



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GTM.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES – GTM

ESTUDO DE ESFORÇOS RESULTANTES DE IMPACTOS DURANTE TRANSPORTE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Juliano Mendes Guarengi (*)
Siemens Ltda

Alan Sbravati
Siemens Ltda.

Rodrigo Muza Mossmann
Enbras Software e Projetos Ltda.

Roberto Dallo Ferreira
Enbras Software e Projetos Ltda.

Fernando Torres Pereira da Silva
Enbras Software e Projetos Ltda.

RESUMO

São apresentados neste trabalho resultados de investigação sobre o comportamento dinâmico das estruturas de transformadores quando submetidas a impactos decorrentes do transporte.

PALAVRAS-CHAVE

Transporte de transformadores, Instrumentação, Método dos elementos finitos, Dinâmica de Multi-Corpos, Carregamentos dinâmicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A especificação dos impactos aos quais o transformador pode ser submetido durante o transporte é baseada em valores de acelerações comumente verificados por meio da instrumentação do equipamento com registradores de impacto. Estes são posicionados na parte externa do tanque e monitoram as acelerações bruscas decorrentes, usualmente, de choques mecânicos, tais como os acoplamentos entre vagões no transporte ferroviário.

Buscando, hipoteticamente, aumentar a segurança para o transporte, tem-se visto uma ação reativa do mercado no sentido de estabelecer critérios de dimensionamento mais severos que os usualmente medidos, não necessariamente embasada por estudos efetivos. Poucos estudos têm sido desenvolvidos nesta área, principalmente no que diz respeito ao comportamento dinâmico destas estruturas diante das diferentes formas de impacto.

A hipótese tradicional de cálculo é que os impactos sofridos pela base de transporte sejam integralmente transmitidos para o transformador e para seus elementos internos. Entretanto, sob a ótica de análises dinâmicas, fica bastante evidente que a transmissão destes esforços seja fortemente dependente da flexibilidade e dos amortecimentos das estruturas.

Para analisar este fenômeno, iniciou-se na Siemens um estudo detalhado sobre o comportamento dinâmico do transformador submetido a impactos durante seu transporte. Tal estudo foi desenvolvido seguindo duas abordagens: uma numérica, pelo uso de ferramentas de simulação cuja formulação baseia-se no Método de Elementos Finitos (*finite elements method, FEM*) e na técnica do sistema de Multi-Corpos (*multi-body systems, MBS*) e outra experimental, viabilizada pela instrumentação de algumas unidades. Esta teve a finalidade de obter uma compreensão mais profunda do que ocorre no transporte e propor novos critérios para as reais requisições de carregamento.

2.0 - ABORDAGEM EXPERIMENTAL

O ponto de partida do trabalho foi a instrumentação de transformadores, medindo com grande riqueza de detalhes os impactos e esforços decorrentes do transporte dos equipamentos. A partir destas medições foram elaborados modelos numéricos detalhados do sistema completo, buscando identificar os fatores mais relevantes para elaboração de um modelo analítico.

Dentre os casos instrumentados houve transportes rodoviários, marítimo e ferroviário. Para monitoramento dos equipamentos foram utilizados extensômetros (*strain gauges*) para medição da tensão mecânica e acelerômetros para medir as acelerações decorrentes dos impactos. Como nomenclatura padrão, definimos como direção longitudinal a direção paralela à maior dimensão do equipamento (sentido de deslocamento do veículo – também identificada como direção *y*), como direção transversal à direção no plano horizontal, perpendicular à longitudinal (também referenciada como direção *x*) e como direção vertical o eixo *z*.

2.1 - Instrumentação Transformador T1

A disposição dos sensores na Parte ativa e no Tanque do transformador T1 é apresentada na Figura 2. Para as medições das acelerações no tanque foram utilizados registradores de impacto comerciais, nas posições 1 e 2. A aquisição e tratamento de todos os sinais medidos, exceto para 1 e 2, é feito via duas placas de aquisição comerciais.

As placas de aquisição recebem os sinais dos acelerômetros 3 e 4 e dos extensômetros de 5 a 12 em tempo real. O registro individual de tensão mecânica só é efetuado na memória se a variação do sinal do extenso metro ou dos acelerômetros é superior a valores pré-definidos. Portanto, os acelerômetros 3 e 4 têm a função principal de “trigger”. Os extensômetros 5, 6 e 7, 8 medem as tensões mecânicas normais resultantes de carregamentos na direção *y* nas estruturas de fixação inferior e superior da parte Ativa ao tanque. Aqueles posicionados nos pontos 9, 10, 11 e 12 medem as mesmas tensões normais nas estruturas de fixação lateral do núcleo, solidárias às vigas da parte ativa.



