**Nova Formula Student**

**2024/2025 – 2º Semester**

**INTERNSHIP CHALLENGE**

**Diogo Neto Filipe**

Contents

[Introdução 3](#_Toc202981984)

[Sistema de Coordenadas do Pneu 3](#_Toc202981985)

[Análise Teórica das Curvas 4](#_Toc202981986)

[FY vs SA – Força Lateral vs Ângulo de Deriva 4](#_Toc202981987)

[MZ vs SA – Momento de Autoalinhamento vs Ângulo de Deriva 5](#_Toc202981988)

[FX vs FY – Longitudinal Force vs Normal Load 6](#_Toc202981989)

[Metodologia e Resultados 7](#_Toc202981990)

[Cornering Teste Results 7](#_Toc202981991)

[Leitura de Dados – Script read\_calspan\_data 7](#_Toc202981992)

[Tratamento de dados – Curva FY vs SA 8](#_Toc202981993)

[Tratamento de dados – Curva MZ vs SA 11](#_Toc202981994)

[Tratamento de dados – Curva FZ vs FX 12](#_Toc202981995)

# Introdução

Este relatório tem como objetivo analisar o comportamento dinâmico do pneu ***Hoosier 20.5×7.0-13 R20*** montado numa jante de 7.0 polegadas, através da interpretação de curvas experimentais provenientes dos testes realizados no âmbito do ***FSAE Tire Test Consortium***. O foco incide sobre três curvas fundamentais, obtidas em dois tipos de ensaio distintos — *Cornering* e *Drive/Brake* — que refletem as respostas do pneu a diferentes condições de atuação.

As curvas analisadas são:

* **Força Lateral vs Ângulo de Deriva (FY vs SA)** –*Cornering*;
* **Momento de autoalinhamento vs Ângulo de Deriva (MZ vs SA)** –*Cornering*;
* **Força Longitudinal vs Carga Vertical (FX vs FZ)** –*DriveBrake*.

Estas curvas possuem relevância prática essencial no contexto da dinâmica de veículos de competição, nomeadamente na definição dos limites de aderência e comportamento do carro em curva e em aceleração/travagem. Ao compreender estas relações, torna-se possível definir zonas de funcionamento seguro, garantindo ao piloto previsibilidade e eficácia no controlo do veículo em pista*.*

## Sistema de Coordenadas do Pneu

O sistema de coordenadas utilizado nos testes é centrado no plano, tal como ilustrado na Figura1. As forças principais consideradas são:

* **FZ**: força normal, correspondente ao peso que atua perpendicularmente ao plano do solo.
* **FY**: força lateral, gerada durante curvas, responsável pela capacidade de manter o carro em trajetória.
* **FX**: força longitudinal, associada à tração ou travagem do pneu.

A person driving a race car

AI-generated content may be incorrect.

Figura 1-Sistema de Coordenadas

# Análise Teórica das Curvas

Nesta secção apresenta-se o enquadramento teórico de algumas das principais curvas utilizadas na análise da dinâmica de pneus. O seu estudo é essencial para compreender o comportamento lateral e longitudinal de um veículo, a sua resposta à direção e os limites físicos de aderência. As curvas mais relevantes nesta análise são:

* **FY vs SA** (força lateral vs ângulo de deriva),
* **MZ vs SA** (momento de autoalinhamento vs ângulo de deriva),
* **FX vs FZ** (força longitudinal vs carga vertical).

## FY vs SA – Força Lateral vs Ângulo de Deriva

A curva FY vs SA é fundamental para perceber a capacidade do pneu gerar força lateral em função do ângulo de deriva (**Slip Angle**), que surge quando a direção do movimento do pneu não coincide com o seu eixo geométrico. Esta situação é comum em curvas, onde o pneu precisa de gerar força lateral para manter o veículo em trajetória.

A curva apresenta tipicamente três regiões distintas:

* **Zona Linear:** A força lateral (FY) cresce aproximadamente de forma linear com o aumento do ângulo de deriva. Esta é a fase de maior aderência e resposta previsível.
* **Zona de Transição:** FY continua a crescer, mas de forma não linear. O pneu aproxima-se do seu limite de aderência.
* **Zona de Saturação:** FY atinge o seu pico máximo. Após este ponto, ocorre deslizamento parcial ou total da banda de contacto, com perda de aderência e controlo.

