



Simulação de processos para fabrico aditivo
metálico

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Nuno Miguel Salcedas Duarte

Leiria, setembro de 2024

Página intencionalmente deixada em branco



Simulação de processos para fabrico aditivo metálico

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Nuno Miguel Salcedas Duarte

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2024

Página intencionalmente deixada em branco

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Página intencionalmente deixada em branco

*O pessimista vê
dificuldade em todas
as oportunidades, o
otimista vê
oportunidade em
todas as dificuldades.*

Winston Churchill

Página intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador Doutor Joel Oliveira Correia Vasco pelo apoio que me deu ao longo deste projeto e pela notável disponibilidade mostrada.

Quero também agradecer à Cadflow, por me terem dado a oportunidade de realizar este projeto com o software e hardware por eles fornecidos. Um especial agradecimento ao Engenheiro João Paulo Rodrigues.

Por fim quero dar os meus sinceros agradecimentos aos meus pais, aos meus amigos, aos meus colegas e em especial à Mariana Agostinho, por todo o apoio que me deram para realizar o mestrado e o projeto. Sem eles não seria possível.

Página intencionalmente deixada em branco

Resumo

O presente relatório descreve o projeto desenvolvido no âmbito da unidade curricular Projeto, integrado no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial (MEM – PI).

No mundo do ciclismo de alta competição, é cada vez mais importante otimizar a aerodinâmica e reduzir o peso dos componentes integrantes da bicicleta, de modo a melhorar o desempenho dos ciclistas, realçando que uma diferença de 100 gramas, faz diferença ao fim de 5 horas de esforço. Este projeto foca-se na otimização topológica de um destes componentes.

O objetivo principal deste projeto é otimizar uma pedaleira (alumínio 5086) de uma bicicleta para reduzir a sua massa, mas mantendo a sua integridade mecânica. O objetivo secundário deste projeto é obter um componente otimizado que seja a junção do braço, da aranha e do prato da pedaleira, transformando assim os três componentes num só.

Foi feita a otimização com recurso ao *software* Siemens NX num modelo muito aproximado ao de uma pedaleira já existente, tendo sido feita uma alteração, de modo a tapar com material uma porção da pedaleira, dando assim ao *software* mais material com que possa trabalhar e otimizar de uma maneira mais eficiente e livre.

O componente otimizado obtido apresenta uma redução na massa do conjunto da pedaleira em cerca de 120 gramas face à pedaleira original, no entanto mais testes deveriam ser feitos no modelo, tais como estudos aerodinâmicos e estudos de viabilidade no que diz às condições de fabricação da peça, e também deveriam ser feitas otimizações, quando assim for possível, que tenham em conta o eixo de orientação da impressão, de modo a prevenir zonas com suportes desnecessários e *voids* internos, quando fabricada por fabrico aditivo.

Palavras-chave: Otimização topológica, fabrico aditivo, ciclismo, NX

Página intencionalmente deixada em branco

Abstract

This report describes the project developed as part of the course unit “Project”, integrated into the Master’s in Mechanical Engineering – Industrial Production (MME – IP).

In the world of high-competition cycling, it is increasingly important to optimize aerodynamics and reduce the weight of the bike's components to improve cyclists' performance, highlighting that a difference of 100 grams can make a difference after 5 hours of effort. This project focuses on the topology optimization of one of these components.

The main objective of this project is to optimize a crankset (made of aluminum 5086) for a bicycle to reduce its weight while maintaining its mechanical integrity. The secondary objective is for the optimized component to combine the crank arm, spider, and chainring into one, thus transforming the three components into a single one.

The optimization was performed using NX software on a model very similar to an existing crankset. A modification was made to cover part of the crankset with material, thus providing the software with more material to work with and optimize more efficiently and freely.

The optimized component achieved a mass reduction of about 120 grams compared to the original crankset. However, more tests should be conducted on the model, such as aerodynamic studies and feasibility studies regarding manufacturing conditions. Additionally, further optimizations should be made, where possible, considering the orientation axis for 3D printing to prevent areas with unnecessary building supports and internal voids when manufactured via additive manufacturing.

Keywords: Topology optimization, additive manufacturing, cycling, NX

Página intencionalmente deixada em branco

Índice

1. Introdução.....	1
2. Estado da Técnica.....	3
2.1 Mundo do ciclismo profissional	3
2.2 Evolução nas bicicletas e componentes.....	7
2.3 Componentes de uma bicicleta	8
2.3. Fabricação aditiva	17
2.3.1 Procedimento.....	18
2.4. Vantagens dos processos de fabricação aditiva	19
2.6. Processos de fabricação aditiva	21
2.7 SLM.....	24
2.8. Otimização topológica	25
3. Metodologia.....	27
4. Procedimento experimental	29
5. Análise e Discussão de Resultados.....	35
6. Conclusões	38
Referências bibliográficas	39

Página intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 – Ataque de Tadej Pogačar numa etapa de montanha na volta a França ^[2]	3
Figura 2 – Comparação do perfil de sprinter com o perfil de montanhista ^[5]	4
Figura 3 – Bicicleta e equipamento de contrarrelógio ^[7]	5
Figura 4 – Ciclistas em pelotão compacto ^[8]	6
Figura 5 – Quadro da bicicleta ^[12]	8
Figura 6 – Forqueta da bicicleta ^[13]	9
Figura 7 – Roda dianteira com aros e roda traseira lenticular ^[14]	10
Figura 8 – Comparação de v brake com travão de disco ^[15]	11
Figura 9 – Desviador traseiro ^[16]	12
Figura 10 – Pedaleira de uma bicicleta	13
Figura 11– Cassete de uma bicicleta ^[17]	14
Figura 12 – Pedais da bicicleta ^[18]	15
Figura 13 – Guiador da bicicleta ^[19]	16
Figura 14 – Ilustração dos processos de fabricação aditiva e fabricação subtrativa ^[20]	17
Figura 15 – Ilustração dos processos de fabricação aditiva	18
Figura 16 – Ilustração do processo SLM ^[27]	24
Figura 17 – pedaleira Shimano Dura Ace FC R9200	27
Figura 18 – CAD da Pedaleira Shimano Dura Ace FC R9200	27
Figura 19 – Sequência de operações	28
Figura 20 – Exemplos de otimizações falhadas	29
Figura 21 – Pedaleira idealizada para o estudo	30
Figura 22 – Definição da massa máxima admitida	31
Figura 23 – Preservação da zona dos dentes	31
Figura 24 – Preservação da zona de encaixe do pedal	32
Figura 25 – Força aplicada	32
Figura 26 – Preservação da zona do constrangimento de fixação	33
Figura 27 – Remoção da zona de união ao prato	33
Figura 28 – Vista geral de todas as condições aplicadas para a simulação	34
Figura 29 – Modelo da pedaleira otimizada	35
Figura 30 – Conjunto da nova pedaleira	36
Figura 31 – Tensões existentes	36

Página intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tecnologias aditivas que processam pós metálicos	21
Tabela 2 – Propriedades do alumínio 5086 necessárias na simulação	34

Página intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

AM – *Additive Manufacturing*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

EBM – *Electron Beam Melting*

SLM – *Selective Laser Melting*

DMD – *Direct Metal Deposition*

CAD – *Computer Aided Design*

TO – *Topology Optimization*

STL - *Stereolithography*

ISO – *International Standardization Organization*

DED – *Direct Energy Deposition*

DfAM – *Design for Additive Manufacturing*

Página intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

O presente relatório apresenta o projeto desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Projeto, integrado no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial.

Com a necessidade de melhorar a performance dos ciclistas, as equipas de ciclismo têm dado cada vez mais atenção e foco, aos ganhos marginais que se podem obter. Para isso, as equipas passam mais tempo em túneis de vento, de forma a perceber o que pode ser melhorado a nível aerodinâmico, tanto na posição dos ciclistas, como nas bicicletas e nos seus componentes, estudando e testando também como os podem tornar o mais leve possível.

O objetivo principal deste projeto é otimizar topologicamente uma pedaleira de uma bicicleta, de modo a reduzir a sua massa, mas mantendo a sua integridade mecânica. O objetivo secundário deste projeto é obter um componente otimizado que seja a junção do braço, da aranha e do prato da pedaleira, transformando assim os três componentes num só.

O material a que se recorre mais frequentemente para fazer um componente mais leve, mantendo toda a sua integridade mecânica, é a fibra de carbono. A fibra de carbono tem entre 5 a 10 micrómetros e é composta maioritariamente por átomos de carbono. Apresenta uma elevada rigidez, elevada tensão de cedência e é um material extremamente leve.

O material utilizado neste projeto, para a otimização da pedaleira, foi o alumínio, que continua a ser o material mais utilizado devido ao seu reduzido custo, quando comparado com o elevado custo da fibra de carbono. É também um material leve e bastante rígido, cumprindo os requisitos de muitas bicicletas de topo.

O estudo desta otimização topológica foi realizado com recurso ao software da *Siemens*, o NX, mas devido a limitações na ferramenta com materiais compósitos, não foi possível recorrer à fibra de carbono como material de estudo, daí a escolha do alumínio, mais concretamente, o alumínio 5086.

Neste projeto, será feita uma introdução ao ciclismo e à necessidade de se otimizar as bicicletas e os seus componentes no capítulo 2, e ainda serão abordadas os temas de fabrico aditivo e otimização topológica; no capítulo 3 e 4 serão delineadas as estratégias para proceder à simulação do componente bem como definidos os parâmetros para a otimização ; no capítulo 5 serão apresentados e discutidos os resultados obtidos; por último, no capítulo 6, está a conclusão do relatório e possíveis melhorias e sugestões para trabalhos futuros.

Página intencionalmente deixada em branco

2. Estado da Técnica

2.1 Mundo do ciclismo profissional

No mundo competitivo do ciclismo profissional de estrada, a busca por ganhos marginais tornou-se o Santo Graal, tanto para os atletas como para os engenheiros. O ciclismo é o desporto do mundo mais exigente e que mais fatura passa para o corpo humano. Estamos a falar de um desporto em que os ciclistas passam diariamente, dependendo da prova que estão a fazer, 4,5 ou até 6 horas em cima da bicicleta, sendo que por vezes enfrentam condições atmosféricas adversas, como chuva, vento constante ou até por forma de rajadas, e nas provas durante os meses de julho, agosto e setembro, enfrentam um calor abrasador que implica a ingestão de muitos líquidos. Muitas vezes, no meio de isto tudo, ainda tem de escalar montanhas duríssimas, com 10km de subida com pendentes médias de 7% de inclinação, que tem por vezes rampas de 15%/16% de inclinação, ou até mais, em casos com a subida do Angliru em Espanha, com rampas a mais de 20%. Etapas com 120km, 200km ou alguns casos, como acontece em algumas clássicas de um só dia, provas que tem 250km. Isto tudo implica que os ciclistas tenham de fazer treinos intensivos para estarem preparados para enfrentar estas condições ^[1].

Na Figura 1 pode ver-se um ataque de um ciclista face ao seu rival mais direto.



