



IMPACTO FRONTAL DE VEÍCULOS EM POSTE DE CONCRETO ARMADO

Raquel Colares Abreu

Tereza Denyse Pereira de Araújo

raquel-colares@hotmail.com

denyse@ufc.br

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil

Campus do Pici, Bloco 710, 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil

Resumo. Os grandes centros urbanos possuem cada vez mais veículos trafegando nas ruas e avenidas, tornando a ocorrência de acidentes bem mais frequentes. Estes acidentes podem gerar transtornos ao tráfego, como também podem causar danos a via ou até mesmo aos ocupantes dos veículos. Os postes de iluminação pública são alvo desses acidentes, devido ao fato de se localizarem nos acostamentos das vias. A ruína dessa estrutura ocasiona a redução ou desligamento do fornecimento de energia elétrica, levando a perdas para a população que reside em torno da via, além de prejuízos à companhia elétrica. A partir desse fato, o objetivo do presente estudo é realizar uma análise numérica explícita do comportamento dos postes de concreto armado quando submetidos ao impacto de veículos. Para essa análise, utiliza-se o Método dos Elementos Finitos através do pacote comercial ABAQUS/Explicit. Este é um método de dinâmica explícita, que avalia problemas de impacto com o desenvolvimento de elevadas tensões em um curto intervalo de tempo. São realizadas duas análises: a de vibração livre que é comparada com a solução analítica do poste, o que permite validar o modelo numérico; a do impacto do veículo propriamente dito, cujos resultados são comparados com os resultados obtidos por análises transientes, sendo a carga aplicada em função de pulsos meia-senoide, triangular e retangular, com o intuito de verificar qual destes melhor representa o fenômeno do impacto no modelo proposto.

Palavras-Chave: Dinâmica Explícita, Impacto, Modelagem numérica, Método dos Elementos Finitos

1 INTRODUÇÃO

Os projetos estruturais buscam analisar e desenvolver estruturas resistentes tanto às cargas internas como às externas (ação do vento). Contudo, as cargas excepcionais, como terremotos, explosões e impacto veem ocorrendo com mais frequência nas estruturas, necessitando considerar seus efeitos nos projetos de engenharia. No entanto, a compreensão desses efeitos não é tão fácil.

A partir do século XX, o estudo de cargas acidentais ganhou destaque, principalmente, na área militar, devido à necessidade das estruturas serem resistentes aos ataques externos. Seguindo, o mesmo foco de pesquisa, a indústria nuclear também proporcionou grandes avanços no entendimento do comportamento de estruturas submetidas ao impacto e explosões, visto que as estruturas deveriam conter qualquer falha apresentada nos reatores nucleares.

O impacto pode acontecer a partir de diversas circunstâncias, desde os acidentes de veículos colidindo em estruturas até desastres naturais (*tsunamis*, terremotos e etc.). Entretanto, as estruturas, como colunas de estacionamento, pontes, viadutos e postes de iluminação pública são mais suscetíveis ao impacto de veículos em baixas e altas velocidades (Thilakarathna *et al.*, 2010). Portanto, a falha destes elementos pode ocasionar desde a perda de estabilidade até a interrupção da energia elétrica.

O choque de veículos contra objetos rígidos (postes, colunas de concreto, árvores, dentre outros) é um fenômeno complexo que envolve a interação entre dois corpos. É um problema essencialmente dinâmico e tem sido um tema de grande preocupação entre pesquisadores. Os estudos envolvem o uso de modelos simplificados (Milner *et al.*, 2001), análises experimentais (Dai *et al.*, 2011) e numéricas (Khalili & Saboori, 2010). Dentre os métodos numéricos utilizados, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) que tem se tornado uma ferramenta poderosa em análises de problemas complexos, pois permite realizar estudos paramétricos sem a necessidade de investigações experimentais onerosas e demoradas (Saatci, 2007).

Durante a colisão uma força de grande intensidade é gerada. Essa força é muitas vezes representada matematicamente por uma função no tempo aplicada na estrutura impactada. A amplitude máxima da força é geralmente determinada considerando que não há perda de energia no contato (Ferrer *et al.*, 2010), ou seja, a energia cinética do veículo antes da colisão é totalmente absorvida pela estrutura impactada como energia de deformação elástica (Al-Thairy & Wang, 2013). Dessa forma, o problema de impacto é bastante simplificado, eliminando a não linearidade do problema devido ao contato.

A fim de levar em consideração essa não linearidade, vários programas computacionais foram desenvolvidos com o intuito de simular o impacto através de uma análise dinâmica explícita. Estes programas podem considerar o contato entre os corpos, a não linearidade geométrica, a não linearidade das propriedades dos materiais empregados, além da verificação do dano na estrutura (Amante, 2009). Os seguintes programas podem ser citados: LS-DYNA3D, LS-DYNA e ABAQUS, os quais têm sido largamente utilizados por pesquisadores com muito sucesso. Ferrer *et al.* (2010) estudaram uma coluna de aço localizada em um estacionamento e sujeita ao impacto de veículos em baixa velocidade. Estes autores usaram o LS-DYNA com o objetivo de estabelecer uma carga estática equivalente que representasse o impacto do veículo contra a coluna. Thilakarathna *et al.* (2010) avaliaram colunas de concreto sob o impacto transversal de veículos também usando o LS-DYNA. O principal objetivo destes autores foi quantificar a vulnerabilidade dos impactos. Já Al-Thairy & Wang (2013)

usaram o ABAQUS/Explicit para estudar colunas de aço sob o impacto de veículos com o intuito de avaliar a carga de impacto sugerida pelo EN 1991 (Eurocode 1).

Sun *et al.* (2000) compararam o desempenho dos dois métodos dinâmicos (implícito e explícito) disponíveis no ABAQUS para o caso de problemas de contato linear lento e rápido, chegando as seguintes conclusões: para o caso rápido, o custo do método explícito é muito menor do que o do implícito; para o caso lento, os resultados do método implícito são mais precisos do que o explícito. Este último é condicionalmente estável, necessitando de muitos incrementos de tempo.

Portanto, o presente trabalho apresenta a avaliação do comportamento de um poste de concreto armado submetido ao impacto de veículos, utilizando a ferramenta computacional ABAQUS/Explicit. São executadas duas análises: a de vibração livre que é comparada com a solução analítica do poste proposta por Queiroz e Araújo (2011), o que permite validar o modelo numérico; a do impacto do veículo propriamente dito, cujos resultados são comparados com os resultados de análises transientes, cuja carga aplicada é representada por pulsos meia-senoide, triangular e retangular, a fim de verificar qual destes pulsos melhor representa o fenômeno do impacto para o modelo estudado.

2 MODELO GEOMÉTRICO

O poste de concreto tem seção transversal duplo-T (Fig. 1), cuja dimensão D representa a largura da seção, B é a altura da seção e G especifica a espessura das abas e do flange, cujo valor varia entre 50 ± 5 mm.

