



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR

Eleandro Campos Pereira¹; Fernando Furiatti Saboia²; Alexandre Castro Fernandes³; Lorena Nadine Baran⁴; Thais Mazzure Pedroso⁵; Luis Felipe Carraro⁶; Geovane Cardoso de Almeida⁷

RESUMO

O aumento do volume de tráfego pesado nas rodovias brasileiras gera como consequência maior risco de acidentes de trânsito, incrementando custos significativos aos cofres públicos, com despesas hospitalares, atendimento policial, reparos na infraestrutura, prejuízos aos usuários das vias causando danos ao patrimônio público e privado, além de risco a vida, pode-se levar em conta: danos físicos, emocionais e a perda econômica das vítimas. Mesmo com a modernização dos veículos, o excesso de peso, velocidade ou condições do local aumentam a chance de superaquecimento dos freios, resultando em falhas. O presente estudo trouxe solução para a implantação de um dispositivo de segurança – uma área de escape – na rodovia PR-170 km 461, em Pinhão/PR, onde o trecho por conta do seu formato é chamado de “curva da ferradura”. A declividade longa, seguida pela curva sinuosa tem a condição de causar sinistros onde veículos possam perder o controle e saírem da pista. Demandando a necessidade de implementação de melhorias que minimizem as consequências dos possíveis acidentes no local optou-se pela solução supracitada. A literatura mostra os benefícios deste dispositivo que cresce em quantidade no país, e, mesmo que ainda não existam normativas oficiais, torna necessário entender os parâmetros e a viabilidade técnico-econômica para a tomada de decisões. Foi realizado o estudo afim de definir um anteprojeto de uma área de escape para o local, limitado pela geologia da encosta o estudo foi concluído atendendo a limitação de espaço para uma solução em que sua projeção horizontal não ultrapassasse o limite de 101 metros. Construída sobre aterro em rocha e preenchida com argila expandida (cinasita), os estudos indicaram teoricamente que os veículos terão sua energia dissipada até pararem totalmente, devido ao condição do substrato (cinasita) que por seu poder de rolamento, seu comportamento fluido é capaz de no impacto do veículo proporcionar a transferência de energia até dissipá-lo totalmente, servindo como medida de segurança funcionalmente comprovada em casos críticos.

PALAVRAS-CHAVE: Área de escape; rodovias; veículos; caixa de retenção.

ABSTRACT

The increase in the volume of heavy traffic on Brazilian highways generates a greater risk of traffic accidents, increasing significant costs to public coffers, with hospital expenses, police assistance, infrastructure repairs, losses to road users causing damage to public and private property, in addition to the risk to life, the following can be considered: physical and emotional damage and the economic loss of the victims. Even with the modernization of vehicles, excess weight, speed or local conditions increase the chance of brakes overheating, resulting in failures. The present study brought a

¹ Engenheiro Civil, agente profissional, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: eleandropereira@der.pr.gov.br

² Engenheiro Civil e Diretor Geral do DER, Curitiba/PR. E-mail: fernando.furiatti@der.pr.gov.br

³ Engenheiro Civil e Diretor de Operações do DER, Curitiba/PR. E-mail: alexandrecaastro@der.pr.gov.br

⁴ Engenheira Civil, residente técnica no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: lorenanadine@hotmail.com

⁵ Engenheira Civil, empresa Concremat S/A, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: thais.pedroso@concremat.com.br

⁶ Engenheiro Civil, empresa Concremat S/A, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: luis.carraro@concremat.com.br ⁷

Técnico Projetista, empresa Concremat S/A, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: geovane.almeida@concremat.com.br



solution for the implementation of a safety device – an escape area – on the PR-170 km 461 highway, in Pinhão/PR, where the section, due to its shape, is called “horseshoe curve”. The long slope, followed by the winding curve, can cause accidents where vehicles can lose control and leave the road. Demanding the need to implement improvements that minimize the consequences of possible accidents on site, the aforementioned solution was chosen. The literature shows the benefits of this device that is growing in quantity in the country, and, even though there are no official regulations yet, it makes it necessary to understand the parameters and technical-economic viability for decision making. The study was carried out in order to define a preliminary project for an escape area for the site, limited by the geology of the slope. The study was completed considering the space limitation for a solution in which its horizontal projection did not exceed the limit of 101 meters. Built on rock embankment and filled with expanded clay (kinsite), studies have theoretically indicated that the vehicles will have their energy dissipated until they come to a complete stop, due to the condition of the substrate (kinsite) which due to its rolling power, its fluid behavior is capable of in the impact of the vehicle, it provides the transfer of energy until it is completely dissipated, serving as a functionally proven safety measure in critical cases.