Figura 1 - Transformador T1

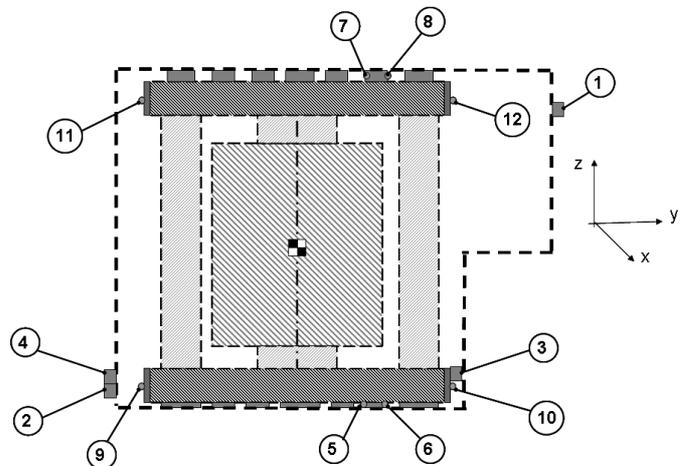


Figura 2 - Posicionamento dos sensores no transformador T1



Figura 3 - Registrador de impacto posicionado na carreta – T4

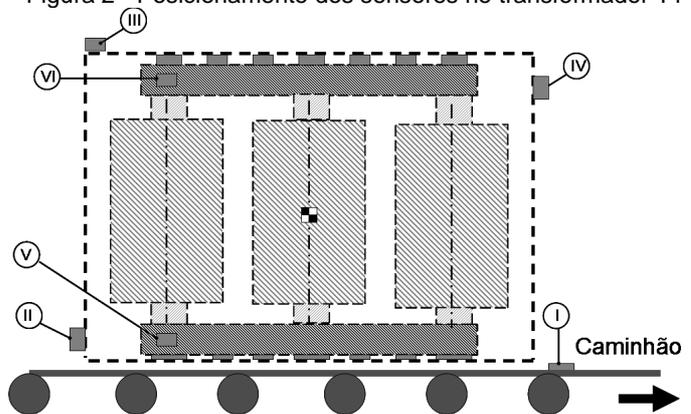


Figura 4 - Posicionamento dos Registradores de Impacto - T4

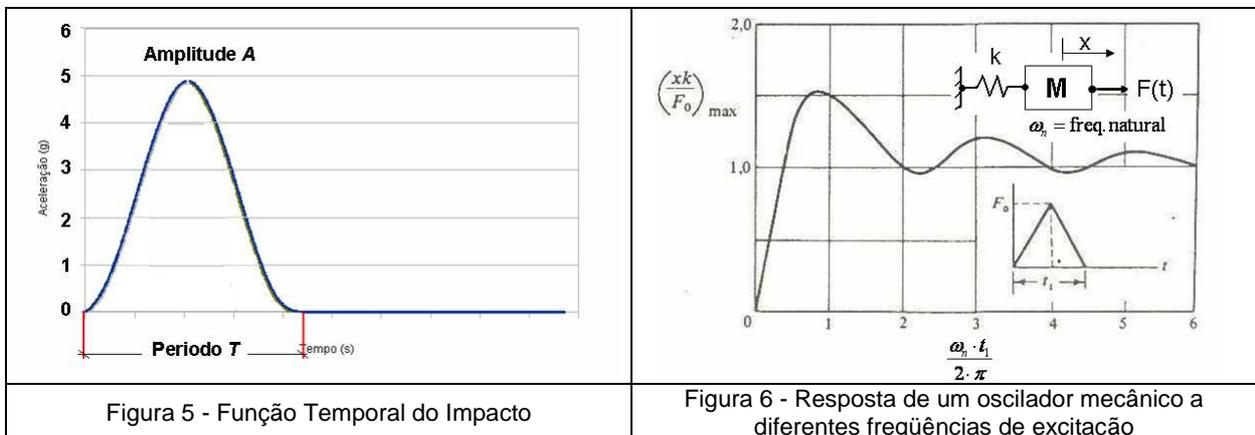
2.2 - Instrumentação dos transformadores T4 – T5

O posicionamento dos registradores de impacto comerciais instalados nos transformadores T4 e T5 segue o esquema apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Foram medidos, desta maneira, as acelerações presentes no veículo, no tanque e na parte ativa do transformador.