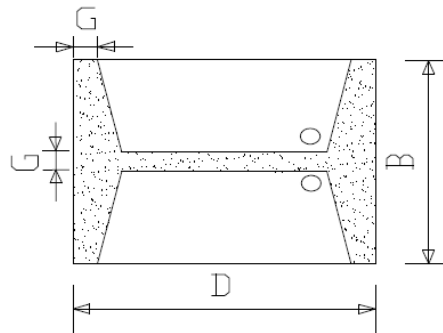


Figura 1. Especificação da seção transversal duplo "T" do poste (Ferreira, 2009)

O comprimento do poste (l) é 9,3 m e as dimensões da seção transversal do poste, $B(z)$ e $D(z)$, são expressas em função da altura segundo as direções y e x (Fig. 2). Estas expressões são dadas por:

$$B(z) = B_i - (B_i - B_f) \frac{z}{l} \quad (1)$$

$$D(z) = D_i - (D_i - D_f) \frac{z}{l} \quad (2)$$

onde, B_i e B_f são a largura do flange na base e no topo do poste, respectivamente; D_i e D_f são a altura da seção na base e no topo do poste, respectivamente. Os valores destas dimensões são mostrados na Tabela 1.

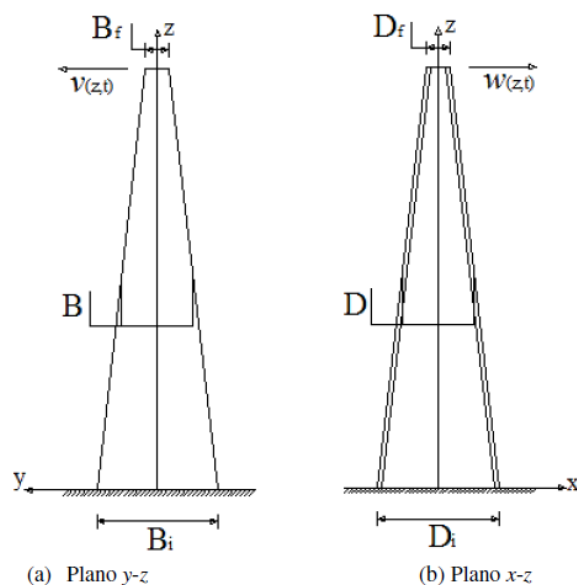


Figura 2. Planos transversais do poste (Queiroz, 2011)

Tabela 1. Dimensões em mm da seção transversal do poste

B_i	B_f	D_i	D_f
193	100	268,8	120

As propriedades geométricas da seção transversal são calculadas a partir da seção mostrada na Fig. 3, já que a inclinação dos flanges na parte interna da seção é apenas para facilitar a desforma (Queiroz, 2011).

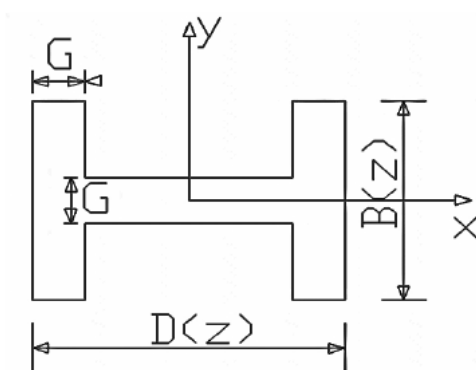


Figura 3. Dimensões da seção poste duplo "T" (Queiroz, 2011)

A área da seção transversal, $A(z)$, do poste duplo-T é dada pela seguinte expressão:

$$A(z) = 2GB(z) + G(D(z) - 2G). \quad (3)$$

O cálculo dos momentos de inércia da seção poste, nas direções x e y , é dado por:

$$I_{px}(z) = \frac{2GB^3(z)}{12} + \frac{G^3(D(z) - 2G)}{12}; \quad (4)$$

$$I_{py}(z) = \frac{B(z)D^3(z)}{12} - \frac{(B(z)-G)(D(z)-2G)^3}{12}, \quad (5)$$

onde, $I_{px}(z)$ e $I_{py}(z)$ são os momentos de inércia em função de z , em torno dos eixos x e y , respectivamente.

O concreto usado no poste tem as seguintes propriedades: densidade igual a 2500 kg/m³, coeficiente de Poisson igual a 0,30 e f_{ck} igual a 25 MPa. O módulo de elasticidade é calculado a partir da NBR 6118 (ABNT, 2014) que recomenda a seguinte expressão:

$$E_c = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ (MPa)}, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (6)$$

onde, α_E é um coeficiente que considera o tipo de agregado gráudo utilizado. Neste caso, foi escolhido o $\alpha_E = 1,0$ para agregados de granito e gnaiss mais usados em obras no município de Fortaleza.

3 ABAQUS/EXPLICIT

O software comercial de elementos finitos ABAQUS (Simulia, 2011) é composto por diversos módulos de análise, sendo eles:

- **ABAQUS/CAE:** É a interface gráfica do software, onde é possível criar modelos de elementos finitos. Neste módulo são determinadas as condições de contorno, a aplicação de cargas, como também a definição das interações de contato. A partir deste gera-se o arquivo input para os módulos ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit.
- **ABAQUS/Standard:** É um modelo de resolução de cálculos de uso geral, sendo capaz de solucionar problemas lineares e não lineares de maneira implícita. É utilizado em análises estáticas e dinâmicas.
- **ABAQUS/Explicit:** É o módulo desenvolvido para promover cálculos de elementos finitos baseado no modo explícito. É eficiente em problemas dinâmicos com grandes deslocamentos e deformações, como é o caso do impacto.
- **ABAQUS/Viewer:** Interface gráfica responsável pela visualização dos resultados.

Uma análise completa de elementos finitos é composta por três etapas, que são:

- **Pré-processamento:** definida como a etapa de criação do modelo estudado e do arquivo de entrada. No caso do ABAQUS, o modelo pode ser criado usando o ABAQUS/CAE.
- **Simulação:** consiste na resolução do problema numérico definido (ABAQUS/Standard; ABAQUS/Explicit).
- **Pós-processamento:** consiste na visualização e análise dos resultados.

Modelos dinâmicos que empregam análises de impacto por elementos finitos podem ser implícitos ou explícitos. A principal diferença entre eles está na forma de integração no tempo. Os códigos implícitos são adequados para modelos dinâmicos transientes que tenham condições constantes e sejam fenômenos lentos. Já, os códigos explícitos são convenientes para modelos dinâmicos transientes de curta duração e que requer um passo de tempo muito pequeno.

O ABAQUS possui esses dois tipos de análises inseridos em seus módulos. O ABAQUS/Standard usa um método de integração no tempo implícito, desse modo, a

resolução do sistema de equações ocorre em cada incremento do processo, requerendo um tempo de incremento maior e também de recursos computacionais, já que opera sobre as matrizes do modelo. O ABAQUS/Explicit utiliza um método de integração no tempo explícito, desenvolvido para resolver problemas dinâmicos de curta duração com grandes deformações e deslocamentos, necessitando um pequeno passo de tempo e pouca memória RAM para executar a simulação.

A modelagem do impacto segue os seguintes passos: geração da malha de elementos finitos do poste, modelagem do impactador, solução explícita, contato entre o poste e o impactador. Esses passos são descritos a seguir.

