



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DENNIS DENIAM DE ALBUQUERQUE RIBEIRO

**PROJETO CONCEITUAL DE BARREIRA DE SEGURANÇA
FLUIDODINÂMICA APLICADA A CIRCUITOS AUTOMOBILÍSTICOS**

CARAÚBAS

2023

DENNIS DENIAM DE ALBUQUERQUE RIBEIRO

**PROJETO CONCEITUAL DE BARREIRA DE SEGURANÇA
FLUIDODINÂMICA APLICADA A CIRCUITOS AUTOMOBILÍSTICOS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jackson de Brito
Simões

CARAÚBAS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

R484p Ribeiro, Dennis.
 PROJETO CONCEITUAL DE BARREIRA DE SEGURANÇA
 FLUIDODINÂMICA APLICADA A CIRCUITOS
 AUTOMOBILÍSTICOS / Dennis Ribeiro. – 2023.
 64 f. : il.

 Orientador: Jackson de Brito Simões.
 Monografia (graduação) – Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2023.

 1. Eau rogue. 2. Barreira de segurança. 3.
 Válvula. 4. energia. 5. Acidente. I. Simões,
 Jackson de Brito , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DENNIS DENIAM DE ALBUQUERQUE RIBEIRO

**PROJETO CONCEITUAL DE BARREIRA DE SEGURANÇA
FLUIDODINÂMICA APLICADA A CIRCUITOS AUTOMOBILÍSTICOS**

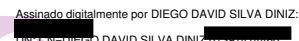
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 10 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

 Assinado de forma digital por JACKSON DE BRITO SIMÕES
Dados: 2023.10.24 06:31:27 -03'00'

Jackson de Brito Simões, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

DIEGO DAVID SILVA DINIZ:  Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA DINIZ:
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ, O=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, OU=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2023.10.23 18:17:00-03'00'
Foxit PhantomPDF Versão: 10.1.4

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz (UFERSA)
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente
AURELIANO XAVIER DOS SANTOS
Data: 23/10/2023 15:36:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Aureliano Xavier Dos Santos (UFRPE)
Membro Examinador

Manoel Albuquerque Rêgo Junior

(In Memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e aos meus pais Manoel Albuquerque Rêgo Junior e Maria José Ribeiro Albuquerque por todo o apoio e dedicação na minha formação como indivíduo, pela fé e confiança de que a educação é e sempre será o melhor caminho a se seguir, sendo eu a prova de que estão certos.

Quero deixar minha imensa gratidão a todos os amigos e conterrâneos que me deram suporte ao longo desta caminhada, além de deixar aqui um agradecimento especial a todos os caraúbens que me acolheram e ajudaram no período residindo em Caraúbas.

Não posso deixar de mencionar minha grande família da vila acadêmica da Ufersa Caraúbas na qual rimos e choramos juntos. A todos vocês, presentes ou não na vila, quero que saibam que os melhores momentos da minha vida foram ao lado de todos vocês, levo comigo e amo todos vocês.

Agradeço aos meus professores do curso de engenharia mecânica com destaque ao meu orientador Jackson Simões por toda a orientação e paciência no decorrer de nossa parceria para a realização deste trabalho, minha profunda gratidão

Por fim mas não menos importante, minha querida Amanda, que durante meu estágio teve papel fundamental para meu sucesso, com você fui o último homem de pé

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

O presente trabalho foca na análise das curvas Eau Rouge e Raidillon, situadas no icônico Circuito de Spa-Francorchamps com um enfoque nas barreiras de segurança presentes nessa área do circuito. Observou-se que, ao longo dos anos, essas barreiras mostraram ser ineficientes na dissipação de energia cinética dos acidentes. Para abordar essa questão, realizou-se uma investigação abrangente que compreendeu a análise de 10 acidentes ocorridos no período de 1992 a 2023. Com objetivo central deste estudo foi desenvolver uma barreira de segurança mais eficiente, capaz de proteger os pilotos e garantir a segurança das competições automobilísticas. Utilizando simulações baseadas em referências bibliográficas, foi possível determinar a eficácia da válvula como um componente para a melhoria da segurança nesse contexto. A implementação da válvula em uma nova configuração de barreira de segurança representaria uma melhoria na eficácia desses dispositivos. Além disso, observou-se que a válvula poderia ser ajustada e adaptada de acordo com as especificidades do circuito, tornando-a uma alternativa para melhorar a segurança em curvas de alta velocidade, como Eau Rouge e Raidillon.

Palavras-chave: Eau rouge; Barreira de segurança; válvula; energia; acidente;

ABSTRACT

This work focuses on the analysis of the Eau Rouge and Raidillon curves, located on the iconic Circuit de Spa-Francorchamps with a focus on the safety barriers present in this area of the circuit. It was observed that, over the years, these barriers proved to be inefficient in dissipating kinetic energy from accidents. To address this issue, a comprehensive investigation was carried out, which included the analysis of 10 accidents that occurred between 1992 and 2023. The central objective of this study was to develop a more efficient safety barrier, capable of protecting pilots and ensuring safety of automobile competitions was using simulations based on bibliographical references, it was possible to determine the effectiveness of the valve as a component for improving safety in this context. Implementing the valve in a new safety barrier configuration would represent an improvement in the effectiveness of these devices. Furthermore, it was noted that the valve could be adjusted and adapted according to the specifics of the circuit, making it a solution to improve safety in high-speed corners such as Eau Rouge and Raidillon.

Keywords: Eau rouge; Security barrier; Valve; Energy; Accident;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Circuito de Spa-francorchamps no ano de 1934	18
Figura 2	– Mapa detalhado do circuito de Spa-Francorchamps atual (2023)	19
Figura 3	– Telemetria do carro Ferrari de Carlos Sainz, pole position do GP da Bélgica de Formula 1	20
Figura 4	– foto aérea discriminando as curvas <i>eau rouge e radillion</i>	20
Figura 5	– Momento eminente em que dois carros NASCAR colidem em “T”	22
Figura 6	– RB5 carro da equipe Red Bull na temporada 2009 de Formula 1.....	23
Figura 7	– Desenho representativo de um carro Esporte protótipo de <i>endurance</i>	24
Figura 8	– Exemplo de carro GT modelo Subaru WRX Gr.3.....	24
Figura 9	– Barreiras de segurança TECPRO organizadas.....	25
Figura 10	– Representação da válvula de tesla.....	27
Figura 11	– Exemplificação dos tipos de fluxos (direto e indireto) no interior da válvula...27	
Figura 12	– Parâmetros de projeto para a válvula de tesla.....	28
Figura 13	– Telemetria do piloto Antonio Giovinazzi nas 1000 horas de Spa, categoria esporte protótipo (EP).....	35
Figura 14	– Telemetria do carro do piloto Charles Leclerc no grande prêmio da Bélgica de Formula 1.....	35
Figura 15	– Matriz QFD para o projeto de barreira fluidodinâmica.....	38
Figura 16	– Desenho técnico do dispositivo receptor.....	38
Figura 17	– Desenho técnico da placa de compósito de fibra de carbono.....	40
Figura 18	– Desenho técnico do elemento 1 do transferidor.....	41
Figura 19	– Desenho técnico do elemento 2 do transferidor.....	42
Figura 20	– Representação técnica da válvula de tesla.....	43
Figura 21	– Fluxo relacionado ao número de Reynolds.....	44
Figura 22	– Simulação demonstrando os vórtices em um fluido transitando em uma válvula de Tesla.....	45
Figura 23	– Projeto conceitual completo da barreira de segurança.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Variação da energia de impacto absorvida em função da capacidade de absorção de energia das fibras de carbon.....	40
Gráfico 2	–	Relação entre diodicidade e Número de Reynolds.....	44
Gráfico 3	–	Gráfico comparativo relacionando a diodicidade, em função do número de válvulas para diferentes números de Reynolds.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Disposição da metodologia utilizada neste trabalho.....	29
Tabela 2	–	Carta de catalogação utilizada para mapear os casos.....	31
Tabela 3	–	Organização dos dados obtidos através das cartas de catalogação	32
Tabela 4	–	Aspectos desejados do Receptor.....	37
Tabela 5	–	Parâmetro influentes no projeto.....	37
Tabela 6	–	Propriedades físicas do PEBD.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

F1	Formula 1
GP	Gran Prix
SPA	Spa-Francorchamps
FIA	Federação Internacional de Automobilismo
GT	Gran Turismo
LMP	Le Man Prototype
RACB	Royal Automobile Club Belgium
IRL	Indy Racing League
MwRSF	Midwest Roadside Safety Facility

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	GESTÃO DO CONHECIMENTO	16
2.1	Uma breve história sobre o automobilismo	16
2.2	Circuito de Spa-Francorchamps	17
2.2.1	Curvas <i>Eau Rouge</i> e <i>Radillion</i>	18
2.2.2	Acidentes fatais	20
2.2.3	Colisão em “T”	20
2.2.4	Categorias que correm em SPA	21
2.2.4.1	Formula 1	22
2.2.4.2	Esporte Protótipo	22
2.2.4.3	Gran Turismo	23
2.3	Barreiras de segurança	24
2.4	Energia cinética	25
2.5	Válvula de Tesla	26
3.	OBJETIVOS	28
3.1	Objetivo Geral	28
3.2	Objetivos específicos	28
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Fase 1	29
4.2	Fase 2	30
4.3	Fase 3	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1	Organização dos dados	32
5.2	Energia cinética do impacto	34
5.3	Projeto Conceitual	36
5.3.1	Receptor	36
5.3.2	Transferidor	41
5.3.3	Dissipador	42
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
7.	REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO	49
8.	APÊNDICES	55

1 INTRODUÇÃO

Desde a criação do automóvel, em 1885, era questão de tempo até que as empresas entrassem em disputa para medir forças sobre as qualidades de suas máquinas. O desenvolvimento tecnológico relacionado aos carros foi focado em vários fatores, mas a disputa começou a ser no quão rápido suas máquinas podem chegar, ou seja, o quanto a ciência pode desenvolver aspectos dos automóveis para sair de um ponto a outro em menor tempo possível.

Intrinsicamente, o desenvolvimento dos primeiros automóveis ocorreu em paralelo com o desenvolvimento dos motores, na qual foram se convertendo de motores a vapor para motores de combustão interna gerando mais potência e velocidade. As empresas, a fim de mostrar superioridade de carro para carro, começaram a competir publicamente, não só financeiramente, mas também em corridas denominada de *Grand Prix* (GP).

Com o aumento da velocidade dos carros e pouco desenvolvimento em segurança aplicada nos circuitos, acidentes com consequências fatais tornaram-se comuns. Eventos como as 24hrs de *Le Mans* tornaram-se famosos tanto pela demonstração de velocidade como pela letalidade do público e pilotos. Alguns circuitos herdaram tais características como, por exemplo: Indianapolis, Autódromo de Modena, Circuito de Spa-Francorchamps e etc.

Circuitos como o de Spa-Francorchamps (SPA), têm certas peculiaridades na qual se tornam um desafio a mais para os pilotos. O circuito de SPA conta com uma sequência de duas curvas em seu primeiro setor na qual já vitimou mais de 40 pilotos desde 1922, denominadas *Eau Rouge* e *Radillion*. Algumas características que se pode citar é sua alta velocidade em até 300 km/h, a inclinação em 40 metros do início até o fim e seu ponto cego no final das curvas.

Com o intuito de minimizar os riscos aos pilotos a análise da cinemática de acidentes, fatais ou não, vem sendo realizada por parte de dirigentes de competições automobilísticas que analisam e busca compreender como um acidente burla as camadas de seguranças impostas pela engenharia no carro de competição pode ajudar a evitar casualidades indesejáveis.

A finalidade do trabalho proposto é trazer um projeto conceitual de barreira de segurança fluidodinâmica e para isso será analisado por via de vídeo a cinemática de acidentes em competições oficiais ocorridos nas curvas *Eau Rouge* e *Radillion* do circuito de Spa-Francorchamps localizado na Bélgica para coletar, organizar, analisar dados e informações que alicercem o desenvolvimento do conceito.

2 GESTÃO DO CONHECIMENTO (GC)

2.1. Uma breve história sobre o automobilismo

Assim como a humanidade, o automóvel não possui um exato momento de criação. Sua evolução aconteceu no decorrer dos séculos XVIII e XIX, fruto de sucessivas aproximações e adaptações tecnológicas e possuíam objetivos comuns como uma locomoção mais rápida, um mínimo de esforço dos ocupantes e uma maior comodidade a esses. (OLIVEIRA, 2010)

A construção do primeiro automóvel movido à gasolina de sucesso levou a eventos de corrida de automóveis a combustão. Era abril de 1887, quando a primeira corrida aconteceu na França. A rota tinha 1,2 milhas de comprimento. (MORGAN, 2017) Em seus primórdios, no final do século passado, o esporte automobilístico tinha como objetivo principal demonstrar a velocidade e a segurança dos carros. (MÖDERLER, 2017)

Em 1894, foi organizada pela revista parisiense *Le Petit Journal* a primeira prova oficial na França, entre Paris para Rouen. Na época foi chamada de “*Concours des Voitures sans Chevaux*” (Competição de Carros sem Cavalos). O conde Jules-Albert de Dion foi o primeiro a chegar a Rouen no tempo de 6 horas e 48 minutos, numa velocidade média impensável para os dias de hoje, de 19 km/h. (SANTOS, 2015)

Nos primeiros anos do século XX, multiplicou-se a realização de provas de resistência, em estrada aberta, com percursos longos e duros. Foi o caso da célebre Paris-Viena que, com quase 100 km de extensão, contou com 137 concorrentes à partida, no dia 22 de junho de 1902. A travessia da Suíça saldou-se por uma razia enorme de viaturas, tendo sido eliminados quase todos os favoritos. À chegada, apenas 80 carros cortaram a meta, liderados por Marcel Renault, tripulando o seu Renault 16 cavalos que, assim, averbou uma vitória inesperada, à espantosa média de 62,5 km/h. (FERREIRA, 2002)

Os primeiros circuitos foram adaptados de hipódromos, utilizados para corridas de cavalos. Entre os primeiros construídos especificamente para o automobilismo do mundo estão o Milwaukee Mile (Estados Unidos, 1903), Brooklands (Inglaterra, 1907) e Indianapolis Motor Speedway (1909 Estados Unidos). Outros bem famosos também surgiram há quase 100 anos, como o Spa-Francorchamps na Bélgica, em 1922 e o Circuit de la Sarthe, na França, em 1923. (JAGUAR, 2018)

