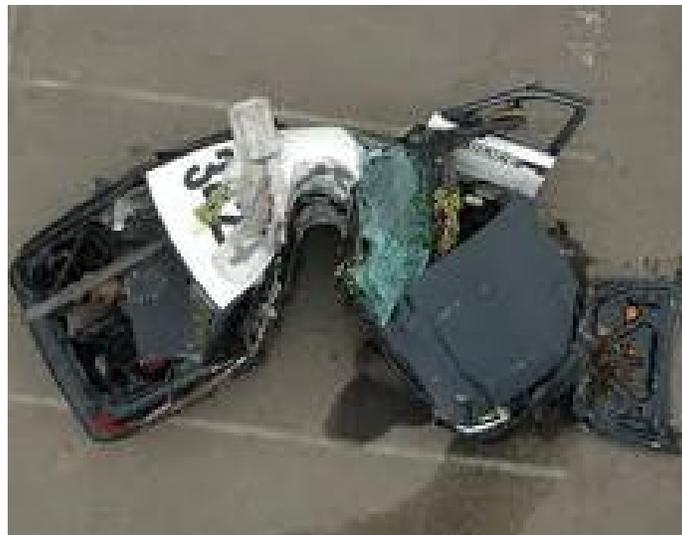


COLISÃO DE AUTOMÓVEIS EM POSTES DE CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DO FENÔMENO E DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE CÁLCULO DE VELOCIDADE

Dr. Eng. Wilson Toresan Jr.
Perito Criminal
wilson-toresan@igp.rs.gov.br



COLISÃO DE AUTOMÓVEIS EM POSTES DE CONCRETO ARMADO:

ESTUDO DO FENÔMENO E DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE CÁLCULO DE VELOCIDADE

Dr. Eng. Wilson Toresan Jr.
Perito Criminal
wilson-toresan@igp.rs.gov.br

1 INTRODUÇÃO

O estudo de eventos nos quais veículos automotores colidem contra postes tem mostrado-se de grande necessidade e importância para nossa sociedade. Estatísticas de acidentes de trânsito informam que 10% dos acidentes com vítimas fatais envolvem colisões desta natureza. O Rio Grande do Sul é o estado onde acidentes derrubam mais postes por dia, com uma média de 10 postes⁵.

O sucesso da reconstrução de um acidente de trânsito e, conseqüentemente, da confirmação das conclusões sobre o evento, será influenciada pelo grau de compreensão do fenômeno ocorrido.

Estudos sobre interações entre estruturas de automóveis e de postes de concreto armado em acidentes de trânsito são praticamente inexistentes no Brasil, exceção feita ao trabalho pioneiro desenvolvido por Negrini e Kleinübing²². A bibliografia disponível (internacional) aborda, na maioria dos estudos, apenas as estruturas dos automóveis e/ou postes de madeira.

O objetivo deste trabalho é compreender os fenômenos físicos que constituem um acidente de trânsito em que um automóvel colide contra um poste de concreto armado e, a partir desta compreensão, desenvolver uma metodologia de cálculo de velocidade pré-impacto para o automóvel.

O trabalho apresentado está baseado em resultados obtidos de metodologias aplicadas em colisões na bibliografia e em dados observados e medidos em locais de acidentes de trânsito nos quais ocorreram colisões de um automóvel em um poste de concreto.

2 LEVANTAMENTO DO LOCAL

2.1 Exame da Via

Além do levantamento, rotineiro, das dimensões e das sinalizações existentes na via, em eventos de colisão em poste, é comum encontrar marcas no pavimento de pneus e de arrasto, tanto em localização anterior, como posterior ao sítio de colisão. Estas marcas auxiliam na determinação das posições estáticas e dinâmicas e no cálculo de velocidade.

A projeção de fragmentos estruturais provenientes do veículo, também, pode ser utilizada para confirmar as conclusões obtidas sobre a dinâmica do evento.

2.2 Exame do Poste

Neste trabalho abordaremos os postes de concreto armado com volume cônico e seção circular vazada, tendo em vista que a experiência em locais de acidentes de trânsito aponta para a presença destes tipos de estruturas na maioria dos eventos de colisão entre veículos e postes no estado do Rio Grande do Sul.

Utilizados como suportes para as linhas de transmissão de energia elétrica, os postes possuem suas geometrias, procedimentos de instalação e projetos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, nas quais as companhias e empresas de distribuição de energia elétrica baseiam-se para elaborar suas próprias normas^{8,9,10,11,12}.

O perito deve medir e registrar o maior número de variáveis relativas ao poste no local, podendo utilizar-se, posteriormente, de normas, a partir dos dados que coletou, para complementar seu trabalho.

Os postes de concreto possuem, obrigatoriamente, uma identificação gravada em suas estruturas através de inscrição em baixo relevo ao longo de seu comprimento, que auxiliarão a identificar sua classificação em norma (figura 1). Variáveis como peso, diâmetros da base e do topo, resistência nominal e de ruptura (considerando-se cargas estáticas), profundidade de engastamento, conicidade e data de fabricação, podem ser determinadas diretamente de norma.



Figura 1. Exemplo de identificação em baixo relevo em poste de concreto (destaque em amarelo).

Entretanto, outras variáveis, importantes para o cálculo de velocidades e para o estudo da dinâmica do evento, somente poderão ser coletadas a partir de um exame no local. Destacam-se, entre estas variáveis: altura e área da colisão com o veículo, deslocamento da base do poste a partir de sua posição de engastamento, altura da região no qual o concreto entrou em colapso e o número e o diâmetro dos vergalhões do concreto armado.

2.3 Exame do Veículo

As medições a serem realizadas nos veículos objetivam coletar variáveis que serão utilizadas nas equações para cálculos de velocidades e no estudo da dinâmica do evento. Destacam-se a geometria e a localização da deformação, a direção da força de colisão com o poste (PDOF) e o deslocamento linear e angular após a colisão.

As técnicas de medições utilizadas neste trabalho estão baseadas em um protocolo internacional² desenvolvido para eventos do tipo colisão envolvendo automóveis.

2.3.1 Variáveis de deformação no veículo

Neste trabalho serão abordadas as colisões frontais e laterais de automóveis em postes de concreto. As variáveis estão apresentadas a seguir e descritas graficamente nas figuras 2 e 3.

Variáveis:

- CG: centro de gravidade
- L: largura da área deformada
- C_{max} : cota de máxima deformação
- C_n e C_{gn} : cotas locais e globais de deformação medidas ao longo de “L” (nestes exemplos as cotas estão divididas em 6 partes equidistantes)
- PDOF: força de colisão com o poste
- d: distância entre a linha de ação da PDOF e a linha paralela que cruza o centro de gravidade do automóvel
- largura e comprimento do veículo pós-impacto

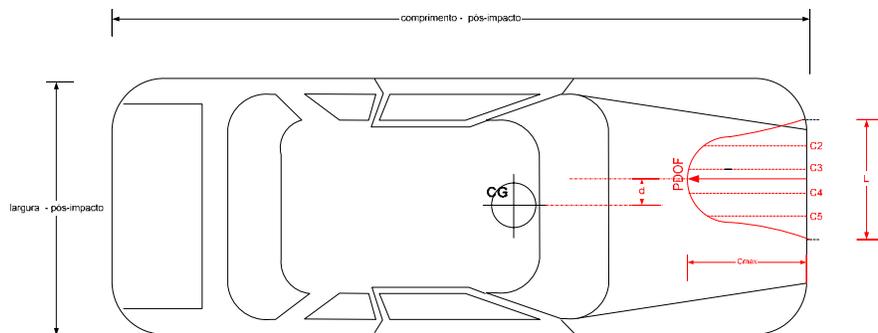


Figura 2. Medição de cotas de deformação para um impacto frontal.

