





Sandra Raquel Pereira Salgado Fernandes

**Otimização de um adaptador de teste para ICT**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia do Produto

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles



## **Agradecimentos**

**(Folha em branco)**

## Resumo

O aumento da complexidade nas placas de circuito impresso (PCB), leva também a uma crescente complexidade dos equipamentos eletrônicos e, conseqüentemente, a um avanço nas tecnologias de teste que verificam e controlam os mesmos. A produção em massa de diversos equipamentos (por exemplo, automóveis) implica a elevada produção de placas de circuito impresso (PCB), surgindo assim a necessidade de inovar e modificar nos métodos de controlo de qualidade. Assim, existem diversas formas de se proceder à inspeção de um PCB, incluindo inspeção ótica automatizada (AOI), inspeção visual manual (MVI), inspeção por raios-X, teste de circuito funcional (FCT) e o teste in-circuit (ICT).

O teste por ICT é um teste elétrico que é feito às placas de circuito impresso, através da utilização de várias agulhas de teste (sondas elétricas) que verificam se existem falhas no PCB em análise. Para a realização desse teste elétrico é necessária a utilização de um aparelho denominado de adaptador de teste, que é modificado conforme o PCB.

É objetivo desta dissertação realizar o projeto mecânico de um adaptador de teste, de forma a otimizar o peso próprio do mesmo, uma vez que um equipamento destes pode chegar a pesar 20 kg, peso considerável e que dificulta a manipulação do adaptador.

Assim, e de forma a cumprir os objetivos, apresenta-se um estudo para que se entenda a importância, funcionamento e tipos de testes e adaptadores de testes. Posteriormente, através da criação de novos modelos tridimensionais será possível apresentar propostas de otimização. Após a construção desses modelos, serão testados através de simulações numéricas que têm por base o método dos elementos finitos.

Com a aplicação de diversas otimizações, conseguiu-se diminuir o peso total do adaptador de teste, sendo que as otimizações propostas podem ser adaptadas para outros equipamentos semelhantes.

**Palavras-Chave:** Adaptador de teste, PCB, ICT, elementos finitos, otimização

**(Folha em branco)**

## **Abstract**



(Folha em branco)

## **Símbolos**

(Folha em branco)

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

## **Notação**

(Folha em branco)

# Índice

(Folha em branco)

## Índice de Figuras



(Folha em branco)

## **Índice de Tabelas**

(Folha em branco)

# 1. Introdução

Atualmente, devido aos enormes avanços da tecnologia, a indústria encontra-se cada vez mais competitiva, o que leva a que exista um grande nível de concorrência, e necessidade de procura por soluções novas e inovadoras. O facto de a indústria eletrónica estar cada vez mais competitiva leva a que exista a necessidade de solucionar problemas e procurar otimizações, de forma a que as empresas se mostrem competitivas, mas também para que seja possível responder de forma positiva aos problemas apresentados pelos clientes.

A Controlar, empresa dedicada ao desenvolvimento de hardware e software para a indústria, verificou que existe a necessidade de solucionar problemas que os seus adaptadores de teste possuem. Um adaptador de teste é um equipamento concebido para detetar defeitos em componentes individuais que constituem os PCB's. A realização deste projeto será de extrema importância uma vez que permitirá um estudo aprofundado do adaptador de teste da Controlar, mas também porque irá permitir que os adaptadores de teste da empresa sofram otimizações, permitindo assim novas soluções que irão garantir criação de valor.

Será utilizado ao longo de todo o trabalho o método dos elementos finitos, método numérico, que permite a análise dos componentes. A utilização deste método terá elevada importância, uma vez que na impossibilidade de criação de modelos reais, será o modelo mais perto da realidade que se conseguirá alcançar. Os estudos feitos serão análises estáticas, uma vez que não existem carregamentos dinâmicos.