2.2 Circuito de Spa-Francorchamps

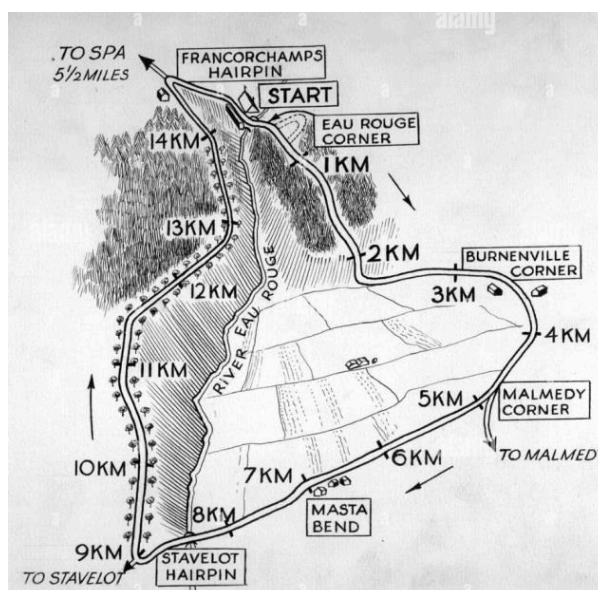
Stavelot é uma cidade belga onde, logo após o fim da Primeira Guerra, os automobilistas locais começaram a dirigir nas estradas da região. Até então a cidade era conhecida por suas águas terapêuticas, mas com a formação de um circuito (Spa-Francorchamps) que combinava longas retas e trechos rurais sinuosos começou a atrair mais corredores. (CONTESINI, 2019)

O circuito Spa-Francorchamps foi criado, em 1921, para corridas de motos. Seu construtor fez uso de estradas públicas que se misturavam ao redor das belas florestas das ardenas, como visto na figura 1, para criar uma magnífica pista de 14 quilômetros de extensão que foi muito rápida, muito desafiadora e muito perigosa. (NOBLE; HUGHES, 2004)

Em 1924, os dirigentes do RACB, conscientes da importância de organizarem a sua própria corrida de resistência, colocaram de pé a primeira edição das 24 Horas de Spa. A principal razão desta decisão foi a de permitir aos construtores belgas a oportunidade de medirem forças com os seus concorrentes estrangeiros e de colocarem em prática aquilo que tinham aprendido em Le Mans. (AUTOSPORT, 2017)

Assim, como aconteceu nas outras pistas da Europa, a Segunda Guerra Mundial trouxe destruição ao circuito de Spa, que teve que esperar até 1947 para que a reconstrução fosse concluída, com a mudança da curva Stavelot, que foi alterada para que o circuito se mantivesse dentro dos limites da cidade e a retirada da chicane Malmedy, que tinha sido introduzida numa mudança em 1934. (VILCHE, 2020)

Figura 1: Circuito de Spa-francorchamps no ano de 1934

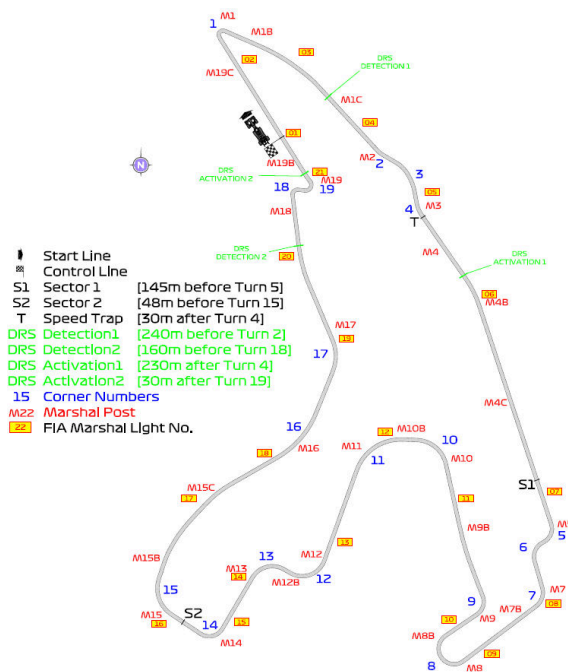


Fonte: Goddard (2019)

Além do circuito fantástico, o Grande Prêmio da Bélgica também é conhecido por suas mudanças incríveis de condições climáticas. A pista pode ir de sol forte a uma chuva torrencial em questão de minutos, e não é desconhecido por metade da pista estar encharcada enquanto a outra metade está totalmente seca. Este é um dos as razões pelas quais Spa, frequentemente, produz grandes corridas. (NOBLE; HUGHES, 2004)

Spa-Francorchamps é um dos circuitos preferidos dos pilotos e dos espectadores, por se tratar de uma pista desafiadora, veloz, longa e seletiva como mostra e telemetria na figura 3. Seu mix de curvas lentas e rápidas (como a famosa *Eau Rouge*, feita com acelerador acionado no máximo) e setores com trechos em subidas e descidas, como mostrado na figura 2, tornam o traçado do GP da Bélgica um cenário que proporciona excelentes disputas entre os pilotos. (ZAMBELI, 2019)

Figura 2: Mapa detalhado do circuito de Spa-Francorchamps atual (2023)



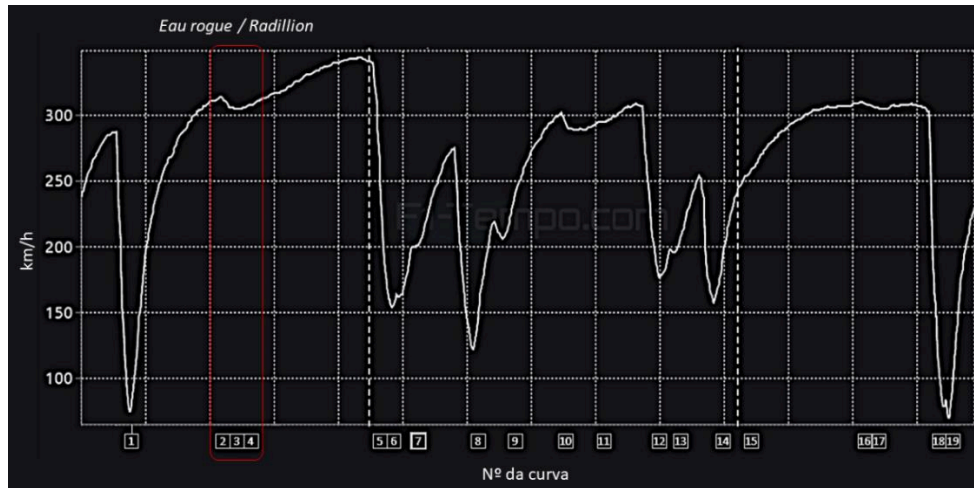
Fonte: (FIA, 2023)

2.2.1 Curvas *Eau Rouge* e *Radillion*

No circuito de SPA, a “*Eau Rouge*” é um dos pontos mais desafiadores para qualquer piloto. Uma curva em subida, logo na saída de outra curva, a *La Source*, que tem a fama de separar os bons pilotos dos ótimos pilotos. SIGMA (2015) afirma que seu nome, que em francês significa “água vermelha”, provém de um córrego próximo à pista que tem esta cor, entretanto,

segundo um mito, essa tonalidade se deve ao sangue dos pilotos que morreram nesse trecho. (NIETO, 2014)

Figura 3: Telemetria do carro Ferrari de Carlos Sainz, pole position do GP da Bélgica de Formula 1



Fonte: (adaptado do site F1-tempo.com)

Primeiro vem uma descida e em seguida vem a curva em subida, isso tudo a 300 km/h sem tirar o pé do acelerador. Não por acaso esse circuito é o favorito de alguns dos maiores pilotos da história como Schumacher e Senna. (LOUBACK, 2018) O *Raidillon* é uma curva à esquerda, imediatamente a seguir a *Eau Rouge* como determinado na figura 4. Na verdade, é tão perigosamente rápida com mudanças verticais de direção quase insustentáveis, a luta contra o carro é constante, em especial com a sua tendência em fugir primeiro de traseira, depois, no alto da colina, de frente. (AUTOSPORT, 2017)

Figura 4: foto aérea discriminando as curvas *eau rouge* e *radillion*



Fonte: (OVERSTEER, 2023)

2.2.2 Acidentes Fatais

A mistura dessas características já rendeu momentos perigosos e trágicos neste trecho. Só para citar alguns casos: em 1985, o promissor Stefan Bellof morreu nos 1000 km de Spa, quando bateu após uma tentativa de ultrapassagem na *Eau Rouge*. Já em 1993, Alessandro Zanardi se lesionou após um forte acidente com sua Lotus. O trecho até foi temporariamente modificado para 94, para diminuir a velocidade no local, mas a configuração original voltou em 95 (FERREIRA, 2021).

Um dos pilotos a se acidentarem na pista foi Stirling Moss, que bateu forte na curva Burnenville, durante o treino para a corrida de 1960 e sofreu várias fraturas, inclusive nas pernas. Ao ir buscar socorro, o piloto Mike Taylor teve uma quebra de barra de direção e bateu forte, ficando paralisado por anos. (VILCHE, 2020)

Chris Bristow e Alan Stacy perderam a vida na mesma curva em que Moss se acidentou, sendo os dois únicos pilotos de F1 a falecerem no circuito, das 48 vítimas fatais da. A morte de Bristow revela a falta de segurança da época, já que o piloto perdeu o controle do carro e capotou, sendo decapitado por uma cerca de arame farpado que ficava ao lado da pista. Os guard rails só seriam instalados no circuito três anos depois. (VILCHE, 2020)

Anthoine Hubert mexeu com o mundo do automobilismo quando o francês se envolveu em um grave acidente na segunda volta da primeira corrida do final de semana em Spa-Francorchamps. Logo após o acidente, a FIA lançou uma investigação para analisar o caso. A conclusão é de que Correa bateu no carro "virtualmente estacionado" de Hubert enquanto estava a 218 km/h, após atingir uma barreira e, ao final, ficou parado no meio do circuito. O impacto resultou em um pico de força de 81,8g no carro de Hubert. (SMITH, 2020)

2.2.3 Colisão em “T”

Uma colisão em “T” é uma espécie de acidente automobilístico que leva o nome do formato T gerado quando a frente de um carro colide com a lateral de outro carro no momento do contato. (EARLE, 2023)

A temida batida em T é um ângulo quase reto (de 90°) como visto na figura 5, entre os carros envolvidos e que projeta uma onda de choque violenta tanto na estrutura do carro quanto no corpo do piloto. (GIACOMELLI, 2011) .Estes acidentes também podem ocorrer devido a situações fora do seu controle, como falha nos freios ou condições climáticas adversas que tornam a parada difícil ou impossível. (GRABER, 2022)

Figura 5: Momento eminente em que dois carros NASCAR colidem em “T”



Fonte: ESPN (2023)

Os acidentes em “T” podem ser muito graves porque a lateral de um veículo não absorve muita energia da colisão, ao contrário de quando um carro é atingido pela frente ou por trás. (RAMIREZ, 2022, p. 1). O piloto do carro impactado de lado sofre mais danos e lesões em acidentes com a em acidentes de carro típicos. Danos cerebrais traumáticos, lesões no pescoço, lesões na medula espinhal, membros esmagados e decepados, lesões na cabeça e traumas ortopédicos são algumas das lesões causadas por este tipo de impacto. (EARLE, 2023)

2.2.4 Categorias que correm em Spa Francorchamps

2.2.4.1 Formula 1

A origem do campeonato está no Campeonato Europeu de corridas de Grand Prix, disputado antes da Segunda Guerra Mundial, onde marcas como Alfa Romeo, Mercedes-Benz e Auto Union lutavam por vitórias em provas realizadas por toda a Europa. Como categoria, a F1 nasceu em 1946, com a primeira corrida disputada no mesmo ano, o Gran Premio del Valentino, disputado em Turim, Itália. O primeiro campeonato mundial foi disputado em 1950, e a categoria já empregou regulamentos técnicos dos mais variados. (VIECELI, 2020)

Os carros de F1 são monopostos de um só piloto construídos quase que completamente a partir de compósitos de fibra de carbono. Todos os carros serão alimentados por motor turbo híbrido fornecido pela Ferrari, Renault, Mercedes-Benz e outras fabricantes. (COELHO, 2016)

Os Formulas são carros construídos especificamente para competições, e para serem classificados como tal devem ter algumas características chave: Rodas sem para-lamas,

Monopostos, Cockpit aberto como mostra a figura 6. A origem do nome Fórmula vem do padrão de nomenclatura estabelecido pela FIA para categorias de monopostos. (VIECELI, 2020)

Figura 6: RB5 carro da equipe Red Bull na temporada 2009 de Formula 1



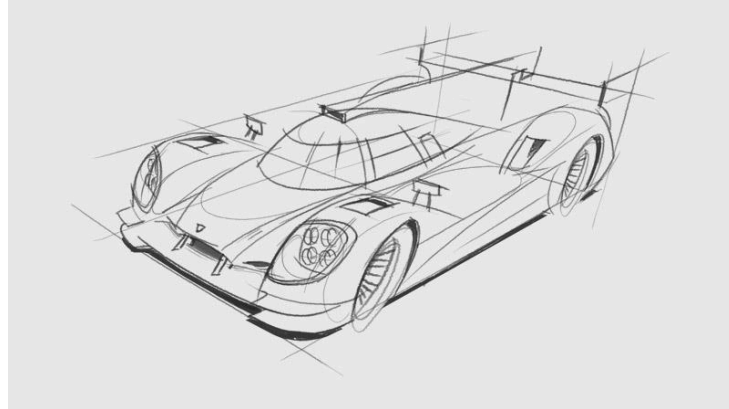
Fonte: (NEWHEY, 2017)

2.2.4.2 Esporte Protótipo

Esporte-protótipos são carros construídos especialmente para competições, com as seguintes características: Rodas cobertas, cockpit aberto ou fechado, usualmente carros com lugar para duas pessoas. A classificação de modelos como esporte apareceu inicialmente na edição 1966 do regulamento. À época, eram definidos como carros especialmente construídos para provas de *Sprint* ou *endurance*, mas que fossem uma espécie de “prévia” para um futuro carro de produção. Desde então, o conceito evoluiu lentamente, ao ponto de que atualmente os modelos tenham pouco ou nada em comum com modelos de produção seriada. (VIECELI, 2020)

Esses carros podem ter cockpits abertos ou fechados como mostra a figura 7 e contam com uma tecnologia moderna. Normalmente, esses são os campeões gerais da prova, já que contam com uma maior potência e um desenho aerodinâmico mais perfeito. Desde 2010, os carros híbridos que geram menos poluentes por usarem um motor elétrico junto com um de combustão, também foram aceitos nesta categoria. O peso mínimo para estes veículos é de 900kg para os carros de gasolina e 930kg para os de diesel, com os carros totalmente abastecidos. A largura tem 1,60m e o tanque de combustível tem capacidade de 90 litros (gasolina) e 81 litros (diesel). (HONÓRIO, 2011)

Figura 7: Desenho representativo de um carro Esporte protótipo de *endurance*



Fonte: (PORSCHE, 2020)