A aceleração da carreta foi registrada com o fim de identificar-se qual a excitação de base repassada ao transformador, e, por sua vez, se existe atenuação ou amplificação na resposta do equipamento dependendo da posição onde foi tomada.

3.0 - ABORDAGEM NUMÉRICA

O comportamento característico de um sistema submetido a um tipo de excitação dinâmica arbitrária é dependente das características da excitação e das características dinâmicas do sistema. O espectro de resposta é uma representação gráfica que nos permite saber o pico máximo da resposta de um sistema em função da(s) frequência(s) natural(ais) do mesmo. Diferentes tipos de excitações resultarão em diferentes espectros de resposta. Como exemplo, segundo [1], o espectro de resposta de um oscilador não-amortecido a um impulso triangular é dado pela Figura 6.



A observação dos dados experimentais revelou a importância da flexibilidade dos materiais na resposta do transformador à aceleração impulsiva. Assim, é natural a tentativa de compreender o fenômeno pelo estudo do comportamento estrutural do conjunto (através da análise em elementos finitos) quando submetido a uma excitação dinâmica. A sua modelagem correta, porém, exige que se tenha uma boa noção de como os esforços são transmitidos ao transformador e, então, de como eles são recebidos pelos componentes internos. O método do sistema multi-corpos, em contraste com o método dos elementos finitos, surgiu para estudar a cinemática e a dinâmica de corpos com movimentos descritos por equações diferenciais não lineares.

As conexões desses corpos são feitas por meio de juntas idealizadas (que restringem graus de liberdade) ou por elementos mais complexos - como contatos, molas, amortecedores ou forças genéricas - que adicionam condições de contorno aos movimentos. Como, em geral, os programas de sistemas multi-corpos trabalham com menos graus de liberdade se comparados a um sistema em elementos finitos, a solução das equações se torna muito mais rápida e a técnica é especialmente adequada para análises transientes.

Neste tópico, as respostas dos 3 equipamentos (na condição de transporte) a excitações impulsivas pela base foram avaliadas via MBS e, em um dos casos, também via FEM. Visando-se evitar problemas numéricos, a excitação impulsiva triangular de amplitude A e período T inserida nos modelos foi suavizada nas regiões de singularidade. A Figura 5 mostra o sinal usado nas análises para um carregamento usualmente especificado para transporte ferroviário, com $A = 5g$.

3.1 - Modelagem de Multi-corpos

Os modelos MBS foram gerados através do pré-processador *MSC-Patran* e exportados ao software *MSC-Adams* para solução dinâmica. Neste caso, a modelagem do tanque como componente flexível foi possível através das informações decorrentes da análise modal desta estrutura (análise do movimento vibratório para cada uma de suas frequências naturais). As características de flexibilidade são, portanto, resultantes da composição dos modos de deformação escolhidos para integrar o modelo MBS, neste caso, para uma frequência de até 100 Hz.

Uma representação dos modelos finais utilizados na análise MBS pode ser vista na Figura 7. Inicialmente, tanto a base de transporte, como a parte ativa, como o tanque, foram considerados como corpos rígidos. A parte ativa foi definida como um ponto material com propriedades de massa e inércia de rotação. Os vínculos modelados foram: os pontos de fixação superior e inferior entre parte ativa e tanque e os cabos de amarração de transporte (pré-tensionados) entre tanque e base de transporte.

Nos modelos finais MBS, apresentados na Figura 7, o modelo simples inicial foi incrementado para considerar o tanque como corpo flexível e os demais vínculos entre a parte ativa e o tanque. O único efeito não-conservativo (de dissipação de energia) considerado aqui foi o amortecimento estrutural do tanque. Nos casos avaliados, os elementos que foram variados são a geometria e massa da parte ativa (inércias da estrutura), a posição dos pontos de fixação da parte ativa ao tanque, as dimensões do tanque e, conseqüentemente, sua flexibilidade.