O **pico de FY** representa o **limite máximo de aderência lateral** que o pneu pode oferecer. Compreender esta curva é fundamental para otimizar o comportamento do veículo em curva e ajustar corretamente parâmetros como pressão, camber, toe e distribuição de carga.

A diagram of a thin line

AI-generated content may be incorrect.

Figura 2-Curva típica FY vs SA. Adaptado de: Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). \*Race Car Vehicle Dynamics\*. SAE International.

## MZ vs SA – Momento de Autoalinhamento vs Ângulo de Deriva

A curva **MZ vs SA** ajuda a compreender o **momento de autoalinhamento** gerado naturalmente pelo pneu durante as curvas com **ângulo de deriva**, ou seja, quando a roda não está perfeitamente alinhada com a direção real de deslocamento. O pneu tende a corrigir essa diferença de orientação, produzindo um **torque (MZ)** que atua no sentido de alinhar a roda com a trajetória.

A forma típica da curva é ilustrada na **Figura 3** e pode ser dividida em três fases principais:

* **Fase de Crescimento:** À medida que o ângulo de deriva aumenta, o momento de autoalinhamento também cresce. Nesta fase, a maior parte da zona de contacto ainda está em contacto estático, o que permite ao pneu gerar um **feedback direcional claro e progressivo**.
* **Pico de MZ:** O momento atinge o seu **valor máximo em módulo** antes do pico da força lateral FY. Isso ocorre porque o **centro de pressão lateral** atinge o seu deslocamento máximo relativamente ao centro da roda, gerando o maior binário corretivo.
* **Fase de Saturação e Queda:** Com o aumento contínuo do SA, a zona de contacto entra em **deslizamento parcial ou total**, reduzindo a assimetria na distribuição de forças. Como consequência, o momento MZ começa a **diminuir em módulo** e aproxima-se de zero, o que indica **perda da capacidade do pneu de alinhar-se naturalmente** com a trajetória.

Este comportamento é crucial para a **entendermos como reage a aderência e o controlo** por parte do piloto. Um MZ progressivo e bem sincronizado com a curva FY vs SA proporciona **estabilidade e previsibilidade na direção**, sendo especialmente importante em contextos como o Formula Student, onde o piloto atua frequentemente próximo do limite de aderência lateral.

A graph of a line of peaks

AI-generated content may be incorrect.

Figura 3- Curva típica MZ vs SA. Adaptado de: Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). \*Race Car Vehicle Dynamics\*. SAE International.

## FX vs FY – Longitudinal Force vs Normal Load

A curva **FX vs FZ** é essencial para analisar o desempenho do pneu em situações de **aceleração máxima** (arranques) e **travagem intensa**, típicas em contextos competitivos como o Formula Student. Através dela, é possível compreender, para cada valor de **carga vertical (FZ)**, qual é a **força longitudinal máxima (FX)** que o pneu é capaz de gerar, antes de atingir o seu limite de aderência.

Esta curva fornece uma **visão simplificada** da capacidade de tração ou travagem do pneu, **sem ainda considerar o deslizamento longitudinal (slip)**. Em termos gerais, observa-se que à medida que **FZ aumenta**, a **capacidade de gerar FX também aumenta**. No entanto, essa relação **não é linear** — a força longitudinal cresce com a carga vertical, mas com **ganhos marginais decrescentes**.

Este comportamento resulta de vários fatores físicos associados à interação pneu-solo, tais como por exemplo, a **não linearidadedo pneu** ou **efeitos térmicos.** Assim, **duplicar a carga vertical não implica duplicar a força longitudinal gerada**. Há uma saturação progressiva da capacidade de gerar força à medida que o pneu é mais carregado.

Apesar da curva **FX vs FZ** fornecer uma estimativa útil da força longitudinal máxima para cada carga vertical, esta abordagem **ignora o papel crítico do deslizamento longitudinal** — ou seja, o quanto o pneu “escorrega” durante a aplicação de força motriz ou de travagem.

O Slip Ratio é definido pela expressão,

Onde:

Pensemos numa **arrancada a fundo**, se o pneu começa a girar rapidamente, mas o carro **mal se mexer**, temos o que implica necessariamente que nestes casos, o pneu **não está a gerar tração eficiente** o que gera desperdício energético, desgaste no pneu e obviamente perda de tempo em competição.