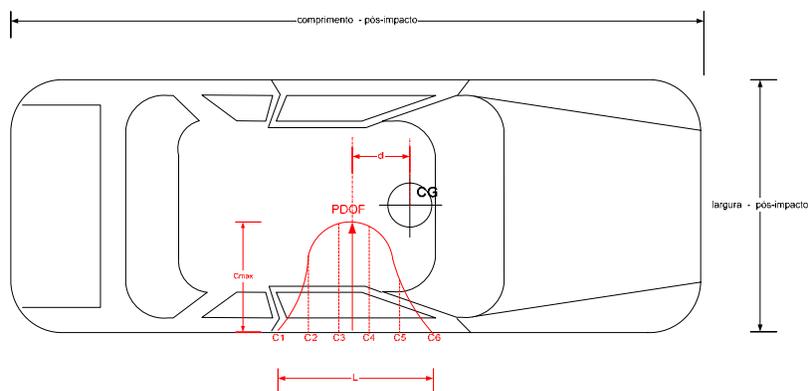


Figura 3. Medição de cotas de deformação para um impacto lateral.

Em alguns casos¹, poderão ocorrer simultaneamente, além das deformações localizadas, provocadas pelo contato direto com o poste, deformações de todo um setor (lateral ou frontal), alterando a geometria global do veículo. Neste caso, as cotas de deformações locais medidas, C_n , deverão ser adicionadas às deformações globais, C_{gn} . A figura 4 ilustra uma situação de colisão lateral onde este fenômeno ocorre.

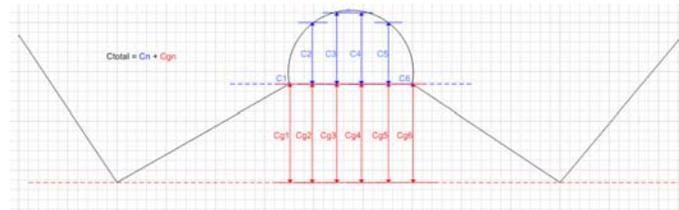


Figura 4. Exemplo de um evento onde se fazem necessárias medições de cotas de deformação locais e globais.

2.3.2 Variáveis da força de colisão (PDOF)

A determinação da direção da força de colisão é realizada unindo-se os pontos $L/2$ e C_{max} (figuras 5 e 6)¹.

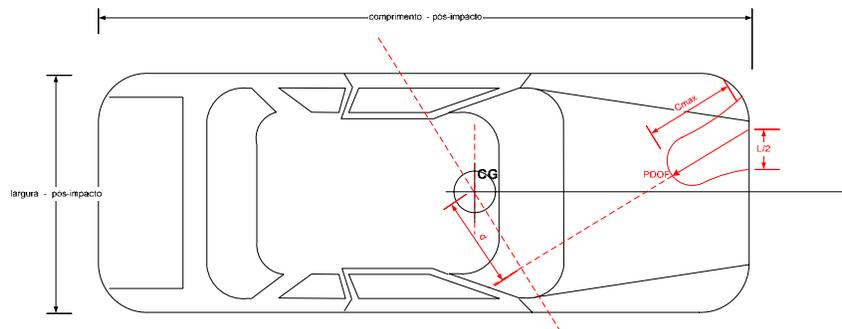


Figura 5. Exemplo de determinação da força de colisão para impacto frontal.

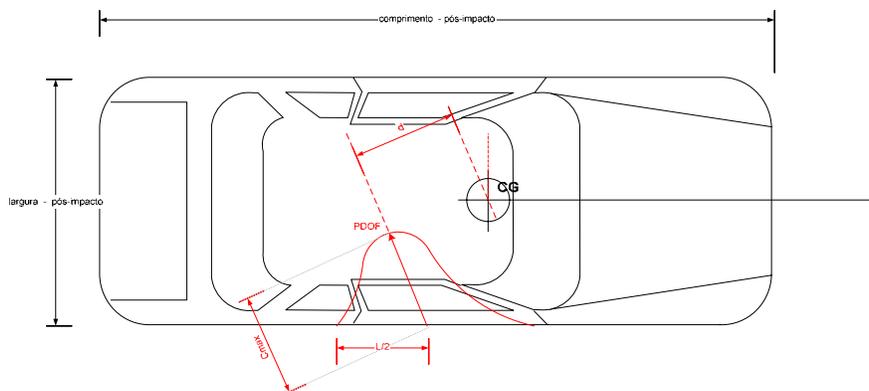


Figura 6. Exemplo de determinação da força de colisão para impacto lateral.

2.3.3 Deslocamento do veículo após a colisão

Quando um veículo colide com um poste, frontalmente ou lateralmente, duas situações distintas poderão ocorrer, dependendo se a direção da força (linha de ação da PDOF) de colisão cruza pelo centro de gravidade do veículo. Caso não cruze (exemplo: figuras 5 e 6), o veículo adquirirá um movimento plano (translação + rotação) pós-colisão. O perito necessitará determinar as dimensões do veículo, sua posição na via e o deslocamento de seu centro de gravidade com relação ao sítio de colisão (posição inicial do poste).

3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA DO POSTE DURANTE A COLISÃO

O sucesso da reconstrução de um acidente de trânsito e, conseqüentemente, da confirmação das conclusões sobre o evento, será influenciada pelo grau de compreensão do fenômeno ocorrido.

Estudos da interação entre as estruturas de um automóvel e de um poste de concreto armado em acidentes de trânsito são praticamente inexistentes no Brasil, exceto a feita ao trabalho pioneiro de Negrini e Kleinübing²². A bibliografia disponível (internacional) aborda, na maioria dos estudos, apenas a estrutura do automóvel e/ou postes de madeira.

Entretanto, o número de acidentes de trânsito envolvendo automóveis e postes de concreto armado é consideravelmente alto no estado do Rio Grande do Sul, justificando a realização de estudos que ajudem a compreender o fenômeno.

O estudo apresentado a seguir está baseado em dados observados e medidos em locais de acidentes de trânsito nos quais ocorreram colisões entre automóveis e postes de concreto.

Da observação dos vestígios destes eventos resultou uma divisão em Fases da seqüência dos danos apresentados pela estrutura dos postes.

3.1 Estudo de Fases de Sequência de Danos em Estruturas de Postes

Fase 1: o poste permanece inalterado, após a colisão, em relação a sua posição original e danos em sua estrutura.

Fase 2: o poste desloca-se em sua base (região limite do engaste no solo) após a colisão, permanecendo em uma posição inclinada e apresenta pequenos danos (fissuras externas) em sua estrutura de concreto (figuras 7 e 10).



Figura 7. Exemplo da Fase 2.

Fase 3: a região do poste atingida pela colisão com o veículo apresenta um colapso localizado da estrutura de concreto, restando parte do concreto armado e da armadura, que sofre deformação dos vergalhões na direção em que o restante da estrutura do concreto é deslocada pelo automóvel; o poste ainda permanece aproximadamente na posição vertical, sustentada pela estrutura da armadura e fiação de energia (figura 8).



Figura 8. Exemplo da Fase 3 a) imagem geral e b) detalhe da estrutura do poste

Fase 4: após o colapso total na região da estrutura de concreto armado do poste colidido, os vergalhões da armadura do concreto deformam-se em grande intensidade e rompem-se, a estrutura superior do poste tomba e a porção do poste engastada desenterra-se parcialmente ou integralmente (figura 9).



Figura 9. Exemplo da Fase 4.

4 METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE VELOCIDADES

Ao estudarmos acidentes de trânsito em que automóveis colidem em postes de concreto armado, verificamos que o fenômeno é complexo e variável, de acordo com características particulares de cada evento. Por este motivo, poderá ser necessário à utilização de uma ou mais metodologias para a realização do cálculo de velocidade do automóvel participante. A determinação da dinâmica do evento será fundamental na escolha destas metodologias. Para uma melhor compreensão do trabalho, vamos dividir a utilização das metodologias a partir de três períodos diferentes do evento: pré-impacto, impacto e pós-impacto.