Figura 1 – Ataque de Tadej Pogacar numa etapa de montanha na volta a França^[2]

O perfil dos ciclistas é diferente, depende da especialização de cada um. Temos sprinters, ciclistas muito fortes, com uma ponta final de força superior a todos os outros ciclistas, e normalmente são estes que disputam o final das etapas planas ou das etapas com pouco acumulado de subida durante as mesmas [3]. Este tipo de ciclista é normalmente mais pesado e não passa muito bem nas etapas de montanha, criando muitas vezes um grupo chamado de “grupeto” e são os últimos a concluir este tipo de etapas. Temos também os montanhistas ou os corredores da classificação geral, que têm outro tipo de perfil, sendo mais leves de modo a passar melhor as montanhas [3]. Cada um destes ciclistas tem perfis diferentes, pelo que fazem treino específico de acordo com as suas características. Por norma, os ciclistas que são bons nas montanhas fazem estágio em altitude para se ambientarem ao reduzido oxigénio presente em altas altitudes e passam por um período de redução de peso que pode demorar alguns meses e que por norma começa quando voltam das férias em janeiro, para se encontrarem nas melhores aptidões físicas quando chegarem os grandes objetivos da época, como por exemplo o Tour de France, Paris-Roubaix e campeonatos do mundo [4].

Na Figura 2 podemos ver a diferença a nível muscular entre o sprinter que vai com a *jersey* preta e branca e um corredor com a *jersey* amarela que passa melhor nas montanhas, sendo perfis completamente distintos.



Figura 2 – Comparação do perfil de sprinter com o perfil de montanhista [5]

Uma vez treinada a vertente do próprio ciclista, é vez de olhar para o equipamento em si, tanto a nível da roupa e calçado, como a nível da própria bicicleta, onde eles passam a maior parte do tempo. Todo este sistema ciclista+roupa+bicicleta tem de ser necessariamente leve e aerodinâmico. Olhando à parte da aerodinâmica existe todo um trabalho por parte dos engenheiros para desenvolver todo o equipamento do ciclista juntamente com a bicicleta, duma maneira mais aerodinâmica, de modo a diminuir a resistência ao ar ^[6]. A posição do ciclista adotada em cima da bicicleta também tem um impacto muito grande na performance do ciclista. É de notar que nas provas em contrarrelógio, os ciclistas adotam uma posição muito mais aerodinâmica com a ajuda de extensores que são colocados nas bicicletas de contrarrelógio, fazendo descansar os braços sobre os mesmos. Os próprios capacetes também são mais aerodinâmicos nestas provas. Na Figura 3 encontra-se um exemplo duma bicicleta e do equipamento utilizado em etapas de contrarrelógio.



Figura 3 – Bicicleta e equipamento de contrarrelógio^[7]

Nas etapas que não são em contrarrelógio, os ciclistas quando vão em pelotão reduzem significativamente o gasto de energia, porque vão protegidos pelos restantes ciclistas que vão na frente do pelotão, a meterem ritmos mais rápidos, mas que vão se expondo ao vento tendo assim um maior desgaste ^[6]. Este tipo de ciclistas sacrifica-se em prol de um colega de equipa mais forte e com grande hipótese de ganhar a etapa ou a classificação geral. Exemplo disso pode ver-se na Figura 4.



Figura 4 – Ciclistas em pelotão compacto^[8]

Sendo o peso um fator crucial, além da necessidade de reduzir o peso do próprio ciclista, há também necessidade de reduzir ao máximo o peso da bicicleta. A redução de umas simples gramas, podem trazer ganhos para o ciclista, traduzindo-se na poupança de energia, que pode ser o suficiente para se superiorizar em relação a outros.

Ter “pernas”, ter uma excelente capacidade física, não é tudo no ciclismo, é também muito importante a bicicleta utilizada, pelo que equipas com maior orçamento, equipam os seus ciclistas com o melhor equipamento possível. Muitas destas equipas também fazem um grande investimento na otimização aerodinâmica, levando os ciclistas para tuneis de vento, de modo a estudar as melhores posições e posturas corporais, e também para estudar o desempenho dos componentes da bicicleta ^[3].

É mesmo muito importante todo este estudo e preparação, que no fim duma etapa de 200km se pode traduzir numa vitória por milímetros ou até por décimas de milímetro, que por vezes tem de se recorrer ao *photofinish*. Nas grandes voltas como o Tour de France, Vuelta a España ou Giro d'Italia, que são provas compostas por 21 etapas e que a classificação geral é feita somando todo o tempo das 21 etapas, no final, os ciclistas têm em cima das pernas mais de 2000km e mais de 80h e isto pode traduzir-se numa vitória por escassos segundos.

2.2 Evolução nas bicicletas e componentes

Nos últimos anos houve avanços significativos e diferenças notáveis no que diz respeito ao design, materiais utilizados e tecnologia. No passado, o aço era o material dominante nos quadros das bicicletas de estrada. No entanto, houve uma mudança para materiais mais leves e mais orientados para o desempenho, como alumínio, fibra de carbono e titânio. A fibra de carbono, em particular, revolucionou o design das bicicletas de estrada, oferecendo uma combinação vencedora de leveza, rigidez e propriedades aerodinâmicas [9].

A geometria das bicicletas de estrada evoluiu para acomodar diferentes estilos e preferências dos ciclistas. As bicicletas antigas geralmente tinham uma geometria mais relaxada, proporcionando uma posição mais direita em cima da bicicleta. As bicicletas modernas apresentam uma geometria mais agressiva, com uma frente mais baixa e alcance maior, promovendo uma melhor aerodinâmica e transferência de potência.

A introdução das mudanças indexadas foi também um marco significativo. Isto permitiu aos ciclistas trocarem de mudança com mais precisão e facilidade, melhorando o desempenho. Nos últimos anos, os sistemas de transmissão eletrônica ganharam popularidade, dando trocas de mudanças precisas e sem esforço, simplesmente carregando num botão [10]. As bicicletas antigas tinham as desmultiplicações muito limitadas, o que significa que não atingiam as grandes velocidades que atualmente se praticam nas bicicletas. Existe agora uma ampla gama de desmultiplicações, permitindo utilizar mudanças mais baixas, de modo a conseguir enfrentar as subidas mais íngremes [11].

As rodas tornaram-se mais leves, mais aerodinâmicas e mais eficientes. As rodas com pneus com câmara de ar, eram as rodas standard, mas a tecnologia tubeless tem vindo a ganhar espaço no mercado, proporcionada menor resistência ao rolamento, menos furos e a capacidade de utilizar pressões de pneus mais baixas para um maior conforto e aderência [9].

Os travões de aro (v-brake) foram a norma durante épocas nas bicicletas antigas, mas os travões de disco têm se tornado cada vez mais populares. Os travões de disco oferecem melhor potência de travagem, especialmente em condições molhadas, e maior modulação. Esta tecnologia influenciou significativamente o design das bicicletas, permitindo a utilização de pneus mais versáteis.

A aerodinâmica tornou-se uma consideração fundamental a ter-se no design das bicicletas de estrada. As bicicletas modernas apresentam formas de tubos mais aerodinâmicas e cabos ocultos para reduzir a resistência ao ar, aumentando assim a velocidade.

Com o desenvolvimento da tecnologia, desenvolveram-se dispositivos eletrônicos como minicomputadores com GPS, medidores da potência que medem a potência aplicada pelo ciclista e monitores de batimentos cardíacos, oferecendo assim extensos dados que permitem o rastreamento e otimização do desempenho do atleta. Avanços nos materiais e nas tecnologias de fabrico, levaram à criação de componentes mais leves, desde pedaleiras mais leves, a guiadores mais leves, contribuindo para a diminuição do peso de forma geral ^[9].

2.3 Componentes de uma bicicleta

Uma bicicleta de estrada é essencialmente composta por um quadro, duas rodas, dois pneus, dois travões, duas manetes para os travões, duas manetes de mudanças, um desviador frontal, um desviador traseiro, uma corrente, uma pedaleira com dois pedais, com dois pratos e um eixo pedaleiro, uma cassete, um guiador, um avanço, um espigão do selim, um selim e uma forqueta. Existem ainda outros componentes como a fita para o guiador, o suporte para os bidons, o sistema GPS entre outros.

O quadro é o esqueleto da bicicleta e é feito de materiais que vão desde o aço, até alumínio, titânio e fibra de carbono (Figura 5). Os quadros mais recentes são feitos de fibra de carbono, de modo a serem o mais leve possível. Existem em vários tamanhos de modo a servirem a qualquer ciclista. Apesar de mais leves, os quadros de carbono apresentam uma excelente resistência mecânica. No interior do quadro ou a passar no exterior junto ao quadro, encontram-se os cabos das mudanças e dos travões.



Figura 5 – Quadro da bicicleta ^[12]

A forqueta é a parte da bicicleta que segura a roda da frente e que faz a ligação com o quadro (Figura 6). É feita normalmente com o mesmo material do quadro e tem um papel muito importante na direção e na absorção de choques. As forquetas utilizadas pelos ciclistas profissionais são em fibra de carbono, tal como o quadro. Há também uma grande necessidade de otimizar a aerodinâmica deste componente, que por norma é conseguido com o formato em lâmina do mesmo, de modo a reduzir a resistência ao ar. Em bicicletas mais modernas, por vezes os cabos dos travões são escondidos no seu interior, de modo a melhor a aerodinâmica e melhorar a estética.



Figura 6 – Forqueta da bicicleta [13]

O conjunto rodas-pneus são os componentes que entram em contacto com o solo, permitindo fazer o movimento linear da bicicleta para a frente. As rodas são geralmente leves e projetadas para velocidade e eficiência. São compostas por um aro, um cubo e vários raios. É ainda composta por um pneu. O aro e o cubo são feitos de fibra de carbono, de modo a reduzir o peso da roda, sendo que os raios são feitos de normalmente de aço inoxidável. Em provas de contrarrelógio, são utilizadas rodas lenticulares na traseira (Figura 7). São rodas fechadas, sem raios, mas que podem aumentar o desempenho em cerca de 30%. No entanto tem algumas desvantagens, tais como a instabilidade que pode causar na bicicleta, especialmente na presença de ventos cruzados, e também o reduzido conforto face a rodas normais. Por esses motivos, só são utilizadas no contrarrelógio, pois são provas mais curtas, que podem ir até 1h de esforço. Como são provas realizadas dentro das cidades, estão protegidas de eventuais ventos que possam existir em zonas de campo ou em zonas sem proteção.



Figura 7 – Roda dianteira com aros e roda traseira lenticular [14]

Os pneus impactam diretamente o desempenho, manobrabilidade e conforto em cima da bicicleta. Normalmente são estreitos, variam entre 23mm e 28mm de espessura e fazem pouco atrito com a estrada, de modo a aumentar a velocidade. A escolha dos pneus depende de fatores como a preferência do ciclista, condições climáticas da corrida e superfície da estrada. Eles são feitos com várias espessuras possíveis e tem um rasto suave em padrão, que oferece aderência para andar na estrada.

Nos últimos anos, tem se adotado cada vez mais a tecnologia tubeless, metendo de parte a típica roda com pneu e uma camara de ar no seu interior. Com o tubeless, sem a camara de ar, poupa-se algumas gramas no peso total do conjunto, além de que sem ela, deixa de haver o risco de furos e de beliscões na mesma. Proporciona ainda, uma melhor sensação quando em contato com o solo, aumentando o conforto. Podem também ser utilizadas com pressões mais baixas, aumentando assim a tração e a segurança do ciclista.

No seu interior, é comum aplicar-se um líquido selante, que pode tapar um possível furo que se possa vir a ter, sendo assim possível continuar a prova, sem perder tempo a trocar de roda.