2.2.4.3 Gran Turismo

Gran Turismo é um termo que vem do italiano e como muitos outros do automobilismo não têm uma definição precisa. O mais próximo a um consenso na definição do termo é que carros Gran Turismo são carros de produção seriada, que possuem desempenho e conforto acima da média dos automóveis comuns e são capazes de cruzar grandes distâncias com conforto para os passageiros. No automobilismo, os Gran Turismo são carros de competição derivados de modelos de rua de alto desempenho. As principais características de um GT são: Chassi derivado de modelo de fabricação seriada, carros de dois lugares exemplificado na figura 8 , requer um número mínimo de unidades fabricadas em um determinado espaço de tempo. (VIECELI, 2020)

Figura 8: Exemplo de carro GT modelo Subaru WRX Gr.3



Fonte: (GRAN TURISMO SPORT, 2019)

2.3 Barreira de segurança

Inicialmente as pistas de corrida tinham pouca ou nenhuma barreira para conter os automóveis em caso de acidente. Na década de 1970, o uso de barreiras também conhecidos como *guard rails*, forneciam alguma proteção contra os carros de corrida nas arquibancadas dos espectadores. Essas barreiras eram feitas de metal, no entanto, as altas velocidades exigiram o uso de paredes mais sólidos para conter o carro de corrida na pista em caso de acidente. (FURGUSON, 2019)

Em 1999, a IRL (Indy Racing League), contratou o *Midwest Roadside Safety Facility* (MwRSF) na Universidade de Nebraska para desenvolver uma barreira de segurança feitas de concreto para corridas ovais de alta velocidade denominada Safer Barrier. O projeto deveria ser capaz de reduzindo as desacelerações laterais. Em segundo lugar, a barreira tinha que ser modular em design para fácil construção e por fim, a barreira não poderia requer em um tempo de inatividade significativo para fazer reparos seguindo um evento de colisão. Finalmente, a barreira teve que permanecer intacta após um evento de acidente extremo e não resultar em detritos espalhados pela pista. (BIELENBERG et al., 2004, p. 1)

A TECPRO criou um sistema revolucionário de proteção de paredes baixas projetado para melhorar a segurança na pista para motoristas e funcionários como mostrado na figura 9. O sistema é patenteado internacionalmente e aprovado pela FIA. As barreiras são feitas de parede de contato de polietileno, oca por dentro, blocos conectados entre si por tiras duplas de náilon. Os muros baixos adaptam-se perfeitamente a quaisquer curvas das pistas de corrida e estão disponíveis em várias cores. (FKP, 2019)

Figura 9: barreiras de segurança TECPRO organizadas



Fonte: (FKP, 2019)

Apesar de toda a inovação tecnológica, alguns circuitos ainda usam uma pilha de pneus amontoados entre a área de escape e os muros de proteção da pista. Pode parecer um resquício

dos velhos tempos, mas a razão pela qual os pneus ainda estão lá mesmo com as novidades nas tecnologias de segurança: sua relação custo/benefício ainda é muito alta. (CONTESINI, 2021)

Barreiras que podem proteger os pilotos da força G encontradas quando o automotor está em alta velocidade incidentes são cruciais em corridas. Em alguns circuitos, como Monza e SPA, que tem áreas de escape curtas, o piloto pode de repente ser arremessado em direção a uma barreira a velocidades superiores a 200 km/h. É por isso que a FIA concentrou muito tempo no desenvolvimento de barreiras especiais de dissipação de energia projetado para minimizar lesões e, ao fazê-lo, revolucionou a segurança dos circuitos. (SEEDHOUSE, 2013)

2.4 Energia cinética

É a energia que um objeto possui devido ao seu movimento. Quanto maior for a massa do objeto e a sua velocidade, maior será a sua energia cinética. Essa forma de energia é um conceito fundamental da Física. Está presente em todos os objetos que se movem e é responsável por impulsionar máquinas, veículos e até mesmo atletas em ação (ASTH, 2016).

A energia cinética depende da velocidade de um objeto e é a capacidade de um objeto em movimento de trabalhar em outros objetos quando colide com eles. Por outro lado, a energia cinética de um objeto representa a quantidade de energia necessária para aumentar a velocidade do objeto do repouso ($v = 0$) para sua velocidade final. A energia cinética, também, depende linearmente da massa, que é uma medida numérica da inércia do objeto e a medida da resistência de um objeto à aceleração quando uma força é aplicada. (CONNOR, 2020)

Por exemplo, um carro em alta velocidade terá uma quantidade significativamente maior de energia cinética do que uma bicicleta em movimento (ASTH, 2016)

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

Onde: E = Energia cinética

m = Massa

v = velocidade

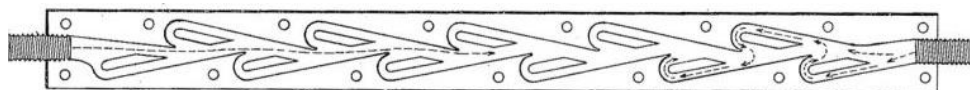
Os corpos envolvidos no choque sofrem deformações elásticas. A energia cinética associada a cada um dos corpos se transforma em energia potencial elástica. No entanto, o choque pode não ser perfeitamente elástico. Nesse processo há dissipação de energia

e, portanto, o choque perfeitamente inelástico é aquele onde os corpos sofrem deformação tal que permanecem unidos após o choque. (SILVA, 2018)

2.5 Válvula de Tesla

Um duto como desenhado na figura 10, que impõe forças específicas sobre os fluidos que se movem através dele. As tensões mecânicas encontradas pelo fluido o forçam a formar um loop em si mesmo em vários pontos. Conforme a água flui para a boca das alças, ela se torna turbulenta e fica mais lenta, o que interrompe o fluxo. (ALVES, 2022)

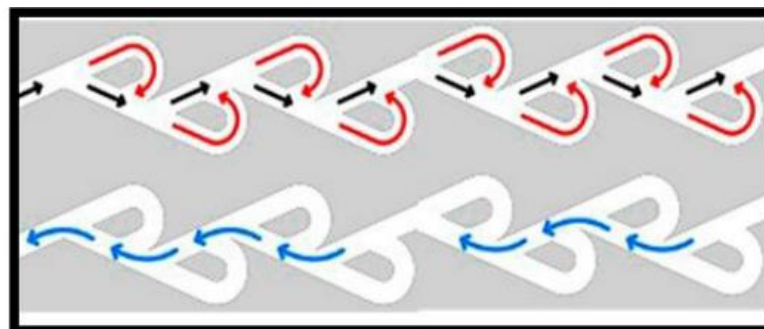
Figura 10: Representação da válvula de tesla



Fonte: Tesla (1920)

A Válvula de Tesla serve para controlar a passagem de um fluido funcionando como uma turbina de resistência, pois faz com que o mesmo consiga passar sem qualquer impedimento em um sentido (direto), mas dificultado imensamente à sua passagem em sentido oposto (indireto) exemplificado na figura 11. Para que ocorra essa dificuldade de passagem utiliza-se do sentido contrário ao escoamento para impedir o próprio deslocamento do fluído em seu interior. (SOUZA, 2021)

Figura 11: exemplificação dos tipos de fluxos (direto e indireto) no interior da válvula



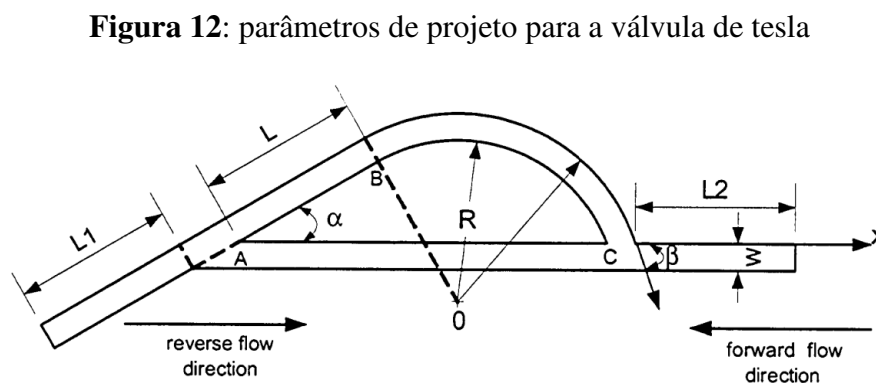
Fonte: (SOUZA, 2021)

Essa característica pode ser medida, sendo sua eficácia ou medida de aproveitamento real. Assim, a diodicidade se caracteriza pela razão entre a diferença de pressão no sentido inverso (antinatural) e no sentido direto (natural) para um mesmo caudal. Para que este sistema

funcione com alguma eficácia é necessário que as perdas de pressão sejam superiores no sentido inverso em relação ao sentido direto, isto é, que passe maior quantidade de fluido no sentido direto e menor no sentido inverso (encontra maior resistência) promovendo a circulação do mesmo da entrada para a saída do sistema. (SOUZA, 2021)

A válvula Tesla não possui partes móveis, consistindo em uma série de “loops interconectados em forma de gota” que permitem que o fluido passe em uma direção. O dispositivo fornece um caminho claro para fluxos diretos, mas a rota é mais lenta para fluxos reversos. O fluxo inverso mais lento é um benefício realizado em circunstâncias em que os fluxos precisam de ser controlados em vez de desencadeados. De acordo com as descobertas, a válvula Tesla poderia aproveitar as vibrações dos motores e outras máquinas para bombear combustível, refrigerantes, lubrificantes e outros gases e líquidos. (BEGG, 2021)

É necessário um método sistemático de projeto para aplicar com sucesso a válvula Tesla em fluidodinâmica. A geometria da válvula tesla é determinada por: a profundidade do canal D , a entrada e saída $L1$ e $L2$, o ângulo α , o segmento reto L e o raio R da curva interna. (TRUONG; NGUYEN, 2003)



Fonte: (TRUONG; NGUYEN, 2003)

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral propor um projeto conceitual de sistema de barreira de segurança fluidodinâmica aplicado a eventos de automobilismo

3.2 Objetivos Específicos

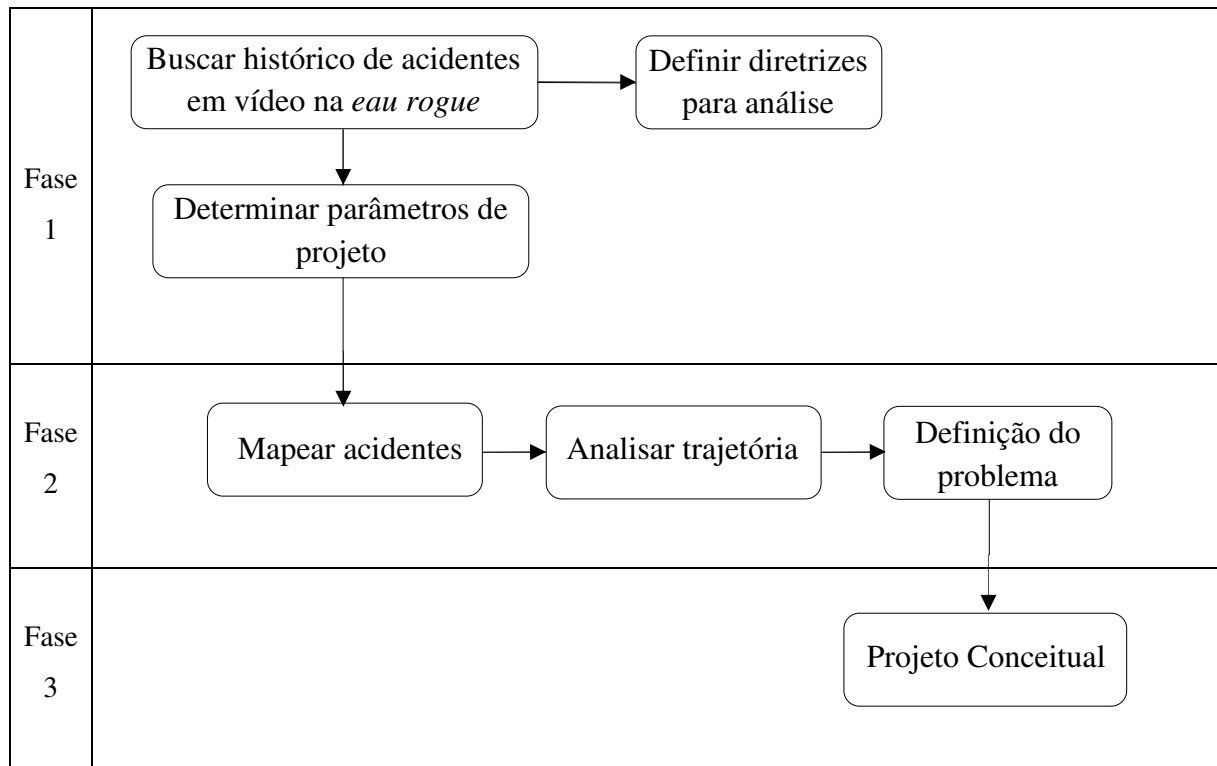
Como objetivos específicos, esse trabalho se propõe realizar as seguintes atividades:

- Mapear os acidentes na *Eau Rouge/ Raidillon*
- Coletar, organizar e analisar dados dos acidentes
- Propor um novo sistema de dissipação de energia cinética
- Atender os parâmetros de projeto previstos na norma da FIA 3501-2017 (4.2; 4.3; 4.4; 4.5; 5.1; 5.3) .

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho adotou-se o seguinte fluxograma, na qual se divide em 3 fases de desenvolvimento

Tabela 1: Disposição da metodologia utilizada neste trabalho



Fonte: Autoria Própria

4.1 Fase 1

Nesta fase foi analisado a origem do problema, para esta análise foram necessário diretrizes e um meio de análise, para assim poder determinar os parâmetros que podem ser atendidos no projeto.

Buscar histórico de acidentes em vídeo na *eau rogue*: Nesta etapa delimitasse a área de ação do trabalho para a curva *eau rogue* e como analisar os acidentes, a própria FIA tem histórico de análise de acidentes em vídeo, então esta etapa busca analisar de forma semelhante.