KEY WORDS: Escape areas; roads; vehicles; retention box.

INTRODUÇÃO

As estradas desempenham um papel crucial na infraestrutura de transporte, facilitando o movimento de mercadorias e pessoas. Com isso, o aumento populacional e o desenvolvimento econômico da sociedade resultam em mais tráfego nas rodovias, o que influencia diretamente a um aumento de acidentes de trânsito. Controlar a velocidade em descidas é um desafio, e o sistema de frenagem pode ter sua eficiência diminuída devido à redução progressiva do atrito entre as lonas e os tambores de freio, o chamado “*fading*” juntamente com o superaquecimento do sistema. Esses fatores podem ocasionar a perda de controle do veículo por parte do condutor. (CONTINENTAL, 2021).

Uma solução inovadora para conter veículos desgovernados que está crescendo no Brasil são as áreas de escape, que se trata de um local adjacente à rodovia com a finalidade de contenção de veículos. Santos (2022) argumenta que em trechos com inclinações e curvas acentuadas, a instalação dessas áreas é uma alternativa a ser considerada. Segundo a Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte – AASTHO (2018), quando a topografia indica a necessidade de declive em outro alinhamento, é desejável e apropriado a implantação da área de escape para que os veículos fora de controle possam diminuir a velocidade e parar longe do fluxo de tráfego principal.

De acordo com o Relatório Executivo de Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras, emitido pela IPEA (Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada) e ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos), os acidentes de trânsito têm custos significativos para os cofres públicos e a sociedade, incluindo despesas hospitalares, reabilitação, atendimento policial, reparos de infraestrutura, prejuízos aos veículos e impactos emocionais. Esses custos abrangem uma ampla gama de áreas, desde cuidados médicos até consequências legais, evidenciando o impacto abrangente dos acidentes nas aglomerações urbanas brasileiras.

Conforme dados da PRF, em 2014 registrou-se 167.247 acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras, gerando 26.182 feridos graves e 8.233 vítimas fatais, o que custou para os cofres públicos mais de 12 bilhões de reais, desse montante mais de 60% oriundos de custos com as vítimas e mais de 37% custos com veículos, por danos materiais, perda de cargas e remoção de veículos. O maior custo recai sobre a perda de produção em relação às vítimas por motivos de afastamento ou sobrevida para produção de atividades econômicas na sociedade, relacionando-se com gastos de previdência social e empobrecimento das famílias, e em segundo lugar custos hospitalares.



Considerando uma média no custo unitário, os valores chegam a R\$ 261.689,00 por acidente, e em caso de morte aumentando consideravelmente para R\$ 664.821,00 por acidente.

Se tratando das rodovias estaduais e municipais do Brasil em 2014, o estudo IPEA estima que os custos com acidentes de trânsito ficaram na faixa de 24,8 a 30,5 bilhões de reais, ou seja, o custo dos acidentes nas vias urbanas, estaduais e federais impõe ao erário um grande empenho financeiro. Esses dados indicam sobretudo a necessidade constante de implementação de medidas preventivas, mitigadoras e melhorias na infraestrutura viária que protejam os usuários contra acidentes, assim como reforçar políticas públicas para educação, precaução, diminuição de quantidade de eventos de sinistros, bem como na redução da severidade deles, visto que impacta diretamente nos custos para a sociedade. Identificar pontos críticos, implementar melhorias na circulação e sinalização, e realizar intervenções de engenharia são essenciais para garantir uma infraestrutura rodoviária mais eficaz. A principal melhoria em análise, em relação ao objeto do estudo denominado “Curva da Ferradura”, localizado na rodovia PR-170 no município de Pinhão/PR, é a implantação de uma área de escape no final do declive do KM 467, seguido das melhoras nos dispositivos de sinalização. Cabe ressaltar, entretanto, que ainda que devidamente estudado e implantado, uma área de escape é dependente diretamente do fator humano, ou seja, mesmo que implantado, o funcionamento da melhoria dependerá da decisão do mesmo de utilizá-lo, para que a área possa funcionar efetivamente.