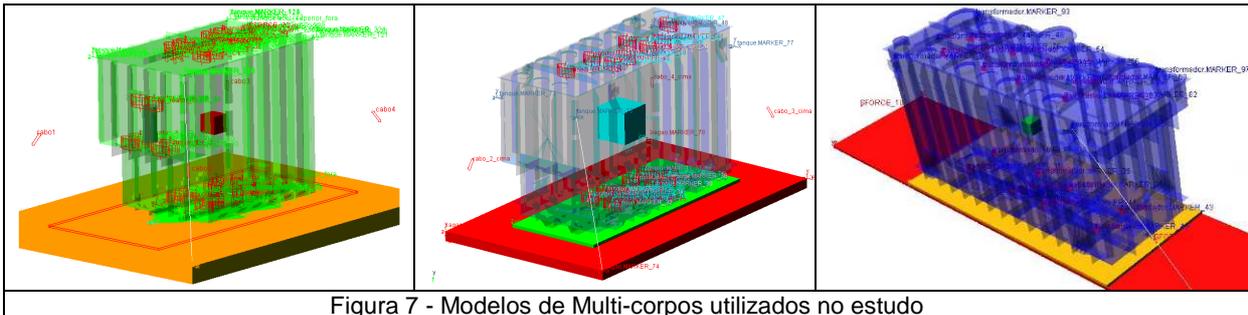


Figura 7 - Modelos de Multi-corpos utilizados no estudo

3.2 - Modelagem por Elementos Finitos

O modelo de elementos finitos foi realizado para o primeiro equipamento instrumentado T1, tendo sido desenvolvido no software *MSC Patran* e resolvido com *MSC Marc*. No modelo do tipo FEM a parte ativa foi considerada como um corpo extenso. Tanto as estruturas de fixação lateral do núcleo (solidárias as vigas da parte ativa) quanto as de fixação da parte ativa como um todo durante transporte foram modeladas em detalhes. Neste caso, as interações de contato entre a parte ativa e o tanque e internamente a parte ativa foram representadas de maneira muito detalhada (sem simplificações).

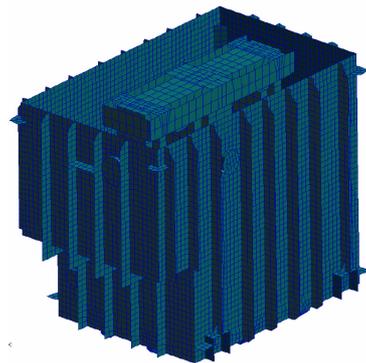


Figura 8 - Modelo de Elementos Finitos de T1

4.0 - RESULTADOS

4.1 - Simulação numérica

4.1.1 - Modelos MBS

Os resultados obtidos pelo modelo mais simples MBS, em que o tanque foi considerado um corpos rígido, revelaram distribuição quase igualitária das forças inerciais da parte ativa entre as fixações superiores e inferiores, dependendo principalmente da posição vertical do centro de gravidade. A divergência das proporções obtidas através dos dados experimentais do transformador T1 em relação a este modelo, mostrou a importância dessa análise detalhada, especialmente pela consideração do tanque como corpo flexível.

Na segunda versão do modelo foi inserida a representação da flexibilidade do tanque e das amarrações do transformador à base de transporte (tirantes pré-tensionados). Foi identificado que o impacto das fixações tracionadas na redução das parcelas de força repassadas às fixações superiores da parte ativa foi mínimo devido a sua alta elasticidade. Concluiu-se que durante os eventos críticos de impacto em transporte, a participação dos cabos não é relevante. Entretanto pudemos atingir valores de distribuição de cargas entre as fixações superiores e inferiores muito próximos dos medidos, conforme apresentado na Tabela 1 para T1.

A Tabela 1 indica a razão percentual entre os carregamentos longitudinais das fixações superiores e inferiores em relação à soma de todos os carregamentos longitudinais repassados às fixações, para os três transformadores simulados por MBS.