Definir diretrizes de análises: Para analisar os vídeos, precisasse de algumas diretrizes para diminuir o número de casos para se tornar viável sua análise, as diretrizes são:

- O acidente deve ter sido registrado por um cinegrafista amador ou profissional
- O vídeo deve registrar a trajetória do acidente após a perda de controle do piloto
- O acidente tem que ocorrer no complexo de curvas *eau rogue*
- A posição final do carro deve ser registrada durante o vídeo

- Os acidentes analisados não necessitam de relatório de acidente
- Deve ser de conhecimento o nome e categoria do piloto acidentado
- Todos os eventos analisados devem ser cancelados pela fia

Determinar parâmetros de projetos: Para a concepção do trabalho alguns parâmetros devem ser respeitados, essas limitações de projeto são impostas pela norma 3501-2017 que rege as diretrizes de projetos de barreiras de segurança, dentre essas limitações serão estes aplicados a este trabalho:

- 4.2 – Altura mínima de 1m
- 4.3 – Altura máxima de 1,2m
- 4.4 – O peso de cada elemento de barreira deve se de tal forma que o sistema de barreira resultante seja suficientemente estável mais ainda sim fácil de ser construído e reparado em local pelo pessoal do circuito
- 4.5 – A Superfície exterior da barreira deve ter uma forma que evita a possibilidade de saliências.
- 5.1 – O sistema de barreira deve ser projetado para alcançar uma vida útil não seja inferior a 10 anos.
- 5.3 – O sistema de barreira deve ser projetado de modo que todas suas partes metálicas sejam adequadamente protegidas contra corrosão.

4.2 Fase 2

Com as diretrizes e parâmetros definidos, pode-se utilizar o mapeamento dos acidentes junto com a análise da trajetória para assim encontrar o problema em comum com todos os acidentes analisados.

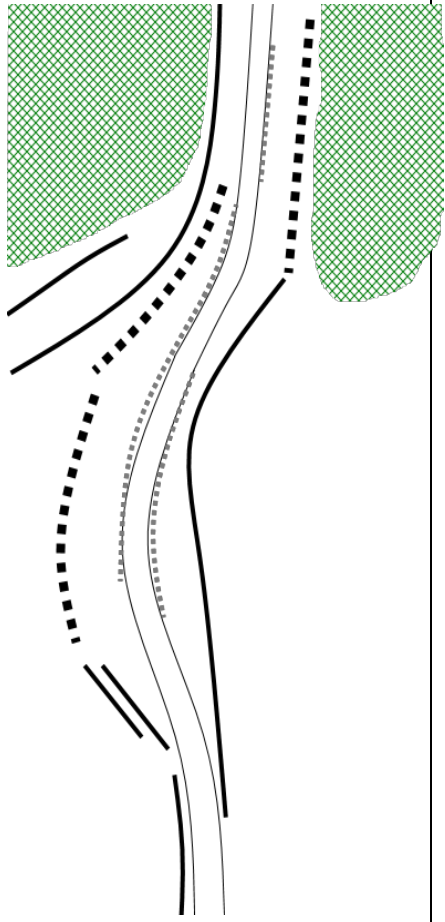
Mapear acidentes: Aqui é onde os acidentes serão registrados e catalogados como mostrado na tabela 2 com auxílio de um mapa da curva *eau rogue* afim de facilitar as análises de trajetória

Analisar Trajetória: Etapa ao qual se busca um padrão, os acidentes já catalogados terão suas trajetórias pré/pós colisão analisadas buscando saber se houve colisões pós acidente, cruzamento de pista pós impacto, colisão com outros carros, condições climáticas e área de escape

Definição do problema: Após todos acidentes mapiados e analisado, identificar um fator que

seja comum em todos os casos, que contribuam para agravar o estado final de saúde do piloto acidentado.

Tabela 2: Carta de catalogação utilizada para mapear os casos

CASO (NÚMERO DO CASO)					
				Ano	
Categoria		Condição de Pista		Área de escape	
Imagens do acidente			Trajetória do acidente		
					
Legenda	Legenda				
Legenda	Legenda				
Legenda	Legenda				
Houve segundo carro envolvido?			voltou para a pista?		
Houve lesão?					
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)					

Fonte: Arquivo Pessoal

4.3 Fase 3

Projeto conceitual: Proposta formalizada do projeto de barreira de segurança, na qual constará decisões de projeto que auxiliam na resolução do problema, desenho técnico, identificação de componentes e materiais propostos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Organização dos dados

A tabela 3, mostra todos os dados extraídos através das análises de vídeo e o registro nas cartas de catalogação como: anos, categoria, condição de pista, área de escape, se voltou ou cruzou a pista, se houve segundo carro envolvido e se houve lesão no acidente

Tabela 3: Organização dos dados obtidos através das cartas de catalogação

Piloto	Ano	Categoria	Condição da pista	Area de escape	Voltou em direção para a pista?	Segundo carro envolvido ?	Houve lesão?
Jack Aitken	2021	GT	Seco	Asfalto	Sim	Sim	Sim
Ryan Roscoe	2004	F1	Seco	Brita	Sim	Não	Não
Lando Norris	2021	F1	Chuva	Asfalto	Sim	Não	Não
Anthoine Hubert	2019	F2	Seco	Asfalto	Sim	Sim	Sim, evoluindo para óbito
Fabio Leimer	2011	F2	Seco	Asfalto	Sim	Não	Não
Alessandro Zanardi	1993	F1	Seco	Brita	Sim	Não	Sim

Gerhard Berger	1992	F1	Chuva	Brita	Sim	Não	Não
Ricardo Zonta	1999	F1	Seco	Brita	Sim	Não	Não
Marcello Marateotto	2014	GT	Seco	Asfalto	Sim	Não	Não
Dilano Van't Hoff	2023	F3	Chuva	Asfalto	Sim	Sim	Sim, evoluindo para óbito

Fonte: Autoria própria

Após os casos analisado dispostos na Tabela 2, pode-se tomar algumas decisões sobre os fatores identificados. No item “ANO” tem casos que variam do ano de 1992 até 2023, sendo assim o problema independe do ano em que acontece, mesmo tendo evolução tecnológica na segurança e nos carros. O mesmo pode ser dito do quesito “CATEGORIA” que, apesar de ser mais comum na formula 1 na nossa análise, outras categorias, com velocidades e massas inferiores também sofrem com acidentes neste ponto do circuito de Spa.

Um fator que está muito relacionado a acidentes em circuitos automobilísticos é a condição climática, porém dos 10 (dez) casos analisados, 7 (sete) das ocorrências aconteceram na “CONDIÇÃO DE PISTA” seca, ou seja, mesmo em condições de chuva este fator não contribui de forma frequente para estes casos.

O formato de “ÁREA DE ESCAPE” é um dispositivo de segurança que visa, assim como as barreiras de segurança, diminuir a energia cinética diminuindo a velocidade, mas ainda não é um denominador comum entre os acidentes pois as ocorrências usavam tanto brita como asfalto na área de escape em uma proporção próxima de 50%.

Com tudo, o único fator comum em todos os casos, que independe de qualquer outro fator é o de “VOLTAR EM DIREÇÃO A PISTA”, este fator além ser indicativo que os sistemas de barreiras para dissipação de energia na curva *eau rouge* não são eficientes, geram também a probabilidade de uma colisão em “T” na qual pode envolver mais de um piloto, aumentando muito a gravidade do acidente. Dentre os casos analisados, 2 (dois) pilotos chegaram a óbito por acidentes com características muito semelhantes, ambos tiveram uma colisão com a barreira de segurança, retornando a pista de forma insegura, incorreta e incontrolável, por fim sendo atingidos na configuração de “T” por outros pilotos.

Unindo o fator de “VOLTAR EM DIREÇÃO A PISTA” com as características da curva, como a altíssima velocidade, não necessidade de frenagem para a execução, elevação de 40 metros, topo da curva possuir “ponto cego” e a baixa eficiência na dissipação de energia cinética por parte das barreiras de segurança, uma nova abordagem para a solução do problema se faz necessário.

Contudo algumas propostas podem ser dadas como a modificação do traçado da curva *eau rogue*, que é inviável devido a Spa-Francorchamps ser um circuito histórico e a FIA prezar por preservar suas características originais. Outra solução possível seria dispositivos de segurança laterais nos carros para amortecimento em caso de batidas em “T”, entretanto Spa recebe diversas categorias e criar dispositivos que se adequasse a cada veículo teria um custo altíssimo além de uma alta dificuldade de projeto.

Por fim, o único fator que está presente em todas as modalidades, que é padronizado em todo o circuito, inclusive na *eau rogue e radillion*, que apresenta falhas em seu papel é a barreira de segurança, sendo assim muito mais viável abordar um novo conceito para estas necessidades.

5.2 Energia cinética do impacto

Para iniciar as decisões de projeto, toma-se como base a equação (1), pois seu uso será eficiente para a simplificação dos cálculos. Como dito na normal FIA 3501-2017, no item 3.2, normatiza a definição de barreira que diz: “Um dispositivo de dissipação de energia que consiste em um ou mais elementos de barreira conectados entre si ou não, capaz de dissipar a energia cinética do impacto de um veículo de maneira controlada”, sendo assim precisa de um valor base de energia que será dissipada.

Sabe-se que o circuito de Spa-Francorchamps recebe várias categorias de automobilismo, em termos de projeto, utiliza-se como base a categoria com maior energia cinética ao passar pela curva *eau rogue* pois se utilizando a categoria com maior energia logo o projeto atende as demais categorias. A priori, as categorias que ficam em destaque são a Esporte protótipo visto na figura 13 e Formula 1 visto na figura 14. Com uma massa total de 930 kg e velocidade na curva de 285km/h na qual quando convertida assume o valor de 79,17 m/s aplica-se na equação:

Figura 13: Telemetria do piloto Antonio Giovinazzi nas 1000 horas de Spa, categoria esporte protótipo (EP)



Fonte: (FIA – World Endurance Championship)

Calculando a energia cinética com os dados obtidos temos:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{930 \cdot 79,17^2}{2} = 2,92 \text{ Mega Joules}$$

Segundo o regulamento técnico da formula 1 2023 – 7ª edição diz que: “A massa do carro, sem combustível, não deve ser inferior a 796kg em todos os momentos durante a competição”. Sendo assim para a categoria formula 1 tem-se que a massa é 765 e a velocidade máxima de 313 km/h, que convertido para m/s o valor se torna 86,94 e aplicando na formula temos:

Figura 14: Telemetria do carro do piloto Charles Leclerc no grande prêmio da Bélgica de Formula 1



Fonte: Formula 1

Calculando a energia cinética com os dados obtidos temos:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{796 \cdot 86,94^2}{2} = 3 \text{ Mega Joules}$$

Sendo assim, com a comparação entre os resultados, a categoria formula 1 é a mais indicada para ser usada como base por ter maior energia cinética em caso de impacto na curva *eau rouge*.

5.3 Projeto conceitual

Tendo em vista um padrão no fenômeno que faz o carro voltar a pista, entende-se a necessidade de uma nova proposta de barreiras de segurança, pois as atuais não conseguem dissipar de forma efetiva a energia imposta no impacto.

Como ponto de partida do projeto conceitual é necessário entender como será disposto os mecanismos que utilizaremos nesta proposta de barreira de segurança, em que pode ser definido em 3 (três): RECEPTOR, TRANSFERIDOR E DISSIPADOR de energia cinética recebida no impacto, a proposta deve obter um nível de dissipação diferente que amenizar o problema encontrado anteriormente.

5.3.1 Receptor

Para tomadas de decisão do RECEPTOR vamos utilizar a matriz de decisão QFD que segundo MORO e Machado (2015) (Quality Function Deployment) é uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão em relação à tradução das necessidades dos clientes em requisitos necessários para os produtos a serem desenvolvidos.

Apenas o RECEPTOR será submetido a matriz QFD devido as outras barreiras que serão utilizadas como comparação não utilizam TRANSFERIDOR e o elemento de barreira utiliza-se do mesmo elemento para características de RECEPTOR quanto DISSIPADOR.

Então, para iniciar a matriz deve-se começar a definir os requisitos do nosso projeto (Etapa 1), quais aspectos são fundamentais para o desenvolvimento do RECEPTOR, para isso segue a tabela 4 com a listagem de objetivos que são desejados.

Para preencher a QFD necessita-se de aspectos desejados para o produto, observando a regra 3501-2017, alguns aspectos pode-se chegar a algumas características do material e geometria como mostra a tabela 4

Tabela 4: Aspectos desejados do Receptor

Apecto desejado	Prioridade
Resistência a impactos	5
Leve	4
Superfície plana	1
Alta durabilidade	3
Resistência à corrosão	2

Fonte: Arquivo Pessoal

Para a Etapa 2, determina-se parâmetros de projeto que influenciam na sua execução, desde fabricação até produto final.

Tabela 5: Parâmetro influentes no projeto

Material
Fabricação
Dimensionamento
Custo

Fonte: Arquivo Pessoal

Com essas informações, já pode-se iniciar o processo de construção da matriz, dando graus de importância entre os aspectos desejados com os parâmetros. Estes graus de importância são inseridos na matriz como Forte (círculo), médio (quadrado) ou fraco (losango). No canto superior direito se encontra a comparação entre a barreira de segurança proposta neste projeto conceitual, cada sistema de barreira tem uma letra correspondente sendo SAFER Barrier a letra X, TEC Pro a letra Y e Barreira de pneus a letra Z.

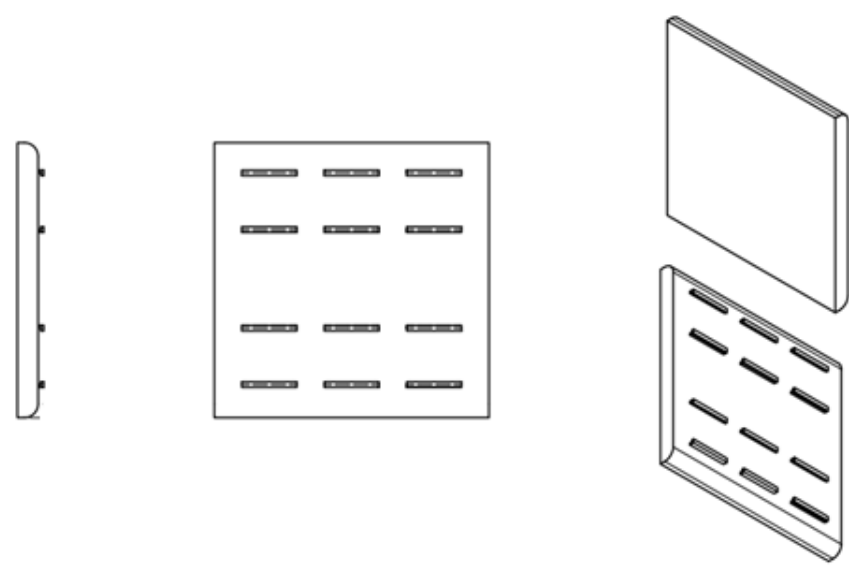
Imagem 15: matriz QFD para o projeto de barreira fluidodinâmica

		Importância	Material	Fabricação	Dimensionamento	Custo					SAFER Barrier - X	TEC Pro - Y	Barreira de Pneu - Z
Aspectos desejados	Resistência a Impacto	5	○	□	□	□					X	A	A
	Leve	4	○	○							A	A	Z
	Superfície Plana	1		□							A	Y	A
	Durabilidade	3	○		◇	□					X	A	Z
	Corsosão	2	○			□					X	A	Z

Fonte: Arquivo Pessoal

Nota-se que todas as barreiras comparadas tem pontos positivos e negativos, sendo o projeto aqui proposto aparecendo em todas os aspectos determinados como “fortes”. Atenta-se também que muitos dos aspectos o projeto proposto se torna mais efetivo em relação as TEC Pro atualmente em uso na *Eau Rogue*.