ABRANGÊNCIA DO ESTUDO DE UMA ÁREA DE ESCAPE

As primeiras áreas de escape com rampas de gravidade foram construídas nos EUA, e ao longo dos anos evoluíram para dispositivos mais seguros, como caixas de retenção com material solto, adaptáveis à topografia da estrada (SILVA, 2022). As rampas de escape devem ser construídas no alinhamento da estrada principal saindo para a direita da pista. (AASTHO, 2018). Como são posicionadas nas margens da via, devem ser feitas de preferência antes de curvas, em tangentes ou em alguns casos nas próprias curvas. Sendo que em curvas horizontais, é recomendado que a rampa seja implantada na continuidade da tangente, com o intuito de prevenir a entrada de veículos descontrolados na curva. Já nas tangentes horizontais, é importante estudar a forma de integrar as rampas à geometria já existente da estrada. Quanto maior for o ângulo ascendente da via de escape, menor será o comprimento necessário. (RODRIGUES *et al.*, 2023)

A AASTHO (2018) recomenda que uma pista de serviço adjacente à rampa deve ser implantada para que os veículos de manutenção possam adentrar a área. Esta faixa deve ser asfaltada, com sinalização clara para orientar o motorista sobre o eixo da rodovia e o acesso ao serviço, e deve ser localizada ao lado da caixa, com uma largura média de 3 metros, projetada de forma que o condutor não confunda a estrada de serviço com o leito de parada da rampa.

A presença de finos e sujeiras no decorrer do tempo resultam em uma redução na eficiência da caixa, sendo recomendável e indispensável acompanhar essa evolução para determinar o momento ideal para a realização da limpeza, escarificação e substituição do material.

Caixa de retenção

No interior da área de escape é feita uma caixa de retenção que utiliza agregados soltos para aumentar a resistência ao rolamento, desacelerar o veículo e manter ele no lugar após ter parado, onde a resistência ao gradiente atua no sentido de descida, oposto ao movimento do veículo (AASTHO,



2018). Esta caixa deve ter um comprimento capaz de fazer com que toda a energia cinética resultante do veículo em movimento seja dissipada ao adentrar o dispositivo. (SILVA, 2022)

Os materiais utilizados no preenchimento devem apresentar características arredondadas, de tamanho único, serem de baixa compactação, com o mínimo índice de materiais granulométricos finos, serem resistentes ao rolamento e com baixa resistência ao cisalhamento. (SANTOS, 2022)

Por conta da eficiência e custo-benefício, utiliza-se a argila expandida, também chamada de cinasita, que permite que o trecho da área de escape seja mais curto, pois a desaceleração é quase imediata, garantindo a frenagem de veículos longos e pesados.

Faixa auxiliar

Deve ser prevista uma grande distância de visão antes da rampa para que o condutor em alta velocidade possa entrar com segurança. O ângulo de saída da rampa deve ser de 5 graus ou menos, com uma faixa auxiliar para que o motorista se prepare para entrar. Para utilizar estas áreas o condutor deve primeiro manter o veículo na faixa da direita e seguir a área vermelha demarcada que indica a entrada da área, e após isso deve se manter na faixa marrom que é a caixa de contenção onde o veículo irá perder velocidade até parar. (FREITAS *et al.*, 2021).

A estrada principal deve ser estendida até um ponto próximo ou além da saída de modo que as rodas dianteiras entrem no leito simultaneamente. (AASTHO, 2018). Em rodovias com várias faixas de rolamento é recomendado que haja uma faixa auxiliar com comprimento mínimo de 300m para acessar a caixa de retenção. De modo geral, para total funcionalidade e segurança nenhuma parte da rampa de escape deve ficar oculta à visão do condutor. (WITHEFORD, 1992)

Drenagem

Nesse tipo de projeto, a drenagem é extremamente importante para evitar a contaminação e compactação do material. Assim, é recomendável a adoção de um sistema de drenagem antes da entrada da caixa, com drenos nas bordas e subterrâneo, com saídas transversais. Para impedir a infiltração entre o agregado e a sub-base, pode ser usado geotêxtil ou pavimentação. Já para a base, a fim de reter contaminantes provenientes de um vazamento de óleo diesel, é aconselhável aplicar um pavimento de concreto (AASTHO, 2018). Diante disto, o projeto de drenagem deve ser feito separado do pluvial e feitas verificações regulares para que haja uma eficiência da rampa e o escoamento adequado. (RODRIGUES *et al.*, 2023)

Sinalização

Deve ser adotada sinalização clara e compreensível, de forma chamativa para possibilitar que os condutores as acessem sem dificuldade, com pinturas no pavimento e de forma vertical. Com isso, evita-se que os condutores confundam e entrem por engano na área de escape. E para os que precisarão utilizá-la terão a oportunidade de conduzir-se à uma área mais segura, procurando frear e manter o controle do veículo e preservar suas vidas, assim como as dos outros, evitando danos importantes aos veículos envolvidos (RODRIGUES *et al.*, 2023). Também deve haver sinalizações que proibam os motoristas de estacionar ou parar nas proximidades, bem como durante a manutenção da área de escape com sinalização extras, indicando a não disponibilidade de uso. (ZANOLI, 2003)



PARÂMETROS ANALISADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE ESCAPE

Quanto maior a velocidade de entrada do caminhão, maior a distância percorrida dentro da caixa e maior o tempo necessário para que o caminhão pare totalmente. (ZANOLI, 2003). Com isso, o dimensionamento da área de escape deve considerar as velocidades e distâncias de veículos desgovernados em diferentes greides descendentes.