4.1 Período Pré-Impacto

4.1.1 Metodologia – marcas de pneus

Considerando-se o posicionamento dinâmico do veículo antes de colidir com a estrutura do poste, é comum serem encontradas marcas de pneus, indicando que o veículo estava desacelerando por frenagem ou derrapagem, que poderão ser utilizadas para a realização de cálculo de velocidade, usando-se as consagradas equações afins⁶.

4.2 Período de Impacto

4.2.1 Metodologia - deformação do automóvel

Destacamos duas metodologias, que são as mais citadas na bibliografia internacional^{1,2,3,4,6,7 e 14}.

Os valores dos coeficientes usados nas equações as seguir são experimentais e específicos para determinados tipos de veículos, portanto dependentes das características destes, como geometria, peso e dimensões. Embora os autores informem que se possa utilizar os mesmos coeficientes para veículos que não tenham sido ensaiados, caso possuam características construtivas semelhantes, deve-se ter o cuidado de avaliar o erro inerente a esta aproximação^{13 e 15}.

Método da máxima deformação¹ (apenas para colisões frontais e automóveis com motor frontal)

Este método é baseado em resultados experimentais, obtidos em crash-tests. Craig¹ publicou um trabalho onde são apresentadas equações que estabelecem a relação entre a máxima deformação encontrada no automóvel e a velocidade de colisão:

Para automóveis de pequeno porte (comprimento menor que 4,6 m e peso menor que 1.361 Kg), tem-se:

$$v \text{ (km/h)} = 0,29711 \times C_{\max} + 6,436 \text{ (para deformações menores que 30,5 cm)}$$

$$v \text{ (km/h)} = 0,82350 \times C_{\max} - 9,654 \text{ (para deformações maiores que 30,5 cm)}$$

Para automóveis de porte médio/grande tem-se:

$$v \text{ (km/h)} = 0,3421 \times C_{\max} + 6,436 \text{ (para deformações menores que 45,7 cm)}$$

$$v \text{ (km/h)} = 0,7475 \times C_{\max} - 11,263 \text{ (para deformações maiores que 45,7 cm)}$$

Obs.: C_{\max} é a cota máxima de deformação em centímetros.

Método de Campbell^{1,2,4,6 e 7} (pode ser usado em colisões laterais e frontais)

As equações estabelecem relações entre a velocidade de impacto de um automóvel e os valores de deformação (C_n) da região colidida do veículo. A seguir está apresentada uma destas equações que se utiliza de seis cotas de deformação.

$$E_{\text{deform}} = \frac{L}{6} \times \left[6 \times G + A \times (C_1 + 2 \times C_2 + 2 \times C_3 + C_4) + \frac{B}{3} \times (C_1^2 + 2 \times C_2^2 + 2 \times C_3^2 + C_4^2 + C_1 \times C_2 + C_2 \times C_3 + C_3 \times C_4) \right] \times (1 + \text{tg}^2(\theta))$$

$$v_{\text{deform}} = 4,4272 \times \sqrt{\frac{E_{\text{deform}}}{m}}$$

onde:

A: N / m (tabelado, valor experimental)

B: N / m² (tabelado, valor experimental)

C_n : m (cota da deformação, conforme protocolo internacional²) *obs.: o número de coeficientes C_x poderá variar de acordo com o número de cotas obtidas.

E_{deform} : N . m (energia utilizada na deformação do veículo)

G: N (tabelado, valor experimental)

L: m (largura da área deformada)

θ : rad (ângulo entre a PDOF e a linha perpendicular a superfície do veículo)

m: kg (massa do veículo)

v_{deform} : m/s (velocidade do veículo associada a " E_{deform} ")

Valores tabelados⁶ e metodologias^{1,6} para a determinação dos coeficientes A, B e G podem ser encontrados na bibliografia recomendada neste trabalho.

4.2.2 Metodologia - fases do comportamento da estrutura do poste

Fase 1. Não há energia relacionada à velocidade desenvolvida pelo automóvel, uma vez que o poste permanece praticamente inalterado em relação a sua posição original e danos em sua estrutura.

Fase 2. O poste desloca-se em sua base (região limite do engaste no solo), permanecendo em uma posição inclinada e apresentando pequenos danos localizados em sua estrutura de concreto.

A velocidade de colisão do veículo será proporcional à energia (E_{deform}) necessária para deformar o veículo (item 4.2.1) e para deslocar a base do poste (E_{poste}). Na figura 10 é apresentado um exemplo de deslocamento da base de um poste na altura do engaste.

A energia para deslocar a base do poste (E_{poste}) será igual ao trabalho realizado pela força impulsiva de contato do veículo com o poste e dada através da equação^{20,22}:

$$E_{\text{poste}} = F \cdot s \quad (\text{N.m})$$

Onde:

s (m): deslocamento da base do poste (medida no local).

F (N): força impulsiva aplicada pelo veículo para deslocar a base do poste durante um período de tempo “t”.



Figura 10. Exemplo de deslocamento da base do poste na altura do engaste.

Para a força “F” impulsiva será adotada a hipótese^{4,13,16} de um valor constante no intervalo de tempo de sua aplicação (pulso retangular). Utilizando-se a 3ª Lei de Newton, considera-se que a mesma força que deforma a estrutura do veículo é a aplicada na estrutura do poste.

Aplicando-se o Princípio do Impulso e Quantidade de Movimento Linear pode-se calcular a força aplicada ao automóvel, ou seja:

$$F = \frac{m \times v}{t} \quad (\text{N})$$

onde:

m (kg): massa do veículo

v (m/s): velocidade do veículo proporcional a energia de deformação de sua estrutura (E_{deform}), ou seja:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times E_{\text{deform}}}{m}} \quad (\text{m/s})$$

t (s): tempo de aplicação da força F (a pesquisa bibliográfica indica, em casos de impacto com postes cilíndricos, que esta variável, na maioria dos casos, estará na faixa de 0,10s-0,15s^{13 e 16}; um CUIDADO especial deverá ser dado na definição deste valor)

A velocidade de colisão do veículo ($v_{\text{colisão}}$) é dada, então, pela expressão:

$$v_{\text{colisão}} = \sqrt{\frac{2 \times (E_{\text{deform}} + E_{\text{poste}})}{m}} \quad (\text{m/s})$$

Fases 3 e 4.

Na fase 3 a região do poste atingida pela colisão com o veículo apresenta o colapso da estrutura de concreto, nas regiões próximas ao impacto, restando parte do concreto armado e da armadura, que sofre deformação dos vergalhões na direção em que o restante da estrutura do concreto é deslocado pelo automóvel; o poste ainda permanece, aproximadamente, na posição vertical, sustentada pela estrutura da armadura.

Na fase 4, após o colapso total na região da estrutura de concreto armado do poste colidido, os vergalhões da armadura do concreto deformam-se em grande intensidade e rompem-se, a estrutura superior do poste tomba e a porção do poste engastada desenterra-se parcialmente ou integralmente.

A partir do exame do poste e da localização da identificação do mesmo, conforme já descrito, obtém-se de normas^{9,10,12} as características dimensionais e a resistência estrutural. Entre estes valores está o máximo valor que uma força pode ser aplicada em uma altura padrão do poste para que seja atingida a resistência a ruptura da estrutura do poste (colapso), obtida a partir de um carregamento estático. A partir deste valor pode-se calcular o máximo momento fletor (estático) que a base do poste pode suportar sem entrar em um processo de colapso. Adota-se a hipótese¹⁸ de que estes valores obtidos a partir de um carregamento estático sejam próximos àqueles que se obteriam de forma dinâmica.

Durante a colisão da estrutura do automóvel com o poste, pode-se medir a altura média de contato do veículo com o poste e considerar que a força impulsiva de contato do automóvel esteja aplicada concentrada nesta altura. Conhecendo-se o máximo momento fletor que a base do poste suporta sem entrar em colapso e a altura média de aplicação da carga impulsiva, esta última pode ser determinada pela divisão do momento fletor pela altura

de aplicação da carga. Para a força “F” impulsiva será adotada a hipótese de um valor constante no intervá-lo de tempo de sua aplicação (pulso quadrado). Exemplos práticos serão apresentados no item 5. Estudos de Casos e Aplicação das Metodologias Propostas.