Figura 16: Desenho técnico do dispositivo receptor



Fonte: Arquivo Pessoal

De início define-se um material que possa atender aos requisitos de projetos impostos pela norma FIA 3501-2017, nela necessita-se determinar um material que seja leve para atender o requisito 4.4 da norma, para simplificar o projeto, adota-se como material primário o polietileno de baixa densidade (PEBD) utilizado pela TECPRO

Tabela 6: Propriedades físicas do PEBD

Propriedade	Método ASTM	PEBD
Densidade, g/cm ³	D 792	0,912-0,925
Temperatura de fusão cristalina, °C	—	102-112
Índice de refração, n_D	D 542	1,51-1,52
Tração no escoamento, MPa	D 638	6,2-11,5
Alongamento no escoamento, %	D 638	100-800
Resistência à tração, MPa	D 638	6,9-16
Alongamento máximo, %	D 638	100-800
Módulo elástico, MPa	D 638	102-240
Dureza, Shore D	D 676	40-50

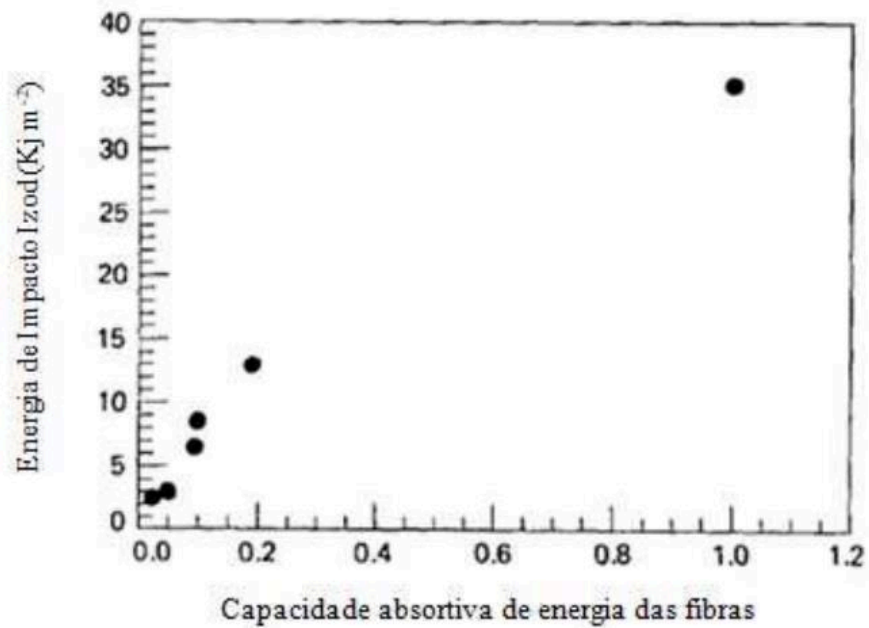
Fonte: (COUTINHO, 2003)

O PEBD tem uma combinação única de propriedades: tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis, altamente resistente à água e a algumas soluções aquosas, inclusive a altas temperaturas o PEBD é pouco solúvel em solventes polares como álcoois, ésteres e cetonas. (COUTINHO, 2003)

A priori usa-se um material que possa revestir a camada externa de toda a barreira de segurança, entretanto alguns mecanismos necessitam de materiais mais específicos. O RECEPTOR precisa de uma disposição de materiais capaz de receber a energia imposta, sem se romper, mas caso rompa não por completo, e ainda sim ser fácil de realizar reparos em pouco tempo como diz o item 5.6, para isso implementou-se no interior do revestimento PEBD placas de compósito de fibra carbono para auxiliar na resistência ao impacto do RECEPTOR, além do

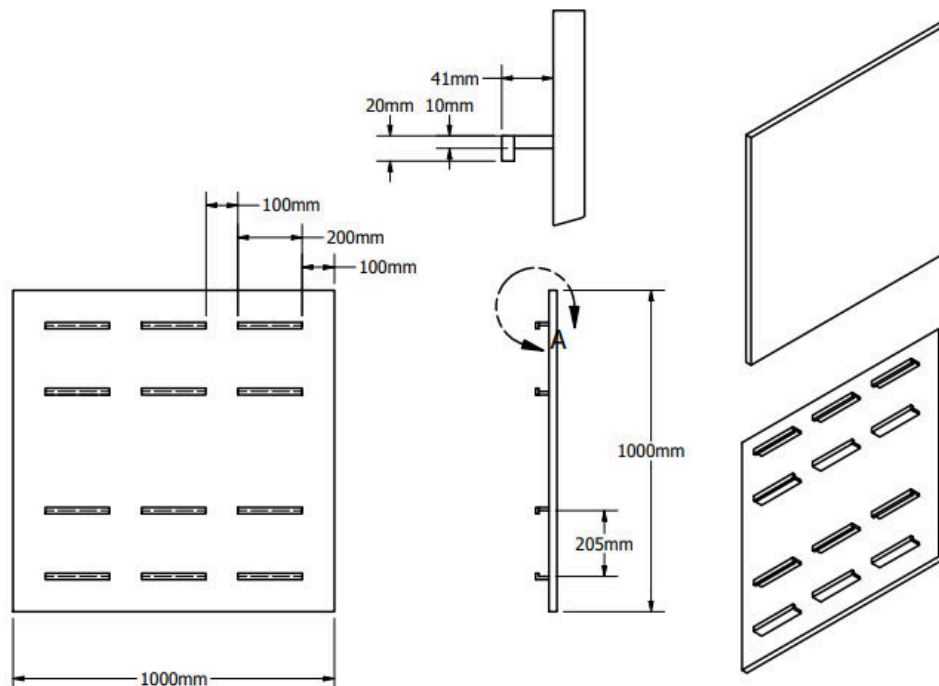
mais, compósitos podem assumir as mais diversas formas facilitando o sucesso do item 5.7 na qual podemos formar uma geometria de fácil instalação.

Gráfico 1: Variação da energia de impacto absorvida em função da capacidade de absorção de energia das fibras de carbono



Fonte: (MAZARIM, 2018)

Figura 17: Desenho técnico da placa de compósito de fibra de carbono (dimensões propostas)



Fonte: Arquivo Pessoal

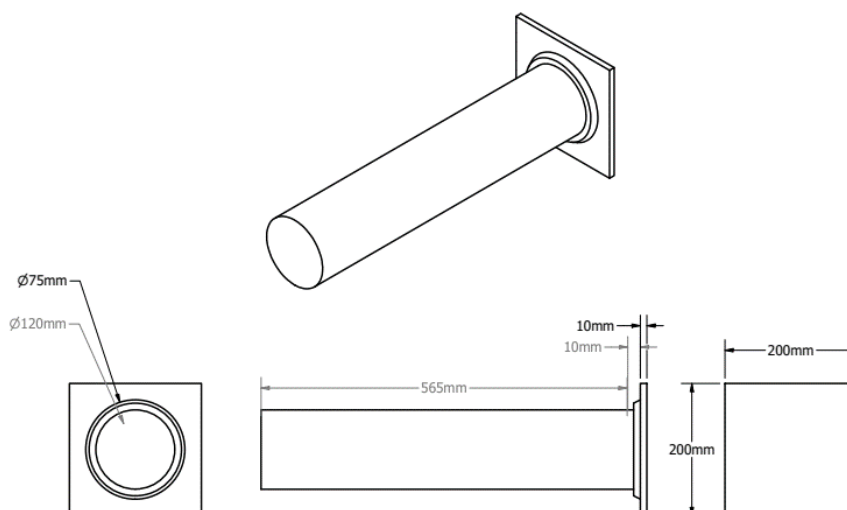
As imagens 16 e 17 exemplificam como deve ser a geometria e as dimensões do receptor de energia cinética, levou-se em consideração atender a altura mínima de 1m (1000mm) (norma 4.2) tendo uma boa margem para + de 200mm na sua fabricação. A parte frontal foi projetada para ser uma superfície plana para atender o requisito 4.5 sendo ideal para uso de divulgação de patrocinadores, que é uma prática comum em qualquer circuito automobilístico.

Os materiais propostos atendem bem os quesitos 5.1 e 5.3 que, respectivamente, definem a durabilidade, que necessita ser acima de 10 anos e uso de materiais que não corroam com a exposição ao tempo como é exigido pela regra, por fim, na parte posterior do receptor projetou-se acoplamentos para facilitar a conexão com o segundo elemento de nome Transferidor

5.3.2 Tansferidor

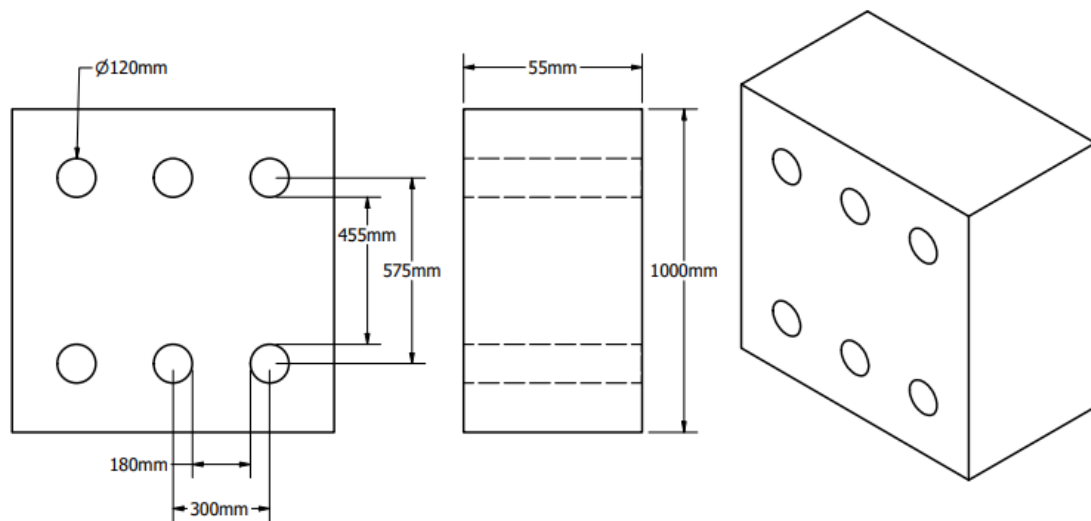
Para o segundo elemento precisa-se de um conhecimento prévio que possa nos auxiliar na transferir a energia do impacto, para isso vamos adota-se como transferidor um sistema de pistão que comprimirá um líquido confinado no interior da barreira. Sabendo que os líquidos são incompressíveis, são os materiais mais adequados para transferir energia de forma quase íntegra. Logicamente que quaisquer fatores que auxiliem a perca de energia durante o processo da barreira são vistos com bons olhos. O transferidor é feito por 2 elementos, o confinamento e o pistão conforme apresentado na imagem 18.

Figura 18: Desenho técnico do elemento 1 do transferidor (dimensões propostas)



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 19: Desenho técnico do elemento 2 do transferidor



Fonte: Arquivo Pessoal

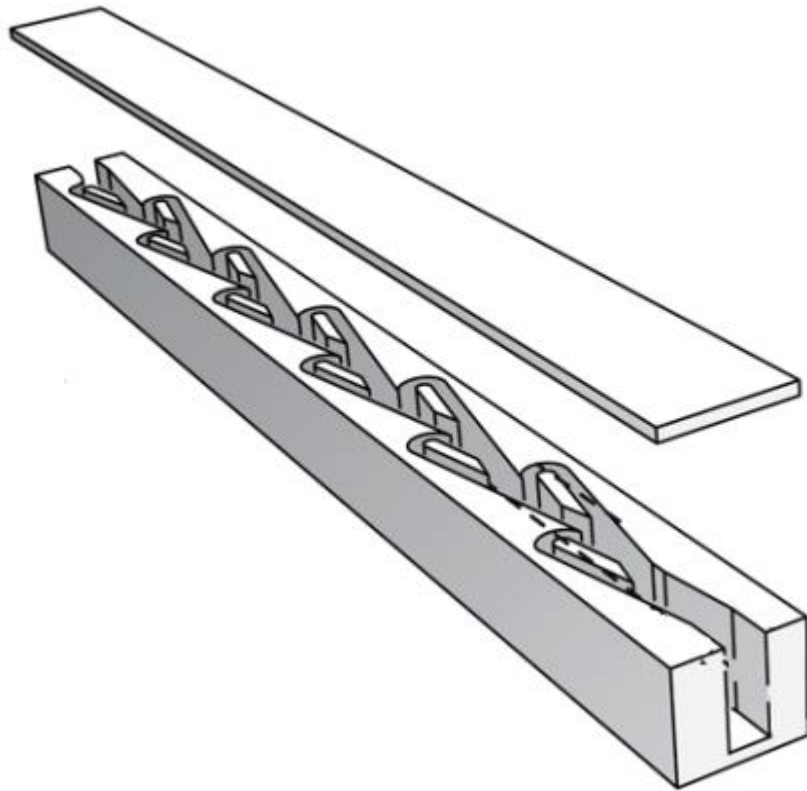
O elemento 1 (um) consiste em um dispositivo rígido capaz de suportar os esforços impostos pelo impacto, mas sua função principal é de transferir a energia a um líquido confinado dentro das comportas cilíndricas do elemento 2, formando um sistema de pistão transportando o líquido para a parte final da barreira.

5.3.3 Dissipador

Por fim, nosso elemento de dissipação será formado por várias válvulas de tesla, sendo elas acopladas na parte posterior do elemento 2 do transferidor, deixando eminente o escoamento, a alta energia aplicada ao fluído e converte em movimento acelerado ao entrar pela válvula terá sua energia dissipada pelos vórtices induzidos pela geometria do dissipador. Como dito por Souza (2021) a perdas de pressão induzidas por fluxo para a válvula de Tesla sob condições de diferenças de pressão fixas variam sistematicamente as taxas de fluxos em ambas as direções.

Para análise de resultados do dissipador, utilizou-se pesquisas bibliográficas que constem a eficiência e a presença dos vórtices o que implica na perda de carga, resultando em dissipação de energia.

Figura 20: representação técnica da válvula de tesla.