A velocidade no início do segmento de rampa é determinada pelo limite de velocidade em que um veículo pode chegar antes de tombar, para isso, utilizando-se a equação (1) demonstrada por Ejzenberg (2009).

$$V_T = \sqrt{\frac{127R}{1,15} \cdot \left(b_r \cdot \frac{t}{2h} + e \right)} \quad (1)$$

Onde a velocidade limite de tombamento lateral (V_T) é dada em km/h e o raio de curvatura (R) em metros. O fator de calibração (b_r) baseado nos estudos de Bonneson (2000), assume valores típicos entre 0,4 e 0,8, podendo ser considerado a média entre eles de 0,6. A superelevação na curva (e) é dada em m/m através da verificação in loco na curva analisada. Já a largura da bitola (t) é estimada por Gillespie (1992, p.312 *apud* VIAPIANA, 2020) em 1,9m para caminhões médios que também pode ser medida ou retirada dos dados do fabricante do veículo. Ejzenberg (2009) determina a altura do centro de gravidade total do veículo em relação ao solo (h), em metros, considerando tanto o caminhão vazio quanto carregado, através da equação (2):

$$h = (m_v \cdot h_v) + (m_c \cdot h_c) / (m_v + m_c) \quad (2)$$

Onde:

m_v = massa do veículo (T)

m_c = massa da carga (T)

h_v = altura do centro de gravidade do veículo (m) h_c = altura do centro de gravidade da carga (m)

Outra forma, citada por Ejzenberg (2009), considera os veículos totalmente carregados, gerando alturas superestimadas, através da equação (3):

$$h = \frac{(h_{total} + h_{base})}{2} \quad (3)$$

Onde:

h = altura do centro de gravidade do semi-reboque em relação ao solo (m)

h_{base} = altura da base de carga (a plataforma do reboque) em relação ao solo (m)

h_{total} = altura total do reboque em relação ao solo (m)

Tendo a velocidade de tombamento pode-se calcular a velocidade no final do segmento de rampa, que será a máxima velocidade que o veículo chegará no início da caixa de cinasita, demonstrada pela Arteris (2018), através da equação (4):

$$V_f^2 = V_i^2 - 254 \cdot \Delta L \cdot (R \pm G) \quad (4)$$



Onde: V_i = velocidade no início do segmento (km/h) velocidade de tombamento
 V_f = velocidade no final do segmento (km/h)

ΔL = comprimento do segmento percorrido (m) R = resistência de rolamento do material (m/m)

G = greide do segmento de rampa (m/m)

A desaceleração que o veículo irá sofrer é dependente da velocidade de entrada no dispositivo, de acordo com as propriedades de rolamento do material de preenchimento da caixa de retenção, a profundidade dela e a inclinação da rampa. (SILVA, 2022)

Para calcular a velocidade de entrada, é necessário considerar que os freios do veículo estejam inoperantes, analisando as forças que atuam no veículo em uma descida. A AASHTO (2018) recomenda utilizar para velocidades de entrada o intervalo de 130 a 140km/h mesmo que a velocidade máxima que os veículos acessam a rampa seja aproximada. Em terrenos onde o comprimento da rampa é limitado, podem ser implantados barris preenchidos com água ou material semelhante para oferecer uma última chance de parada aos veículos desgovernados. (WITHEFORD, 1992)

A desaceleração dos veículos na área de escape depende da velocidade de entrada, das propriedades do material de preenchimento da caixa de retenção, da profundidade e da inclinação da rampa. Foram desenvolvidos dois modelos para calcular o comprimento ideal para a caixa de retenção. O modelo matemático proposto pela Roads and Traffic Authority – RTA, da província de Queensland, na Austrália (REIS; PEDRINI, 2023), consiste em determinar o comprimento da caixa através da seguinte fórmula (5):

$$L = \frac{v^2}{(26a + 2,55X)} \quad (5)$$

Onde:

L: Comprimento da caixa de retenção, excluindo os 50 metros iniciais (m); V : Velocidade de entrada na caixa de cinasita (km/h);

A: Desaceleração

X: Inclinação do dispositivo (%).

Os primeiros 50m são excluídos do cálculo do comprimento pois já são considerados para a zona de transição na profundidade da caixa de retenção.