As bicicletas de estrada usam travões de aro (também conhecido por v-brake) ou travões de disco. Nos travões de aro, quando é pressionado o manípulo dos travões no guiador, os cabos que estão em tensão e que estão ligados desde o manípulo e que vão até à pinça dos travões, acionam o movimento da pinça. Nas extremidades da pinça estão duas pastilhas ou dois calços, e são estes componentes que fazem o contacto com as laterais de lado do aro da roda, o que leva a uma redução da velocidade da bicicleta. Como ocorre este contacto nos componentes e eles são feitos de um material mais frágil que o aro da roda, sofrem desgaste e tem de ser substituídos quando já não oferecem condições de segurança. O travão de disco consiste num rotor, que é um disco metálico circular, montado no cubo da roda e numa pinça que contem os pistons que pressionam as pastilhas contra o rotor, criando fricção e assim reduzindo a

velocidade. O travão de disco oferece melhor potência de travagem o que apresenta melhor controlo e desacelerações mais rápidas, o que é fundamental para os ciclistas que andam a velocidades elevadas e precisam de travar rapidamente, de modo a evitar quedas ou saídas de estrada. Os travões de disco também apresentam melhor desempenho em todas as condições climatéricas, ao contrário dos travões de aro que são afetados pela água e por possível terra ou detritos, os travões de disco operam independentes do aro da roda, não sendo assim afetados pela água e por lama. Os travões de disco também dispersam o calor numa maneira mais eficiente, o que é muito importante para descidas longas ou travagens contínuas. Isto previne possíveis perdas de potência de travagem e desgaste prematuro das pastilhas e disco, devido ao acumular de temperatura. Uma outra vantagem de utilizar travão de disco, é que isto permite uma maior seleção de roda e de pneus mais largos, o que oferece conforto e tração em provas em que os ciclistas passam por pisos mais desgastados durante largos quilómetros. O design das pinças deste tipo de travão é mais compacto e elegante, e tem uma solução integrada que permite recolher a pinça para trás da forqueta, de modo a diminuir a resistência ao ar e preservando o perfil aerodinâmico da bicicleta. Historicamente, o travão de disco sempre foi mais pesado que o travão de aro, mas com os avanços na área dos materiais e do design, a diferença de peso diminuiu substancialmente. Os benefícios do travão de disco compensam o pequeno aumento de peso. Na Figura 8 encontram-se os dois tipos de travão.



Figura 8 – Comparação de v brake com travão de disco ^[15]

A troca de mudança controla a velocidade que é selecionada na cassette e na pedaleira, isto é, o ciclista seleciona a mudança de modo a encontrar a relação apropriada para terrenos planos ou montanhosos. A troca de mudança é integrada nas manetes dos travões, e quando esta é acionada, é ativado o desviador dianteiro ou o desviador traseiro, por ação de cabos em tensão que fazem esta ligação entre os componentes. Hoje em dia, a maior parte das equipas da elite do ciclismo já utilizam mudanças eletrónicas. A diferença é que com estas, basta um pequeno toque para aumentar ou reduzir a mudança, consoante o botão que se pressiona e é enviado um

sinal elétrico para o desviador, que faz mudar a mudança de modo preciso e sem esforço. Este sistema é wireless, o que elimina a necessidade da utilização de cabos. Devido ao posicionamento da manete dos travões e da manete das mudanças na posição onde os ciclistas apoiam as mãos, os ciclistas conseguem facilmente trocar de mudança ou travar, mantendo o foco na estrada e minimizando as distrações. Existem duas manetes de mudança, uma para o desviador dianteiro e outra para o desviador traseiro.

Os desviadores são componentes cruciais na troca de mudanças, permitindo ao ciclista escolher a mudança apropriada para um terreno mais plano ou mais montanhoso (Figura 9). O desviador dianteiro desloca fisicamente a corrente para o outro prato, caso seja uma pedaleira com mais que um prato, e no caso do desviador traseiro, muda a corrente para outro carreto presente na cassette. Até aqui há uma atenção de modo a reduzir o peso, utilizando-se muitas vezes fibra de carbono como material. Os desviadores têm uns limitadores que permite apertar ou dar folga, de modo a que o desviador não saia dos carretos ou do prato, o que faz com que não seja possível pedalar mais ou até pode potencialmente provocar uma queda. É ainda possível afinar os desviadores, de modo a acertar a mudança e suavizar a troca para outras velocidades. Quando os desviadores não estão afinados, pode acontecer que no momento em que se solicita a mudança para um carreto diferente, a mudança não seja feita à primeira, sendo só feita depois de uma segunda ativação por parte da manete das mudanças, ou pode acontecer mudar de uma só vez, dois carretos, o que é prejudicial ao ciclista. Tudo isto precisa de estar bem afinado, para que seja feita a mudança para outro carreto da forma mais rápida, cómoda e segura possível. Os desviadores eletrónicos não necessitam de cabos, sendo que utilizam um sistema wireless, no entanto precisam de uma pequena bateria que serve de alimentação a um pequeno motor que faz o movimento para deslocar o desviador, quando este é solicitado.



Figura 9 – Desviador traseiro [16]

A pedaleira é um componente crítico que faz a ligação entre a força exercida pelo ciclista nos pedais e todo o sistema de transmissão da bicicleta, transformando a força humana exercida sobre os pedais, num movimento linear para as rodas movimentarem a bicicleta (Figura 10). A pedaleira consiste num par de braços horizontais que conecta os pedais ao movimento central (eixo pedaleiro). Nas bicicletas de estrada, por norma existem dois pratos circulares, com um determinado número de dentes, que vão definir a relação de mudanças para todo o sistema. Uma das relações mais frequentes para os dois pratos é 52-36T, o que significa que o prato maior tem 52 dentes e o prato menor tem 36 dentes. O prato maior é utilizado para terrenos mais planos onde se aplicam velocidades muito elevadas e o prato mais pequeno é utilizado nas montanhas, onde é preciso uma maior desmultiplicação para conseguir manter a cadência correta. Os pratos são tipicamente feitos de alumínio ou fibra de carbono. Começam agora também a existir bicicletas com um só prato na pedaleira. Muitas pedaleiras já tem um medidor de potência incorporado, que mede a potência aplicada pelo ciclista, o que dá informações valiosas para os treinos e provas, e para análise do desempenho.

Os braços horizontais variam tipicamente entre 165mm e 175mm.



Figura 10 – Pedaleira de uma bicicleta

A cassette trabalha em conjunto com a pedaleira e com a corrente, e oferece também uma grande variedade de relações de mudanças (Figura 11). É montada no cubo da roda traseira, e por norma a cassette dos ciclistas profissionais tem entre 10 a 12 velocidades. Cada velocidade corresponde a um prato circular com dentes chamado de carretos. Estes carretos têm dimensões

diferentes e um número de dentes diferente, sendo que o carreto mais pequeno é utilizado para velocidades maiores como em sprints e o carreto maior é utilizado para velocidades menores, como subir montanhas. A diferença no número de dentes do carreto menor para o carreto maior costuma ser 11-28T ou 11-32T. O material dos carretos costuma ser em alumínio ou titânio. Os carretos costumam ser otimizados de modo a reduzir a fricção com a corrente que liga a cassete à pedaleira. Existe uma necessidade de otimizar ainda mais de modo a reduzir o peso sem sacrificar a durabilidade da cassete. A manutenção é fundamental, uma vez que cassetes gastas ou com dentes gastos, prejudicam na mudança entre carretos.



Figura 11– Cassete de uma bicicleta [17]

A corrente é um componente que serve de ligação da cassete à pedaleira e que transfere a potência exercida pelo ciclista nos pedais, para a roda traseira, de modo a propulsionar a bicicleta para a frente. A performance da corrente, afeta a eficiência da bicicleta e a performance geral. São feitas de aço de alta qualidade, desenhadas para serem leves, mas duradouras. Algumas correntes são feitas de titânio para reduzir o peso e aumentar a resistência à corrosão. A corrente é constituída por elos interconectados. Cada elo é constituído por duas placas internas e duas placas externas que são mantidas juntas por pinos. As placas internas encaixam nos dentes dos pratos da pedaleira e nos carretos da cassete, enquanto as placas externas encaixam no desviador dianteiro e no desviador traseiro de modo a permitir a troca de mudança. Algumas correntes topo de gama, vem com revestimentos especiais ou com tratamentos, de modo a reduzir a fricção e assim aumentar o desempenho na troca de mudança. Por cima disto, é ainda lubrificada de modo a reduzir o desgaste e a manter toda a operação suave. Com o tempo, o desgaste é inevitável, e torna-se fundamental dar uma manutenção cuidada à corrente, limpar, lubrificar e substituir por outra nova, quando já estiver muito desgastada, isto porque uma corrente desgastada prejudica o desempenho, mas também

compromete e pode causar dano nos componentes com que está em contacto. Tal como nos outros componentes, a massa da corrente também é um fator a ter em consideração.

Os pedais são o componente que faz a ligação entre o sistema ciclista-bicicleta. É neles que é aplicada a força por parte do ciclista, fazendo a bicicleta movimentar-se segundo um movimento linear (Figura 12). Os melhores pedais são mais eficientes na transferência da força e são mais confortáveis. Os pedais utilizados pelos ciclistas são de encaixe, permitindo montar/desmontar com bastante rapidez. Os clips (encaixes) que são colocados nas sapatilhas e que por sua vez, encaixam nos pedais da bicicleta, são feitos de plástico ou metal, enquanto o pedal onde se encaixa a sapatilha é de fibra de carbono ou alumínio. É possível ajustar a tensão dos pedais, de modo que seja possível a cada ciclista escolher o quão fácil/rápido é tirar o pé do pedal. Isto é importante, porque imprevistos acontecem, e pode ser preciso meter o pé no chão o mais rápido possível, mas ao mesmo tempo, também não se quer desencaixar o pé no meio de um sprint, provocando uma queda. Para desencaixar o pé do pedal é necessário rodar lateralmente cerca de 15°. Também aqui é importante reduzir o peso, sendo a fibra de carbono o material de eleição. Os clips que são colocados na sola das sapatilhas, podem ser ajustados mais à frente do pé ou mais atrás, para que sejam mais ergonómicos e evitem possíveis lesões ao ciclista. Muitos dos ciclistas optam por pedais com potenciómetros, para que saibam quantos watts vão a exercer, para que controlem melhor o seu esforço.



Figura 12 – Pedais da bicicleta ^[18]

O guiador tem um papel muito importante na aerodinâmica do ciclista e também no seu conforto (Figura 13). Os guiadores são feitos em fibra de carbono, reduzindo o peso, mas mantendo a rigidez necessária e suavizando as vibrações sentidas. A largura dos guiadores é escolhida tendo em conta a largura de ombros do ciclista. Os guiadores têm uns drops, que permitem ao ciclista adotar uma posição mais deitada, que é mais agressiva, de forma a reduzir

a resistência ao ar, o que se traduz em maiores velocidades alcançadas. Estes drops podem ser ajustados tanto no seu alcance (distância horizontal desde o avanço até ao início do drop) como na sua altura. O avanço é o componente que faz a ligação entre o guiador e o quadro. É graças a ele, que podemos controlar a distância do guiador ao quadro, ajustando assim para os vários tamanhos dos ciclistas. É comum ver-se guiadores já com estes avanços integrados num só componente. Nos guiadores mais modernos também há uma preocupação em esconder os cabos por dentro do guiador, para que sejam mais aerodinâmicos. É também utilizada uma fita que é enrolada à volta do guiador, de modo a dar mais conforto ao ciclista e que também serve de atenuador contra as vibrações provocadas pelo movimento. A fita pode ser feita em espuma, em gel ou numa mistura dos dois.