Fonte NGUYEN (2021)

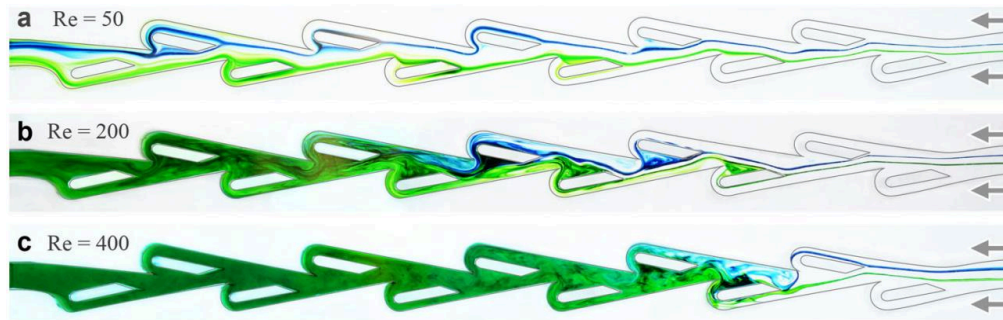
A forma de caracterizar este tipo de válvulas é calculando a sua diodicidade. A diodicidade é a razão entre a diferença de pressão no sentido inverso e no sentido direto. Para que este sistema funcione com alguma eficácia, é necessário que as perdas de pressão sejam superiores no sentido inverso em relação ao sentido direto, isto é, que passe maior quantidade de fluído no sentido direto e menor no sentido inverso (encontra maior resistência) promovendo a circulação do mesmo da entrada para a saída do sistema, para que isto aconteça a diodicidade tem que ser obrigatoriamente superior a 1 (um). (ALVES, 2017)

$$Di = \frac{P_{inverso}}{P_{direto}}$$

Através da literatura encontrada sobre o uso de válvulas deste tipo, notou-se que na generalidade a diodicidade aumentava quando o número de Reynolds aumentava. O número de Reynolds descreve a relativa importância das forças inerciais em comparação com as forças viscosas num fluído, isto é, o rácio do momento do fluído com as forças de fricção transmitidas no mesmo pelas paredes do canal. Para números de Reynolds altos as forças inerciais dominam

e o fluxo é irregular e com variações das propriedades de fluxo (pressão, velocidade, etc como exemplificado na figura 21), existindo um amortecimento do sistema muito baixo que permite que pequenas perturbações cresçam e se tornem interações não lineares. (ALVES, 2017)

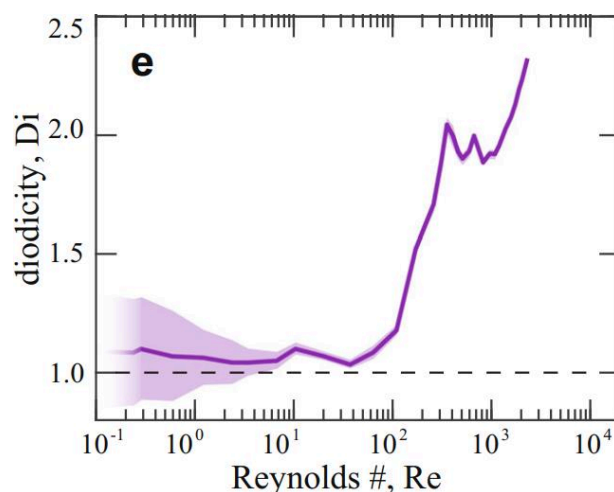
Figura 21: fluxo relacionado ao número de Reynolds



Fonte: NGUYEN (2021)

Segundo analisado por Nguyen (2021) em b um valor de transição de $Re = 200$, os filamentos são laminares e estáveis durante as primeiras unidades, instáveis e misturados no meio, e estão quase completamente misturados no final do conduíte. Em c $Re = 400$, fluxos instáveis e bem misturados na maior parte do canal. (NGUYEN, 2021)

Gráfico 2: Relação entre diodicidade e Número de Reynolds

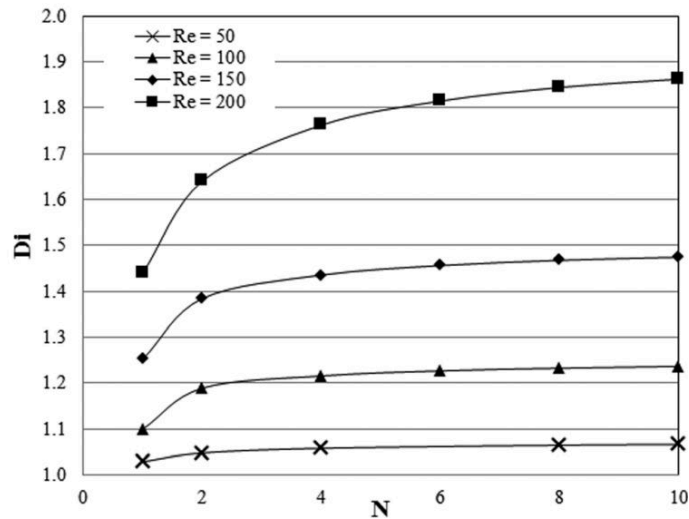


Fonte: NGUYEN (2021)

Para questões de dimensionamento e melhor rendimento, Thompson (2014) cita que a distância entre uma válvula a outra, foi dimensionalizado usando o diâmetro hidráulico do canal principal, sendo N o número de válvulas usadas. Pelo gráfico 3 pode-se observar que para Re

= 200, aumentando o número da válvula de $N = 1$ para $N = 10$ aumenta a diodicidade em quase 25%.

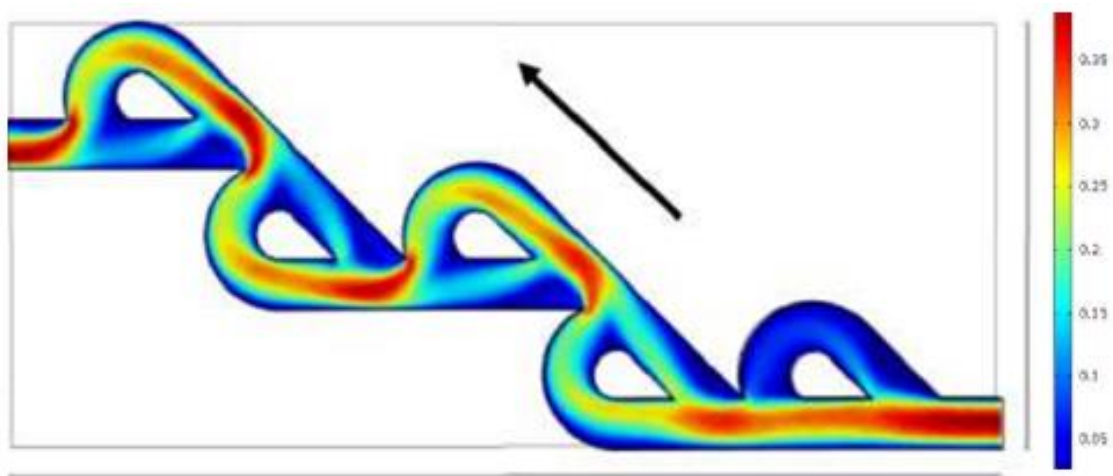
Gráfico 3: Gráfico comparativo relacionando a diodicidade, em função do número de válvulas para diferentes números de Reynolds



Fonte: Thompson (2014)

Concluindo, Souza (2021) relatou em sua pesquisa o sentido direto é mais fluído, enquanto que no inverso há vórtices que impedem parcialmente o fluído de escoar livremente. Na simulação da imagem 22 foi utilizada a água como fluido principal.

Figura 22: Simulação demonstrando os vórtices em um fluído transitando em uma valvula de Tesla



Fonte: Adaptado de Souza (2021)

Para o dimensionamento geométrico é necessário:

O valor do número de Reynolds dado por:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

Onde: ρ = densidade do fluído

v a velocidade

μ a viscosidade dinâmica

D_h é o diâmetro hidráulico

Como dito por Alves (2017) para o canal de secção quadrada que pretende-se fabricar o diâmetro hidráulico toma o valor do lado do quadrado. Caso o canal seja retangular o seu diâmetro hidráulico toma o valor:

$$DH = \frac{4A}{P} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{(a+b)}$$

Onde : a e b são os lados do retângulo

Os parâmetros para distância entre válvulas são dados por:

$$G = \frac{l}{DH}$$

Onde: l = distância válvula a válvula

G = variável resultado adimensional

Sabendo que N = número de válvulas utilizadas podemos determinar a diodicidade a partir de:

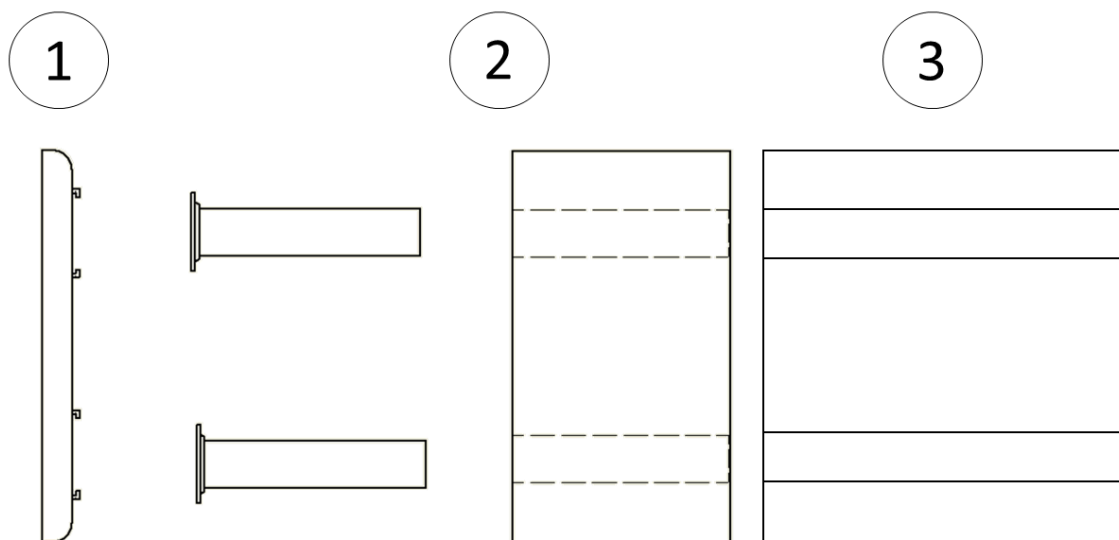
$$Di = a + b (N^{0,11} \cdot G^{-0,39} \cdot Re^{1,87})$$

Tendo em visto que a válvula de tesla tem sua eficiência comprovada em dissipação de energia por meio de perda de carga de um fluido, temos então todos os elementos definidos para o projeto conceitual. Com relação ao transferidor, o sistema de pistão pode-se utilizar de

materiais não metálicos de fácil usinagem para sua confecção, sendo o sistema de armazenamento de líquido feito do mesmo material que a cobertura do receptor (PEBD). A válvula de tesla utilizada no sistema também segue o raciocínio do transferidor, com a diferença de ter uma geometria bem mais complexa e que tem inúmeros parâmetros que podem ser modificados.

A respeito dos reparos e instalação da barreira, tendo em vista que o sistema receptor é móvel, em caso de quebra pode ser reparada de maneira fácil e rápida. Sendo assim tem-se dispostos os itens 1, 2 e 3 que são respectivamente o RECEPTOR, TRANSFERIDOR e DISSIPADOR de energia cinética gerando assim o projeto conceitual proposto neste trabalho:

Imagem 23: Projeto conceitual completo da barreira de segurança



Fonte: Arquivo Pessoal

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o trabalho, notou-se que o circuito de Spa – Francorchamps além de ser um palco de corridas históricas também se tornou um ambiente de altíssima periculosidade, mesmo se limitando a apenas uma seção de 3 curvas e análise de 10 acidentes, foi constatado 2 óbitos de jovens pilotos com menos de 20 anos de idade.

Entende-se que dos acidentes analisados, todos obtiveram falhas no processo de dissipação de energia cinética das barreiras de segurança da curva *eau rouge*, sem levar em consideração outras partes do circuito. Levando assim a necessidade de uma nova proposta de barreira de segurança que abordasse uma dissipação de energia cinética de forma personalizada para aquele ponto específico do circuito.

O projeto conceitual de barreira fluidodinâmica mostra-se promissor com a união de elementos já conhecidos nas barreiras convencionais como na introdução de novos conceitos como a válvula de tesla, utilizando conceitos mais antigos unidos com novos materiais e novas tecnologias de análise, pode-se sim chegar a um projeto satisfatório.

Algumas vantagens encontradas no trabalho é o fato de não ser necessário peças metálicas, diminuindo seu peso, fácil reparo e fácil catálogo de materiais, por já utilizar materiais homologados pela FIA. Suas desvantagens notórias são a dificuldade de fabricação do elemento dissipador devido sua geometria complexa, alto custo e necessidade de reparo com menor número de acidentes quando comparado com barreiras já existentes.

Apesar das limitações do trabalho, recomenda-se para trabalhos futuros, encontrar rearranjos matemáticos que possam associar a quantidade de energia cinética aplicada no sistema de barreiras com os números de válvulas necessárias (N) e a diodicidade requerida (Di). Buscar também líquidos que possam melhorar a dissipação de energia ao percorrer a válvula e atingir número de Reynolds (Re) satisfatórios, já que (Re) e (Di) estão relacionados.

Recomenda-se também um trabalho de análise de esforços nas paredes das válvulas ao receber o fluido em alta velocidade após o impacto, sendo possível assim dimensionar de maneira mais efetiva os parâmetros geométricos da válvula, aumentando seu tempo de vida, eficiência, além de ser possível propor novos materiais para a sua construção.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, Damares. **Válvula criada por Nikola Tesla há 100 anos pode encontrar uso moderno.** [S. l.], 7 out. 2022. Disponível em: <https://socientifica.com.br/valvula-criada-por-nikola-tesla-ha-100-anos-pode-encontrar-uso-moderno/>. Acesso em: 17 maio 2023.

ALVES, Sofia de Sousa. **DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO CIRCULADOR DE LÍQUIDO MILIMÉTRICO.** Dissertação de mestrado em 2017. Disponível em https://run.unl.pt/bitstream/10362/57142/1/Alves_2017.pdf> Acesso em 22 set 2023.

ASTH, Rafael C. **Energia cinética: o que é, fórmula e exemplos.** [S. l.], 3 mar. 2016. Disponível em: <https://www.significados.com.br/energia-cinetica/>. Acesso em: 17 maio 2023.

AUTOSPORT. **Circuito de Spa-Francorchamps: O mais belo do mundo.** [S. l.], 24 ago. 2017. Disponível em: <https://www.autosport.pt/maismotores/circuito-spa-francorchamps-belo-do-mundo/>. Acesso em: 16 out. 2021.

BEGG, Rehana. **The Tesla Valve: Bringing Back a Forgotten Invention.** [S. l.], 18 maio 2021. Disponível em: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21164409/the-tesla-valve-bringing-back-a-forgotten-invention>. Acesso em: 7 set. 2023.