Segundo a AASHTO levando em consideração a inclinação da caixa de retenção e a resistência de rolamento do material de preenchimento, o comprimento é calculado pela fórmula (6):

$$L = \frac{v^2}{254(R \pm G)} \quad (6)$$

Onde:

L: Comprimento da caixa de retenção (m);

V : Velocidade de entrada no dispositivo (km/h);



R: Coeficiente de rolamento do material de preenchimento; G: Porcentagem de inclinação utilizada na caixa dividida por 100.

A largura da rampa deve permitir acomodar mais de um veículo simultaneamente, sendo recomendada uma largura mínima de 8m, mas preferencialmente entre 9m e 12m. (AASTHO, 2018). Uma pista de serviço ao lado esquerdo e/ou direito da caixa é necessária para manutenção e retirada de veículos, com uma largura média de 3 a 5m. A profundidade dos primeiros metros da caixa de retenção deve ser menor para evitar o afundamento das rodas dos veículos, minimizando os impactos de uma desaceleração brusca e facilitando sua remoção.

Como não há uma regra para definir a profundidade exata da caixa de retenção, cada estudo realizado dá suas diretrizes pra esse dimensionamento. O estudo de Witheford (1992) não recomenda a profundidade maior que 45cm. Já a AASHTO (2018) recomenda uma profundidade inicial de 7,5cm e entre os 30 a 60m alcance a profundidade mínima total de 100cm tornando-se constante ao longo do dispositivo.

A análise feita nos EUA sugere profundidades mínimas de 30cm, recomendando que no início da caixa de retenção a profundidade seja de 15 cm e no trecho entre 30 a 60 m de comprimento a profundidade variando entre 46 a 90 cm. (ZANOLI, 2003)

Na Austrália recomenda-se que nos primeiros 50m da caixa de retenção aumente gradualmente de 0 até 35cm, onde esse trecho tem como finalidade amenizar os efeitos da desaceleração, proporcionando conforto durante a frenagem. Posteriormente são 100m de profundidade constante de 35cm, seguindo nos próximos 25m a transição até 45cm. (ZANOLI, 2003)

Áreas de escape no Brasil

A ausência de normas no país faz com que seja necessário utilizar os parâmetros estrangeiros como base para a tomada de decisão da localização, geometria, materiais, sinalização e manutenção desses dispositivos. Com isso, atualmente, são encontradas poucas áreas de escape nas rodovias brasileiras. A primeira área de escape com caixa de retenção foi implantada em 2001, no Km 42,6 da SP-150 da Via Anchieta, em São Paulo.

A segunda foi feita no ano de 2011 no km 671,7 da BR-376 em Guaratuba no Paraná. Esta área de escape também conta com tambores cheios de água para auxiliar na contenção dos veículos e não possui pórtico como a do Km 667,3. (RODRIGUES *et al.*, 2023)

A terceira área também está disposta na SP-150 da Via Anchieta em São Paulo desde 2014, e se encontra no Km 49 da rodovia.

A quarta foi implantada em 2018 no Km 37,9 da BR-277, sentido litoral na região da Serra do Mar, em Morretes-PR, composta por uma caixa preenchida com cinasita.

A quinta foi inaugurada em 2018 e está localizada no km 353 da BR-116/SP, rodovia Régis Bittencourt Serra do Cafezal, entre as cidades de Miracatu e Jucitiba.

A sexta encontra-se na BR-146 no Km 87 em Serra do Salitre-MG, implantada no ano 2019. Conhecida por um declive sinuoso, fica próxima ao município de Araxá (MG), tendo a caixa de retenção preenchida de cascalho.

A sétima foi Inaugurada em novembro de 2019 na BR-376, no Km 667,3, em Guaratuba-PR. Ela conta com uma caixa de retenção de 150 metros, com 1,5 metros de profundidade, sendo 20 cm de



macadame seco, 10 cm de brita graduada simples e o restante de cinasita, tendo também duas faixas laterais para operação e transbordo (ARTERIS, 2020). Também possui uma inovação que é o pórtico rolante utilizado para remover os veículos que é uma estrutura automatizada apoiada por duas pontes rolantes com trilhos que se estendem por toda a área de escape, tendo capacidade de movimentar até 70 toneladas de carga e operada por uma equipe de até cinco pessoas e que utilizam controles remotos para movimentar a estrutura que permite a remoção mais rápida do veículo sinistrado.

A oitava área de escape foi implantada em 2022 e fica no trecho entre a BR-040 e o trevo do bairro Betânia, km 541, chamada de “descida do Betânia”.

Através do programa *Google Earth* e juntamente com dados obtidos por pesquisas, obteve-se as estimativas da Tabela 1, a seguir, que faz a comparação entre as características das áreas de escape presentes no Brasil.