O trabalho da dissertação inicia-se com o estudo dos PCB's e dos vários erros que podem existir. É também estudado inicialmente, os vários tipos de teste que existem para verificar os defeitos nos PCB's, para que depois seja possível estudar mais pormenorizadamente o teste por ICT, que é o que possui maior relevância para o presente trabalho.

Após esta fase, serão apresentadas várias propostas de otimização para diversos componentes que constituem o adaptador de teste. Estas propostas serão desenhadas recorrendo ao software SolidWorks e, posteriormente, testadas através de simulações estáticas, no software Ansys, que será fundamental para que se verifique se as

propostas estão ou não aptas. Além disso serão apresentadas propostas de montagem de forma a que se consiga facilitar o tempo e o modo de montagem que existe atualmente.

## **1.1 Enquadramento**

Criada em 1995, a Controlar – Eletrónica Industrial e Sistemas é uma empresa dedicada ao desenvolvimento de hardware e software, principalmente direcionada para a indústria de componentes elétricos do setor automóvel, e com grande vocação em automação industrial, desenvolvimento de sistemas funcionais e de qualidade, para dispositivos eletrónicos. A empresa possui diversas unidades de negócio e cada uma delas conta com um vasto portfólio de produtos e serviços com referências a nível mundial, encontrando-se atualmente numa fase de forte crescimento, tendo já sido distinguida como uma das 100 maiores PME portuguesas pela revista Exame. [1]

Sedeada em Alfena, a Controlar é uma empresa de base tecnológica, com forte incorporação de conhecimento, resultante da grande atividade interna de I&D, na área de eletrónica industrial para testes e automação de componentes e produtos. Deste modo, a Controlar tem como modelo de negócio o desenvolvimento de soluções na área de automação, testes e controlo industrial. Assim, a missão da empresa é desenvolver soluções de automação industrial eco-inovadoras e eficientes, recorrendo a tecnologias que estejam adaptadas às necessidades e expectativas atuais, garantindo assim soluções eficientes com qualidade, segurança, flexibilidade e inovação.

Da parceria da Controlar com a Universidade do Minho e com o INL (International Iberian NanoTechnology Laboratory), surgiu o projeto denominado Tooling Optimization for ICT Systems (TOP4ICT), que surge enquadrado no Programa Iniciativa Clube de Fornecedores Bosh, onde a presente dissertação se encontra enquadrada. A Controlar, visto ser um fornecedor da Bosh, pretende desenvolver equipamentos e sistemas avançados de controlo e qualidade, com objetivo de fazer face às necessidades de excelência da Bosh, ao nível das constantes evoluções nas placas de circuito impresso (Printed Circuit Board, PCB), desenvolvendo assim diversas melhorias nos sistemas que fazem o controlo das mesmas, os chamados sistemas In-Circuit Test (ICT). [2]

## **1.2 Objetivos**

O projeto TOP4ICT tem como objetivo o desenvolvimento de soluções que tragam valor para os sistemas de teste ICT da Controlar, assim como, sistemas que respondam à exigência atual que existe, proveniente do avanço das placas de circuito impresso.

É objetivo desta dissertação realizar o projeto mecânico de um adaptador de teste, de forma a otimizar o peso próprio do mesmo.

Assim, e de forma a cumprir os objetivos, é pretendido que se consiga melhorias na geometria do adaptador, novas peças standard, pesquisa de novos materiais que cumpram as restrições de rigidez mecânica, condutividade elétrica e características ESD.

## **1.3 Motivação**

A realização deste projeto irá proporcionar a utilização e consolidação de conhecimentos adquiridos ao longo do curso. Além disso, o projeto que será desenvolvido não é meramente académico uma vez que futuramente pode resultar na construção de um modelo físico da Controlar. A realização deste trabalho irá permitir o conhecimento de uma área diferente que não é abordada ao longo do curso que é a projeção de máquinas para o controlo de PCB's.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

No capítulo inicial, começa-se por contextualizar o tema da presente dissertação, assim como, onde esta se enquadra e os objetivos a que pretende responder.

No capítulo 2 estudam-se todos os aspetos que relacionados com os PCB's e testes que existem para o controlo dos mesmos.

No capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos onde temos os conceitos em que este trabalho se encontra assente. Abordam-se conceitos teóricos que ajudam na interpretação dos resultados obtidos, como por exemplo, o método dos elementos finitos.

No capítulo 4 apresentam-se várias propostas obtidas e simulações numéricas que permitirão a validação das mesmas.

Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões e, também, as sugestões para trabalhos futuros.

(deixar em branco)



## 2. Estado da Arte

### 2.1 Placas de Circuito Impresso

As placas de circuito impresso (PCB) são utilizadas em todos os produtos eletrônicos e têm como principal função a ligação entre os diferentes componentes que constituem os circuitos eletrônicos (Figura 1). A evolução dos processos de fabrico e das tecnologias fez com que cada vez mais estes equipamentos se tornassem mais pequenos e mais complexos.

Dentro da ampla e diversificada gama de aplicações das placas de circuito eletrónicas, mais vulgarmente designadas por PCB's, é sempre esperado que estes funcionem de acordo com todos os parâmetros de desenvolvimento, sem erros nem falhas. Os PCB's são na maioria das vezes muito complexos, possuindo centenas de componentes e milhares de conexões de solda, sendo este um desafio para a indústria que fabrica estas placas, existindo assim necessidade de aplicar uma variedade de procedimentos de inspeção e testes para que a qualidade do produto esteja garantida [3].



*Figura 1 Placa de Circuito Impresso (PCB)*

A evolução das placas de circuito impresso e a sua produção em ritmo acelerado exige a criação de formas de controlo que analisem a existência, ou não, de possíveis falhas da sua produção. Muitos são os defeitos que podem surgir e que podem dar errado num PCB, tais como: soldas interrompidas, problemas de fixação dos componentes, falha na inteligência computacional, componentes desalinhados, excessos de solda que causam curtos circuitos, entre outros (Figura 2).

A inspeção em várias fases da fabricação é muito importante, uma vez que permitirá a detecção precoce de falhas e quanto mais cedo ocorrem estas detecções, também mais barato se torna corrigir o problema.

Na produção das placas de circuito impresso existem três processos onde a inspeção é bastante importante e necessária, que são: a própria impressão da placa, a colocação dos componentes sobre a superfície e a soldagem dos componentes [4].

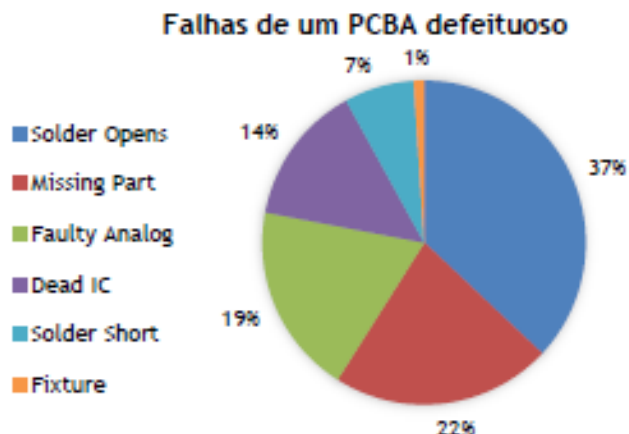


Figura 2 Defeitos PCB [2]

Dentro das várias falhas que um PCB pode ter, estes podem dividir-se em dois grupos: o grupo das falhas estruturais e o grupo das falhas elétricas (Tabela 1). Como os próprios nomes indicam, as falhas estruturais estão relacionadas com a presença/ausência dos componentes, enquanto as falhas elétricas estão mais direcionadas para falhas funcionais. Algumas falhas de uma placa de circuito impresso podem também estar relacionadas com a soldadura [3].