# Metodologia e Resultados

Os dados utilizados nesta análise foram obtidos através dos ficheiros do ensaio **FSAE Tire Test Consortium** no formato *TIRF* (.dat) Estes dados são provenientes de testes realizados em laboratório por equipamentos de alta precisão, que medem as respostas dinâmicas do pneu a diferentes condições de carga, velocidade, ângulo de deriva, entre outros. O trabalho surge completamente à volta do pneu ***Hoosier 20.5×7.0-13 R20*** montado numa jante de 7.0´´. Para garantir essa coerência, os resultados foram todos filtrados por essas mesmas características e o tipo de teste, isto é, Cornering e Drive Brake como antes visto. Todo o processamento foi realizado no ambiente **GNU Octave**, com recurso a scripts próprios, desenvolvidos para automatizar a leitura, filtragem e extração de resultados dos ficheiros.

## Cornering Teste Results

O objetivo na estruturação do código foi garantir uma abordagem **modular e reutilizável**, permitindo que os scripts possam ser facilmente adaptados e reaproveitados para futuras análises. A metodologia seguiu duas fases principais:

* **Leitura de dados brutos**, baseada no conhecimento da estrutura dos ficheiros TIRF;
* **Tratamento e filtragem de dados úteis**, resultando nas curvas finais.

### Leitura de Dados – Script read\_calspan\_data

Este script modular tem como principal função a leitura dos ficheiros Calspan,sendo a única vez que se utiliza os ficheiros, filtrando um pneu específico e variáveis como **SA** e **FZ** e uma variável que lhe for passada como parâmetro (**Y**), como vemos na figura 4.

A black screen with white text

AI-generated content may be incorrect.

Figura 4- Cabeçalho da função

O script começa por percorrer todos os ficheiros .dat presentes no diretório. A convenção de nomes dos ficheiros (B2356rawXX) facilita a sua identificação automática dentro de um **loop**, conforme ilustrado abaixo.

A screen shot of a computer code

AI-generated content may be incorrect.

Figura 5- loop leitura dos ficheiros

À medida que consegue abrir os ficheiros vai testar se o ficheiro é útil ou não, verificando a característica do pneu (Nome e Jante) que se encontram sempre na primeira linha dos ficheiros .dat, se não for o indicado passa para o próximo elemento da diretório.

A black screen with white text

AI-generated content may be incorrect.

Figura 6- verificação de ficheiros

Se efetivamente for o ficheiro que contenha a informação do pneu desejado, então passa para a leitura, lendo os nomes das colunas e localiza os seus índices retornando todos os dados para o script que o invocou.

### Tratamento de dados – Curva FY vs SA

O principal objetivo deste script é gerar o gráfico da Força Lateral em função do Ângulo de Derivapara uma **carga vertical fixa de 1300 N**. Para tal, foram definidas três tolerâncias de variação da carga vertical [ .Estas tolerâncias permitem observar o **efeito da suavização dos dados** na forma final da curva.

A black background with white text

AI-generated content may be incorrect.

Figura 7- Parametros iniciais

Após a execução do script *read\_calspan\_data*, que fornece os dados brutos filtrados por tipo de ensaio, pneu e jante, o script principal inicia o **processamento dos dados para visualização gráfica** com as seguintes etapas:

A computer screen with text and numbers

AI-generated content may be incorrect.

Figura 8-loop principal

O código implementa um **loop principal**, que percorre cada uma das tolerâncias definidas. Em cada iteração:

1. É criado um **filtro lógico** (*mask*) que seleciona apenas os dados cuja carga vertical FZ esteja dentro do intervalo definido:
2. Os dados selecionados são armazenados em vetores separados de SA e FY;
3. Os valores de SA são ordenados para garantir consistência na aplicação do ajuste polinomial;
4. É aplicado um **ajuste polinomial de grau 3** utilizando a função polyfit, que implementa o método dos **mínimos quadrados** para suavizar os dados experimentais.

No final de cada iteração, o script gera automaticamente o gráfico FY vs SA para a respetiva tolerância, permitindo a comparação entre diferentes níveis de suavização.

O gráfico apresentado na **Figura 9** mostra o comportamento da **força lateral (FY)** em função do **ângulo de deriva (SA)** para três tolerâncias diferentes em torno de uma carga vertical central de **1300 N**:

* ±50 N (vermelho),
* ±100 N (verde),
* ±150 N (azul).