Tabela 3. Características das áreas de escape no Brasil. Elaborada pelos autores.

Rodovia	SP-150	SP-150	BR-376	BR-376	BR-277	BR-116	BR-146	BR-040
Km	42,6	49	671,7	667,3	37,9	353	87	541
Comprimento do taper (m)	70	60	90	455	25	345	35	50
Comprimento da faixa auxiliar (m)	-	-	30	50	100	-	40	50
Comprimento caixa de retenção (m)	85	85	120	150	175	130	130	120
Largura da caixa de retenção (m)	5	5	5	5	5	5	5	5
Largura da pista de serviço (m)	3,5	5	3	5	5	3	3,5	3,5
Profundidade (m)	1	1,2	1,2	1,5	-	1,1	-	0,9
Material de preenchimento	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cascalho	Cinasita

ESTUDO DE CASO NA RODOVIA PR-170 EM PINHÃO/PR

A PR-170 entre os municípios de Pinhão e Bituruna é uma rodovia estadual implantada na década de 80 em parceria e convênio com a Companhia de Energia Copel, projetada em pista simples. A chamada “Curva da Ferradura”, como é conhecida na região em razão do seu formato, conforme a Figura 1, situa-se no KM 467 da PR-170, coordenadas UTM SIRGAS 2000 (433316.00 m E, 7124647.00 m S).

Próximo ao local está a Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz Rocha Netto – Foz Areia, na bacia do Rio Iguaçu. Esse segmento é marcado por declives acentuados e longos, apresenta relevo montanhoso, com várias sequências de curvas horizontais que demandam ao condutor tomar muita atenção para visibilidade, redução na velocidade e cuidado na direção.



Figura 1. Curva da Ferradura (GOOGLE MAPS, 2024).

De acordo com os dados da Polícia Rodoviária Estadual e a Coordenadoria de Engenharia de Tráfego e Segurança Rodoviária - DER/PR, a rodovia PR-170 nesse ponto é marcado reincidência de acidentes são eles, eventos de tombamentos/capotamentos, onde se situa a Curva da Ferradura. Isto se deve em vista da grande sinuosidade e pela curva anteceder um declive acentuado. O trecho em questão é denominado “170S0570EPR – de AC. PINHÃO para BARRAGEM FOZ DO AREIA (A)” com extensão de 41,24 km, se inicia no KM 427,96 ao 469,20, como mostra a Figura 2.

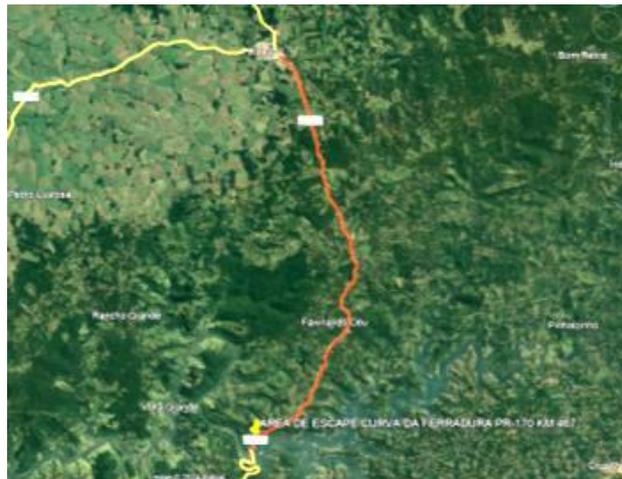


Figura 2. Curva da Ferradura (GOOGLE EARTH, 2024).

Foram analisados o número de acidentes nesse trecho por quilômetro, o tipo do acidente, e a quantidade de envolvidos, de óbitos e de feridos no período de 2018 até 2024. Observou-se que na extensão total do trecho, com 41,24 quilômetros, em todos os últimos 7 anos analisados, aconteceram acidentes no KM 467 em sua quase totalidade por tombamento e/ou capotamento; sendo este KM em específico o ponto mais citado com mais eventos apresentados em todos os períodos.

No total de todo período analisado foram registrados 36 acidentes por tombamento, choque ou capotamento no KM 467, o que envolveu 48 pessoas, com 16 feridos e 4 mortes. Desses acidentes, mais de 11% registraram-se com óbitos, representando um índice significativamente alto.



Definida por arco de aproximadamente 180°, essa curva obriga o condutor a manter condições de equilíbrio de forças durante todo o seu desenvolvimento por um considerável período de tempo. Possui um declive longitudinal que a antecede, de aproximadamente 400 metros e inclinação 9%, prosseguido por uma curva suave à direita no KM 467,26, chegando em seguida até a curva da ferradura à esquerda no Km 467,440.