Figura 13 – Guiador da bicicleta [19]

O selim onde os ciclistas se sentam, é um componente fundamental que oferece o conforto necessário para enfrentar as longas etapas em cima da bicicleta. A estrutura onde se encaixa é tipicamente feita de fibra de carbono, nylon ou matérias compósitas. O selim é preenchido no seu interior com uma espuma ou gel ou uma combinação de ambos. A parte mais exterior do selim é feita com materiais duradouros que resistem ao desgaste e às condições climatéricas. Normalmente são utilizados materiais sintéticos para assegurar isso, tais como microfibras, couro ou Kevlar. Os selins vem em diferentes formas e tamanhos, para que se adaptem ao perfil de cada ciclista, sendo que podem ser achatados ou mais redondos, podem ser mais largos ou mais estreitos e muitos selins não tem material na zona central de modo a não fazer pressão em zonas sensíveis, prevenindo também algum desconforto. Pode ser ajustada a sua posição para a frente ou para trás, tal como a sua inclinação. A sua altura também pode ser ajustada, mas isso já é feito no espigão do selim, que é o tubo vertical que faz a ligação da bicicleta ao selim. Também aqui se poupa algum peso, optando-se mais uma vez pela escolha de fibra de carbono como o material de construção.

Por vezes, optam-se por reduções ainda mais extremas, como raspar a tinta em certas zonas, tirar os encaixes dos bidons, ou até tornar os bidons mais aerodinâmicos, tirar a fita do guiador e atirar os bidons fora em momentos cruciais da corrida, em que sabem que já não vão precisar de se hidratarem.

2.3. Fabricação aditiva

A fabricação aditiva consiste na criação de um objeto através da adição de material, camada a camada, até se obter o objeto final. Por outro lado, a fabricação subtrativa remove o material de um bloco inicial, até se obter o objeto final. Está ilustrado na Figura 14 os dois processos.

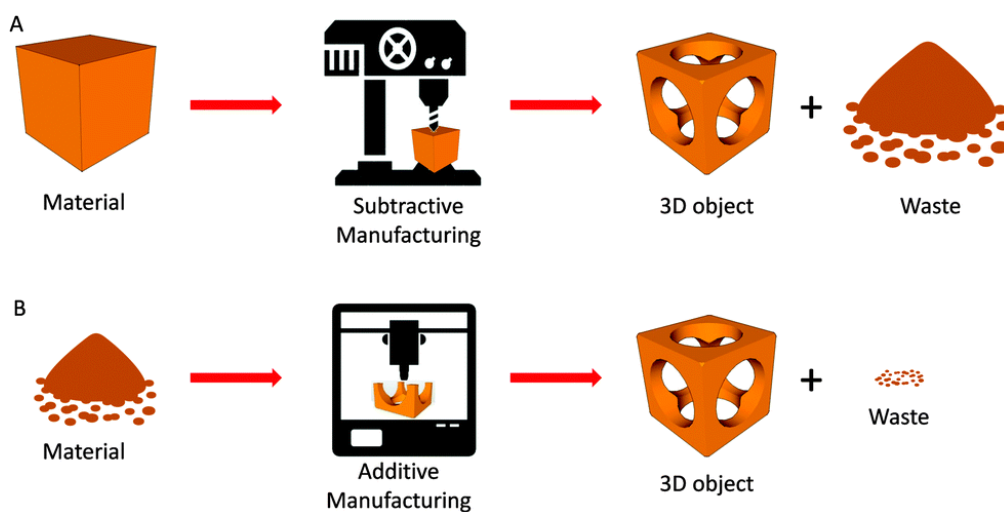


Figura 14 – Ilustração dos processos de fabricação aditiva e fabricação subtrativa [20]

Existe um maior desperdício de material quando o objeto é feito por fabricação subtrativa. O processo de fabricação subtrativa requer uma análise detalhada e cuidadosa da geometria da peça, para determinar, por exemplo, interferências da ferramenta durante as trajetórias de maquinação, ordem dos processos de maquinação e definição de ferramentas.

Por outro lado, a fabricação aditiva requer a obtenção da peça a produzir em formato digital, sendo que se pode apresentar como um ficheiro oriundo dum *software* de CAD, tenha sido ele desenhado/projetado, obtido duma digitalização com recurso a um *scanner* 3D ou até fruto duma otimização topológica. Requer ainda detalhes como a dimensão e orientação da peça a construir, equipamento a utilizar e que materiais utilizar [21], sendo que a geometria nunca será uma limitação ao fabrico.

A maior parte das máquinas comercializadas usam o método de adição camada a camada e as maiores diferenças nestas máquinas estão no tipo de material que usam, na forma como as

camadas são criadas e como é que as camadas se ligam umas às outras. Existe também a necessidade, para alguns casos, de se usar material de suporte que irá fornecer sustentação à peça a ser produzida. Este material de suporte é mais tarde removido por processos de pós-processamento. Estas diferenças determinam a precisão da peça final, e a suas propriedades mecânicas, a rapidez do processo, o seu pós-processamento e o custo da máquina [21].

Muitas das vezes, a criação destes modelos é realizada com a intenção de validar o design dos mesmos, ajudando na compreensão do design e dando uma perspectiva que os desenhos CAD e as renderizações não permitem. Com estes protótipos também se torna possível testar rapidamente a sua funcionalidade.

Atualmente, e com o avançar das tecnologias, já é bastante comum haver modelos híbridos, isto é, modelos que foram construídos com recurso a fabricação aditiva e fabricação subtrativa [22].

2.3.1 Procedimento

O princípio base da fabricação aditiva, passa pela construção de um modelo através de um sistema CAD 3D, que depois é convertido para ficheiro STL. Depois é feita a orientação do modelo da forma mais correta no *software* da própria máquina. Posteriormente, é feito um fatiamento das várias camadas e por último, é fabricada a peça, adicionando material camada a camada, até se obter no final a peça desejada, sendo que cada camada é uma fina secção da parte derivada do CAD original. Na Figura 15 está esquematizado este processo.

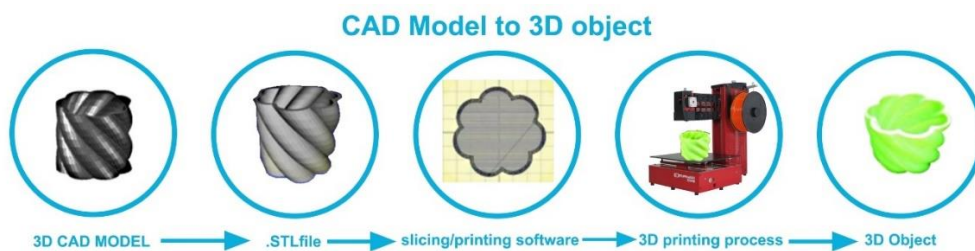


Figura 15 – Ilustração dos processos de fabricação aditiva.

Com a evolução dos *softwares*, atualmente já existem softwares CAD que conseguem desenhar a peça e preparar todo o processo de impressão. Depois é só enviar para a impressora com a informação já toda preparada, sendo que neste ponto basta mandar imprimir a peça.

Como está indicado na imagem anterior, é necessário então obter um ficheiro STL para ser lido na impressora. Existem impressoras que aceitam outro tipo de extensões. Será sempre necessário verificar as dimensões, orientações e posições do modelo, sobretudo se vamos imprimir mais que uma peça, de modo a não haver sobreposições. Para não haver interseções entre as peças, é utilizada uma técnica que se chama *nesting*, que posiciona as peças de modo que estejam a uma distância segura entre elas. Este *nesting*, pode ser feito automaticamente pelo *software*, dando o utilizador uma distância de segurança entre os vários modelos e podendo também escolher a que altura irá a impressão começar ou então pode ser feito manualmente e livremente pelo utilizador ^[23].

É essencial garantir que existem condições para avançar com a impressão do modelo, verificando se existe material suficiente para a impressão, seja ele em pó, filamentos ou resina, e também se os parâmetros de inertização estão alcançados, como a substituição de oxigénio por azoto, de modo a evitar combustões e explosões, e também deformações térmicas ^[24].

Depois da impressão do modelo, procede-se à sua remoção e ao seu pós-processamento, verificando se já não existem temperaturas altas ou mecanismos da máquina em movimento. Quando possível, e dependendo da máquina/tecnologia utilizada, o pó que não foi sinterizado e que esteja por cima da peça imprimida, deve ser removido no interior da máquina. Por um lado, para ser reaproveitado, ou como no caso de alguns pós metálicos, para segurança da pessoa que está a manusear os pós, pois alguns são prejudiciais à saúde.

O pós-processamento também varia da tecnologia utilizada, dando alguns exemplos como a remoção de material de suporte, passagem pela máquina de granalha em que são projetados microesferas de vidro contra a peça, tratamento térmico ou até passar pela polidora.

2.4. Vantagens dos processos de fabricação aditiva

Sendo que a fabricação aditiva desperdiça menos material na criação de componentes, tem menos impacto ambiental que a fabricação subtrativa, sendo assim mais sustentável, sendo isto uma clara vantagem. No campo da sustentabilidade temos também a melhoria na eficiência dos recursos, garantindo a quantidade de material certa em cada etapa do processo ^[25].

É importante aproveitar ao máximo a vantagem que existe a nível de design e de liberdade para criar uma peça ^[25]. Regra geral, peças que possam ser fabricadas por métodos convencionais e que sejam economicamente mais apelativas, não devem ser fabricadas por AM, no entanto, é

importante equacionar a sua utilização quando se trata de geometrias complexas, baixos volumes de produção, características especiais ou oportunidades para consolidar várias peças.

Outra vantagem está no facto de que os componentes só são produzidos quando necessários, evitando assim a necessidade de *stocks* desnecessários, que se associa também à outra vantagem de que qualquer alteração na fase de desenvolvimento de um produto, pode ser rapidamente testada.

2.5 Desvantagens dos processos de fabricação aditiva

Um das limitações destes processos, é a qualidade de acabamento da peça, sendo que muitas das vezes é necessário dar um acabamento às mesmas. Isto acontece por exemplo na tecnologia SLM, na qual a peça é criada com a adição de camadas e isto deixa um acabamento áspero na mesma. Com a necessidade de maquinar ou polir a peça, aumenta o tempo de produção da peça e também os custos.

A gama de materiais a utilizar é ainda limitada. Nem todos os materiais são facilmente adaptáveis para processos de fabrico aditivo, e certos materiais até podem exibir diferentes propriedades mecânica quando utilizados no AM.

Um dos grandes problemas do AM continua a ser as tolerâncias apertadas exigidas, quando se imprime uma peça. Durante a fase de camada a camada, podem ocorrer empenos devido a cargas térmicas presentes durante o processo de impressão. Isto pode requerer pós-processamento adicional, tendo que a peça ser maquinada. No caso da impressão de uma pedaleira, este ponto é extremamente importante, de modo que os dentes encaixem na perfeição na corrente.