Como se pode observar, todas as curvas apresentam a forma típica esperada de um pneu em ensaio de *cornering*: uma zona linear inicial, seguida de um pico de força lateral e posterior queda representando o derrapamento. À medida que a tolerância aumenta, o número de pontos usados para o ajuste também aumenta o que **suaviza o comportamento global**, mas pode **incluir variações indesejadas** fora da zona de carga alvo. A curva com ±50 N (vermelha) apresenta maior precisão local, mas também maior sensibilidade ao ruído. A curva com ±150 N (azul) é mais estável, mas menos representativa da condição FZ ≈ 1300 N. Isto confirma que o **nível de tolerância afeta diretamente a forma e a fidelidade da curva ajustada**, sendo necessário um compromisso entre suavização e precisão local.

A graph of different colored lines

AI-generated content may be incorrect.

O código foi desenvolvido com **foco na eficiência e modularidade**, seguindo as **boas práticas de programação**. A estrutura do script permite uma leitura clara, separação de tarefas por funções, reaproveitamento de código e fácil adaptação para novos cenários.

Para avaliar o **tempo de execução total**, foi utilizado o comando tic e toc do GNU Octave, inserido no bloco principal do processamento. Esta abordagem permite verificar se o código está de facto otimizado para lidar com **conjuntos de dados extensos** de forma rápida e eficaz.

Naturalmente, o tempo de execução pode variar com o tipo de máquina utilizada e com o tamanhodo dataset, mas fornece uma boa estimativa da eficiência relativa do algoritmo.

Este tempo reduzido evidencia que o script foi desenhado para **alto desempenho**, mesmo ao processar milhares de linhas, aplicar **ajustes polinomiais em série** e gerar os gráficos correspondentes para múltiplas tolerâncias de carga vertical.



Figura 10- tempo total de execução

### Tratamento de dados – Curva MZ vs SA

Este script foi desenvolvido com a mesma estrutura modular e lógica de processamento do utilizado para a curva FY vs SA. Por essa razão, não se torna necessário repetir a análise do código, uma vez que todo o raciocínio aplicado foi mantido: leitura, filtragem por tolerância, ordenação dos dados e ajustamento final. A figura 11 apresenta o gráfico do momento de autoalinhamento em função do ângulo de deriva para três tolerancias de carga vertical centradas em 100N:

Tal como na curva FY vs SA, a intenção foi comparar o impacto de diferentes tolerâncias no perfil da curva MZ vs SA. No entanto, algumas **anomalias visuais** surgem e devem ser interpretadas com cuidado.

A curva com menor tolerância (vermelha) apresenta um desvio visível face às restantes, especialmente por não estar centrada em torno de , como se esperaria num comportamento simétrico. Esta assimetria pode estar associada à sensibilidade do método de ajustamento utilizado quando aplicado a um conjunto de dados mais restrito. Apesar de a forma geral da curva MZ vs SA refletir corretamente o comportamento esperado com um pico antes da saturação lateral os efeitos observados nas extremidades e o pequeno deslocamento de uma das curvas demonstram as limitações do modelo polinomial global utilizado. Uma possível melhoria futura seria a adoção de **técnicas de suavização locais** ou ajustes por regiões para melhor representar a física real do pneu em todas as zonas do gráfico.

A graph with colored lines

AI-generated content may be incorrect.

Figura 11- Resultado MZ vs SA

Mais uma vez, o tempo de execução do script foi cuidadosamente considerado durante o seu desenvolvimento. A estrutura modular, os filtros lógicos eficientes e o ajustamento vetorizado foram pensados para garantir que o processamento fosse rápido, escalável e reutilizável. A utilização do comando tic e toc permite confirmar que, mesmo com múltiplas tolerâncias e suavizações, o tempo de execução mantém-se muito reduzido, o que demonstra a eficácia da abordagem adotada.

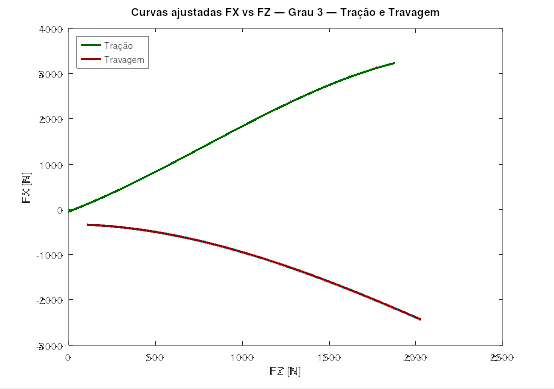


Figura 12- tempo total

### Tratamento de dados – Curva FZ vs FX

Esta função já tinha sido preparada no contexto dos ensaios DriveBrake, onde se analisou o comportamento dos pneus sob diferentes níveis de aceleração e travagem, à medida que a carga vertical (FZ) aumentava ou diminuía.