A energia E_{poste} relacionada a este fenômeno será equivalente ao trabalho que a força impulsiva (equivalente ao momento fletor de ruptura da base do poste) realiza devido ao deslocamento da estrutura do poste (medido no local) após a colisão com o automóvel, no período de tempo que suas estruturas estiverem em contato^{20,22}.

$$E_{\text{poste}} = F \cdot s \quad (\text{N.m})$$

Onde:

s (m): deslocamento do poste (medida no local). Um exemplo é apresentado na figura 11.

F (N): força impulsiva aplicada pelo veículo para deslocar do poste durante um período de tempo “t”.

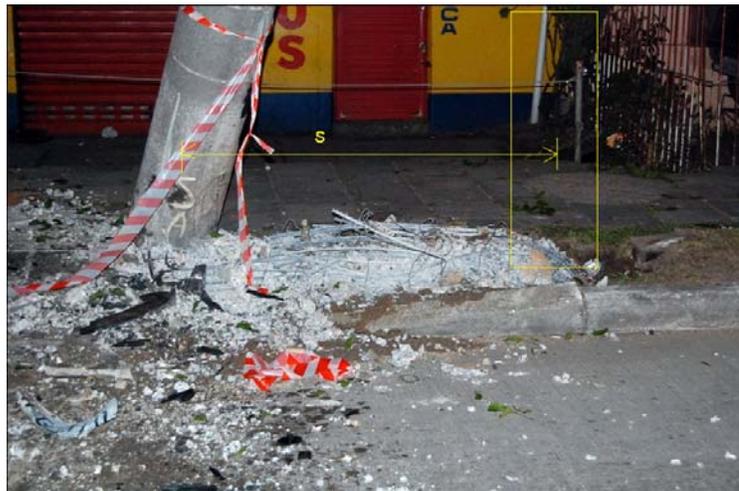


Figura 11. Exemplo de deslocamento de poste em fase 3 ou 4.

Do Princípio do Trabalho e Energia calcula-se a velocidade correspondente ao trabalho “ E_{poste} ”:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times E_{\text{poste}}}{m}} \quad (\text{m/s})$$

onde:

m (kg): massa do veículo;

v (m/s): velocidade do veículo proporcional ao trabalho E_{poste} .

4.3 Período Pós-Impacto

4.3.1 Metodologia - Deslocamento do Veículo Após a Colisão

Propõe-se que seja utilizado o Princípio do Trabalho e Energia, a partir da determinação do deslocamento do centro de gravidade do automóvel desde o sítio de colisão com o poste até o seu sítio de imobilização, relacionando o trabalho realizado pelas forças de atrito entre as rodas do veículo e o pavimento a energia cinética equivalente, ou seja, a tradicional equação de cálculo de velocidade para marcas de frenagem. Um cuidado especial deverá ser tomado na verificação do fato de observar se houve arrasto das rodas ou rolamento destas, pois no último caso algumas alterações no cálculo deverão ser realizadas⁶.

4.4 Cálculo da Velocidade de Impacto do Automóvel no Poste

Cada um dos fenômenos abordados nos três períodos (pré-impacto, impacto e pós-impacto) e nas quatro fases, que poderão ocorrer em uma colisão de automóvel em um poste, produzirá uma quantidade de energia ou trabalho equivalentes a parcelas de velocidades do veículo, que somados fornecerão a velocidade total de colisão do veículo. No item 5 serão apresentados casos reais onde estas metodologias serão aplicadas para demonstrar sua funcionalidade.

4.5 Verificação da Validade dos Resultados Obtidos

Utiliza-se o Princípio do Impulso e da Quantidade de Movimento Linear (PIQML) para verificar a validade dos resultados obtidos.

$$F \cdot t = m \cdot (v_2 - v_1)$$

Onde v_2 e v_1 são as velocidades do veículo em momentos anterior e posterior à colisão, m é a massa do veículo, F é a força impulsiva resultante da colisão e t é o tempo de aplicação da carga impulsiva, ou seja, o tempo de contato de colisão entre o veículo e o poste.

Esta ferramenta permite verificar os erros gerados a partir das hipóteses utilizadas, como: tempo de contato entre a estrutura do veículo e do poste durante a colisão, utilização de uma teoria de carregamento estático, valores normalizados, entre outros.

5. ESTUDO DE CASOS E APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS

5.1 Colisões Frontais

5.1.1 Colisão frontal de um Fiat/Uno em poste de concreto

Breve Histórico: O automóvel Fiat/Uno ao finalizar uma trajetória curva e iniciar uma trajetória retilínea adentrou na calçada e colidiu em um poste de concreto armado (figura 12), que conforme inscrições constatadas em sua estrutura era da categoria 14-400¹² (comprimento de 14m e carga de ruptura 400 daN = 4.000N).



Figura 12.

Cálculo da velocidade de colisão:

- Período pré-impacto:

Não se constatou marcas de pneus no pavimento asfáltico.

- Período de impacto:

Energia relacionada ao veículo (E_{deform}): será utilizado o Método de Campbell para estabelecer relações entre a velocidade de impacto do automóvel e os valores de deformação da região colidida do veículo. Na figura 13 tem-se uma planilha com a largura e as cotas das medidas da região deformada e o peso do veículo, os coeficientes A, B e G e os resultados: energia envolvida na deformação (E_{deform}) e a velocidade relacionada (v_{deform}).

METODOLOGIAS DE CAMPBELL (6 COTAS)	
A (N/m)	52888,30
B (N/m ²)	324053,59
C1 (m)	0,08
C2 (m)	0,28
C3 (m)	0,45
C4 (m)	0,40
C5 (m)	0,35
C6 (m)	0,20
E (N.m)	39940,06
G (N)	4315,91
L (m)	1,00
Peso (N)	
massa (kg)	950,00
v (m/s)	9,17
v (km/h)	33,01

Figura 13

Os coeficientes A, B e G foram obtidos de tabelas recomendadas pela bibliografia⁶, considerando *stiffness category 1*⁶.

Energia relacionada ao poste (E_{poste}): neste evento, considerando-se a proposta de fases do comportamento da estrutura do poste, atingiu-se a fase 2 e deve-se considerar a energia empregada para deslocar a base do poste. Na figura 14 está mostrado o deslocamento da base do poste destacado com um círculo em amarelo e com uma medida de $s = 5\text{cm}$.



Figura 14.

A energia para deslocar a base do poste será igual ao trabalho (E_{poste}) realizado pela força impulsiva de contato do veículo, considerando-se a hipótese de um valor constante no intervalo de tempo de sua aplicação (pulso quadrado). Esta grandeza é calculada utilizando-se a 3ª Lei de Newton, considerando que a mesma força que deforma a estrutura do veículo é a aplicada na estrutura do poste. No presente caso:

$$F = \frac{m \cdot v}{t} = \frac{\sqrt{2 \cdot m \cdot E_{\text{deform}}}}{t} = \frac{\sqrt{2 \cdot 950 \cdot 39940}}{0,12} = 72593\text{N}$$

O trabalho para deslocar a base do poste é calculado:

$$E_{\text{poste}} = F \cdot s = 72593 \cdot 0,05 = 3629,7 \text{ N.m}$$

- Período pós-impacto: desconsiderou-se o movimento de rotação do veículo após a colisão.