BIELENBERG, Robert *et al.* Initial In-Service Performance Evaluation of the SAFER Racetrack Barrier. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, Dearborn, Michigan, p. 1-14, 3 dez. 2004. Disponível em: <https://bunker4.zlibcdn.com/dtoken/69735ae5966a269120a11f872b98c62b>. Acesso em: 29 mar. 2022.

COELHO, André M. **Quais são as principais categorias automobilísticas?** [S. l.], 7 maio 2016. Disponível em: <https://www.carrodegareagem.com/quais-sao-principais-categorias-automobilisticas/>. Acesso em: 13 out. 2021.

CONNOR, Nick. **O que é energia cinética – definição**. [S. l.], 29 jan. 2020. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-energia-cinetica-definicao/>. Acesso em: 9 ago. 2023.

CONTESINI, Leonardo. **Spa-Francorchamps: a história e a evolução do circuito do GP da Bélgica**. [S. l.], 28 ago. 2019. Disponível em: <https://flatout.com.br/spa-francorchamps-a-historia-e-a-evolucao-do-circuito-do-gp-da-belgica/>. Acesso em: 8 nov. 2021.

CONTESINI, Leonardo. **Por que a F1 ainda usa barreiras de pneus?** . [S. l.], 27 jul. 2021. Disponível em: <https://flatout.com.br/por-que-a-f1-ainda-usa-barreiras-de-pneus/>. Acesso em: 26 set. 2023.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE .. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, v. 13, n. 1, p. 01–13, jan. 2003.

EARLE, Jeremy D. **T-BONE CAR ACCIDENT INJURIES – THE TYPICAL T-BONE CAR ACCIDENT**. [S. l.], 11 maio 2023. Disponível em: <https://warrior.law/who-at-fault-t-bone/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

ESPN. Motorsports T-Bone Crash Compilation. YouTube, Maio de 2023. 08min21s. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=OLzpaSOpa58>. Acessado em: 10 Jul. 2023

FERREIRA, Bruno. **A sequência Eau Rouge e Raidillon ficou perigosa demais para a F1?**. [S. l.], 3 set. 2021. Disponível em: <https://projetomotor.com.br/spa-eau-rouge-raidillon-perigosa-seguranca-f1/>. Acesso em: 16 out. 2021.

FERREIRA, Franclim (ed.). As primeiras corridas. *In: Automobilismo: tudo o que você queria saber sobre o esporte*. [S. l.], 29 abr. 2002. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~fff/Homepage/Model_prim.html. Acesso em: 10 out. 2021

FIA - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE L'AUTOMOBILE. **2023 BELGIAN GRAND PRIX**. 27 jul. 2023. Documento. Disponível em: <https://www.fia.com/documents/championships/fia-formula-one-world-championship-14/season/season-2023-2042>. Acesso em: 17 ago. 2023.

FIA – World Endurance Championship. Antonio Giovinazzi x Ferrari Hypercar Onboard at Spa 2023 6 Hours of Spa FIA WEC. YouTube, mai de 2023. 02min07s. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=IrBYjeGdnI4&t=24s>. Acessado em: 03 set. 2023

FKP. **BARRIERS**. [S. l.], 14 nov. 2019. Disponível em: <https://fkp-uk.com/tecpro-barrier/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

Formula 1. SPAFRANCORCHAMPS Top Speed Record 361 kmh Charles Leclerc Onboard. YouTube, jan de 2021. 0,21s. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=j38VLrNExSU>. Acessado em: 15 ago. 2023

FURGUSON, David P. **The Science of motorsport**. New York: Routledge, 2019. 290 p. ISBN 978-1-138-30178-8.

GODDARD, Geoff. **Mappa del circuito di Spa Francorchamps in Belgio**. 19 jan. 2019. 1 fotografia, 26,2 x 21,6 cm. Disponível em: <https://www.alamy.it/mappa-del-circuito-di-spa-francorchamps-in-belgio-1960s-image62224351.html>. Acesso em: 17 ago. 2023.

GRABER, Jacquelyn. **T-Bone Accidents: What They Are and How to Avoid Them**. [S. l.], 11 dez. 2022. Disponível em: <https://getjerry.com/car-insurance/t-bone-accidents-what-they-are-and-how-to-avoid-them#common-causes-of-t-bone-accidents>. Acesso em: 6 set. 2023.

GRAN TURISMO SPORT. **Subaru WRX Gr.3**. [S. l.], 4 out. 2019. Disponível em: <https://www.gran-turismo.com/br/products/gtsport/>. Acesso em: 9 ago. 2023.

HONÓRIO, Rafael. **LMP1, LMP2, GTEPro e GTEAm: as categorias das 24 horas de Le Mans**. [S. l.], 11 jun. 2011. Disponível em: <http://ge.globo.com/motor/noticia/2011/06/lmp1-lmp2-gtepro-e-gteam-categorias-das-24-horas-de-le-mans.html>. Acesso em: 14 out. 2021.

JAGUAR. **Automobilismo: tudo o que você queria saber sobre o esporte**. [S. l.], 23 jun. 2018. Disponível em: <https://www.jaguarbrasil.com.br/news/automobilismo-tudo-o-que-voce-queria-saber-sobre-o-esporte.html>. Acesso em: 16 out. 2021.

LOUBACK, Artur. **Quais os trechos mais perigosos dos circuitos da F-1?**. [S. l.], 4 jul. 2018. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/quais-sao-os-trechos-mais-perigosos-dos-circuitos-de-f-1/>. Acesso em: 16 out. 2021.

MAZARIM, G. de C.; SALERNO, G. RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO E RESINA EPÓXI EM COMPARAÇÃO AO AÇO SAE 1010. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa/MG, BR, v. 4, n. 1, p. 0127–0142, 2018. DOI: 10.18540/jcecvl4iss1pp0127-0142. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2499>. Acesso em: 10 set. 2023.

MÖDERLE, Catrin. 1906: O primeiro Grand Prix da história do automobilismo. *In: 1906: O primeiro Grand Prix da história do automobilismo*. [S. l.], 26 jun. 2017. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/1906-o-primeiro-grand-prix-da-hist%C3%B3ria-do-automobilismo/a-297894>. Acesso em: 3 out. 2021.

MORGAN, Sharon. **The History of Auto Racing and the Race Car**. [S. l.], 27 out. 2017. Disponível em: <https://quality-coaches.com/auto-restoration-service/the-history-of-auto-racing-and-the-race-car/>. Acesso em: 8 out. 2021.

MORO, SUZANA REGINA; MACHADO, Marcos William Kaspchak. MODELO PARA APLICAÇÃO DO QFD NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MULTIFUNCIONAIS. **XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, Fortaleza/Ce, p. 1-20, 16 out. 2015. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_210_247_27542.pdf. Acesso em: 30 set. 2023.

NEWHEY, Adrian. **How to Build a Car**. [S. l.]: HarperCollins, 2017. 438 p. ISBN 000819680X,9780008196806. Disponível em: <https://ia801808.us.archive.org/12/items/how-to-build-a-car-the-autobiography-of-the-worlds-greatest-formula-1-designer/%5BBookflare.net%5D%20-%20How%20to%20Build%20a%20Car%20The%20Autobiography%20of%20the%20Worlds%20Greatest%20Formula%201%20Designer.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2023

NGUYEN, Q.M., Abouezzi, J. & Ristroph, L. Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve. *Nat Commun* **12**, 2884 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23009-y>

NIETO, Esteban. **Eau Rouge, a desafiante curva que fez Senna "falar com Deus"**. [S. l.], 21 ago. 2014. Disponível em: <https://www.terra.com.br/esportes/automobilismo/formula1/eau-rouge-a-desafiante-curva-que-fez-senna-falar-com-deus,1585978cbf8d7410VgnVCM10000098cceb0aRCRD.html>. Acesso em: 16 out. 2021.

NOBLE, Jonathan; HUGHES, Mark. **Formula One Racing for Dummies**. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2004. ISBN 0-7645-7015-3.

OLIVEIRA, Rodrigo Luiz Pinheiro de. **Impactos da qualidade percebida sobre as atitudes e intenções comportamentais de proprietários de automóveis**. Orientador: Prof. Dr. Jersone Tasso Moreira Silva. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Ciências Empresariais, Belo Horizonte, 2010.

OVERSTEER. **Eau Rouge & Raidillon: Is F1's Flat-Out Corner too Dangerous?**. [S. l.], 20 maio 2023. Disponível em: <https://oversteer48.com/eau-rouge-raidillon/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

PORSCHE. **Tudo sobre controle**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.porsche.com/brazil/pt/aboutporsche/christophorusmagazine/archive/366/articleoverview/article05/#:~:text=Na%20categoria%20LMP1%20DH%2C%20o,significa%20uma%20perda%20de%20competitividade>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SANTOS, Bruno. **A PRIMEIRA CORRIDA DA HISTÓRIA DO AUTOMOBILISMO**. [S. l.], 28 abr. 2015. Disponível em: <https://blogstartsports.com.br/a-primeira-corrida-do-automobilismo/>. Acesso em: 11 out. 2021.

SEEDHOUSE, Erick. **Pulling G: Human Responses to High and Low Gravity**. New York: Springer, 2013. 229 p. ISBN 978-1-4614-3029-2

SILVA, Ana Carolina Bezerra da. **Colisão elástica**. [S. l.], 21 maio 2018. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/colisao-elastica/>. Acesso em: 30 ago. 2023.

SMITH, Luke. **FIA divulga relatório sobre acidente fatal de Hubert na F2**. [S. l.], 7 fev. 2020. Disponível em: <https://motorsport.uol.com.br/fia-f2/news/fia-divulga-relatorio-sobre-acidente-fatal-de-hubert-na-f2/4681710/>. Acesso em: 8 nov. 2021.

SOUZA, Ivair de. **Válvula de tesla e sua eficácia no escoamento de fluídos newtonianos: uma simulação** / Ivair de Souza. – Manaus, 2021.

TESLA, Nikola, **VALVULAR CONDUIT**. APPLICATION FILED FEB. 21, 1916. RENEWED JULY 8.1919. PatentedFeb. 3, 1920.

THOMPSON, S. M., Paudel, B. T Jamal e D. Walters. "Numerical investigation of multistaged tesla valves". Journal of Fluids Engineering 136(8) (2014), pp. 081102

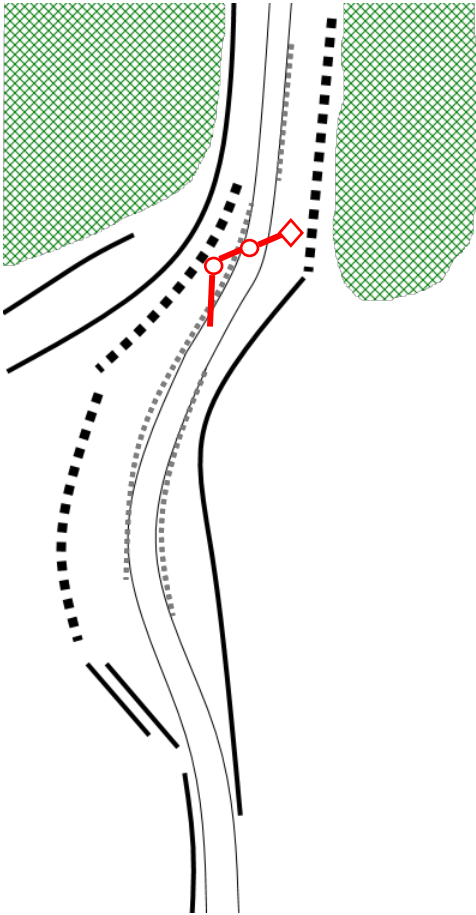
TRUONG, T-Q; NGUYEN, N-T. Simulation and Optimization of Tesla Valves. Nanotech, 2003, Vol. 1. Technical Proceedings of the 2003 Nanotechnology Conference and Trade Show, Volume 1, ISBN 0-9728422-0-9.

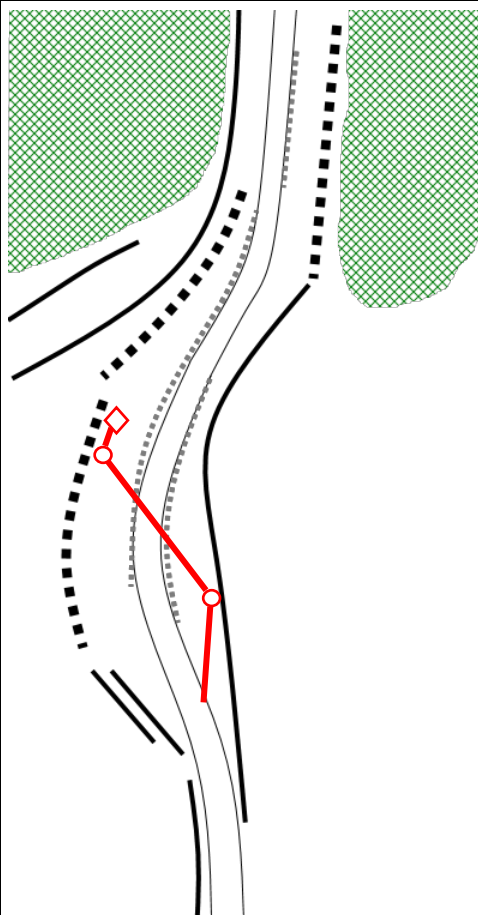
VIECELI, Daniel. **Explicando as categorias do automobilismo mundial – parte 2**. [S. l.], 2 ago. 2020. Disponível em: <https://nivelandoaengenharia.com.br/pt/blog/2020/02/08/explicando-as-categorias-do-automobilismo-mundial-parte-2/>. Acesso em: 13 out. 2021.

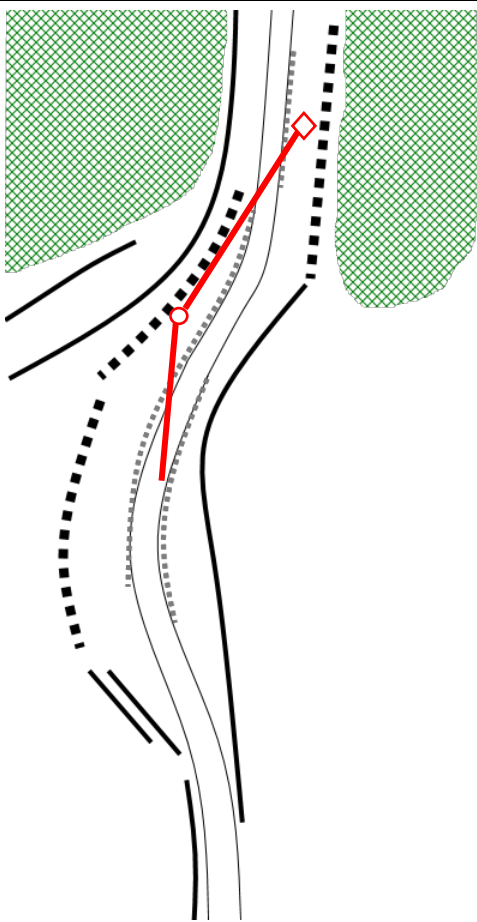
VILCHE , Denise. **SÉRIE CIRCUITOS DA F1: Spa-Francorchamps**. In: VILCHE , Denise. **SÉRIE CIRCUITOS DA F1: Spa-Francorchamps**. [S. l.], 23 jul. 2023. Disponível em: <https://boletimdopaddock.com.br/serie-circuitos-da-f1-spa-francorchamps-2/73296>. Acesso em: 19 ago. 2023.