3.1 Malha de Elementos Finitos do Poste

O poste é discretizado com o elemento sólido, C3D8R, que consiste num elemento linear tridimensional com 8 nós e 3 graus de liberdade translacionais por nó, integração reduzida e controle de *hourglass*. A escolha deste elemento deve-se a recomendações presentes no manual do ABAQUS para problemas de contato. Estas recomendações consistem na utilização de malhas mais refinadas com elementos lineares de integração ou de modos incompatíveis.

A vantagem destes elementos em problemas de contato em relação aos elementos de segunda ordem é devido ao fato de se calcular forças nodais resultantes da pressão aplicada com a mesma direção e magnitude (Souza, 2002).

O manual do ABAQUS explica que elementos de segunda ordem podem causar problemas em simulações de contato, já que as forças nodais obtidas pela pressão de contato, aplicadas a superfície mestre (*master*) de um elemento de segunda ordem não possuem a mesma direção para a pressão constante, resultando em inconsistências na resposta do algoritmo. O poste é dividido em uma malha de 15 mm, dessa forma possuindo 88040 elementos (Fig. 4).

O modelo matemático do poste é o de uma viga engastado na base (Fig. 5), acima do solo, e livre no topo (Fig. 4). A zona de impacto é a face externa do poste na direção x , mostrada em cinza na Fig. 5, com altura de 250 mm e a uma distância de 475 mm da base. Nesta região é aplicada a carga de impacto na análise implícita e o impactador na análise explícita, a fim de representar o impacto frontal do veículo.

3.2 Impactador

A massa rígida utilizada para colidir com o poste e, assim, realizar uma aproximação de impacto frontal de veículos de pequeno porte foi utilizada por Al-Thairy (2012). É um bloco rígido (Fig. 6), cujas dimensões são 150 mm de largura, 250 mm de altura e 1000 mm de comprimento. As dimensões assumidas para o impactador neste trabalho foram adaptadas para a zona de impacto usada por Queiroz (2011). As propriedades do material escolhido para compor o impactador é o aço com módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,30.

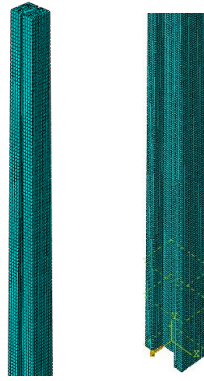


Figura 4. Modelo numérico do poste de concreto

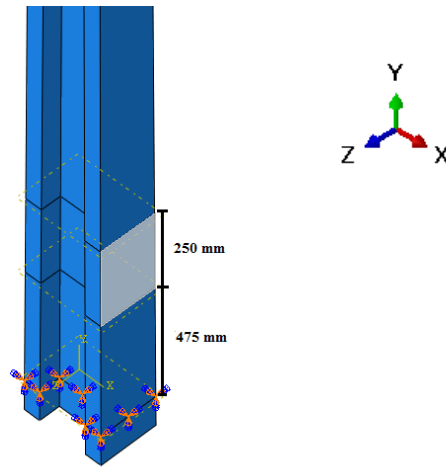


Figura 5. Condição de contorno e zona de impacto

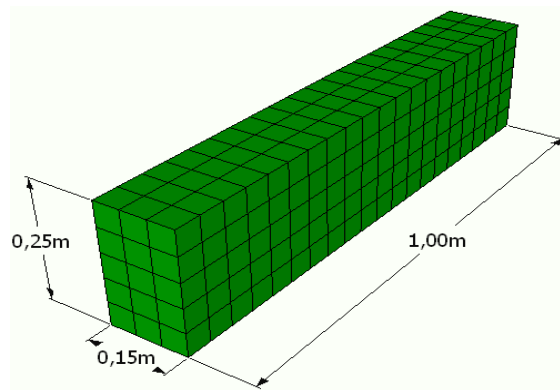


Figura 6. Representação do impactador utilizado neste estudo

Na modelagem numérica é usado o elemento sólido C3D8R, dividido em uma malha de 50 mm, sendo uma divisão maior do que a selecionada para o poste. O objetivo é evitar a penetração dos nós do bloco na superfície do poste. O módulo de elasticidade é tal que garanta que o bloco se comporte como um corpo rígido em relação ao poste. A densidade do impactador foi ajustada para atender a massa do veículo utilizada por Queiroz (2011). A velocidade do bloco é designada como uma condição de contorno inicial, usando a opção *predefined field* no ABAQUS/Explicit.

3.3 Solução Explícita

A solução explícita é baseada no método da diferença central que é um método de integração numérica que busca satisfazer as equações diferenciais governantes do sistema a partir de intervalos de tempo discretos. O deslocamento no tempo desejado é expresso em termos de valores de deslocamento, velocidade e aceleração obtidos anteriormente.

Essa formulação dinâmica explícita foi desenvolvida em programas de elementos finitos para resolver problemas que envolvem corpos deformáveis. Usa uma lei de integração explícita cujas matrizes de massa dos elementos são diagonais. Assim, a equação de movimento, sem amortecimento, para um corpo com vários graus de liberdade é dada por:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

onde, $[M]$ é a matriz de massa diagonal, $[C]$ é a matriz de amortecimento, $[K]$ é a matriz de rigidez, $\{\ddot{u}\}$ é o vetor das acelerações, $\{\dot{u}\}$ é o vetor da velocidades, $\{u\}$ o vetor dos deslocamentos e $\{F(t)\}$ é o vetor das forças externas em função do tempo. A Eq. (7) é integrada considerando que as acelerações $\{\ddot{u}\}$ são calculadas no tempo t e usadas para determinar as velocidades no instante $t + \Delta t/2$ e os deslocamentos $\{u\}$ no instante $t + \Delta t$ (Simulia, 2011). As acelerações e velocidades são determinadas por:

$$\dot{u}_{i+\frac{1}{2}}^N = \dot{u}_{i-\frac{1}{2}}^N + \frac{\Delta t_{i+1} + \Delta t_i}{2} \ddot{u}_i^N \quad (8)$$

$$u_{i+1}^N = u_i^N + \Delta t_{i+1} \dot{u}_{i+\frac{1}{2}}^N \quad (9)$$

onde, u^N é o grau de liberdade (componente deslocamento ou rotação) e o índice i refere-se ao número do incremento no passo da análise dinâmica explícita. A integração por diferença central é explícita no sentido que o estado cinemático é obtido usando os valores conhecidos de $\dot{u}_{i-\frac{1}{2}}^N$ e $\ddot{u}_i^N$ do incremento anterior.

A regra de integração explícita é bastante simples, mas por si só não proporciona a eficiência computacional associada aos procedimentos da análise dinâmica explícita. A chave para obter essa eficiência computacional é o uso da matriz diagonal, visto que as acelerações no início do incremento são calculadas por (Simulia, 2011):

$$\ddot{u}_i^N = (M^{NJ})^{-1} (P_i^J - I_i^J) \quad (10)$$

onde, M^{NJ} é a matriz de massa, P_i^J é vetor de aplicação de carga, e I_i^J é o vetor das forças internas, o qual é formado a partir das contribuições dos elementos individuais tal como a matriz global de rigidez necessita para ser formada (Simulia, 2011).