O script foi construído com uma estrutura muito semelhante às anteriores, mantendo o foco na modularidade, reutilização e desempenho. Tal como nas outras curvas, foi utilizada uma função de ajustamento polinomial de grau 3, que garante suavidade, estabilidade numérica e fidelidade física, tornando-se adequada para utilização em modelos de simulação.

.

Ao contrário das curvas FY vs SA e MZ vs SA, neste caso optou-se por representar duas curvas separadas, correspondentes a:

* Tração – valores positivos de FX (linha verde);
* Travagem – valores negativos de FX (linha vermelha).

Esta distinção é relevante porque se tratam de fenómenos fisicamente diferentes.

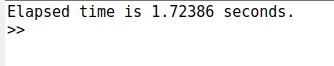
A curva FX vs FZ revela um comportamento típico de saturação da força longitudinal com o aumento da carga vertical. À medida que FZ aumenta, FX também cresce, mas com ganhos marginais decrescentes — especialmente visível na curva de tração.

Observa-se ainda uma resposta assimétrica entre tração e travagem:

* A curva de tração (verde) tende a atingir forças máximas ligeiramente superiores;
* A curva de travagem (vermelha) satura mais cedo, o que poderá estar relacionado com diferenças na interação pneu-solo ou com distribuição de pressão na zona de contacto.

Esta assimetria é altamente relevante para o projeto, uma vez que influencia diretamente como a distribuição ideal de massas e as estratégias de travagem;

Mais uma vez, o tempo de execução foi tido em conta durante o desenvolvimento do script. A estrutura vetorizada e os filtros aplicados garantem rapidez mesmo com datasets extensos. A utilização de tic e toc confirmou um tempo de execução reduzido, mantendo a coerência com a lógica eficiente dos restantes scripts.



# Conclusão Final

O presente trabalho teve como objetivo estudar, de forma sistemática e aplicada, o comportamento do pneu Hoosier 20.5×7.0-13 R20, montado numa jante de 7.0”, com base em dados experimentais reais fornecidos pelo FSAE Tire Test Consortium. A análise focou-se em três curvas fundamentais para a dinâmica de veículos:

* FY vs SA (força lateral vs ângulo de deriva),
* MZ vs SA (momento de autoalinhamento vs ângulo de deriva),
* FX vs FZ (força longitudinal vs carga vertical).

Cada curva foi estudada com filtragem por diferentes tolerâncias de carga vertical, permitindo observar o impacto da variabilidade do FZ nas formas e características dos ajustamentos. Para isso, foram desenvolvidos scripts modulares e eficientes em GNU Octave, respeitando boas práticas de programação e otimização de tempo de execução.

A curva FY vs SA demonstrou claramente as zonas de resposta linear, transição e saturação, sendo essencial para compreender o limite de aderência lateral do veículo. A curva MZ vs SA, apesar de mais sensível a assimetrias e ajustes numéricos, confirmou o comportamento teórico de um pico de autoalinhamento antes da saturação lateral. Já a curva FX vs FZ revelou a típica resposta de saturação da força longitudinal com o aumento da carga, com uma diferença notável entre os regimes de tração e travagem.

Para além da componente analítica, este trabalho demonstrou a importância de uma abordagem técnica rigorosa na manipulação e interpretação de dados de ensaio, algo essencial em contexto de competição como o Formula Student, onde decisões técnicas influenciam diretamente o desempenho em pista.

### Perspetivas futuras

Para dar continuidade a este estudo, propõem-se algumas direções relevantes:

* Incluir o slip ratio nas análises de tração e travagem (FX vs SL);
* Estudar o impacto da pressão de enchimento e da temperatura do pneu nas curvas FY e FX;
* Expandir a análise para incluir modelação dinâmica realista, integrando os dados num simulador de comportamento veicular;
* Estudar vários compostos ou pneus diferentes para comparar a resposta dinâmica.