Tabela 1 Tipos de Erros [3]

Defeito	Tipo	Relação c/ soldadura
Circuitos abertos	Estrutural	Sim
Solda pequena	Estrutural	Sim
Componentes elétricos em falta	Estrutural	Não
Desalinhamento dos componentes	Estrutural	Sim
Componentes elétricos defeituosos	Elétrico	Não
Componente errado	Elétrico	Não
Solda em excesso	Estrutural	Sim
Componente não elétrico em falta	Estrutural	Não
Orientação errada	Elétrico	Não

A crescente complexidade dos equipamentos eletrónicos leva, consequentemente, a um avanço nas tecnologias de teste que verificam e controlam a qualidade dos mesmos. A produção em massa de diversos equipamentos, tal como as unidades de controlo eletrónico do setor automóvel, aeronáutico e espaço ou a produção de telemóveis, entre outros, implica a elevada produção de PCB's, surgindo assim a necessidade de inovar e modificar nos métodos de controlo de qualidade, que são essenciais nos processos de produção. No processo de montagem dos PCB's existem várias etapas ou opções de controlo de qualidade e, assim, de forma a responder às falhas que os PCB's podem apresentar existem várias formas de proceder à inspeção dos mesmos, incluindo inspeção ótica automatizada (AOI – *Automated Optical Inspection*), inspeção visual manual (MVI – *Manual Visual Inspection*), inspeção por raios-X, teste de circuito funcional (FCT – *Functional Circuit Test*) e, por fim, o teste no circuito (ICT) que é o teste onde a presente dissertação está focada.

### 2.1.1 Metodologias de Teste

De seguida serão apresentadas as várias metodologias de teste que atualmente o mercado apresenta, desde sistemas de inspeção com raio-x a testes elétricos. Cada uma das tecnologias que serão de seguida apresentadas são competentes na deteção de certos defeitos, e a combinação das várias ao longo do processo produtivo proporciona a melhor inspeção possível e um maior nível de confiança nas placas de circuito impresso.

- **Inspeção Ótica Automatiza (AOI)**

Consiste num método de inspeção para as placas de circuito impresso onde se utiliza uma câmara para a procura de defeitos visivelmente reconhecíveis, como por exemplo, componentes ausentes ou erros de posicionamento (Figura 3) [5]. O sistema está organizado em duas fases diferentes: a fase de calibração e a fase de teste. Na fase de calibração identifica-se a placa de circuito impresso padrão e as suas características são guardadas numa base de dados. A imagem padrão será utilizada na primeira etapa da inspeção para comparação de imagens.

Nesta técnica a placa é iluminada por várias fontes de luz e de vários ângulos, e a câmara tira fotografias para construir uma imagem completa da placa e realizar comparação de imagens, através de sistemas integrados nos computadores, que fazem a recolha e gravação de dados e, posteriormente, fazem a execução de análises matemáticas, através de algoritmos. No fim, depois de definidos os critérios, faz-se a avaliação do PCB.

Neste método de inspeção, utiliza-se uma placa de circuito impresso de referência que é gravada na memória do sistema. Assim, durante o teste as placas que se encontram a ser testadas são comparadas com a placa de referência, verificando assim se existe algum defeito [6] [3].

**Vantagens:**

- Tecnologia bem conhecida pelos fabricantes e aceite;
- Detecção da maior parte das falhas comuns;
- Técnica de controlo que é implementada em linhas de produção dos PCB's.

**Desvantagens:**

- Técnica limitada à “linha de visão”, ou seja, incapaz de inspecionar conexões ocultas;
- Inspeção menos eficaz nas placas que se encontram densamente carregadas.



*Figura 3 Exemplo de equipamento para inspeção ótica automatizada [7]*

- **Inspeção Visual Manual (MVI)**

A forma mais simples que existe para a inspeção das placas de circuito impresso é a inspeção visual manual.

Na inspeção visual manual não existe nenhuma máquina envolvida, sendo o ser humano juntamente com uma ferramenta de ampliação o responsável por procurar possíveis falhas nas placas de circuito impresso (Figura 4) [5]. O operador que realiza esta técnica de inspeção recorre a documentação e a padrões comuns para procurar defeitos de acordo com a placa que se encontram a verificar. Esta técnica é utilizada na verificação da qualidade da solda, na verificação dos componentes e na verificação de

defeitos superficiais, mas é uma técnica que é menos fiável no controlo uma vez que os operadores podem sofrer de fadiga, resultando numa má inspeção do produto.