Para o ABAQUS/Explicit, a interação explícita necessita de massa nodal ou inércia para que todos os graus de liberdades sejam ativos. Entretanto, pode haver restrições que estejam ligadas a condições de contorno que promovam a ativação dos graus de liberdade. Os graus de liberdade de um nó são ativados por elementos com valores de densidade diferentes de zero (por exemplo, sólidos, casca, barra) ou elementos de massa ou inércia, a partir disso, valores de massa ou inércia diferentes de zero são criados naturalmente de acordo com a formação da matriz de massa uniforme. Porém, quando os nós são ativados por elementos com valores de densidade iguais a zero deve-se ter cuidado em se restringir os nós ou em adicionar a massa ou a inércia (Simulia, 2011).

Por ser um método condicionalmente estável necessita-se manter a estabilidade do modelo, ou seja, o passo de tempo (Δt) deve ser sempre menor que o passo de tempo crítico

(Δt_{crit}). Desse modo, o limite de estabilidade para o método (sem amortecimento) é dado a partir da maior frequência do sistema (w_{max}), dado por:

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{\text{max}}} \quad (11)$$

3.4 Contato

Diversos problemas de engenharia envolvem o contato entre duas superfícies, como é o caso do impacto. Para esse tipo de problema, quando dois corpos entram em contato, em um curto intervalo de tempo age uma força normal entre eles. O software comercial ABAQUS busca compreender quais superfícies dos corpos analisados interagem na simulação, a fim de determinar o comportamento de cada elemento em contato.

Na definição das interações de contato, o ABAQUS/Explicit permite a utilização de dois algoritmos de contato. O algoritmo de contato geral, que utiliza definições básicas de contato com poucas restrições sobre o tipo de superfícies, e o algoritmo de contato par, que possui mais restrições de contato sobre o tipo de superfícies. As interações de contato são definidas especificando os pares de superfícies envolvidas no contato (Simulia, 2011). Segundo Al-Thairy (2012), o uso do algoritmo de contato par garante maior precisão nas simulações.

No ABAQUS existem duas possibilidades de especificar as superfícies em contato, sendo elas, *Node-to-Surface* e *Surface-to-Surface*. Nos dois casos é necessário definir quais serão as superfícies mestre (*master*) e a superfície escrava (*slave*), visto que a superfície mestre irá definir o comportamento da superfície escrava, de acordo com o tipo de especificação escolhida na análise.

Na especificação *Node-to-Surface*, ocorrem interações dos nós da superfície escrava com a superfície mestre, sendo que a condição de contato envolve um único nó da superfície escrava e um conjunto de nós da superfície mestre. Contudo, essa especificação pode ocasionar a penetração da superfície mestre na superfície escrava, e assim, resultar em tensões de contato que não estão de acordo com a realidade. Uma forma de evitar esse tipo de problema é refinando a superfície escrava mais que a superfície mestre. Também se recomenda que o corpo mais rígido seja a superfície mestre, para que os elementos da superfície escrava se deforme de acordo com a superfície mais rígida. A especificação *Surface-to-Surface* considera ambas as superfícies no momento do contato. Nesta opção a ocorrência de penetrações torna-se menor, devido às superfícies serem bem definidas (Simulia, 2011).

A formulação de contato no ABAQUS/Explicit também inclui o método de imposição das restrições, as interações entre superfícies e a formulação de deslizamento.

3.5 Método da Imposição das Restrições

O método cinemático usado neste estudo é um algoritmo de contato chamado preditor/corretor que funciona do seguinte modo, em cada incremento da análise: o estado cinemático avança em uma configuração prevista, sem as condições de contato; são determinados quais nós da superfície escrava pretende penetrar a superfície mestre; o conhecimento da profundidade de penetração de cada nó escravo, da massa associada e do incremento de tempo permite calcular a força de resistência para que não ocorra a penetração dos nós da superfície escrava na superfície mestre, minimizando assim as penetrações entre as superfícies em contato (Simulia, 2011).

3.6 Interações entre superfícies

As interações entre superfícies em contato podem ser divididas em duas componentes: uma normal e uma tangencial as superfícies. Nestas superfícies, quando em contato, pode ocorrer a transmissão de forças normais e de cisalhamento, respectivamente. A componente tangencial consiste no movimento relativo (deslizamento) das superfícies, possibilitando o surgimento de tensões de cisalhamento. Cada interação de contato pode se referir a uma propriedade de contato que especifica um modelo para a interação entre superfícies de contato.

Muitas vezes a formulação que trata do contato normal como uma restrição unilateral é utilizada para que sejam cumpridas as restrições geométricas. A pressão de contato normal é obtida pelas reações na zona de contato. Portanto, o comportamento normal às superfícies é determinado segundo a distância que separa as duas superfícies antes do contato, chamada de *clearance*. A restrição de contato é aplicada quando o valor de *clearance* for nulo. Para a formulação de contato, não existe limite em relação à magnitude das tensões de contato. A partir do momento que as superfícies em contato se separam as pressões de contato entre elas passam a ser nulas ou negativas, e a restrição é removida (Fig. 7). Este tipo de comportamento é denominado de contato *hard* (Simulia, 2011).

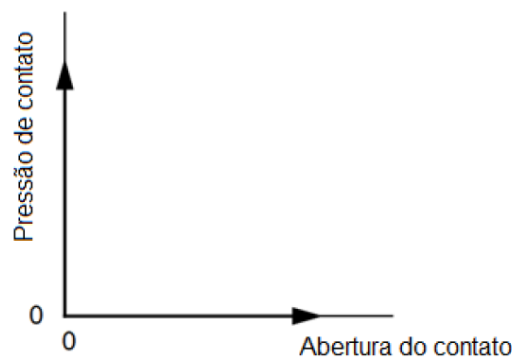


Figura 7. Relação pressão-*clearance* para o contato *hard* (Adaptado de Simulia, 2011)

O ABAQUS disponibiliza a propriedade de comportamento tangencial baseada no atrito de Coulomb, onde o atrito entre as superfícies é caracterizado pelo coeficiente de atrito μ . Tendo em vista que p é a tensão de contato entre as superfícies, é possível determinar a tensão limite cisalhante de contato, de acordo com a expressão abaixo:

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (12)$$

O movimento tangencial é zero ($\mu = 0$) até que as superfícies em contato alcancem o valor de tensão limite de cisalhamento (Simulia, 2011).

O coeficiente de atrito depende dos materiais em contato, como mostrado na Tabela 2. Caso a velocidade de deslizamento entre as superfícies não seja nem muito grande nem muito pequena, a força de atrito é proporcional à força normal e o coeficiente de atrito (μ) será constante.

3.7 Deslizamento das Superfícies

Após determinar o método de imposição das restrições de contato, é necessário definir o tipo de cálculo de deslizamento relativo entre as superfícies. Devido o cálculo apresentar certo grau de complexidade, pode ser separado em duas opções o *finite-sliding* e o *small-sliding*.