O AM torna-se menos económico para a produção em massa, sendo mais eficiente para a produção de pequenas quantidades. O custo dos materiais (pós), consumo de energia, maiores tempos de produção, podem resultar em maiores custos para a produção em grandes quantidades.

O tamanho da impressora e o tamanho da sua cama de construção, limitam o tamanho da peça a produzir. Nos casos em que as peças a produzir são pequenas, podem ser impressas 50 peças numa só impressão. Quando as peças são grandes, por vezes só se consegue imprimir uma de cada vez.

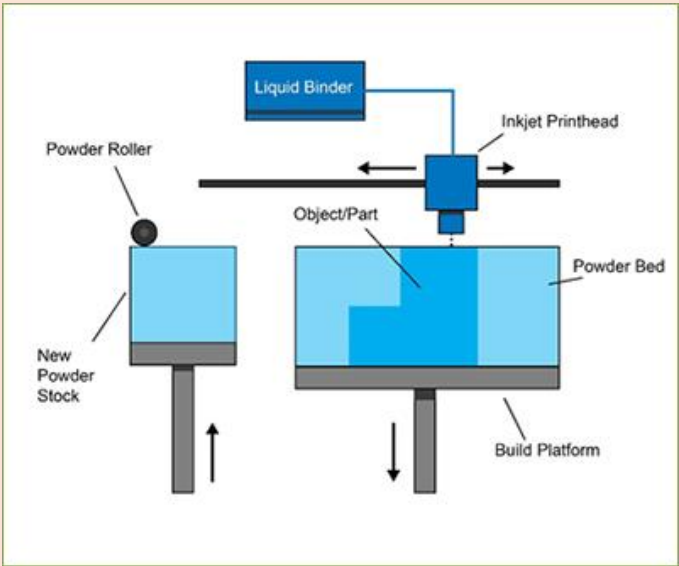
2.6. Processos de fabricação aditiva

As sete categorias referenciadas na norma ISSO/ASTM 52900:2021, elaboradas pelo comités ISO TC261 (*International Standardization Organization*) e ASTM F42 (*American Society for Testing and Materials*), são:

1. *VAT Photopolymerisation*
2. *Material Jetting*
3. *Binder Jetting*
4. *Material Extrusion*
5. *Powder Bed Fusion*
6. *Sheet Lamination*
7. *Directed Energy Deposition*

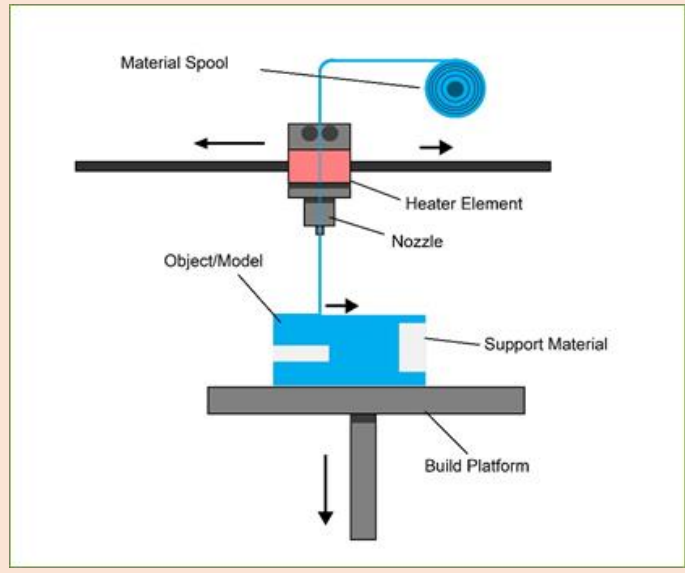
Destas sete categorias, apenas quatro podem processar pó metálico. As tecnologias e os materiais que são normalmente utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tecnologias aditivas que processam pós metálicos

Categoria	Tecnologia	Materiais utilizados
Binder Jetting	<p style="text-align: center;">Metal 3D Print ^[26]</p> 	Aço inoxidável

Material Extrusion

FDM [26]



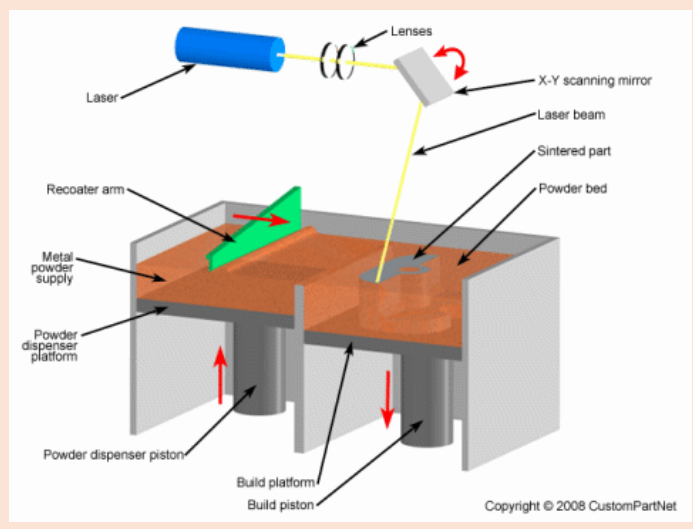
Filamentos

EBM

Liga de titânio
Liga de crómio-cobalto

SLM [27]

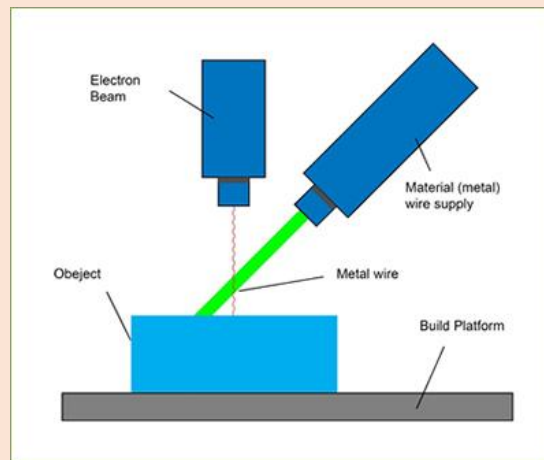
Powder Bed Fusion



Aço inoxidável
Ligas de alumínio
Ligas de titânio
Liga de crómio-cobalto
Liga de níquel

DED

DMD [26]



Aço inoxidável
Liga crômio-cobalto
Ligas de titânio
Ligas de níquel

Analisando a tabela e tendo em conta que a pedaleira seria eventualmente para imprimir, foi escolhida a tecnologia SLM para ser estudada, sendo que é a única tecnologia que processa pós metálicos de alumínio, material utilizado na otimização topológica da pedaleira.

2.7 SLM

O processo de SLM (*Selective Laser Sintering*) é um processo de fabrico aditivo que utiliza pó metálico processado por um laser com elevada potência. Tem início com a deposição e compactação da primeira camada de pó sobre a plataforma de construção, sendo esta camada a base de construção para a peça, e de seguida, com o laser, é percorrida a trajetória da peça, havendo uma fusão parcial do pó. A plataforma de construção vai descendo, permitindo a adição de camadas sucessivas até à peça estar completa, e ao mesmo tempo, a plataforma de alimentação vai subindo, de modo a alimentar o processo com pó. O pó é depois espalhado na plataforma de construção com recurso a um rolo, que deixa o pó liso e pronto a que haja nova sinterização (Figura 16).

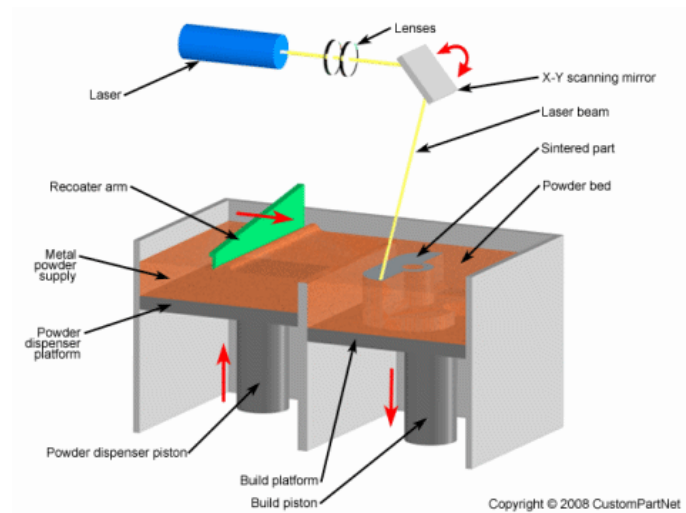


Figura 16 – Ilustração do processo SLM^[27]

A plataforma onde a peça é construída, encontra-se inserida numa câmara com temperatura controlada para reduzir a intensidade do laser e reduzir os empenos/distorções, devido às contrações térmicas, sendo que a peça necessita no fim um tempo de arrefecimento. Parâmetros como a potência do laser, propriedades do material e velocidade de varrimento do laser, podem diferir entre diferentes máquinas que utilizem o mesmo processo.

2.8. Otimização topológica

A possibilidade oferecida pelo fabrico aditivo para produzir componentes com formas complexas, deu motivação para se investigarem novos métodos para se criarem objetos e estruturas mais leves, sem olhar ao entrave da complexidade do design que isto causaria ao utilizar processos de fabrico tradicionais.

Nos dias atuais, a otimização topológica está de mãos dadas com o fabrico aditivo de modo a aproveitar-se o melhor dos dois mundos. Esta sinergia pode levar ao aumento da performance do componente ao mesmo tempo que reduz os custos e material desperdiçado.

A otimização topológica implica muitos passos para se obter o componente final otimizado. Começa com a definição do solver e do método utilizado para correr o processo de otimização. Depois disso é possível aplicar forças e constrangimentos no modelo, seguida de todas as definições necessárias para chegar aos objetivos predefinidos.

Depois da simulação, é necessário um pós-processamento. Seja ele uma suavização, seja uns pequenos ajustes, é sempre necessário este trabalho. O resultado obtido serve como um guia, não serve como resultado final, se assim fosse, o engenheiro não era necessário e perdia o seu trabalho. Nem sempre o resultado obtido vem nas melhores condições e é preciso evitar situações como aquela que vamos ver mais à frente. É um processo que requer muito tempo, mas que é essencial para uma solução otimizada.

A otimização topológica é então um tipo de métodos de otimização de tamanho, massa e forma. Esta otimização é feita num espaço restrito à otimização, otimizando esse mesmo espaço, tendo em conta todos os objetivos que queremos alcançar. Tudo o que seja peças de ligação ao objeto que estamos a otimizar, terão de ser excluídos deste espaço, senão eles próprios seriam alvo da otimização.

Um exemplo dos seus benefícios pode ser encontrado na indústria aeronáutica, onde o peso e a redução de custos são cruciais, onde no avião Airbus A380 se poupou cerca de 1000 kg.

Página intencionalmente deixada em branco

3. Metodologia

O software utilizado para otimização topológica foi o NX, software da *Siemens*. Como base de partida para a simulação, foi utilizado um modelo já existente, duma pedaleira Shimano Dura Ace FC R9200 , uma das pedaleiras mais utilizadas em alta competição por parte dos ciclistas e das equipas.



Figura 17 – pedaleira Shimano Dura Ace FC R9200

Como pode ser observado na Figura 17, o modelo tem dois pratos, no entanto o objetivo da simulação é criar uma pedaleira com um só prato, visto que já é uma prática recorrente em alta competição. Para isso, importou-se o modelo para o NX e foi retirado o prato mais pequeno, como pode ser visto na Figura 18.