O ser humano apesar de possuir várias vantagens em relação a uma máquina, pois consegue relembrar fatores anteriores e fazer comparações do que vê ao longo do tempo sofre distrações que podem levar a uma grande quantidade de falhas não detetadas [8].

**Vantagens:**

- Baixo custo devido à simplicidade da inspeção;
- Não existe utilização de nenhum equipamento especializado;
- Inspeção rápida.

**Desvantagens:**

- Método bastante limitado;
- Apenas se pode verificar componentes que estão dentro da linha de visão;
- Grande probabilidade de falha do operador.



*Figura 4 Inspeção Visual Manual (MVI)*

- **Inspeção Raio-x**

A inspeção das placas de circuito impresso através da inspeção por raio-x é uma técnica que ainda é recente no mercado, mas que permite analisar com elevada precisão a montagem do dispositivo (Figura 5). Normalmente este método de controlo dos PCB's é feito em junções de solda e é altamente eficaz para se observarem os detalhes, sem ser necessário mexer mecanicamente na placa.

Os materiais absorvem o raio-x de forma proporcional ao seu peso atómico, assim sendo, materiais mais pesados absorvem mais raio-x e materiais mais leves absorvem menos. As soldas como normalmente são feitas de elementos pesados, por exemplo

estanho, aparecem com alguma facilidade neste tipo de teste facilitando assim a inspeção [3] [8].

O controlo das placas de circuito impresso através da inspeção raio-x, é utilizada principalmente para analisar qualquer tipo de soldadura feita, conseguindo verificar se existem ou não porosidades dentro da solda, chamados de “voids points”. Este método é o único capaz de detetar estes pontos, mas possui algumas desvantagens, tais como: a não deteção de componentes eletricamente defeituosos ou fora das especificações, custo e tempo de teste elevado [9].

Durante a realização deste teste existe uma fonte que emite a radiação, radiação essa que passa através da placa de circuito impresso e é absorvida por um elemento detetor. Este detetor é constituído por diferentes materiais que irão absorver a radiação emitida e enviar as imagens obtidas para uma câmara que recebe e trabalha a imagem, e no fim, envia para um processador de imagem que fará o tratamento dos dados.

**Vantagens:**

- Capacidade de ver e inspecionar placas com ligações por baixo;
- Capacidade de controlar PCB's densamente preenchidas.

**Desvantagens:**

- Tecnologia recente que ainda não é bem aceite;
- Não deteta componentes eletricamente defeituosos [3].



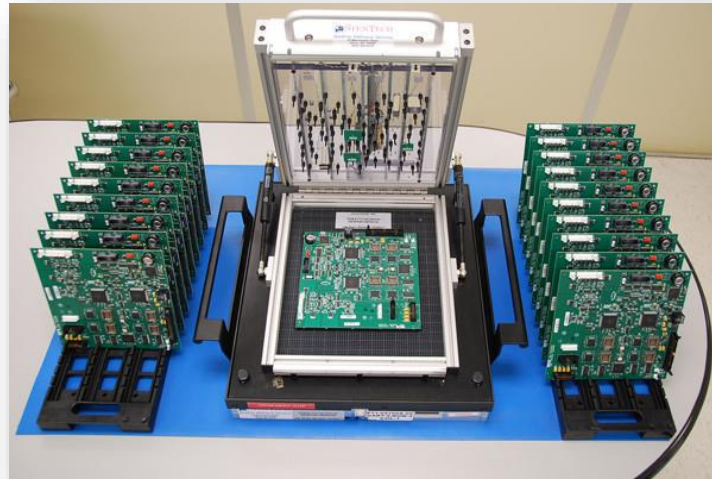
*Figura 5 Inspeção Raio-X*

- **Testes Funcionais (FCT)**

O teste funcional procura garantir e verificar se o comportamento e funções de uma placa de circuito impresso estão dentro das especificações, e é sempre realizado no final

da montagem do PCB [5]. Este teste habitualmente é feito com a placa alimentada, e são utilizados conectores ou camas de agulhas (

Figura 6), para a realização do mesmo. Em caso de utilização de camas de agulhas para a realização do teste, o número das mesmas será muito menor do que nas camas de agulhas para o teste no circuito (ICT).