Tabela 2. Coeficiente de Atrito para diferentes materiais em contato (Wriggers, 2006)

<i>Materiais em contato</i>	<i>Coeficiente de Atrito (μ)</i>
Concreto - Concreto	0,5 - 1,0
Concreto – Aço	0,2 - 0,4
Concreto – Areia	0,35 - 0,6
Aço – Aço	0,2 - 0,8
Metal – Madeira	0,3 - 0,65
Madeira - Madeira	0,4 - 1,0

O *finite-sliding* permite que haja deslocamentos relativos de valores consideráveis entre os corpos envolvidos no contato. Já, o *small-sliding* admite deslocamentos relativos infinitesimais entre as duas superfícies. Em ambos os casos, a rotação relativa é permitida. Contudo, o *finite-sliding* torna-se computacionalmente dispendioso (Simulia, 2011).

Portanto, é mais viável utilizar a opção *small-sliding*, já que usa uma aproximação caso um ponto deslize mais que uma pequena fração no contato das superfícies. Além de poder ser usada no modelo de interações entre dois corpos deformáveis ou entre um corpo deformável e um corpo rígido.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A validação do modelo numérico do poste de iluminação pública se dá através de uma análise de vibração livre realizada no ABAQUS/Standard e comparada com a solução analítica simplificada do poste desenvolvida por Queiroz e Araújo (2011).

4.1 Análise Modal

A solução analítica simplificada do poste desenvolvida por Queiroz e Araújo (2011) consiste em reduzir o sistema de vários graus de liberdade para o de um grau de liberdade em cada direção da análise, obtendo-se desse modo duas frequências naturais para cada direção de inércia. O primeiro modo de vibração está relacionado ao momento de inércia em torno do eixo-x e o segundo modo de vibração ao momento de inércia em torno do eixo-y (Fig. 3).

Esses dois modos de vibração representam as duas primeiras frequências naturais do modelo numérico do poste, cujos resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Frequência naturais do modelo numérico e da solução analítica

<i>Modos de Vibração</i>	<i>Solução Analítica</i>	<i>Solução Numérica</i>	<i>Erro (%)</i>
1º Modo	1,212	1,2002	-0,98
2º Modo	2,316	2,230	-3,85

Observa-se que, no primeiro modo de vibração, o erro obtido está abaixo de 1%; já o erro do segundo modo está acima desse valor. Contudo, ainda são considerados valores baixos e dentro do aceitável, assim validando o modelo numérico do ABAQUS/Standard.

5 ANÁLISE TRANSIENTE

A análise transiente é realizada com o objetivo de verificar as respostas no tempo para os deslocamentos na extremidade livre do poste devido às cargas de impacto aplicadas. Estas cargas são definidas como funções no tempo na forma de meia-senoide, triangular e retangular para um tempo de impacto de 100 ms (Fig. 8). Estes pulsos foram escolhidos a partir de estudos realizados por Queiroz (2011), Thilakarathna (2010) e o Eurocode 1 (2006), que determinam a utilização dos respectivos pulsos como a melhor opção para representar a força de impacto de veículos em objetos fixos. É considerado um comportamento linear em todas as simulações. As funções dinâmicas dos carregamentos são apresentadas a seguir, respectivamente.

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \sin\left(\frac{\pi}{t_d} t\right), & \text{se } 0 \leq t \leq t_d \\ 0, & \text{se } t \geq t_d \end{cases} \quad (13)$$

$$P(t) = \begin{cases} 2P_0 \left(\frac{1}{t_d} t\right), & \text{se } 0 \leq t \leq \frac{t_d}{2} \\ 2P_0 \left(1 - \frac{1}{t_d} t\right), & \text{se } \frac{t_d}{2} \leq t \leq t_d \\ 0, & \text{se } t \geq t_d \end{cases} \quad (14)$$

$$P(t) = \begin{cases} P_0, & \text{se } 0 \leq t \leq t_d \\ 0, & \text{se } t \geq t_d \end{cases} \quad (15)$$

onde, $P(t)$ é a função dinâmica que descreve a carga de impacto no instante de tempo t , P_0 é a amplitude da carga de impacto e t_d é o tempo de duração do impacto.

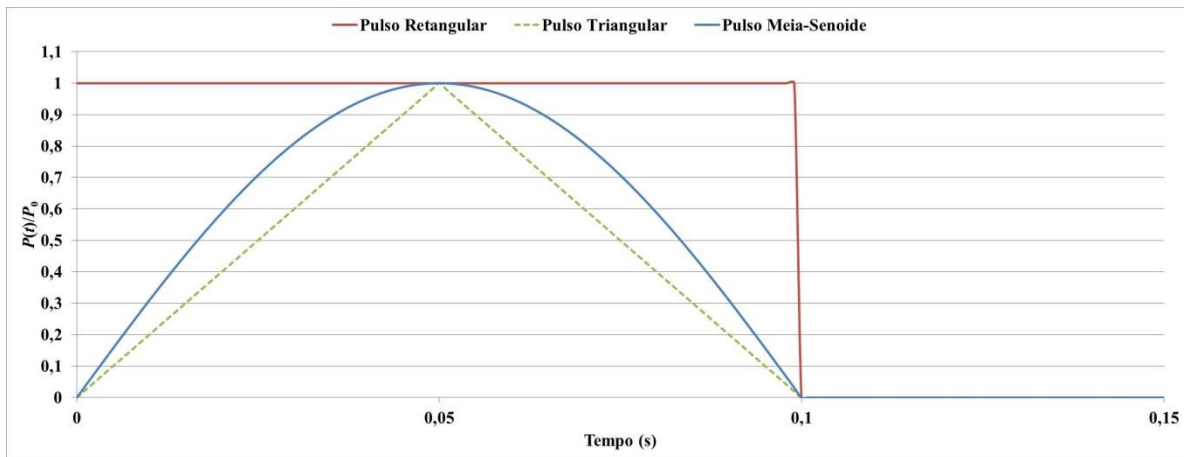


Figura 8. Curvas dos pulsos para um tempo de impacto de 100 ms

A determinação das amplitudes (P_0) é obtida de acordo com Queiroz (2011). Neste caso, considera-se que não ocorrem perdas de energia durante o impacto, ou seja, a energia cinética do veículo antes do impacto é totalmente absorvida pelo poste como energia de deformação elástica, resultando na seguinte expressão:

$$P_0 = v_v \sqrt{km_v} \quad (16)$$

onde, v_v é a velocidade do veículo; m_v é a massa do veículo e k é a rigidez do poste, que é determinada por:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\int_0^h \frac{(h-z)(l-z)}{EI(z)} dz}} \quad (17)$$

onde, E é o módulo de elasticidade do material; $I(z)$ é o momento de inércia em função de z ; l é o comprimento da viga; e h é a altura na qual a carga é aplicada, cujo valor é 60 cm da base do poste.