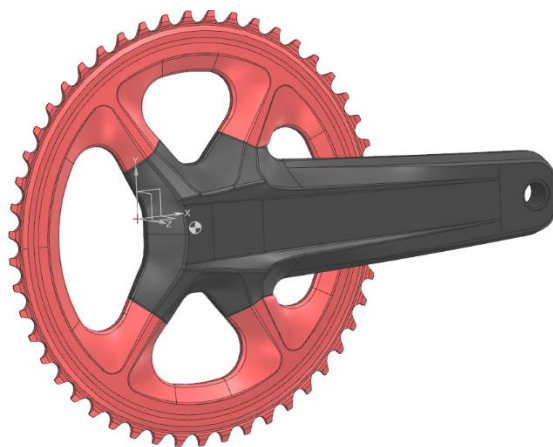


Figura 18 – CAD da Pedaleira Shimano Dura Ace FC R9200

Para realizar a simulação no NX, são necessários alguns passos, nomeadamente especificar o material que vai ser utilizado; especificar o *design space* onde será otimizado o componente; definir os objetivos da otimização, que serão neste caso, reduzir a massa do componente; aplicar forças e condições de fronteira; e indicar zonas para remover ou incluir material.

Depois de realizada a simulação, será necessário validar a mesma. Se os resultados não corresponderem ao pretendido, dever-se-á voltar novamente às definições de parâmetros, como pode ser observado na Figura 19.

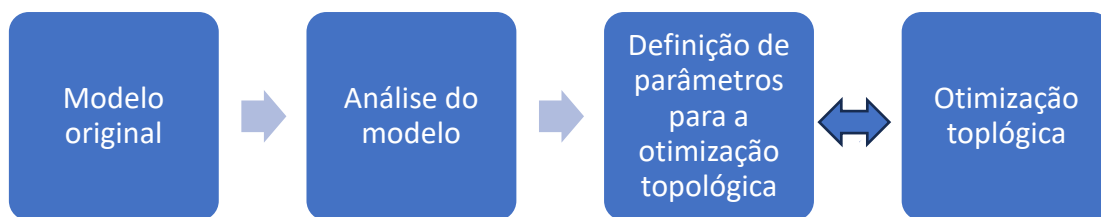


Figura 19 – Sequência de operações

4. Procedimento experimental

Durante as simulações que foram feitas inicialmente, verificou-se que os resultados obtidos eram completamente descabidos e que não estavam de acordo com as expectativas para este estudo. Na Figura 20 estão alguns exemplos dos vários problemas enfrentados, que ocorreram durante a simulação. Nestes 2 casos, temos demonstradas as iniciais que acompanharam o projeto no seu princípio. Na imagem da esquerda, a zona do prato não foi preservada e foi ignorada completamente e na imagem da direita não temos conexão entre o braço e o prato da pedaleira. Estes tipos de fenómenos ocorreram porque inicialmente só tinha um constrangimento aplicado no meio do braço onde este se conecta ao veio que liga ao outro braço da pedaleira (não está visível na imagem) e ao quadro, e apenas uma força aplicada no braço, onde este se liga com o pedal. Só com estas 2 condições para a simulação, seria impossível alcançar os objetivos pretendidos.

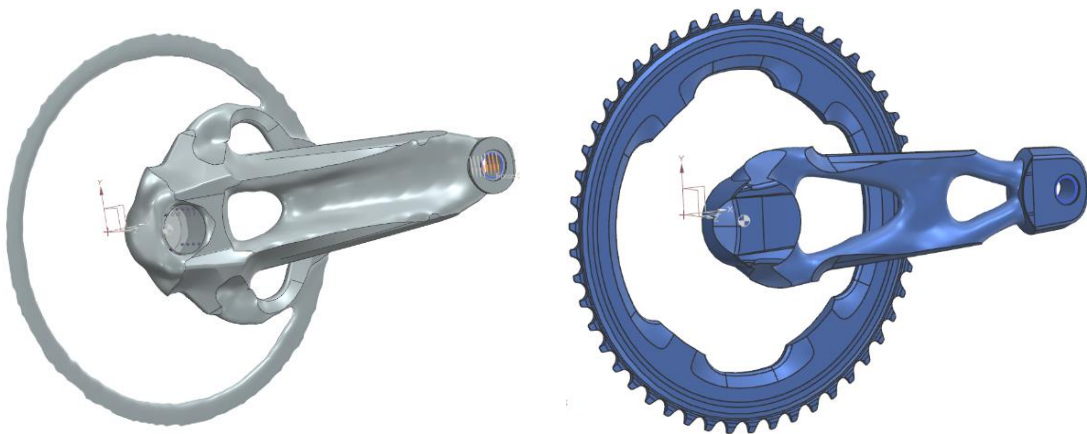


Figura 20 – Exemplos de otimizações falhadas

Além de se terem aplicado mais condições à simulação, foi também alterada a abordagem inicial, porque o software tentou otimizar um componente que, por sua vez, já estava otimizado para alto rendimento. Na segunda abordagem feita, foram tapados todos os furos que existiam na pedaleira, deixando esta de estar aberta. Ao fazer isto, a pedaleira ficou com mais material e, tendo mais material com que trabalhar, o software apresenta um maior grau de liberdade para otimizar o componente. Esta segunda abordagem pode ser vista na Figura 21.

Para a otimização deste conjunto, apontou-se para uma redução de massa, de modo a que no máximo a pedaleira tenha 300 gramas, ou seja, o objeto otimizado não poderá ter mais de 300 gramas (Figura 22).

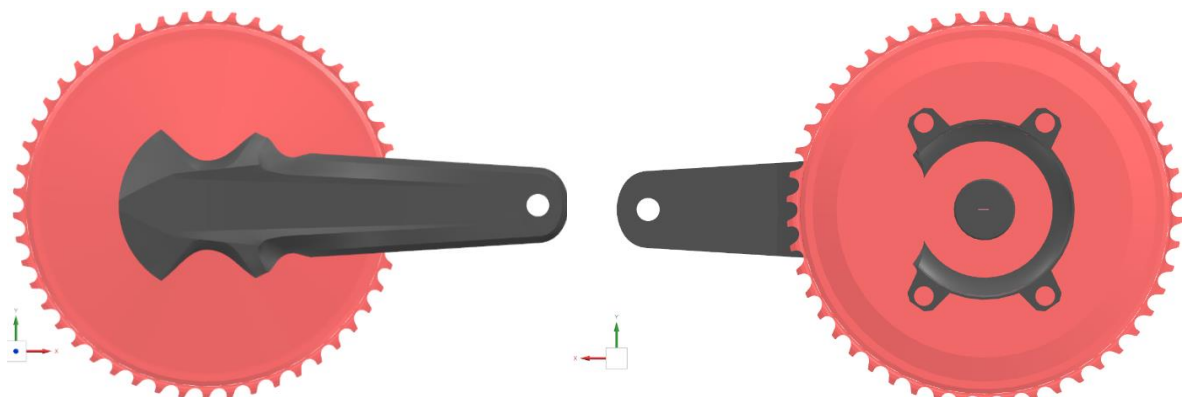


Figura 21 – Pedaleira idealizada para o estudo

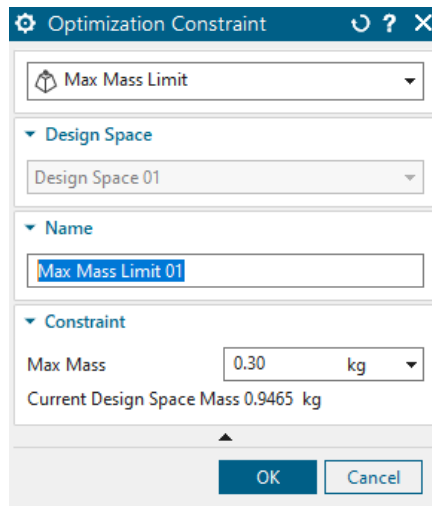


Figura 22 – Definição da massa máxima admitida

Em relação às outras condições do estudo, a zona onde estão os dentes, onde passa a corrente, tem de ser preservada. Para isso, foi preservada uma zona de 10mm, como é possível ver na Figura 23.

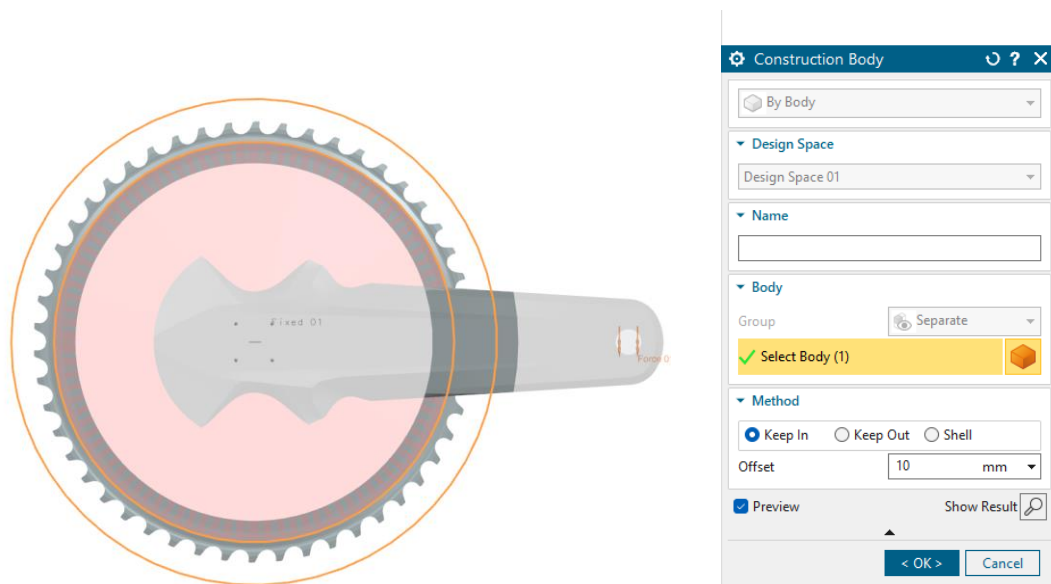


Figura 23 – Preservação da zona dos dentes

Na zona do braço, onde é encaixado o pedal, foi também preservada uma zona de 5mm, de modo a que não haja otimização nestes 5mm (Figura 24).