*Figura 6 Exemplo Teste Funcional - Camas Agulhas [10]*

Para se inspecionar uma placa de circuito impresso através de um teste funcional é necessário que se faça a interface entre o testador e o PCB, ou então, entre um ponto de teste previamente escolhido.

Como referido anteriormente, o teste funcional trata-se de uma forma de controlar as placas de circuito impresso com a mesma ligada, de forma a verificar o funcionamento e a funcionalidade da mesma. Este teste tem uma grande importância uma vez que verifica se a função do produto está ou não dentro do que é pretendido, podendo aparecer erros que só seriam detetados quando todo o equipamento estivesse concluído.

Os testes funcionais não são uma solução perfeita uma vez que envolvem muita variabilidade, incluindo a percentagem da placa que vai ser ou não testada, ou seja, nestes testes é necessário definir quais as entradas ou estímulos que se pretendem, bem como os resultados desejados e delinear os parâmetros do teste. Ao realizar um teste funcional submete-se o PCB a uma sequência de sinais e fontes de alimentação, e as respostas vão sendo monitorizadas nos pontos específicos. Devido a estes fatores o teste funcional é considerado muito complexo [3].

**Vantagem:**

- Identificação de defeitos funcionais;
- Simulação de ambiente operacional;
- Teste que consegue verificar a funcionalidade ao aplicar valores de alimentação de tensão e/ou corrente;
- Testa a funcionalidade do PCB ao aplicar estímulos de entrada.

**Desvantagens:**

- Custo elevado relacionado com o custo de programação;
- A programação requer um conhecimento profundo do objeto em estudo;
- Testes feitos através de conectores que podem ter problemas de confiabilidade, uma vez que os conectores têm desgaste;
- Pode não incluir 100% de cobertura de todas as partes e circuitos.

## **2.2 Introdução ao In-Circuit-Test (ICT)**

A produção das placas de circuito impresso, a colocação dos diferentes componentes e a integridade das peças requerem que existam testes sofisticados para garantir que o produto final cumpre todos os requisitos e padrões de qualidade. Um dos principais testes que ajuda os fabricantes de PCB's a fazer o controlo dos seus produtos é o teste no circuito, mais conhecido por in-circuit-test (ICT).

O teste no circuito é um teste elétrico utilizado na indústria para que durante a montagem dos PCB se faça um controlo rigoroso. Neste teste, uma ou várias sondas elétricas (designadas de agulhas de teste) entram em contacto com cada componente da placa, verificando se estes apresentam valores elétricos corretos e se estão no lugar certo. Assim, com este teste é possível verificar se existem curtos-circuitos, aberturas na solda, resistência, capacitância e indutância dos diferentes componentes. Enquanto que no teste funcional se pressupõe que o PCB está montado corretamente, no teste por ICT faz-se a verificação disso mesmo.

Os sistemas de teste ICT utilizam um princípio de proteção aquando da medição de desempenho dos componentes eletrónicos, uma vez que acontece um isolamento elétrico do componente que se encontra sob teste [11].



O teste no circuito apresenta diversas vantagens: teste rápido por unidade, teste individual de cada componente, capacidade de testar a funcionalidade lógica, fácil detecção de defeitos de fabrico e resultados de teste fáceis de interpretar. Relativamente às desvantagens deste teste pode considerar-se a dificuldade de avaliação quando uma placa tem componentes em paralelo, devido ao teste considerar como se fosse apenas um componente, o custo elevado dos dispositivos de teste, tempo de desenvolvimento longo, e a incapacidade de testar componentes que funcionam em conjunto, pois normalmente não se consegue individualiza-los [3].