Queiroz (2011) realizou um estudo paramétrico para verificar a influência do impacto de veículos em poste de concreto armado, com a adição de defesa, usando o programa de elementos finitos SAP2000. Neste estudo, a carga de impacto foi representada por uma função meia-senoide, com a variação dos valores de massa e velocidade do veículo, como também o tempo de duração desta carga. Concluiu-se que a variação da velocidade de impacto possui maior influência na amplitude dos deslocamentos do poste, que quando comparada com a variação da massa do veículo. Também foi observado que com a inclusão da defesa, os efeitos da colisão do veículo contra o poste diminuíram, portanto possuindo uma maior capacidade de absorção de energia de deformação.

Assim, a massa de 1500 kg para um tempo de duração de impacto de 100 ms proporciona os maiores deslocamentos (Queiroz, 2011). No presente estudo, esses valores são utilizados na análise para uma velocidade de 30 km/h, resultando em uma amplitude de carga P_0 igual a 660,2898 kN.

As análises são realizadas apenas na direção x , a fim de comparar com os resultados obtidos por Queiroz (2011). Os deslocamentos em função do tempo são avaliados na extremidade livre do poste em um nó central (nó 77). A Fig. 9 mostra o gráfico dos

deslocamentos em função do tempo das análises transientes realizadas no ABAQUS/Standard para os pulsos meia-senoide, triangular e retangular.

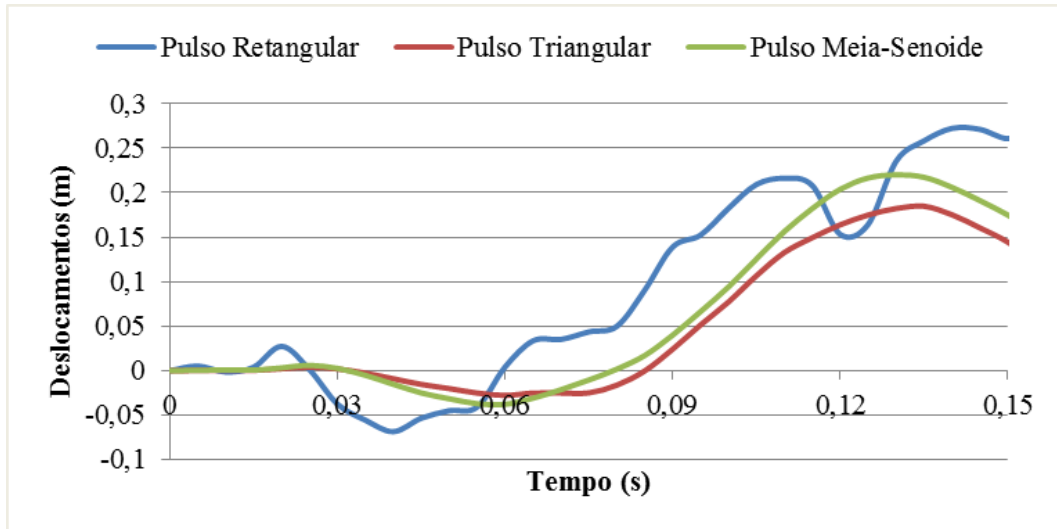


Figura 9. Deslocamentos em função do tempo para uma massa de 1500 kg e velocidade de 30 km/h realizada no programa ABAQUS/ Standard

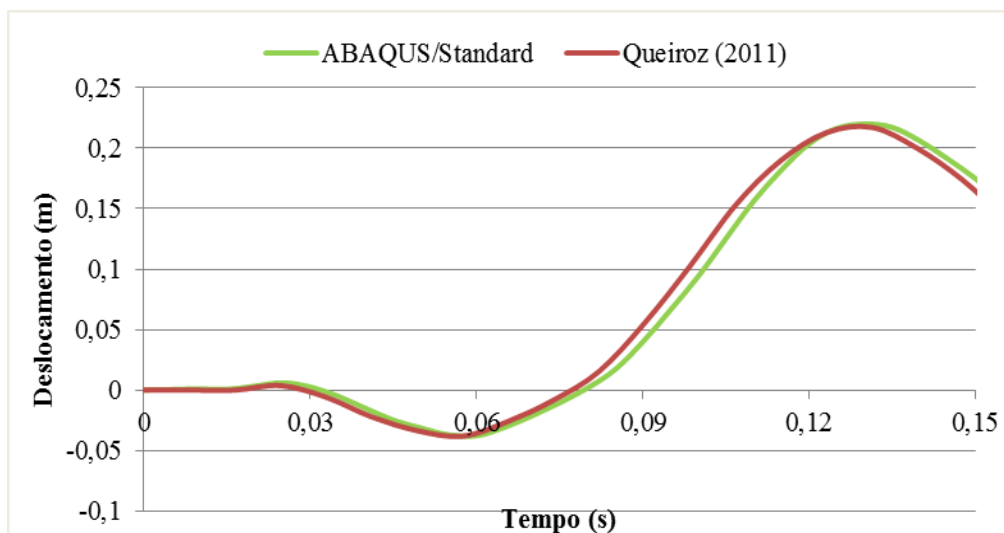


Figura 10. Comparativo dos deslocamentos para uma massa de 1500 kg e velocidade de 30 km/h

Percebe-se que os pulsos possuem comportamentos semelhantes, no entanto, o pulso retangular se distancia dos pulsos triangular e meia-senoide, com uma tendência pouco harmônica. Quando se compara os deslocamentos encontrados com o pulso meia-senoide, tanto pelo ABAQUS/Standard como por Queiroz (2011), pode-se observar que os deslocamentos se mantêm iguais para ambas as análises (Fig. 10). Portanto, o modelo numérico proposto para o poste no programa ABAQUS/Standard apresenta resultados consistentes, o que era de se esperar.

6 ANÁLISE EXPLÍCITA

Nesta análise é promovida a colisão entre o bloco rígido (*slave*), que representa o veículo, contra o poste de concreto armado (*master*). A Fig. 11 mostra como foi determinado, para esse estudo, o contato entre as duas superfícies.

As interações de contato atribuídas nesta análise são de um comportamento normal entre superfícies, neste caso o *hard contact* e um comportamento tangencial regido pela lei de atrito de Coulomb, como *frictionless*. Para representar a energia dissipada usou-se a formulação cinemática com a opção de deslizamento *small-sliding*.

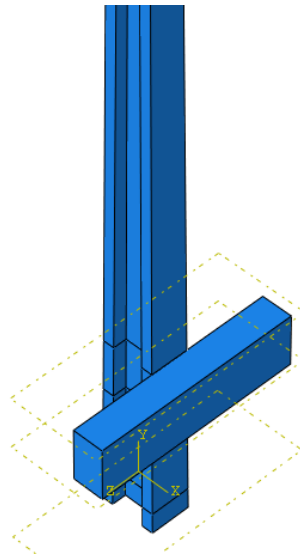


Figura 11. Representação do poste em contato com o bloco rígido

Nesta análise, o comportamento do concreto empregado é representado pela curva tensão-deformação, de acordo com a NBR 6118:2014 (Fig. 12), evidenciada pela expressão:

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (18)$$

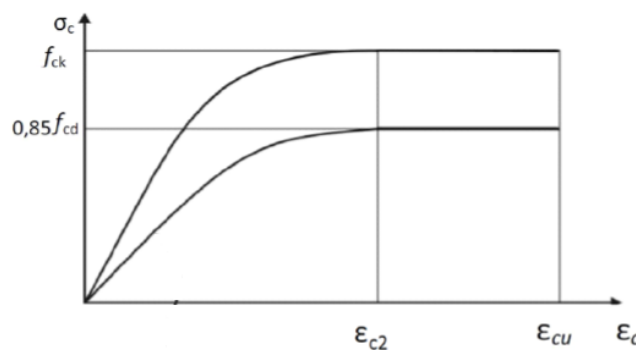


Figura 12. Curva tensão-deformação idealizada para o concreto (NBR 6118:2014)

onde, f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto; ε_{c2} é a deformação específica de encurtamento do concreto no início do regime plástico; e ε_{cu} é a deformação específica de

encurtamento do concreto na ruptura (Fig. 12). Para um concreto de $f_{ck} \leq 50$ MPa, o fator n é igual a 2; e os valores de ε_{c2} e ε_{cu} são 2,0 ‰ e 3,5 ‰, respectivamente.