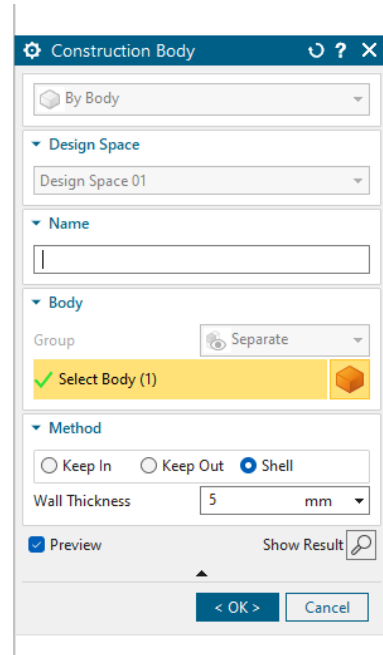
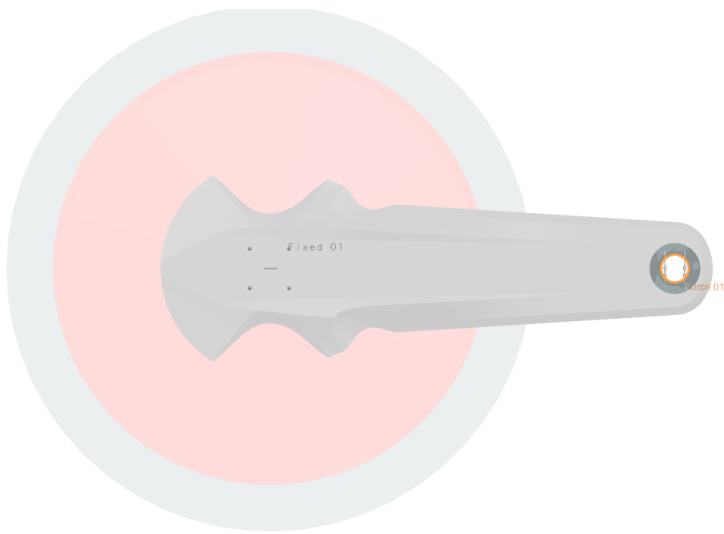


Figura 24 – Preservação da zona de encaixe do pedal

Foi ainda aplicada uma força de 2000N em Z, que é sensivelmente a força que um ciclista com peso de 68kg, multiplicado por 3, faz sobre o pedal (Figura 25). A multiplicação por 3 serve apenas como fator de segurança do material.

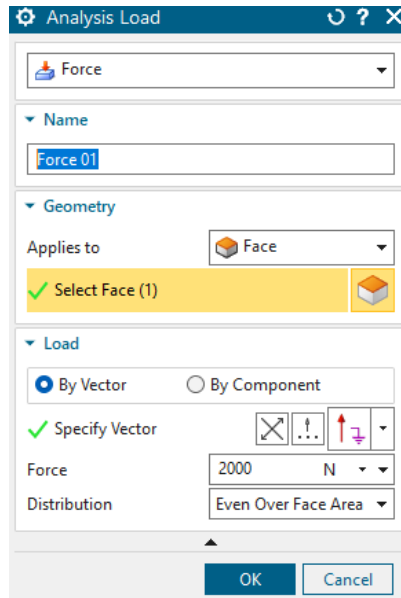


Figura 25 – Força aplicada

Foi também preservada, a zona do constrangimento da pedaleira que liga ao quadro, preservando-se 4 mm. O constrangimento aplicado foi o de fixo (Figura 26).

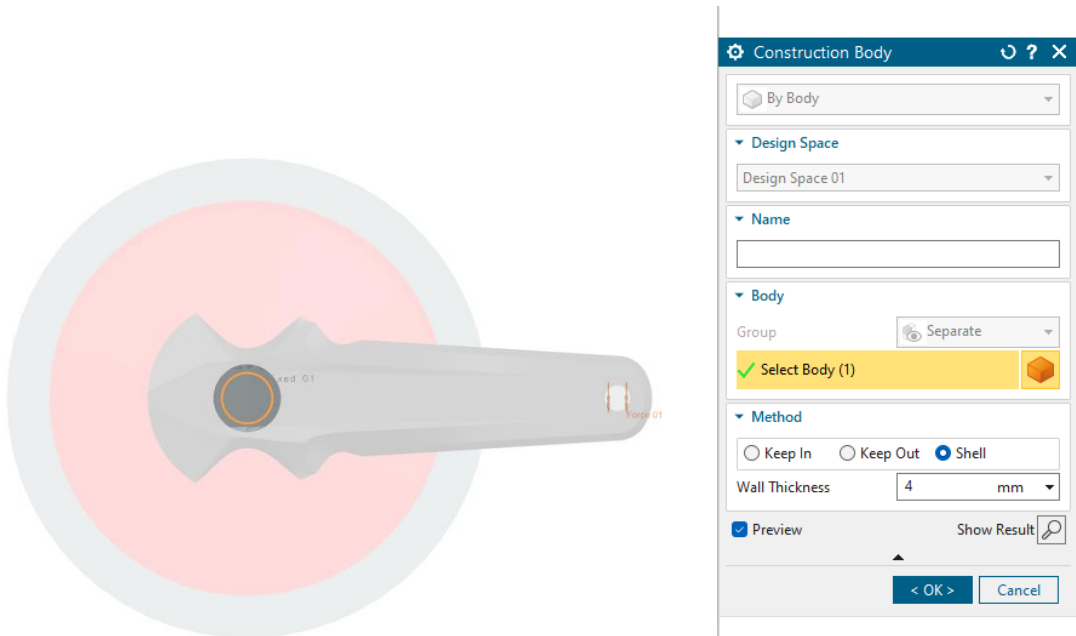


Figura 26 – Preservação da zona do constrangimento de fixação

Por último, foi removida uma zona da simulação, uma vez que não se pretende manter a zona de material que fazia a união da pedaleira com os pratos, dando assim possibilidade ao *software* de ter liberdade ao idealizar como será a nova ligação (Figura 27).

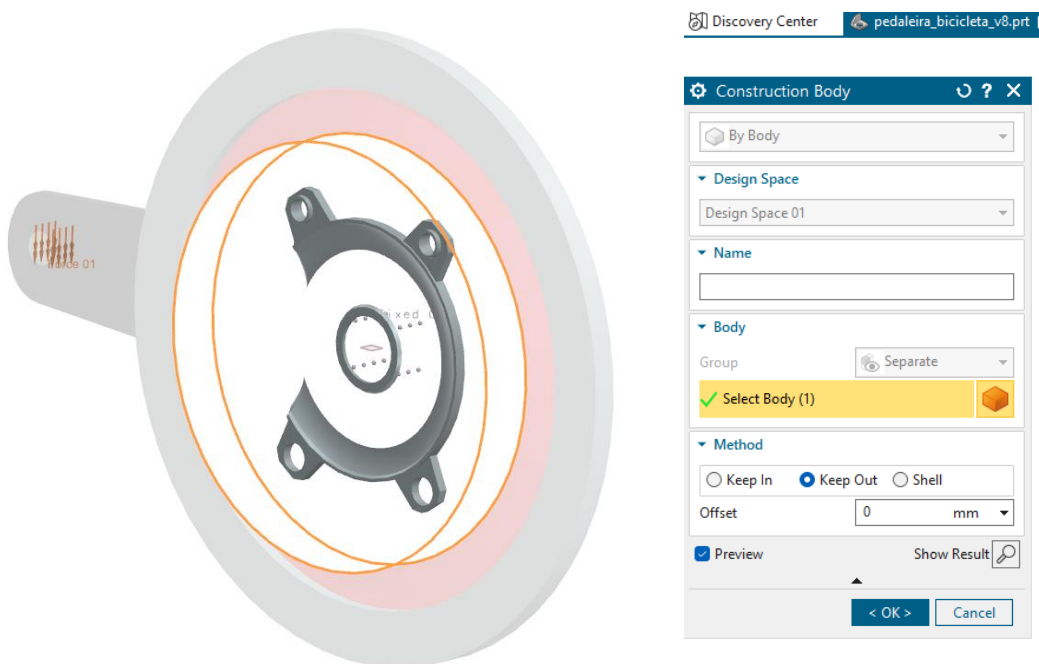


Figura 27 – Remoção da zona de união ao prato

Em suma, todas as condições do estudo podem ser vistas na Figura 28. As zonas que foram preservadas no modelo, foram sofrendo algumas alterações ao longo dos testes feitos, pelo que os valores atribuídos para a simulação, surgiram de tentativa erro, nomeadamente na atribuição de maiores e menores áreas de preservação do modelo. Com isto, convergiu-se para as condições apresentadas.

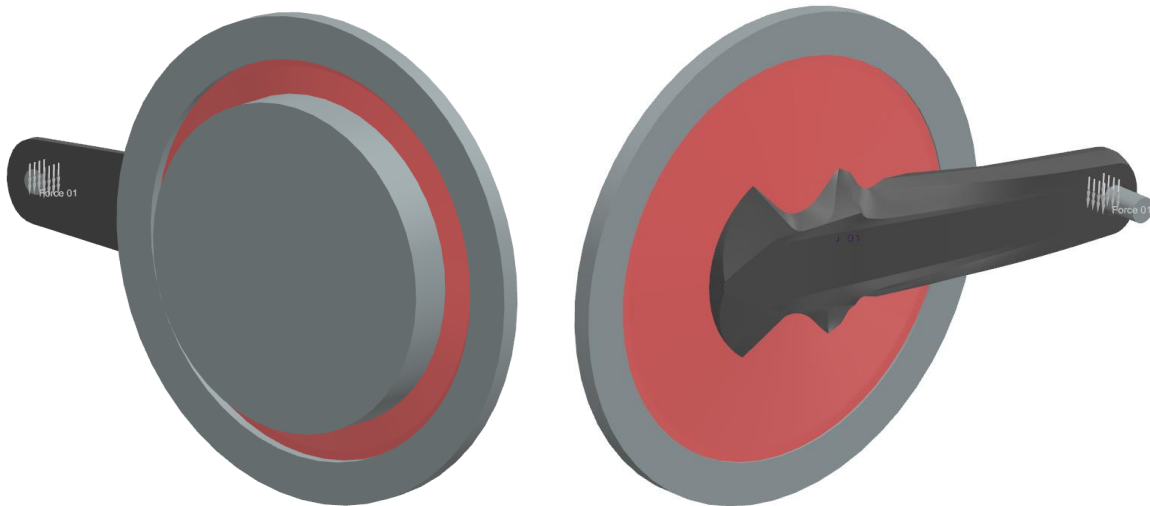


Figura 28 – Vista geral de todas as condições aplicadas para a simulação

Depois de definidas todas as condições necessárias para a simulação, foi escolhido o material a utilizar. Foi escolhido o alumínio 5086, material já existente na biblioteca de materiais do NX. O alumínio apresenta uma elevada tensão de cedência A caracterização do material com as propriedades necessárias para a simulação, pode ser visto na Tabela 2. O NX só necessita desta informação para realizar o estudo, sendo o estudo impossível de realizar com um material que não tenha uma destas propriedades definidas.

Tabela 2 – Propriedades do alumínio 5086 necessárias na simulação

Tensão de cedência σ	217 MPa
Módulo de elasticidade E	72 GPa
Coefficiente de Poisson ν	0,33

5. Análise e Discussão de Resultados

Com base nas condições definidas anteriormente, foi obtido o seguinte modelo otimizado (Figura 29). Este modelo levou 2 horas de cálculo e cerca de 190 iterações até acabar.