Para a realização do teste ICT existem dois métodos que são vulgarmente utilizados, em que ambos os tipos isolam os componentes e testam as características eletrónicas de cada um, que são o:

- Flying probe
- Adaptador de Teste (Cama de Agulhas).

### 2.2.1 Flying Probe

Um dos métodos para se realizar o teste no circuito é o Flying Probe (Sonda Voadora), onde as agulhas de teste conseguem deslocar-se até aos pontos de interesse na placa de circuito impresso, fazendo o contacto sempre que necessário (Figura 7).

As agulhas de teste movem-se e são controladas eletromecanicamente, sendo um dos principais problemas o acesso da agulha até ao ponto de teste. Este problema resulta principalmente do tamanho dos componentes, que sendo cada vez mais pequenos e complexos, impedem a agulha de aceder corretamente ao ponto de teste, impedindo desta forma que o teste fique completo.

Este método é adequado para produtos de baixo e médio volume, e é preferencialmente utilizado para a realização de protótipos [12].



Figura 7 Flying Probe para ICT [12]

### 2.2.2 Adaptador de Teste (Cama de Agulhas)

Um adaptador de teste é um dispositivo construído para detetar defeitos em componentes individuais nos PCB's (Figura 8). Estes dispositivos possuem um conjunto de sondas (agulhas de teste), que fazem o contacto com os nós do circuito do dispositivo em teste (designado de DUT – *Device Under Test*), ou seja, com os pontos de análise da placa de circuito impresso. A utilização destes adaptadores, também muitas vezes designados apenas por camas de agulhas, é a forma mais vulgar de se proceder ao teste no circuito, conseguindo-se com esta técnica de inspeção um contacto que pode chegar até aos milhares de pontos de teste individuais, dentro dos circuitos da placa de circuito impresso [3].

Neste tipo de adaptadores as agulhas de teste são fixas, o que permite que o teste ocorra com maior velocidade, e são normalmente utilizados para produtos estáveis e de alto volume.

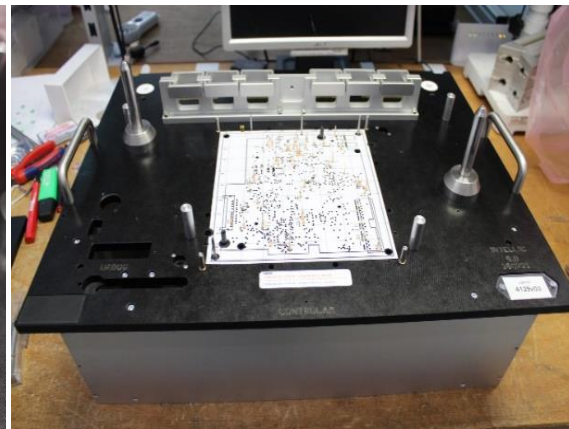


*Figura 8 Adaptador de Teste para ICT [13]*

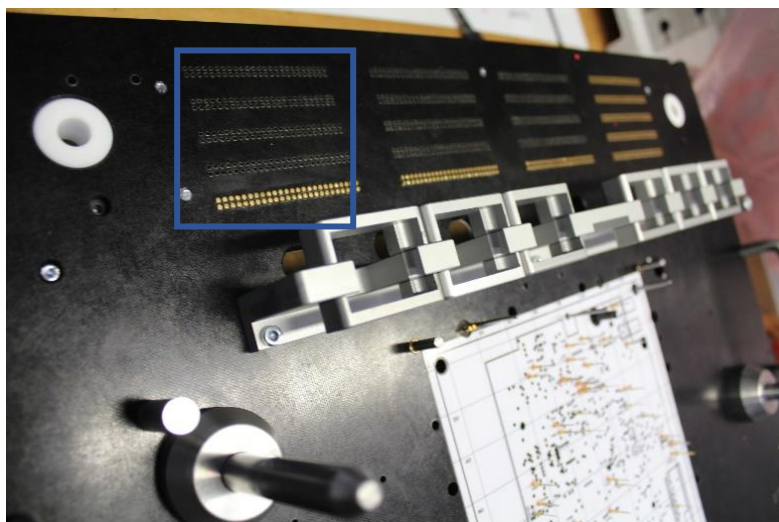
Estes adaptadores são compostos essencialmente por quatro componentes: alojamento do PCB em teste (Figura 9), cama de agulhas (figura 10), sistemas de suporte e guiamento (figura 10) e a interface para estabelecer contacto com o equipamento de medição externo (Figura 11).