Conclusão e verificação dos valores

A energia total ($E_{\text{colisão}}$) envolvida no processo da colisão será o resultado da soma da energia utilizada na deformação do veículo com o trabalho realizado para deslocar a base do poste:

$$E_{\text{colisão}} = E_{\text{deform}} + E_{\text{poste}} = 43569,7\text{N.m}$$

E a velocidade equivalente a esta energia será:

$$V_{\text{colisão}} = \sqrt{\frac{E_{\text{colisão}} \cdot 2}{m}} = \sqrt{\frac{43569,7 \cdot 2}{950}} = 9,577\text{m/s} = 34,47\text{km/h}$$

Na figura 15 estão mostrados estes resultados e a verificação feita através do PIQML. Percebe-se a existência de um pequeno erro da ordem de 387 kg.m/s.

COLISAO FRONTAL	STIFFNESS CATEGORY 1
FIAT - UNO	
VEICULO	
massa	950 kg
dimensões	3,69 m x 1,55 m
deslocamento angular	40 graus
deslocamento do CG apos a colisão	---
colisão em obstaculo apos a separação	---
POSTE	
Identificação	CEEE - item 21 - 14-400
deslocamento na base	0,05 m
colapso	---
deformação da armadura	---
tempo de contato - impulso	0,12 s
força de impulso	72.593,8 N
CALCULOS	
energia - deformação do carro (crash3)	39.940 J
energia - deslocamento da base do poste	3.629,7 J
energia - colapso e deformação da armadura	---
energia - deslocamento ang. do veiculo	---
energia - deslocamento do CG do veiculo	---
energia - deslocamentos somados	---
ENERGIA TOTAL	43.569,7 J
VELOCIDADE (km/h)	34,47 km/h
VELOCIDADE (m/s)	9,58 m/s
VERIFICAÇÃO: dQM = impulso	
m.v1	9.098 kg.m/s
f.dt	8.711 kg.m/s
m.v1 - f.dt	387 kg.m/s
m.v2	zero kg.m/s

Figura 15.

5.1.2 Colisão frontal de um VW/Gol em um poste de concreto

Breve Histórico: O automóvel VW/Gol adentrou na calçada e colidiu em um poste de concreto armado (figura 16), que conforme inscrições constatadas em sua estrutura era da categoria 14-400¹² (comprimento de 14m e carga de ruptura 400 daN = 4.000N).

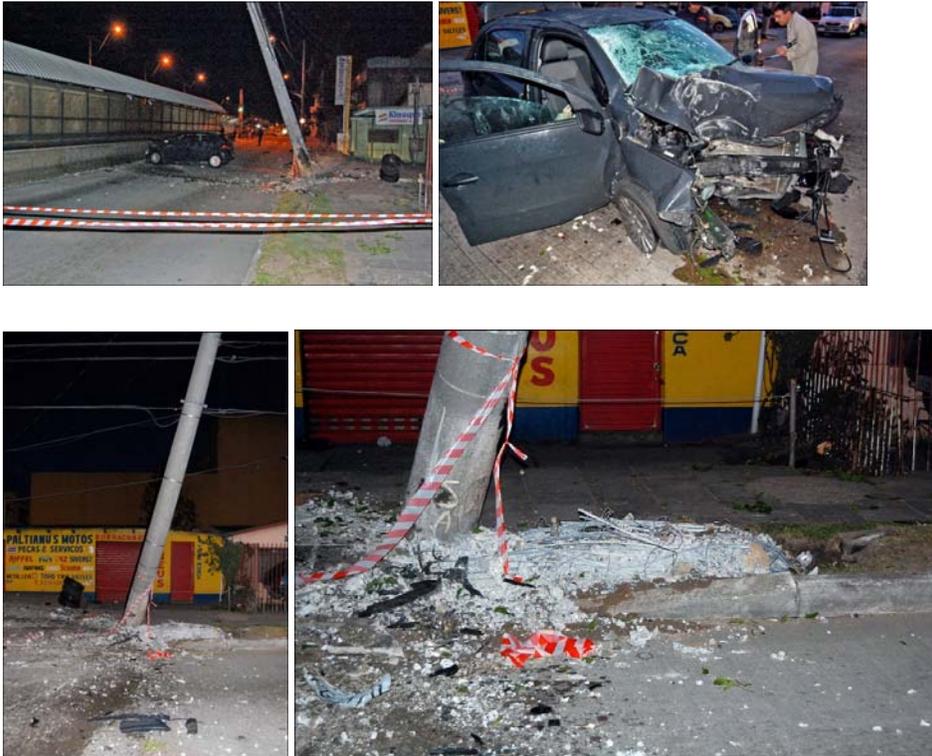


Figura 16.

Cálculo da velocidade de colisão:

- Período pré-impacto:

Não se constatou marcas de pneus no pavimento asfáltico.

- Período de impacto:

Energia relacionada ao veículo (E_{deform}): será utilizado o Método de Campbell para estabelecer relações entre a velocidade de impacto do automóvel e os valores de deformação da região colidida do veículo. Na figura 17 tem-se uma planilha com a largura e as cotas das medidas da região deformada e o peso do veículo, os coeficientes A, B e G e os resultados: energia envolvida na deformação E_{deform} e a velocidade relacionada v_{deform} .

METODOLOGIAS DE CAMPBELL (6 COTAS)	
A (N/m)	52888,30
B (N/m ²)	324053,59
C1 (m)	0,20
C2 (m)	0,70
C3 (m)	0,80
C4 (m)	0,80
C5 (m)	0,70
C6 (m)	0,20
E (N.m)	87910,63
G (N)	4315,91
L (m)	0,80
Peso (N)	
massa (kg)	950,00
v (m/s)	13,60
v (km/h)	48,98

Figura 17.

Os coeficientes A, B e G foram obtidos de tabelas recomendadas pela bibliografia⁶, considerando *stiffness category 1*⁶.

Energia relacionada ao poste (E_{poste}): neste evento, considerando-se a proposta de fases do comportamento da estrutura do poste, atingiu-se a fase 3. Na figura 11 está mostrado o deslocamento do poste, que foi de 1,80m.

O trabalho que a força impulsiva realiza devido ao deslocamento da estrutura do poste, após a colisão com o automóvel, no período de tempo que suas estruturas estiverem em contato será:

$$E_{\text{poste}} = F \cdot s = 78600 \cdot 1,8 = 141480 \text{ N.m}$$

Onde:

$s = 1,8\text{m}$ - deslocamento do poste (medida no local).

$F = 78600 \text{ N}$ - força impulsiva aplicada pelo veículo para deslocar do poste durante um período de tempo “t”.

A força impulsiva aplicada é determinada utilizando-se dos valores normalizados^{9,10,12} e determinados conforme a planilha apresentada na figura 18.

Planilha de Cálculo da Força de Ruptura Estática			
ENTRADA DE DADOS		CÁLCULOS	
Identificação no Poste	14-400	Raio Ext. na Base do Poste (m)	0,225
Classificação do Poste	CEEE - Item 21	Raio Int. na Base do Poste (m)	0,175
Comprimento Nominal do Poste(m)	14	Raio Ext. na Topo do Poste (m)	0,095
Conicidade do Poste (m/m)	0,02	Raio Int. no Topo do Poste (m)	0,035
Diâmetro da Base do Poste (m)	0,45	Comprimento do Engaste do Poste no Solo (m)	2
Diâmetro do Topo do Poste(m)	0,17	Diametro ext. no engaste do poste	0,41
Densidade do Concreto (Kg/m ³)	2400	Volume Total do Poste (m ³)	0,572
Resistência a Ruptura do Poste - Teste Estático (N)	4000	Peso Total do Poste	1372
MEDIÇÕES NO POSTE			
Espessura média da Parede do Poste (m)	0,05		
Altura Média da Colisão com o Automóvel (m)	0,6	Momento Fletor de Ruptura na Base do Poste - Teste Estático (Nm)	47200
		Resistência de Ruptura do Poste na Altura Média da Colisão com o Automóvel - Teste Estático (N)	78866,67

Figura 18.