A consideração de um modelo elastoplástico para o concreto no modelo numérico, tem como objetivo idealizar a estrutura como sendo de concreto armado, devido ao fato do poste não ter sido modelado com armadura de aço.

6.1 Resultados

Como já mencionado, o impactador representa o veículo de massa igual a 1500 kg, com velocidade de 30 km/h, colidindo contra o poste, cuja duração do impacto é 100 ms. Os resultados desta análise são comparados com os resultados da análise transiente (Fig. 9), com o intuito de observar quais dos pulsos utilizados melhor representam a situação de impacto veicular contra objetos fixos.

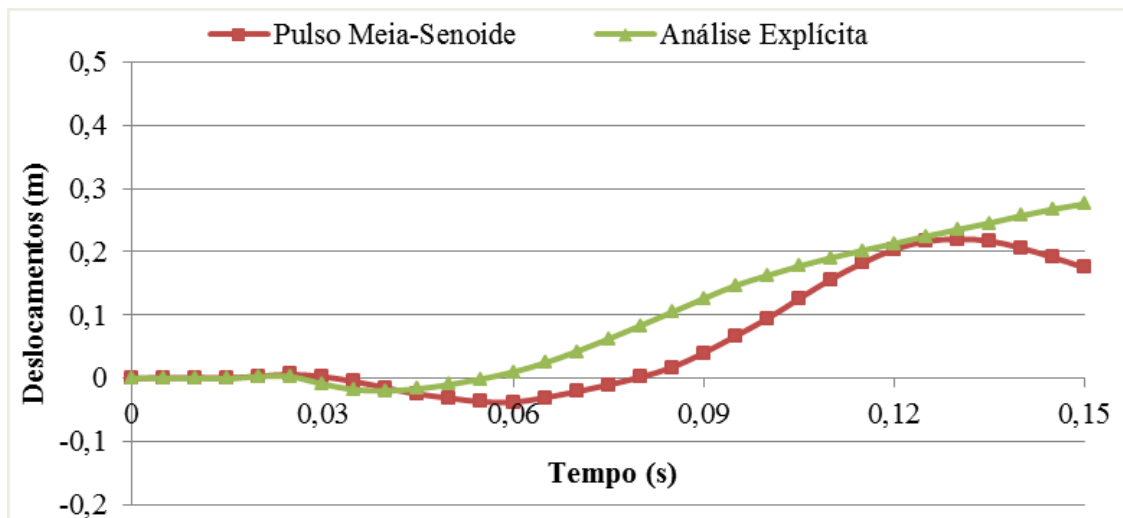


Figura 13. Comparativo dos resultados da análise explícita com os obtidos para o pulso meia-senoide

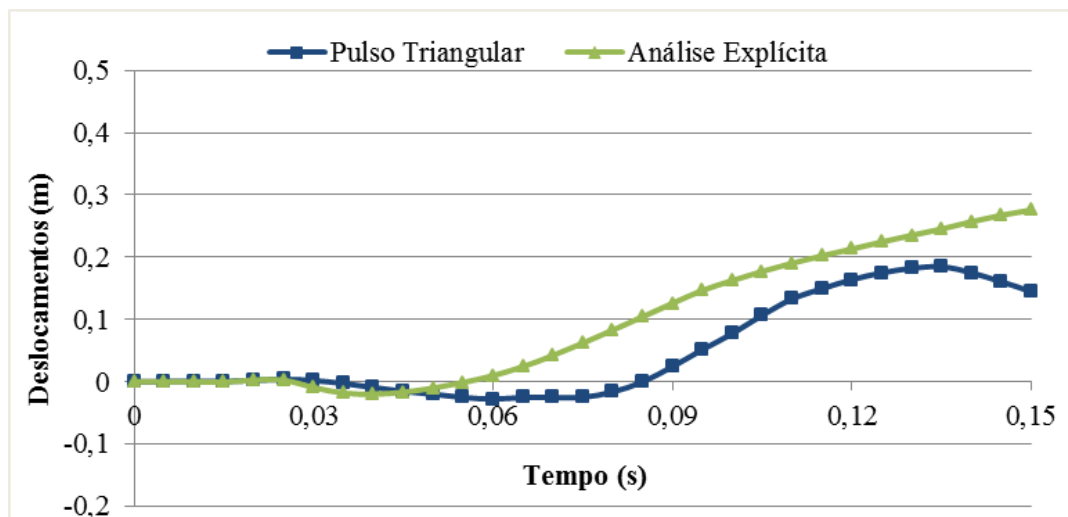


Figura 14. Comparativo dos resultados da análise explícita com os obtidos para o pulso triangular

Das figuras 13, 14 e 15, percebe-se que para um tempo de impacto muito curto todas as curvas dos pulsos estudados aproximam-se dos resultados obtidos pela análise explícita,

devido aos pequenos deslocamentos no início da colisão. Contudo, a partir de aproximadamente 0,05 s, as curvas dos pulsos triangular (Fig. 14) e meia-senoide (Fig. 13) começam a se distanciar da curva da análise explícita, apresentando um comportamento defasado. A análise explícita, a partir daí, possui deslocamentos maiores (Fig. 16), chegando a ser 16 vezes maiores (Fig. 17).