Quando os limites de velocidade e sinalização não são respeitados, falhas no sistema de freios de veículos pesados podem ocorrer, levando a excesso de velocidade, perda de controle, manobras evasivas, derrapagem e tombamento.

É fato que os principais motivantes a incidentes nesse local são o relevo com a longa rampa descendente e o greide acentuado, que causam o aumento natural da velocidade pela ação da gravidade, os pequenos raios das curvas horizontais, aliados à sobrecarga na frenagem, veículos com carga excessiva e/ou imprudência dos motoristas. Medidas preventivas são exigidas pelos usuários da rodovia e moradores da região devido ao alto índice de acidentes no local.

A equipe técnica do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER – Superintendência dos Campos Gerais elaborou um anteprojeto para implantação da área de escape no local em questão utilizando como base os modelos de áreas de escape existentes no Brasil, bem como a literatura atual.

RESULTADOS

Para dimensionar o dispositivo, foram considerados parâmetros como a velocidade diretriz da via de 80 km/h, o raio da curva horizontal de 240m, a rampa máxima de 9,04% e a superelevação máxima de 6,20%. Com base na topografia local, a caixa de retenção pode atingir 101m de comprimento, sendo necessário verificar sua capacidade de parar os veículos desgovernados de forma segura.

Para calcular a altura do centro de gravidade do veículo em relação ao solo (h), considerou-se a altura máxima legal do veículo de 4,4m, carregado com metade da sua capacidade de carga, com a altura de base da carga de 1,4m acrescida de 0,75m, resultando em uma altura de 2,15m.

A velocidade máxima da curva no KM 466+800 é calculada como a velocidade de tombamento, considerando o fator de calibração de 0,6 e bitola do veículo de 1,9m, resultando em 93,11 km/h pela equação (4).

A velocidade em que o veículo chega no final da rampa que antecede a “curva da ferradura” será a velocidade com que ele entrará na área de escape, com isso, tendo o comprimento de rampa de 400m, com uma inclinação de 9,04% e resistência de rolamento do material do leito – concreto asfáltico - de 0,012 m/m, e utilizando a velocidade inicial na rampa como sendo a velocidade de limite de tombamento de 93,11km/h, obteve-se a velocidade final de 128,987km/h.

Para verificar o comprimento da caixa de cinasita, calculou-se a redução de velocidade atingida pelo veículo ao percorrer os 101m, utilizando o modelo da AASHTO. Considerando o coeficiente de rolamento do material de preenchimento – cinasita – de 0,577 e a inclinação de 5,77%, tem-se a velocidade de 127,60km/h.

Assim sendo, no ponto de entrada da caixa com 128,987 km/h, ao percorrer os 101m da caixa projetada, o veículo tipo resultaria na velocidade residual de 1,38 km/h, considerada nesse caso irrisória, visto que os cálculos e fatores adotados são superestimados e que, historicamente, os veículos conseguem reduzir a velocidade rapidamente, parando antes do final da caixa de escape. Admitiu-se uma faixa auxiliar/taper de 445 metros antecedendo a caixa de escape, em pavimento flexível, com sinalização horizontal em formato xadrez, nas cores branco e vermelho, com largura de



3,50 metros. Também foi previsto um pavimento final após a caixa com extensão de 9,00 metros, para auxílio na retirada dos veículos e na manutenção.

Para a área de escape foi considerado estrutura em aterro atendendo uma inclinação, limitada por barreiras rígidas de concreto. Entre o espaço da caixa e da faixa pavimentada foi adotado contenção de concreto armado. Para a caixa de cinasita após a camada final de terraplenagem, adotou-se uma camada de 20 cm de macadame seco, seguido de 10 cm de brita graduada simples, manta geotêxtil tecido e por fim preenchimento da caixa com argila expandida, com profundidade gradual variável até 1,20 m. Dentro da caixa aplicou-se inclinação de 4% das laterais para o centro da caixa, com dreno longitudinal até caixa coletora, de modo a permitir a drenagem adequada dos líquidos perigosos. O anteprojetado pode ser observado na Figura 3 e 4, a seguir.



Figura 3. Planta baixa da área de escape projetada. Fonte: Os autores, 2024.