Período pós-impacto:

Energia relacionada ao deslocamento do centro de gravidade do automóvel (E_{desloc}) desde o sítio de colisão com o poste até o seu sítio de imobilização. Calcula-se o trabalho realizado pelas forças de atrito entre as rodas do veículo e o pavimento utilizando-se a tradicional equação de cálculo de velocidade para marcas de frenagem.

$$v_{\text{desloc}} = 15,94 \cdot \sqrt{\mu \cdot d} = 15,94 \cdot \sqrt{0,7 \cdot 9} = 11,11 \text{ m/s}$$

$$E_{\text{desloc}} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{950 \cdot (11,11)^2}{2} = 58630,2 \text{ N.m}$$

onde:

$m = 950 \text{ kg}$ - massa do automóvel

$\mu = 0,7$ (coeficiente de atrito entre os pneus do automóvel e o pavimento asfáltico)

$d = 9 \text{ m}$ – deslocamento do CG do automóvel após a colisão

v (m/s) – velocidade equivalente a E_{desloc}

Conclusão e verificação dos valores

A energia total ($E_{\text{colisão}}$) envolvida no processo da colisão será o resultado da soma da energia utilizada na deformação do veículo (E_{deform}) com o trabalho realizado para deslocar o poste (E_{poste}) e a energia relacionada ao deslocamento do centro de gravidade do automóvel (E_{desloc}):

$$E_{\text{colisão}} = E_{\text{deform}} + E_{\text{poste}} + E_{\text{desloc}} = 288020 \text{ N.m}$$

E a velocidade equivalente a esta energia será:

$$v_{\text{colisão}} = \sqrt{\frac{E_{\text{colisão}} \cdot 2}{m}} = \sqrt{\frac{288020 \cdot 2}{950}} = 24,62 \text{ m/s} = 88,6 \text{ km/h}$$

Na figura 19 estão mostrados estes resultados e a verificação feita através do PIQML. Percebe-se a existência de um erro da ordem de 1000 kg.m/s, provavelmente devido ao valor do período de contato do veículo com o poste estar subestimado.

COLISAO FRONTAL	STIFFNESS CATEGORY 1
	VW - GOL
VEICULO	
massa	950 kg
dimensões	3,8 m x 1,6 m
deslocamento angular	270 graus
deslocamento do CG após a colisão	9 m
colisão em obstáculo após a separação	---
POSTE	
Identificação	CEEE - item 21 - 14-400
deslocamento na base	---
colapso	sim
deformação da armadura	1,8 m
tempo de contato - impulso	0,15s
força de impulso	78.600 N
CALCULOS	
energia - deformação do carro (crash3)	87.910 J
energia - deslocamento da base do poste	---
energia - colapso e deformação da armadura	141.480 J
energia - deslocamento ang. do veiculo	---
energia - deslocamento do CG do veiculo	58.630,2 J
energia - deslocamentos somados	58.630,2 J
ENERGIA TOTAL	288.020 J
VELOCIDADE (km/h)	88,6 km/h
VELOCIDADE (m/s)	24,62 m/s
VERIFICAÇÃO: DOM = impulso	
m.v1	23.389 kg.m/s
f.ct	11.790 kg.m/s
m.v1 - f.ct	11.599 kg.m/s
m.v2	10.554 kg.m/s

Figura 19

5.2 Colisões Laterais

5.2.1 Colisão lateral de um Ford/Escort em um poste de concreto

Breve Histórico: O automóvel Ford/Escort ao realizar uma trajetória curva perdeu a estabilidade e colidiu com a lateral esquerda em um poste de concreto armado (figura 20), que conforme inscrições constatadas em sua estrutura era da categoria 14-600¹² (comprimento de 14m e carga de ruptura 600 daN = 6.000N).



Figura 20

Cálculo da velocidade de colisão:

- Período pré-impacto:

Não se constatou marcas de pneus no pavimento asfáltico.

- Período de impacto:

Energia relacionada ao poste: neste evento, considerando-se a proposta de fases do comportamento da estrutura do poste, atingiu-se a fase 1 e não há energia relacionada à velocidade desenvolvida pelo automóvel, uma vez que o poste permanece praticamente inalterado em relação a sua posição original e danos em sua estrutura.

Energia relacionada ao veículo (E_{deform}): será utilizado o Método de Campbell para estabelecer relações entre a velocidade de impacto do automóvel e os valores de deformação da região colidida do veículo. Na figura 21 tem-se uma planilha com a largura e as cotas das medidas da região deformada e o peso do veículo, os coeficientes A, B e G e os resultados: energia envolvida na deformação (E_{deform}) e a velocidade relacionada (v_{deform}).

MÉTODOLOGIA DE CAMPBELL (6 COTAS)		
A (N/m)	24517,76	
B (N/m ²)	461948,7	
C1 (m)	0,93	
C2 (m)	1,38	
C3 (m)	1,41	
C4 (m)	1,01	
C5 (m)	0,88	
C6 (m)	0	
E (N.m)	272705,5	
G (N)	650,6354	
L (m)	0,91	
Peso (N)	9810	
massa (kg)	1000	
v (m/s)	23,35404	
v (km/h)	84,07454	

Figura 21.

Os coeficientes A, B e G foram obtidos de tabelas recomendadas pela bibliografia⁶, considerando *stiffness category 2*⁶.

- Período pós-impacto: não se constatou movimento do veículo após a colisão.

Conclusão e verificação dos valores

Na figura 22 são apresentados alguns dados do veículo e resultados calculados anteriormente.

COLISAO LATERAL	STIFFNESS CATEGORY 2
VEICULO	
massa	1.000 kg
dimensões	4,0 m x 1,6 m
deslocamento angular	---
deslocamento do CG apos a colisão	---
colisão em obstáculo apos a separação	---
POSTE	
Identificação	CEEE - item 21 - 14-500
deslocamento na base	---
colapso	---
deformação da armadura	---
tempo de contato - impulso	0,2s
força de impulso	116.800 N
CALCULOS	
energia - deformação do carro (crash3)	272.705 J
energia - deslocamento da base do poste	---
energia - colapso e deformação da armadura	---
energia - deslocamento ang. do veiculo	---
energia - deslocamento do CG do veiculo	---
energia - deslocamentos somados	---
ENERGIA TOTAL	272.705 J
[v1] VELOCIDADE (km/h)	84 km/h
[v1] VELOCIDADE (m/s)	23,3 m/s
VERIFICAÇÃO: dQM = impulso	
m.v1	23360 kg.m/s
f.dt	23.360 kg.m/s
m.v1 - f.dt	---
m.v2	ZERO

Figura 22

Também são apresentados resultados como a força de impulso estimada para a colisão e a verificação dos resultados utilizando-se o Princípio do Impulso e Quantidade de movimento Linear.

A estimativa da força de impulso “F” foi calculada considerando a hipótese de um pulso de força durante um período de 0,2s e a equação:

$$F = \frac{m.v_1}{t} = \frac{1000.23,3}{0,2} = 116.800\text{N}$$

5.2.2 Colisão lateral de um Peugeot/307 em um poste de concreto

Breve Histórico: O automóvel Peugeot/307 ao realizar uma trajetória curva perdeu a estabilidade e colidiu com a lateral esquerda em um poste de concreto armado (figuras 23 a 25), que conforme inscrições constatadas em sua estrutura era da categoria 14-400¹² (comprimento de 14m e carga de ruptura 400 daN = 4.000N).



Figura 23.