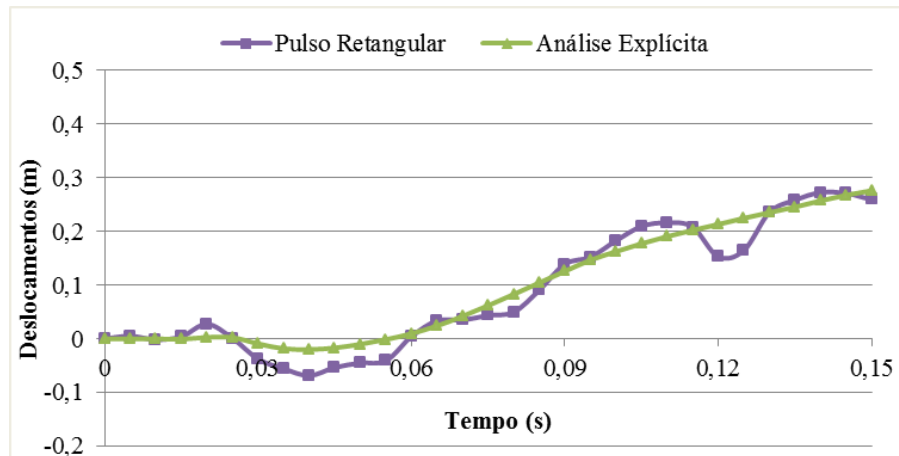


Figura 15. Comparativo dos resultados da análise explícita com os obtidos para o pulso retangular

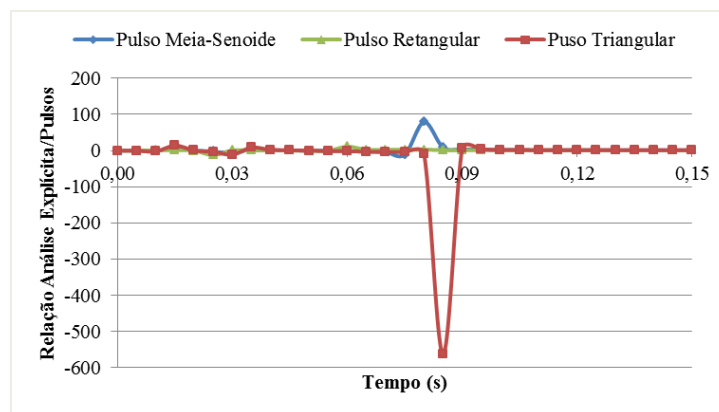


Figura 16. Ordem de grandeza das diferenças dos deslocamentos

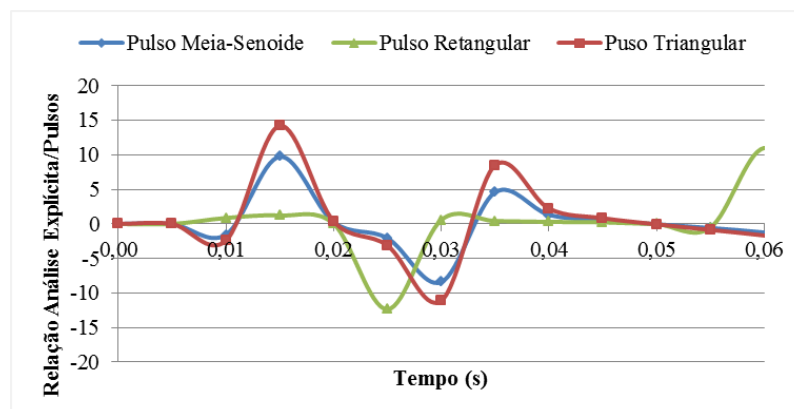


Figura 17. Detalhe da Fig. 16 para o trecho de 0 a 0,06 s

Entretanto, observando a Fig. 15 verifica-se que a curva referente ao pulso retangular possui pontos semelhantes ao da curva que representa a análise explícita. No detalhe da Fig.

17, quando se divide os deslocamentos da análise explícita pelos da análise transiente, observa-se que há alguns picos isolados, mas em geral a razão está próxima de um. Desse modo, observa-se que o pulso retangular melhor se adequa ao modelo proposto, confirmando o que sugere o Anexo C da Eurocode 1: Parte 1-7 (2006).

7. CONCLUSÃO

O presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento do poste de concreto armado devido ao impacto de veículos. O modelo numérico do poste foi desenvolvido no programa comercial ABAQUS e validado a partir da análise de vibração livre comparada com a solução analítica proposta por Queiroz e Araújo (2011). Concluindo-se que os resultados encontrados são pequenos e aceitáveis.

Das análises realizadas, pode-se verificar que os pulsos meia-senoide e triangular proporcionam comportamento semelhante, diferindo ambos do pulso retangular. Contudo, este último pulso é o que mais se aproxima dos resultados da análise explícita. Vale lembrar que na análise transiente, o material tem comportamento linear elástico e na explícita, o comportamento é elastoplástico.

O comportamento do concreto é não linear e é mais bem representado pelo Modelo de Dano Plástico (*Concrete Damage Plasticity* - CDP). Este modelo incorpora o comportamento real do concreto, considerando as fissuras e a perda da rigidez do material com o aumento da carga. Portanto, seria este o próximo passo para a continuação deste trabalho, ou seja, modelar o concreto do poste com o CDP no ABAQUS/Explicit, procurando tornar a análise do impacto frontal de veículos mais real.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela CAPES para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Cálculo e detalhamento*. Rio de Janeiro, 2014.

AL-THAIRY, H. A. B. *Behaviour and Design of Steel Columns Subjected to Vehicle Impact*, 2012. (Thesis of Doctor), University of Manchester.

AL-THAIRY, H.; WANG, Y. C. An assessment of the current Eurocode 1 design methods for building structure steel columns under vehicle impact. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 88, p. 164–171, 2013.

DAI, K. S.; CHEN, S. E.; QI, W. Y.; et al. Field Testing of Directly Embedded Poles. *Experimental Techniques*, v. 35, n. 2, p. 14–23, 2011.

FERRER, B.; IVORRA, S.; SEGOVIA, E.; IRLES, R. Tridimensional modelization of the impact of a vehicle against a metallic parking column at a low speed. *Engineering Structures*, v. 32, n. 8, p. 1986–1992, 2010.

KHALILI, S. M. R.; SABOORI, B. Transient dynamic analysis of tapered FRP composite transmission poles using finite element method. *Composite Structures*, v. 92, n. 2, p. 275–283, 2010.

MILNER, R.; GRZEBIETA, R.; ZOU, R. Theoretical study of a motor vehicle-pole impact. *Road Safety Research, Policing and Education*, p. 1–11, 2001.

QUEIROZ, J. S.. *Análise Transiente Paramétrica de Sistema Poste-Defensa devido ao Choque de Veículos*, 2011. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Ceará.

QUEIROZ, J. S.; ARAÚJO, T. D. Análise Modal Numérica de Defesa de Poste de Distribuição de Energia Elétrica. In: *XXXII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Ouro Preto, 2011.

SAATCI, S. *Behaviour and Modelling of Reinforced Concrete Structures Subjected to Impact Loads*, 2007. University of Toronto.

SIMULIA, D. S. *Abaqus 6.11 Analysis User's Manual*. Vol. I, II e V. Providence, RI, USA, 2011.

SOUZA, A. P. F. *Colapso de Dutos Flexíveis sob Pressão Externa*, 2002. (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

THILAKARATHNA, H. M. I. *Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Columns Subjected to Vehicular Impacts*, 2010. (Thesis of Doctor) University of Technology.

THILAKARATHNA, H. M. I.; THAMBIRATNAM, D. P.; DHANASEKAR, M.; PERERA, N. Numerical simulation of axially loaded concrete columns under transverse impact and vulnerability assessment. *International Journal of Impact Engineering*, v. 37, n. 11, p. 1100–1112, 2010.

WRIGGERS, P. *Computational Contact Mechanics*. 2nd Ed. New York, 2006.