mostrada na curva A-0 da Figura 7, a segurança atinge níveis inaceitáveis. A Figura 8 apresenta o modo de flambagem para a sucção de 15 psi (103,42 kPa), devida à formação de vácuo na tubulação.

TABELA I
COEFICIENTES DE SEGURANÇA À FLAMBAGEM

ESPESSURA (mm)	A-0	A-3	A-7	A-15
6	0,24	0,37	0,42	0,84
8	0,50	0,79	0,92	1,78
10	0,90	1,33	1,71	3,22
12	1,47	2,00	2,83	5,26
14	2,25	2,87	4,33	7,86

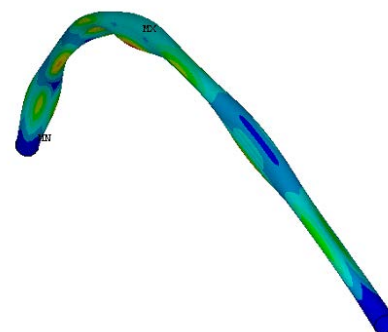


FIGURA 8: MODO DE FLAMBAGEM DA TUBULAÇÃO AÉREA AUTOPORTANTE DEVIDO À FORMAÇÃO DE VÁCUO NA TUBULAÇÃO COM 10 MM DE ESPESSURA

Por outro lado, de modo a se verificar a eficiência da execução de anéis de reforço aplicados externamente, feitos com chapas de aço ASTM A-283 com espessura de 10 mm e largura de 100 mm, analisa-se a variação do coeficiente de segurança à flambagem em função do espaçamento dos anéis de reforço. As configurações analisadas para o posicionamento e espaçamento dos anéis de reforço são apresentadas nas Figuras 9 a 11.

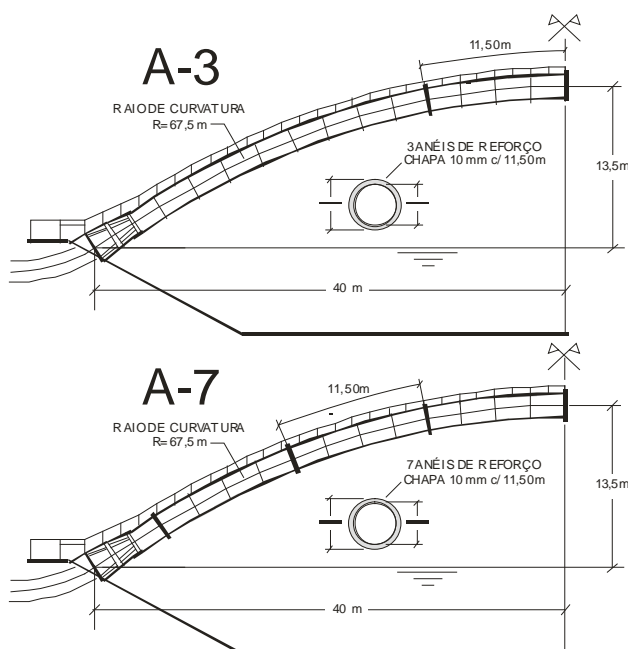


FIGURA 9
REFORÇO DO ARCO AUTOPORTANTE COM 3 ANÉIS DE AÇO
DE 10 MM DE ESPESSURA E DIÂMETRO EXTREMO D=2000 mm

FIGURA 10
REFORÇO DO ARCO AUTOPORTANTE COM 7
DE 10 mm DE ESPESSURA E DIÂMETRO EXTERNO

Analisando-se os dados da Tabela I, referente às estruturas reforçadas, pode-se especificar a menor quantidade de anéis de reforço e espaçamento associado, para um coeficiente de segurança mínimo igual a 2, em função da espessura das chapas. Pode-se observar que, por exemplo, para 3 anéis de reforço a espessura mínima exigida é de 12 mm, descartando-se a configuração de reforço com 7 anéis de aço que terá o mesmo desempenho da configuração anterior. Com o avanço da frente de corrosão, levando a uma espessura efetiva de 10 mm, deve-se partir para a execução do reforço com 15 anéis. O esquema de reforço adotado permite que sejam instalados os anéis de reforço de acordo com a necessidade, onde a cada nova configuração exigida sempre compreende a configuração anterior.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A complexidade e os tipos de análises que podem ser realizados pelo Método dos Elementos Finitos são adequados de modo a verificar o atendimento dos critérios de segurança e estabilidade de estruturas

Desenvolvimento de modelos de elementos finitos para a análise de flambagem da adutora para o vácuo formado por interrupção do abastecimento corresponde a um dos cenários de carregamento analisados neste trabalho.

Observa-se que os modelos matemáticos permitem o cálculo do coeficiente de segurança para a prevenção de acidentes estruturais e oferecer subsídios técnico-operacionais para a tomada de decisão para a escolha de qual das medidas preventivas para a redução do risco contra acidentes é a mais eficiente e econômica.

A mudança da cultura, atualmente voltada para o uso do aço nas tubulações dos sistemas adutores, para o uso de novos materiais, aliados às técnicas de produção de tubos em larga escala, permitirá a transição para novos padrões tecnológicos. O desenvolvimento de materiais compósitos estruturados com fibras, fabricados com resinas termofixas ou termoplásticas reforçadas com fibras inorgânicas (vidro, carbono) ou sintéticas (aramida), levará à máxima eficiência com a otimização das propriedades mecânicas dos materiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo pelo apoio e pelo incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 FERREIRA, P. "Sistema Adutor Metropolitano – SAM. Aspectos de Projeto.", *Revista DAE/SABESP*, n. 117, São Paulo, 1978, p.134-49.
- 2 SOUZA, A. H. T. S. "Ferramentas Computacionais para Análise de Dutos com Defeitos de Corrosão.", Dissertação (Mestrado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco – UFP, 2008.