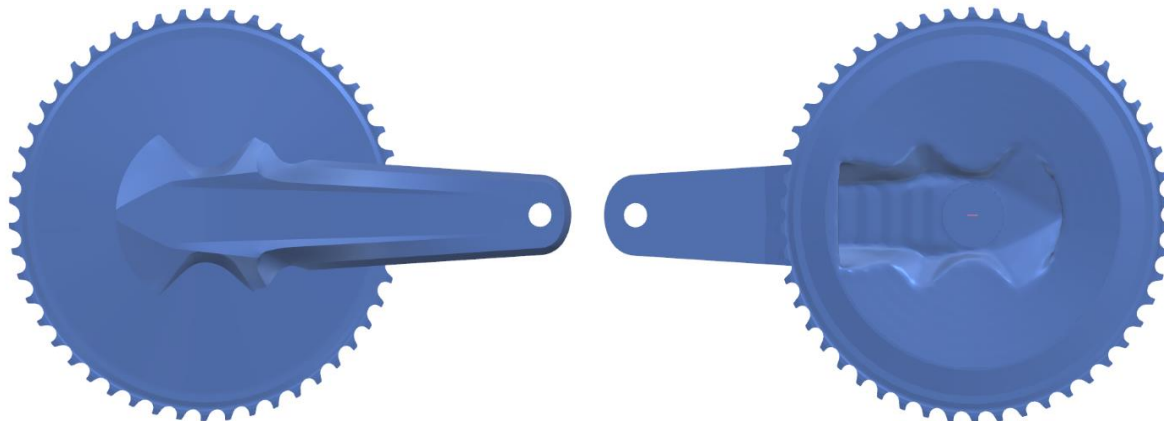


Figura 29 – Modelo da pedaleira otimizada

Como é possível constatar, o software optou por retirar material do interior da pedaleira, ao mesmo tempo que juntou o braço da pedaleira, ao prato da pedaleira, formando um só objeto, cumprindo assim os dois objetivos da otimização, inicialmente propostos. Ao contrário da pedaleira original que continha furos nos pratos, este objeto otimizado acaba por não apresentar nenhum.

É importante lembrar novamente que, depois da simulação, é necessário um pós-processamento. Seja ele uma suavização, seja uns pequenos ajustes, é sempre necessário este trabalho. O resultado obtido serve como um guia, não serve como resultado final.

Na Figura 30, podemos ver o conjunto da nova pedaleira, com o braço do outro lado.

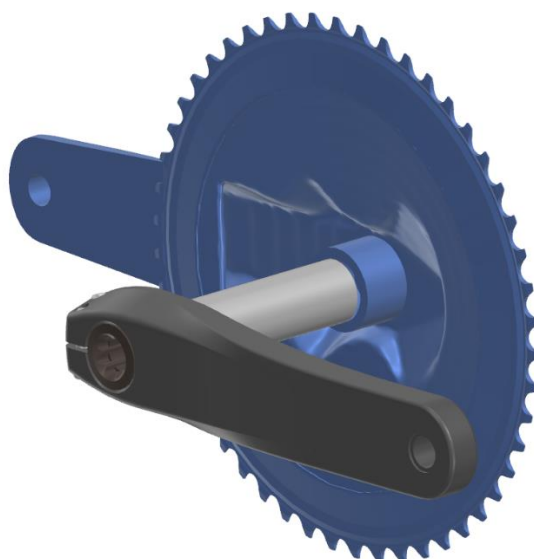


Figura 30 – Conjunto da nova pedaleira

Quanto às tensões resultantes da carga aplicada no objeto otimizado, o valor máximo foi de 167 MPa, não excedendo a tensão de cedência do material, não comprometendo assim a estrutura mecânica da pedaleira. As tensões resultantes podem ser vistas na Figura 31, com a escala de cores indo do azul ao vermelho, sendo que as zonas a azul são zonas de baixa tensão, as zonas a verde são zonas com tensões de cerca de 100 MPa e as zonas amarelas e vermelhas são zonas com tensões mais elevadas. O valor máximo de tensão encontra-se perto da zona de conexão com o veio/quadro.

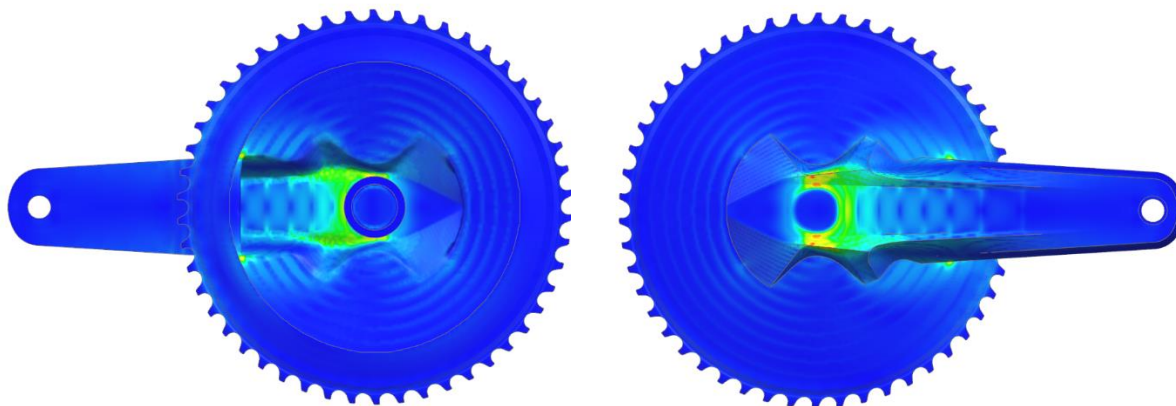


Figura 31 – Tensões existentes

Com esta simulação, foi possível obter uma redução de 120 gramas em relação ao original e cerca de 450 gramas em relação ao conjunto idealizado para a simulação. É uma redução significativa de massa, o que iria impactar a performance de um ciclista numa prova de ciclismo, não gastando tanto energia. Reduzir mais que 120 gramas poderia resultar na ultrapassagem da tensão de cedência do material ou comprometer a sua integridade.

Para este objeto ser validado, teria de ser ainda estudada a sua aerodinâmica, porque apesar de se ter otimizado a pedaleira de modo a reduzir a massa e esta aguentar as cargas solicitadas, esta terá de ser aerodinâmica, de modo a reduzir a sua resistência ao ar.

6. Conclusões

Este projeto serviu para estudar a maneira de como otimizar uma pedaleira feita de alumínio, para uma bicicleta de alto rendimento no setor do ciclismo de estrada, recorrendo à otimização topológica. Os objetivos eram alcançar a redução de massa da mesma e também a junção dos 3 componentes da pedaleira, braço+aranha+prato, num único componente, que pudesse ser depois então imprimido.

O SLM foi a técnica de fabrico aditivo escolhida, uma vez que com este processo é possível imprimir pó de alumínio, no entanto será sempre necessário ter em conta a necessidade de fazer um pós-processamento como tratamento térmico e acabamento superficial.

A pedaleira otimizada apresentou uma redução de massa de 120 gramas em relação à original. A significativa redução de massa, combinada com a eficiência estrutural e diferentes designs, podem vir a dar origem e ao desenvolvimento de novos componentes ainda mais otimizados.

Com a otimização topológica e o fabrico aditivo, é possível ainda customizar cada componente às necessidades específicas de cada ciclista, tendo sempre em conta o balanço entre a redução de massa e a aerodinâmica do conjunto ciclista+bicicleta.

Num trabalho futuro, seria interessante estudar a otimização deste mesmo componente, desta vez como material a fibra de carbono, caso o *software* o permita. A análise de custos para a produção deste componente seria uma mais valia para um projeto futuro, sendo que à partida sabemos que este componente custaria por volta de 4 vezes mais se fosse impressa. Para complementar o estudo, seria também interessante estudar toda a parte do DfAM, para ter a certeza que o componente está nas condições ideais para a impressão, incluindo a possibilidade de otimizar o modelo segundo o eixo de impressão, de modo a prevenir zonas que necessitem de material de suporte. Por último, seria também interessante fazer simulações aerodinâmicas e de vibrações, sendo que estas também seriam necessárias para validar todo o componente.

Irá sempre haver a tendência para se encontrarem soluções para produzir componentes mais leves, mais baratos e mais confortáveis, tendo-se avançado já muito neste campo, no que diz respeito ao ciclismo. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e também com a evolução do ciclismo em si, a procura por ganhos marginais continuará sem cessar.

Referências bibliográficas

- [1] Mujika, Iñigo and Padilla, Sabino (2001). Physiological and Performance Characteristics of Male Professional Road Cyclists
- [2] Acedido a 17 de agosto de 2024, em: <https://www.stickybottle.com/races-results/pogacar-punishes-over-confident-vingegaard-on-epic-tour-2023-stage-video/>
- [3] Menaspa, Paolo (2015). Analysis of road sprint cycling performance
- [4] Mignot, Jean-François (2023). The History of Professional Road Cycling and Its Current Organizational Structure
- [5] Acedido a 17 de agosto de 2024, em: <https://www.victoris.be/team-deraves-muscle-talent-scan-presented-applied-elite-sports-settings-worldwide/sprinter-vs-climber/>
- [6] Malizia, Fabio and Blocken, Bert (2020). Bicycle aerodynamics: History, state-of-the-art and future perspectives
- [7] Acedido a 19 de agosto de 2024, em: <https://bikerumor.com/tadej-pogacar-tt-tricked-out-colnago-tt1-time-trial-bike/>
- [8] Acedido a 19 de agosto de 2024, em: <https://movistarteam.com/en/2020-10-28/2020-la-vuelta-stage-8>
- [9] Lin, Bruce (2023). The History of Tour de France Bike Tech. Acedido a 19 de agosto de 2024, em: https://www.theprosclot.com/blogs/news/tour-de-france-bike-tech-history?srsltid=AfmBOooh_AlnBzENbKhe-kcCwoq3IpiNuNywSyvEp-v14ds9unMbfLP
- [10] Brooks, Tracey (2018). The History and Evolution of Bike Gears. Acedido a 19 de agosto de 2024, em: <https://www.sports-fitness.co.uk/blog/history-and-evolution-of-bike-gears>
- [11] Walker, Mark (2022). A brief and fascinating history of road bike gears. Acedido a 19 de agosto de 2024, em: <https://markwalkercoaching.co.uk/journal/a-brief-and-fascinating-history-of-road-bike-gears/>
- [12] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://www.drovercycles.co.uk/merida-road-frames-custom-builds/>
- [13] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://bike.bikegremlin.com/545/bicycle-fork/>
- [14] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://bikerumor.com/scope-aea-tt-disc-r9-t-algorithm-designed-aero-wheels-debut-at-tour-de-france-time-trial-with-dsm/>
- [15] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://bestwheelset.com/6-types-of-bike-brakes/>
- [16] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://www.cyclingnews.com/features/how-does-a-rear-derailleur-work/>

- [17] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://www.cyclist.co.uk/buying-guides/best-cassette>
- [18] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://www.cyclist.co.uk/buying-guides/buyers-guide-to-the-best-clipless-road-bike-pedals>
- [19] Acedido a 30 de setembro de 2024, em: <https://bikerumor.com/pro-discover-aero-carbon-gravel-bar-and-10-degree-stem/>
- [20] Acedido a 22 de agosto de 2024, em: <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/>
- [21] Gibson, I., Rosen, D. e Stucker, B. (2014). Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2ª edição, Springer
- [22] Acedido a 22 de agosto de 2024, em: <https://www.eplus3d.com/hybrid-printing-what-is-it-how-to-conduct-it.html>
- [23] Acedido a 21 de agosto de 2024, em: <https://www.weerg.com/guides/what-is-3d-part-nesting>
- [24] Acedido a 21 de agosto de 2024, em: <https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/industry-solutions/nitrogen-3d-printing>
- [25] Vasco, Joel C. (2021). Additive manufacturing tooling for the automotive industry
- [26] H. & K. and Team. Additive Manufacturing Research Group. *University, Loughborough*. Acedido a 8 de agosto de 2024. Disponível em: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing>
- [27] Acedido a 9 de agosto de 2024, em: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>