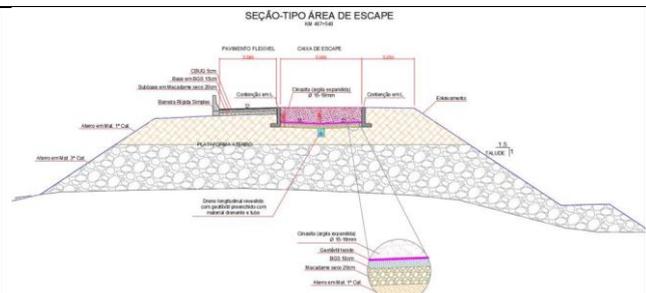


Figura 4. Seção tipo da área de escape. Fonte: Os autores, 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que hoje a literatura é escassa e recente, as aplicações das áreas de escape do Brasil estão sendo realizadas e, através disso, entende-se a importância da definição de parâmetros para adequada implantação. Esses dispositivos cada vez mais demonstram sua utilidade e funcionalidade em rodovias brasileiras, visto que impactam diretamente em salvar vidas no trânsito, além de a viabilidade técnico-econômica apresentar grandes benefícios, especialmente ao se desviar do altíssimo custo de um acidente de trânsito nas rodovias, principalmente as estaduais.

Embora não haja especificações ou normativas oficiais publicadas no Brasil, a necessidade de implantações de dispositivos de segurança, como as áreas de escape, em pontos críticos e específicos de rodovias faz com que abra caminho para serem desenvolvidas. O estudo de caso para a PR-170 foi uma situação específica e potencial para a aplicação de uma área de escape, visto ser uma curva com grande declive, seguida de curva horizontal em quase 360°, com grande potencial para trazer bons resultados. Em síntese, os dados apresentados destacam a urgência de implementar medidas preventivas e de melhoria na infraestrutura viária para proteger os usuários contra acidentes.

Ao priorizar obras e intervenções de engenharia, não apenas se atende às necessidades imediatas, mas também se garante a sustentabilidade da rede viária a longo prazo, além de preservar vidas.

Enfim, conclui-se que o estudo apresenta dados pertinentes para a tomada de decisão no trecho em questão, e a solução encontrada pode ser utilizada como suporte para projeção de novos dispositivos de área de escape nas rodovias brasileiras, servindo assim como modelo de referência.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials. 2018.
- ARTERIS. **Nova Área de Escape da BR-376**. Joinville, 21, 2020. Disponível em: <<https://www.arteris.com.br/fiquepor-dentro/noticias-e-releases/nova-area-de-escape-da-br-376/>> Acesso em: dez. 2023.
- ARTERIS. **Projeto Executivo de Engenharia Rodoviária Para Área de Escape - km 667+300, BR-376/PR - Volume 1**. Outubro, 2018.
- BONNESON, J. A. **Superelevation distribution methods and transition designs**. Washington, D.C.: NCHRP – National Cooperative Highway Research Program/TRB – Transport Research Board, 2000.
- CONTINENTAL. **Perigos do Superaquecimento dos Freios**. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.conti.com.br/newsroom/newsroom-truck-and-bus/perigos-superaquecimento-freios/>> Acesso em: jan. 2024.
- EJZENBERG, S. **Os Veículos Pesados e a Segurança no Projeto das Curvas Horizontais de Rodovias e Vias de Trânsito Rápido**. São Paulo, SP, Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 2009. 245p.
- FREITAS, A. D.; SILVA, E. S.; ASSIS, M. C.; SANTANA, R. E. **Áreas de Escape e Seus Benefícios na Malha Rodoviária Brasileira**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade UNA de Catalão – Campus Santa Cruz, 2021.
- IPEA - Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada; ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos. **Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas**. Brasília, 2003.
- REIS, G. F.; PEDRINI, J. B. **Segurança viária: análise de critérios técnicos para tomada de decisão de implantação de área de escape**. Projeto Multidisciplinar para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Infraestrutura Urbana. Instituto Federal Do Espírito Santo. Vitória, ES. 2023.
- RODRIGUES, E. S.; PENA, F. S.; MELO, J. O.; ROSA, D. J. Q. **Rampa de Escape**. Revista Paramétrica, v. 15, n. 1, jan./jul. 2023.
- SANTOS, D. L. G. **Análise do projeto geométrico e propostas de intervenções na rodovia BR-364, trecho Serra de São Vicente**. Trabalho de Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal De Mato Grosso. Cuiabá, MT. 2022.
- SILVA, R. A. **Estudo de eficiência das áreas de escape e seu impacto na queda da acidentalidade relacionada a transporte de cargas pesadas: estudo de caso ERS-431**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 2022.
- VIAPIANA, C. **Método para determinação de limite de tombamento lateral estático e margem de segurança de veículos pesados em curvas: estudo de caso da ERS-122**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2020.
- WITHEFORD, D. K. **Truck Escape Ramps**. NCHRP Synthesis 178, Transportation Research Board, National Research Council, Washinton, DC, 1992.
- ZANOLI, P. R. **Área de escape para caminhões desgovernados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.