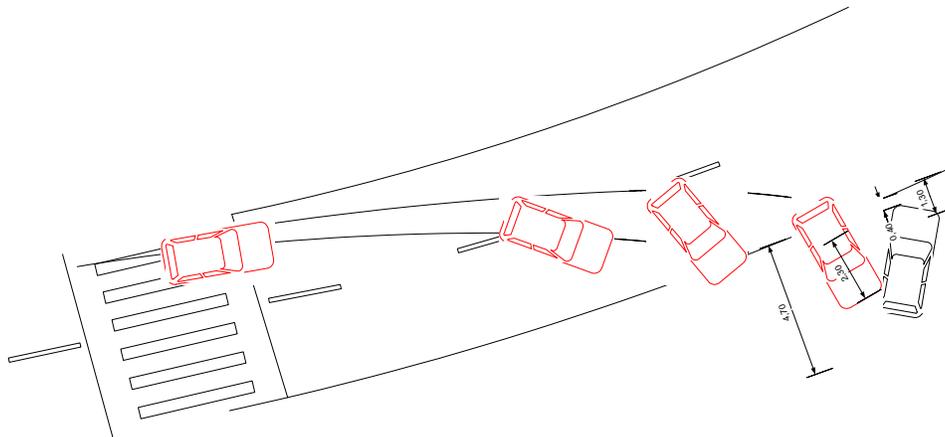


Figura 24.

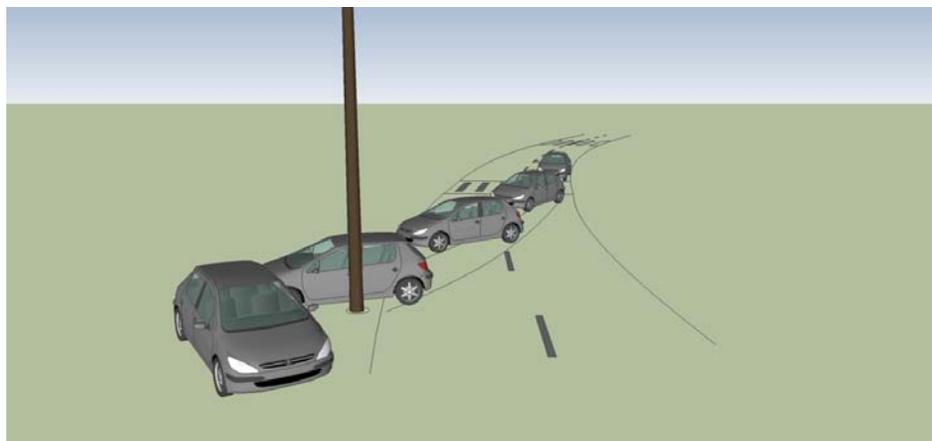


Figura 25.

- Período pré-impacto:

Constatou-se marcas de derrapagem produzidas pelos pneus do veículo no pavimento asfáltico. A equação da velocidade crítica de tangenciamento (v_{derrap}), para um automóvel considerando-se a ação das forças centrípeta e de atrito durante uma trajetória curvilínea plana é dada pela expressão (1) e a energia equivalente (E_{derrap}):

$$v_{\text{derrap}} = 11,27 \times \sqrt{\mu \times r} = 20,84 \text{ m/s} = 75 \text{ km/h}$$

$$E_{\text{derrap}} = \frac{m.v^2}{2} = \frac{1027.(20,84)^2}{2} = 223015,92 \text{ N.m}$$

Onde:

$\mu = 0,7$: coeficiente de atrito entre os pneumáticos e a superfície da pista (para pavimento asfáltico seco em nível).

$r = 63\text{m}$: valor aproximado para o raio de curvatura relativa às marcas de pneumáticos produzidas pelo automóvel ao realizar a manobra de trajetória curva plana, calculado com base no levantamento realizado no local do evento.

Esta velocidade (v_{derrap}) era a velocidade de tráfego do veículo na pista no início da derrapagem. A bibliografia^{15,20} recomenda uma desaceleração (a) para o automóvel de $0,2g$ ao longo de uma derrapagem, permitindo-nos calcular a velocidade do automóvel no momento da colisão com o poste ($v_{\text{colisão}}$), ao fim das marcas de derrapagem, e a energia equivalente ($E_{\text{colisão}}$):

$$v_{\text{colisão}} = \sqrt{v_i^2 - 2.a.d} = \sqrt{20,84^2 - 2.0,2.9,81.14} = 19,5 \text{ m/s} = 70 \text{ km/h}$$

$$E_{\text{colisão}} = \frac{m.v^2}{2} = \frac{1027.(19,5)^2}{2} = 195258,375 \text{ N.m}$$

onde:

$d = 14\text{m}$ – comprimento da trajetória curva das marcas de derrapagem

- Período de impacto:

Energia relacionada à deformação do veículo (E_{deform}): será utilizado o Método de Campbell para estabelecer relações entre a velocidade de impacto do automóvel e os valores de deformação da região colidida do veículo. Na figura 26 tem-se uma planilha com a largura e as cotas das medidas da região deformada e o peso do veículo, os coeficientes A, B e G e os resultados: energia envolvida na deformação (E_{deform}) e a velocidade relacionada (v_{deform}). Na figura 27 é apresentada uma fotografia da região deformada do veículo.

PLANILHA DE CRASH 3 COM 8 COTAS	
A (N/m)	13484,77
B (N/m ²)	255106
C1 (m)	0,35
C2 (m)	0,4
C3 (m)	0,5
C4 (m)	0,5
C5 (m)	0,4
C6 (m)	0,35
E (N.m)	21064,61
G (N)	356,3987
L (m)	0,7
Peso (N)	
massa (kg)	1027
v (m/s)	6,404813
v (km/h)	23,05733

Figura 26.



Figura 27.

Os coeficientes A, B e G foram obtidos de tabelas recomendadas pela bibliografia⁶, considerando *stifness category 2*⁶.

Energia relacionada ao colapso e deslocamento do poste (E_{poste}): neste evento, considerando-se a proposta de fases do comportamento da estrutura do poste, atingiu-se a fase 3. Na figura 28 está mostrado o deslocamento do poste, que foi de 0,25m.



Figura 28

O trabalho (E_{poste}) que a força impulsiva realiza devido ao deslocamento da estrutura do poste, devido à colisão com o automóvel, no período de tempo que suas estruturas estiverem em contato será:

$$E_{\text{poste}} = F \cdot s = 78600 \cdot 0,25 = 19650 \text{ N.m}$$

Onde:

$s = 0,25\text{m}$ - deslocamento do poste (medida no local).

$F = 78600 \text{ N}$ - força impulsiva aplicada pelo veículo para deslocar do poste durante um período de tempo “t”.

A força impulsiva aplicada é determinada utilizando-se dos valores normatizados^{9,10,12} e determinados conforme a planilha apresentada na figura 29.

Planilha de Cálculo da Força de Ruptura Estática			
ENTRADA DE DADOS		CÁLCULOS	
Identificação no Poste	14-400	Raio Ext. na Base do Poste (m)	0,225
Classificação do Poste	CEEE - Item 21	Raio Int. na Base do Poste (m)	0,175
Comprimento Nominal do Poste(m)	14	Raio Ext. na Topo do Poste (m)	0,085
Conicidade do Poste (m/m)	0,02	Raio Int. no Topo do Poste (m)	0,035
Diâmetro da Base do Poste (m)	0,45	Comprimento do Engaste do Poste no Solo (m)	2
Diâmetro do Topo do Poste(m)	0,17	Diametro ext. no engaste do poste	0,41
Densidade do Concreto (Kg/m ³)	2400	Volume Total do Poste (m ³)	0,572
Resistência a Ruptura do Poste - Teste Estático (N)	4000	Peso Total do Poste	1372
MEDIÇÕES NO POSTE			
Espessura média da Parede do Poste (m)	0,05		
Altura Média da Colisão com o Automóvel (m)	0,6	Momento Fletor de Ruptura na Base do Poste - Teste Estático (Nm)	47200
		Resistência de Ruptura do Poste na Altura Média da Colisão com o Automóvel - Teste Estático (N)	78666,67

Figura 29.

Período pós-impacto:

Energia relacionada ao deslocamento do centro de gravidade do automóvel (E_{desloc}) desde o sítio de colisão com o poste até o seu sítio de imobilização. Não foi possível avaliar esta energia, pois o veículo colidiu contra um muro na calçada (figura 30).



Figura 30.