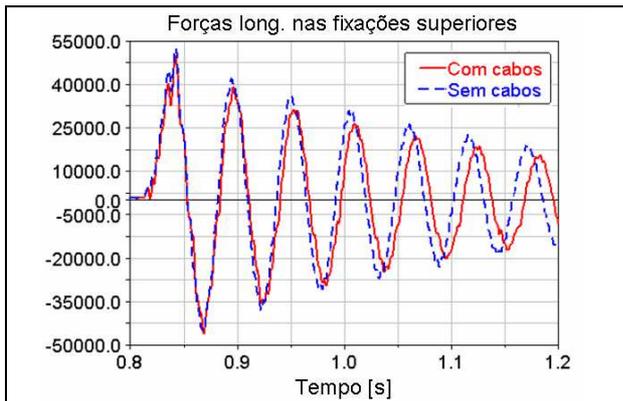


Figura 9 - Resposta de simulações entre modelos com e sem a consideração de cabos de amarração

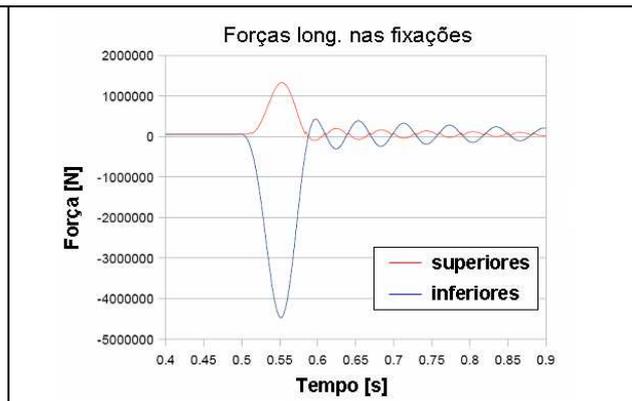


Figura 10 - Reações Longitudinais das fixações superiores e inferiores da parte ativa

Tabela 1 - Relação entre os carregamentos longitudinais de cada fixação e a força longitudinal total nas fixações

Modelo	Massa Parte Ativa	% superiores	% inferiores
T1	100 ton	~25%	~75%
T2	120 ton	~15%	~85%
T3	185 ton	~5%	~95%

Nota-se que, em função da massa da parte ativa, a porcentagem das reações de apoio na direção longitudinal das fixações superiores decresce com o aumento da massa. O aumento da massa da parte ativa representa, ao mesmo tempo, um aumento do seu comprimento e também uma redução na rigidez do tanque, uma vez que suas dimensões também aumentam.

4.1.2 - Modelos FEM

Os resultados obtidos através desta abordagem foram condizentes com aos equivalentes do tipo MBS. A força de atrito entre a parte ativa e o tanque tem pequena participação na resistência à força de inércia da parte ativa. No caso das estruturas de travamento do núcleo, o atrito entre as vigas e este é relevante. A consideração destes efeitos permitiu obter-se o mesmo comportamento de acomodação dos corpos observado nas medições. Como pode ser observado na Figura 11 e na Figura 12, tanto a tensão mecânica na travessa quanto as forças atuantes nas fixações superiores da Parte ativa não retornam aos seus pontos iniciais após o impacto. A Figura 12 mostra a distribuição de cargas entre os grupos de fixações superiores.

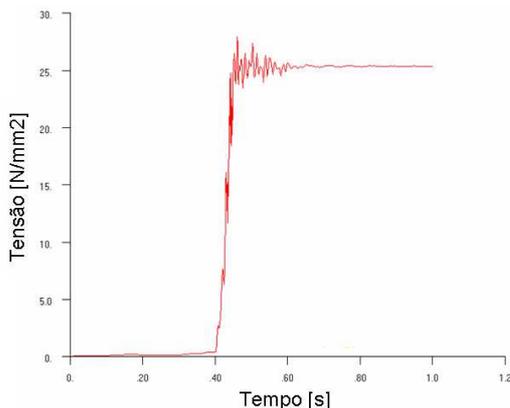


Figura 11 - Tensão mecânica nas estruturas de travamento do núcleo

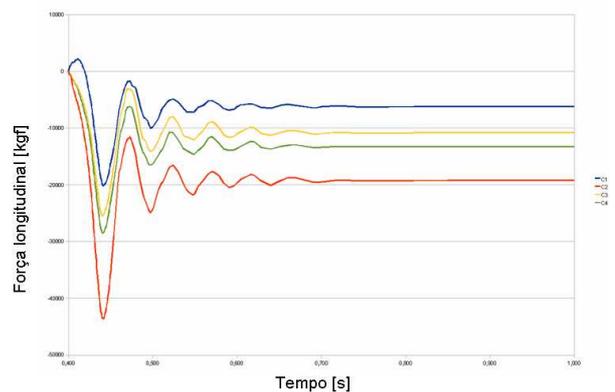


Figura 12 - Forças atuantes nas fixações superiores

4.2 - Instrumentação

4.2.1 - Transformador T1

Os eventos de máximo impacto longitudinal registrados pelo registrador posicionado na parte superior do tanque (Reg. 1) datam do período de transporte ferroviário e referem-se às etapas de engate e desengate do vagão

(montagem da composição). Pode-se observar pela Figura 13 que os sinais de aceleração no tanque são muito similares para os dois eventos.