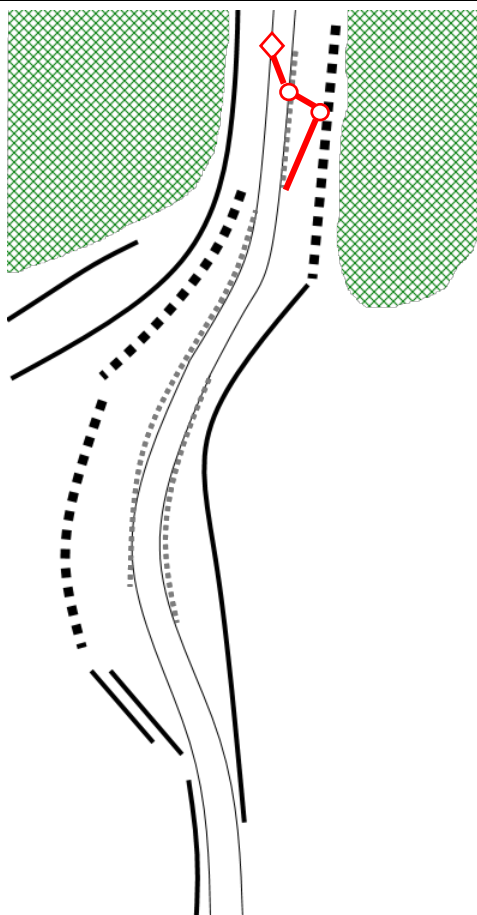
VILCHE, Denise. **Circuitos: Spa-Francorchamps**. [S. l.], 25 ago. 2020. Disponível em: <https://f1templo.com/circuitos-spa-francorchamps/>. Acesso em: 16 out. 2021.

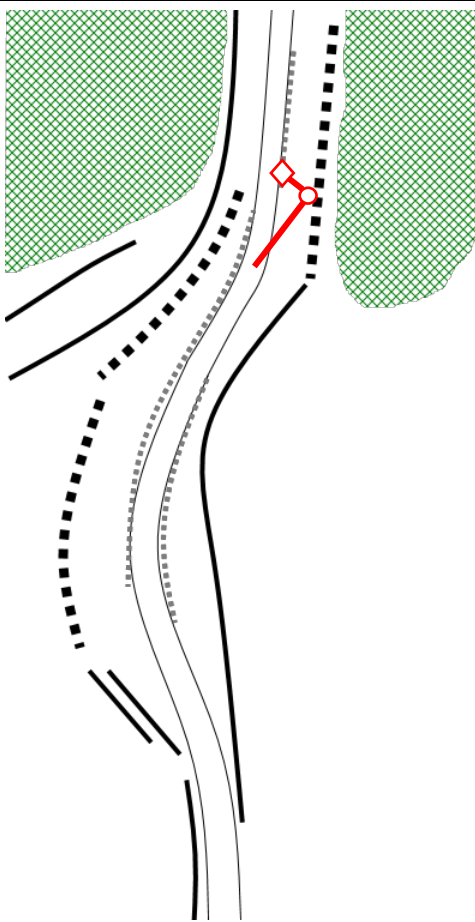
8. APÊNDICES

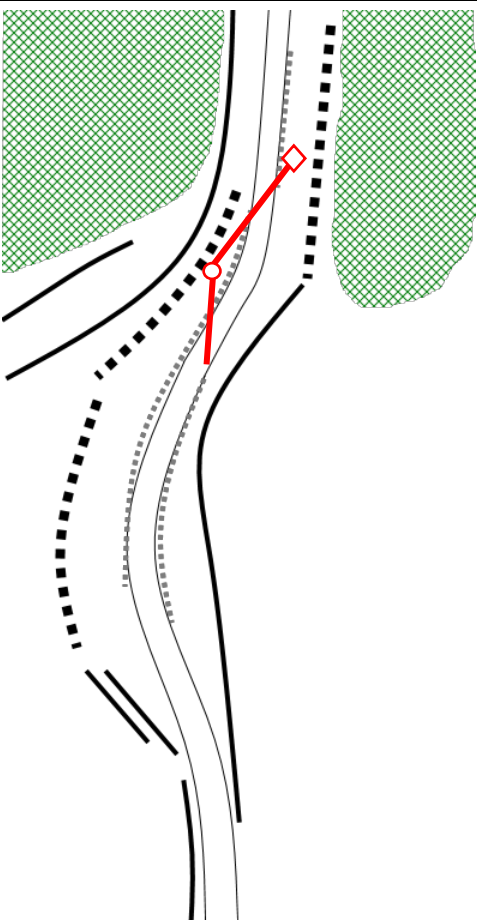
CASO 1						
Nome	Jack Aitken				Ano	2023
Categoria	GT	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Asfalto	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
				 ◇ Posição final ○ Impacto — Trajetória		
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Segundo impacto				
						
Pós impacto		Posição final				
Houve segundo carro envolvido?			Sim	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Sim, todos pilotos envolvidos				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=0qPKPlr1mf8 https://www.youtube.com/watch?v=FZAH5CAyvps			

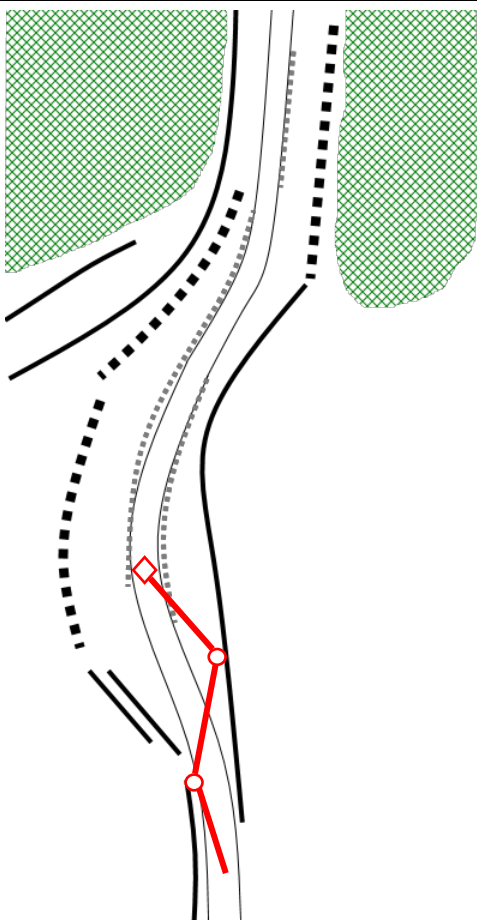
CASO 2						
Nome	Ryan Roscoe				Ano	2004
Categoria	F1	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Asfalto	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
						
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Pós impacto				
						
Segundo impacto		Posição final		◇ Posição final		
				○ Impacto		
				— Trajetória		
Houve segundo carro envolvido?			Não	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?			Não			
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=nLc8V8YpuqA			

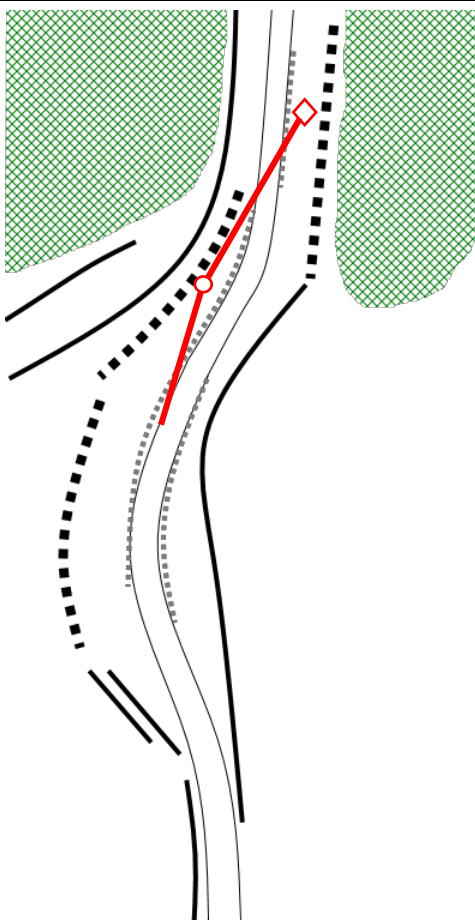
CASO 3								
Nome	Lando Norris				Ano	2021		
Categoria	F1	Condição de Pista	Chuva	Área de escape	Asfalto			
Imagens do acidente				Trajetória do acidente				
				  Posição final  Impacto  Trajetória				
Perca de controle		Impacto						
								
Pós impacto		Pós impacto						
								
Pós impacto		Posição final						
Houve segundo carro envolvido?		Não	Cruzou ou voltou para a pista?				Sim	
Houve lesão?		Não						
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=5Mi63qCRfYs					

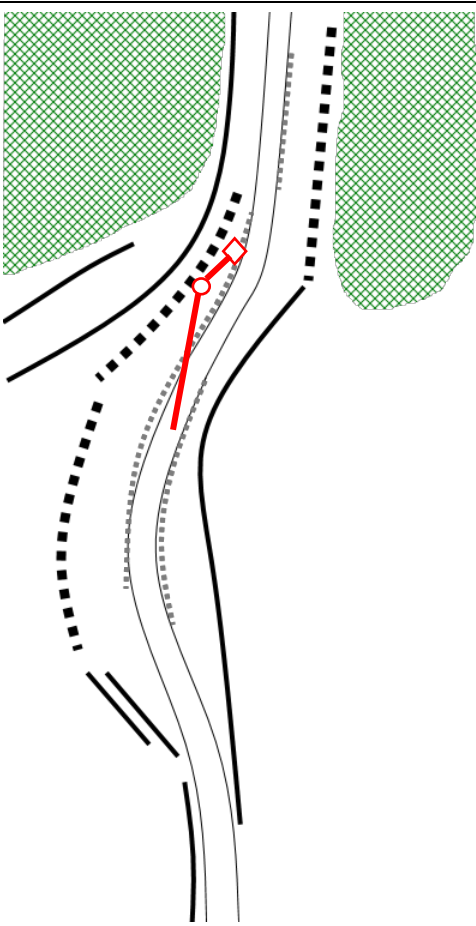
CASO 4						
Nome	Anthoine Hubert				Ano	2019
Categoria	F2	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Asfalto	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
						
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Segundo impacto				
						
Pós impacto		Posição final		 Posição final  Impacto  Trajetória		
Houve segundo carro envolvido?			Sim	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Sim, evoluindo para óbito				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=oUkfzyw2Yk8			

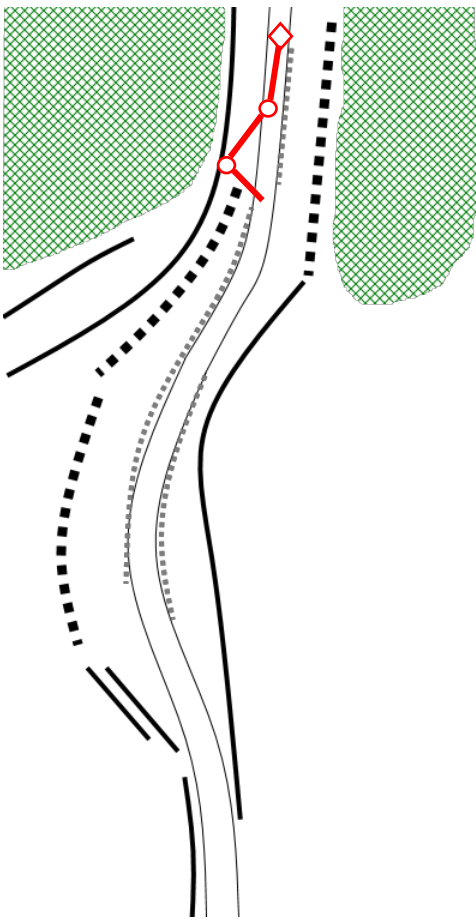
CASO 5						
Nome	Fabio Leimer				Ano	2011
Categoria	F2	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Asfalto	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
				  Posição final  Impacto  Trajetória		
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Pós impacto				
		-				
Posição Final		-				
Houve segundo carro envolvido?			Não	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Não				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=5Mi63qCRfYs			

CASO 6						
Nome	Alessandro Zanardi				Ano	1993
Categoria	F1	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Brita	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
						
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Pós impacto				
						
Pós impacto		Posição final		 Posição final  Impacto  Trajetória		
Houve segundo carro envolvido?			Não	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Sim				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=uES8Esqm3iE			

CASO 7						
Nome	Gerhard Berger				Ano	1992
Categoria	F1	Condição de Pista	Chuva	Área de escape	Brita	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
						
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Segundo impacto				
				◇ Posição final ○ Impacto — Trajetória		
Pós impacto		Posição final				
Houve segundo carro envolvido?			Não	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Não				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=wnmgVw5LbSU			

CASO 8						
Nome		Ricardo Zonta			Ano	1999
Categoria	F1	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Brita	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
				 ◇ Posição final ○ Impacto — Trajetória		
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Pós impacto				
		-				
Posição final						
Houve segundo carro envolvido?		Não	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim	
Houve lesão?		Não				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=IDel-ueyDc8 https://www.youtube.com/watch?v=wGZFio88QYA			

CASO 9						
Nome	Marcello Marateotto				Ano	2014
Categoria	E.P	Condição de Pista	Seco	Área de escape	Asfalto	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
				  Posição final  Impacto  Trajetória		
Perca de controle		Impacto				
						
Pós impacto		Pós impacto				
						
Pós impacto		Posição final				
Houve segundo carro envolvido?			Não	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Não				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=nyIQNM-1hUc			

CASO 10						
Nome	Dilano Van't Hoff				Ano	2023
Categoria	F3	Condição de Pista	Chuva	Área de escape	Asfalto	
Imagens do acidente				Trajetória do acidente		
						
Perca de controle		Impacto				
						
Segundo impacto		Posição final				
-		-				
-		-		 Posição final  Impacto  Trajetória		
Houve segundo carro envolvido?			Sim	Cruzou ou voltou para a pista?		Sim
Houve lesão?		Sim, um evoluindo para óbito				
Link do(s) vídeos(os) utilizado(s)			https://www.youtube.com/watch?v=luoAe78nY9U			