Entretanto, como já calculada a energia de colisão ($E_{\text{colisão}}$), tem-se que:

$$E_{\text{desloc}} = E_{\text{colisão}} - (E_{\text{deform}} + E_{\text{poste}}) = 153433 \text{ N.m}$$

$$v_{\text{desloc}} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{desloc}}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 153433}{1027}} = 17,28 \text{ m/s} = 62,2 \text{ km/h}$$

Onde E_{desloc} e v_{desloc} são a energia e a velocidade equivalente, restante após o impacto com o poste.

Verificação dos valores

Na figura 31 estão mostrados estes resultados e a verificação feita através do PIQML. Percebe-se a existência de um erro da ordem de 50 kg.m/s, provavelmente devido ao valor do período de contato do veículo com o poste estar subestimado.

COLISÃO LATERAL	STIFFNESS CATEGORY 2
	PEUGEOT - 307
VEÍCULO	
massa	1.027 kg
dimensões	3,7 m x 1,8 m
deslocamento angular	???
deslocamento do CG após a colisão	???
colisão em obstáculo após a separação	sim
POSTE	
identificação	CEEE - item 21 - 14-400
deslocamento na base	---
colapso	sim
deformação da armadura	0,60m
tempo de contato - impulso	0,12 s
força de impulso	78.600 II
CÁLCULOS	
energia - deformação do carro (crash3)	21.064 J
energia - deslocamento da base do poste	---
energia - colapso e deformação da armadura	19.650 J
energia - deslocamento ang. do veículo	---
energia - deslocamento do CG do veículo	---
energia - deslocamentos somados	153.433 J
ENERGIA TOTAL	194.147 J
(v1) VELOCIDADE (km/h)	70 km/h
(v1) VELOCIDADE (m/s)	19,44 m/s
VERIFICAÇÃO: dOM = impulso	
m.v1	19.964 kg.m/s
f.dt	2.358 kg.m/s
m.v1 - f.dt	17.606 kg.m/s
m.v2	17.752,5 kg.m/s

Figura 31

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho estão baseados em aproximações e hipóteses que objetivam simular os fenômenos físicos que ocorrem em colisões entre automóveis postes de concreto armado. Este procedimento fez-se necessário devido à escassez de pesquisas e trabalhos que abordem o problema.

Ao longo do trabalho o autor informa e comenta as aproximações e hipóteses adotadas, indicando a origem destes e os cuidados a serem adotados para evitar resultados errôneos.

Neste trabalho não foi abordado o tema da colisão tangencial entre automóveis e postes, como o da figura 32, devido à complexidade do fenômeno e a falta de dados sobre este tipo de evento.

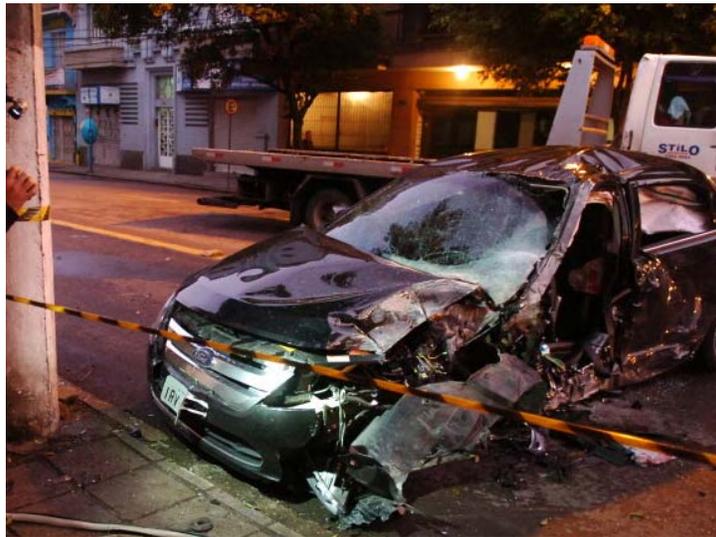


Figura 32.

O assunto não está esgotado e necessita de trabalho de pesquisa para avançar na obtenção de resultados mais precisos e na explicação mais detalhada dos fenômenos físicos que ocorrem neste tipo de evento.

O autor está trabalhando para desenvolver uma ferramenta de simulação numérica do problema.

A bibliografia e as planilhas de cálculos utilizadas estão a disposição dos interessados pelo assunto.

7 BIBLIOGRAFIA

- (1) **Cofone, Joseph N.. The Investigation of Automobile Collisions with Wooden Utility Poles and Trees.** Institute of Police Technology and Management (IPTM) – University of North Florida, 1996.
- (2) **Tumbas, Nicholas S. and Smith, Russell A.. Measuring Protocol for Quantifying Vehicle Damage from an Energy Basis Point of View.** SAE pape0072.
- (3) **Campbell, Kenneth L.. Energy Basis for Collisions Severity.** SAE paper 740565.
- (4) **Morgan, James R. and Ivey, Don L.. Analysis of Utility Pole Impacts.** SAE paper 870607.
- (5) **Jornal Zero Hora. Os Perigos que se Escondem nas Avenidas.** Editoria: Geral, pgs. 36 e 37. 13/03/2008.
- (6) **Fricke, Lynn B. Traffic Accident Reconstruction.** Northwestern University, 1990.
- (7) **Emori, R.I., Analytical Approach to Automobile Collisions.** SAE paper 680016.
- (8) **NBR6231 – Postes de Madeira – Resistência à Flexão,** dezembro de 1980.
- (9) **NBR8451 – Postes de Concreto Armado para Redes de Distribuição de Energia Elétrica – Especificação,** fevereiro de 1998.
- (10) **NBR8452 – Postes de Concreto Armado para Redes de Distribuição de Energia Elétrica – Padronização,** fevereiro de 1998.
- (11) **CEEE-D, Padronização de Distribuição. Materiais para Redes Aéreas de Distribuição. Postes de Madeira.** PTD-00.001 – Seção 7-2, 1992.
- (12) **CEEE-D, Padronização de Distribuição. Materiais para Redes Aéreas de Distribuição. Postes de Concreto.** PTD-00.001 – Seção 7-1, 2005.
- (13) **Warner, Mark H.. Development of Pole Impact Testing at Multiple Vehicle Side Locations as Applied to the Ford Taurus Structural Platform,** Thesis for Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, December 2004.
- (14) **Cofone, Joseph N. et al.. A Comparison of Equations for Estimating Speed Based on Maximum Static Deformation for Frontal Narrow-Object Impacts.** August, 2007.

- (15) Daily, John et al.. **Crush Analysis with Under-rides an the Coefficient of Restitution.** Institute of Police Technology and Management's - 24th Annual Special Problems in Traffic Crash Reconstruction. April 2006.
- (16) Michael S. Varat and Stein E. Husher. **Crash Pulse Modeling for Vehicle Safety Research.** 18th ESV paper. KEVA Engineering, United States of America, paper 501.
- (17) Michael S. Varat and Stein E. Husher. **Vehicle Crash Severity Assessment in Lateral Pole Impact.** Keva Engineering. SAE Paper no. 1999-01-0100.
- (18) Richard W. Kent and Charles E. Strother. **Wooden Pole Fracture Energy in Vehicle Impacts.** Collision Safety Engineering, Inc. SAE Paper no. 980214.
- (19) Nystrom, G. A. and Kost G. **Application of NHTSA Crash Database to Pole Impact Predictions.** Failure Analysis Assoc. Inc. SAE Paper no. 920605.
- (20) Daily, John. **Energy Methods for Pole and Narrow Objects Impact.**
- (21) Francisco, Ezequiel Pelisoli. **Uso de Simulação para o Estudo do Fator de Segurança em um Poste de Concreto Armado Impactado por um Automóvel.** Trabalho de Conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Dezembro de 2010.
- (22) Negrini Neto, Osvaldo e Kleinübing, Rodrigo. **Dinâmica dos Acidentes de Trânsito, Análises, Reconstrução e Prevenção.** Campinas, SP: Millennium Editora, 2009.