Seguindo a lógica de gravação dos dados, os registros de tensão mecânica nas estruturas de fixação foram efetuadas no mesmo instante de registro dos eventos pelos registradores de impacto 1 e 2. Observou-se a forte influencia do atrito seco e do amortecimento envolvido na montagem destas estruturas nas respostas em tensão das mesmas. Em todos os casos observados, mediante excitações de base alternantes de vários ciclos, a curva de variação de tensão não teve mais que dois pulsos de oscilação, identificando comportamentos comuns a sistemas superamortecidos. As respostas em tensão das fixações laterais do núcleo, mostradas na Figura 14, revelam um importante efeito de pequenas acomodações (deslocamentos infinitesimais) da estrutura mediante os impactos sucessivos.

Os resultados obtidos a partir da instrumentação das fixações com extensômetros indicaram valores de tensão bastante inferiores aos utilizados para o dimensionamento. Os elevados fatores de segurança foram conseqüentes da distribuição real das cargas nas estruturas e da resposta da estrutura a um carregamento dinâmico e não um equivalente estático como tradicionalmente usado nos cálculos.

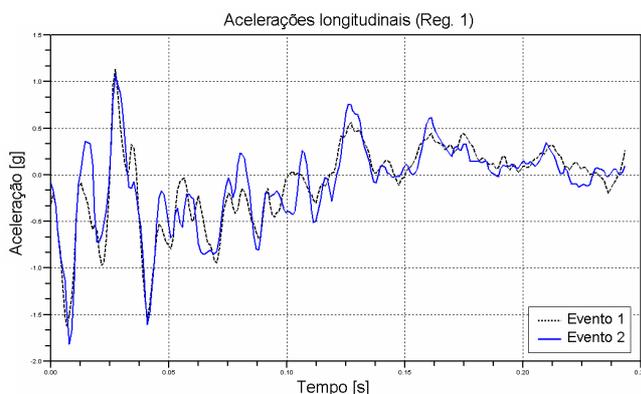


Figura 13 - Sinais de Aceleração no registrador de impacto em dois eventos distintos

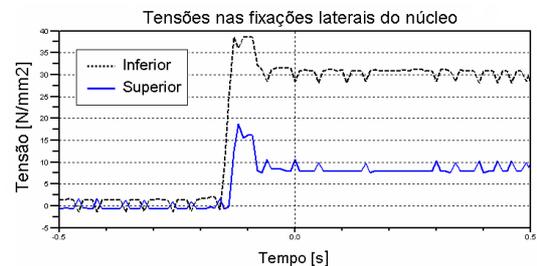


Figura 14 - Tensões mecânicas nas fixações laterais do núcleo em um único evento

4.2.2 - Transformador T4

Através da sincronização inicial de todos os registradores de impacto, foi possível identificar posteriormente os incidentes coincidentes durante o período de transporte. Para todo incidente registrado em um dos acelerômetros do tanque houve um coincidente registrado no acelerômetro colocado na carreta.

Quando comparados os sinais de aceleração longitudinal e transversal do tanque aos registros da carreta pode-se observar que a estrutura do transformador não respondeu às entradas de mais alta frequência provenientes da base. Isto ocorreu igualmente para os impactos na direção vertical. Avaliando-se o espectro dos sinais de resposta do tanque, identifica-se atenuação nas amplitudes correspondentes à maioria das frequências exceto nas frequências naturais do sistema.

Contrariamente as atenuações da carreta para o tanque, as amplitudes de aceleração máxima laterais são amplificadas da parte inferior do tanque para a parte superior, isto sendo justificado pelo efeito da flexibilidade do tanque. Também pode ser identificado através dos gráficos que existe uma defasagem entre os sinais registrados nos diversos pontos.

A Tabela 2 mostra os valores máximos de aceleração gravados em todos os registradores durante um evento de impacto. Os registradores de impacto situados na parte ativa do transformador registraram acelerações máximas significativamente inferiores aos valores observados na parte externa do tanque. As acelerações registradas na parte superior da parte ativa seguem a mesma tendência de amplificação identificada no tanque.

Embora os valores de aceleração tenham sido maiores na viga superior, este fato não implica necessariamente que os carregamentos nas fixações superiores da parte ativa sejam, como conseqüência, maiores que nas fixações inferiores, fato provado na instrumentação do transformador T1. Concluímos que este comportamento se dá em razão da montagem e da flexibilidade do tanque.

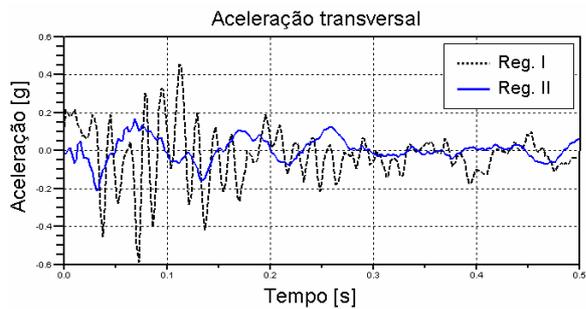


Figura 15 - Sinais de aceleração dos registradores posicionados na carreta e na parte inferior do tanque

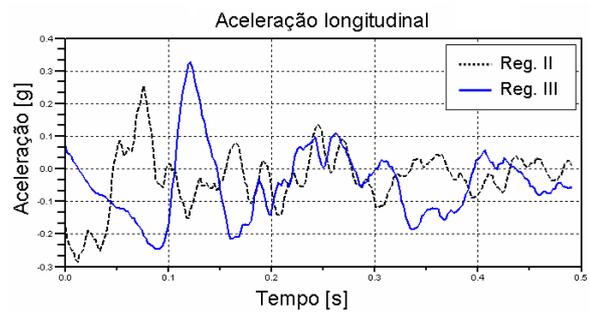


Figura 16 - Sinais de aceleração dos registradores posicionados nas partes superior e inferior do tanque

Tabela 2 - Máximas Acelerações registradas durante um evento de impacto

	lateral [g]	longitudinal [g]	vertical [g]
Carreta (Reg. I)	0.6	0.3	2.2
Tanque Inferior (Reg. II)	0.5	0.2	0.5
Tanque Superior (Reg. IV)	0.5	0.4	0.7
Tampa Tanque (Reg. III)	0.5	0.4	0.5
Viga Superior (Reg. VI)	0.2	0.3	0.3
Viga Inferior (Reg V)	0.1	0.2	0.3

5.0 - MODELAGEM ANALITICA

Baseado nos resultados obtidos através dos modelos de simulação MBS e FEM ante as excitações impulsivas de transporte e nas observações feitas a partir das medições, um novo modelo de calculo das estruturas de fixação de transporte do núcleo e da parte ativa foi proposto.

O novo método de calculo considera o comportamento dinâmico da estrutura transportada (parte ativa e tanque) ante a uma excitação genérica pela base. As flexibilidades do tanque, tampa e vínculos são modelados. As estruturas de fixação são então determinadas de acordo com a sua suportabilidade estrutural aos esforços dinâmicos obtidos do calculo para o transformador em questão.

A Figura 17 mostra o modelo dinâmico equivalente e a Figura 18 os resultados temporais das forças repassadas as fixações da parte ativa obtido para o transformador T1, sem a consideração do atrito entre a parte ativa e o tanque. A proporção de distribuição foi bastante similar à obtida no modelo MBS.

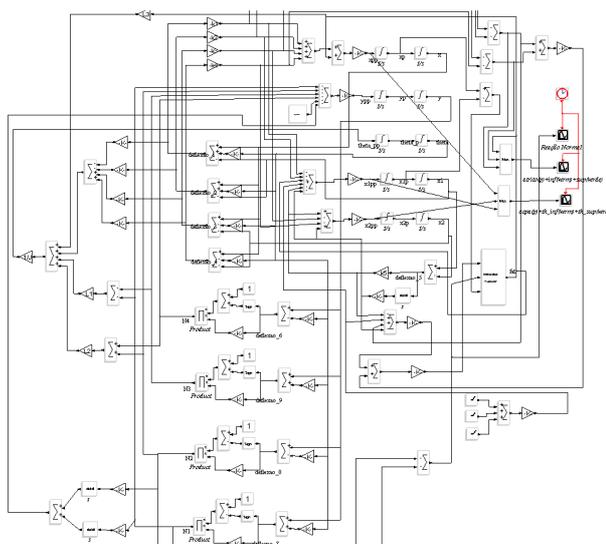


Figura 17 - Modelagem do sistema dinâmico do transporte do equipamento

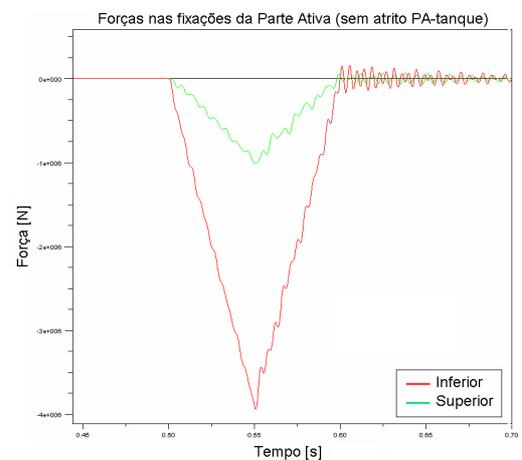


Figura 18 - Repasse de carregamentos entre as fixações superiores e inferiores

6.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram verificadas as variáveis influentes no dimensionamento do transformador para impactos de transporte, ressaltando, sobretudo, a importância da consideração da estrutura completa no dimensionamento das reações nas fixações.

Em razão da flexibilidade do tanque, de atritos internos e de amortecimentos estruturais, constatou-se que, efetivamente, apenas uma parcela da aceleração imposta ao veículo de transporte é repassada à parte ativa, em baixas frequências de excitação. Outro fator grandemente influenciado é a distribuição de esforços entre fixações superiores e inferiores.

Comparando os valores obtidos pelos modelos tradicionais de cálculo para a divisão dos esforços de transporte nas fixações da parte ativa com os valores efetivamente obtidos pelas simulações detalhadas e pelas medições, identificamos uma grande discrepância. Em relação às fixações superiores, esta discrepância mostrou que as estruturas estavam dimensionadas para carregamentos muito superiores aos efetivos, o que é favorável à segurança do equipamento. Entretanto, no caso das fixações inferiores, o efeito se inverte, aumentando a porcentagem do carregamento aplicado. Contudo, a redução entre o valor de impacto externo e o percebido pela parte ativa não só compensou este aumento, como também resultou em tensões bastante reduzidas para as fixações inferiores.

O aprimoramento do modelo de cálculo para a divisão dos esforços entre as fixações superiores e inferiores é condição *sine qua non* para a consideração dos efeitos dinâmicos de amortecimento. Assumindo-se que as estruturas podem ser significativamente otimizadas pelas considerações dinâmicas no cálculo, é essencial que seja também aprimorado o modelo para a distribuição dos esforços na estrutura.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Thomson, W. T.; "Teoria da Vibração com aplicações", 1973.
- (2) Inman, D. J., "Engineering Vibration", 1996.
- (3) Aragão Filho, L. A. C. M. "Curso de dinâmica de estruturas"; Brasil: IME, 2008. Notas de aula do curso de dinâmica de estruturas do Instituto Militar de Engenharia. Disponível em: <<http://www.ime.eb.br/~moniz/>>.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Juliano Mendes Guarengi

Natural de Ourinhos – SP; Nascimento: 17/07/1983

Engenheiro Mecânico – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Engenheiro do Depto de Desenvolvimento de Produto da Siemens TUSA – Area de Calculo Estrutural

Alan Sbravati

Natural de Piracicaba – SP; Nascimento: 02/09/1979.

Engenheiro Mecânico – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da unidade de Transformadores de Potência da Siemens

Rodrigo Muza Mossmann

Natural de São Leopoldo – SP; Nascimento: 07/08/1976.

Engenheiro Mecânico – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Fernando Torres Pereira da Silva

Natural de São Paulo – SP; Nascimento: 06/10/1986.

Engenheiro Mecatrônico – Universidade de São Paulo (USP)

Engenheiro consultor (ENGBRAS) do Depto de Desenvolvimento de Produto da Siemens TUSA – Área de Calculo Estrutural

Roberto Dallo Ferreira

Natural de São Paulo – SP; Nascimento: 11/06/1985.

Engenheiro Mecatrônico – Universidade de São Paulo (USP)

Engenheiro consultor da ENGBRAS – Area de Calculo Estrutural