*Figura 9 Alojamento do PCB e PCB em teste*



*Figura 10 Cama de Agulhas (a branco) e sistemas de suporte/guiamento*



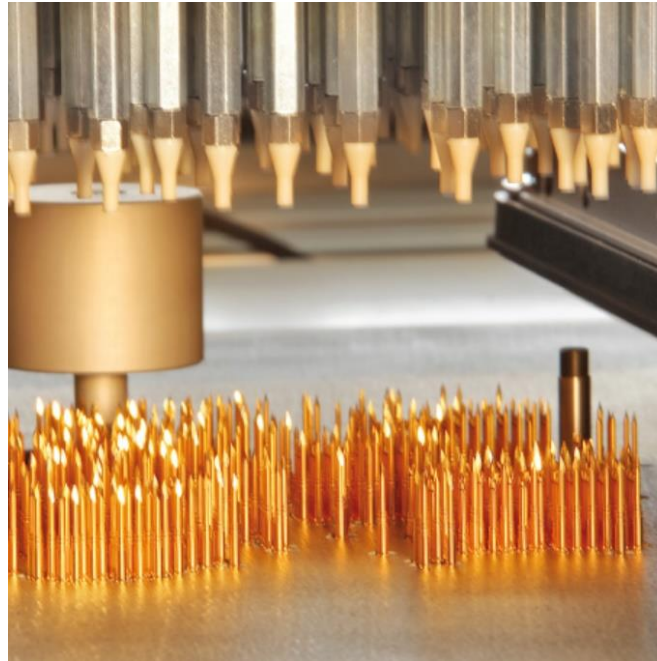
*Figura 11 Interface Elétrica*

O componente designado por “cama de agulhas” é desenvolvido para um produto específico e, por isso, quando uma determinada produção termina este fica inutilizado. Com a utilização de camas de agulhas tem-se um suporte que pode chegar aos milhares de agulhas de teste, que se encontram distribuídas de acordo com pontos previamente escolhidos e programados nas placas de circuito impresso. É de salientar que a construção das camas de agulhas torna-se cada vez mais desafiante dada a crescente complexidade das placas de circuito impresso, uma vez que estas possuem uma tendência de redução de tamanho. Esta redução de tamanho resulta num aumento da densidade dos componentes eletrónicos e, consequentemente, numa redução do diâmetro dos pontos de teste e da distância entre os mesmos.

As agulhas de teste (Figura 12) são o elemento mais importante de todo este aparelho, uma vez que são as responsáveis pela realização do teste elétrico, e por isso, é extremamente importante a sua correta colocação em locais previamente definidos. É de salientar que as agulhas de teste são dos elementos que representam maior custo de fabrico, uma vez que são revestidas a ouro, mas são também o elemento que sofre mais desgaste, que é proveniente do elevado esforço a que são submetidas.

Ao realizar-se o teste, o adaptador de teste irá ser pressionado por um elemento externo, handler (Figura 13), para que ocorra o contacto entre as agulhas de teste e os pontos de teste estabelecidos no PCB. Deste modo, as agulhas vão exercer forças na placa de circuito impresso, e estas forças têm de ser compensadas por forças opostas, para que assim se evite a flexão do PCB. Os elementos responsáveis pela realização destas forças opostas são os calcadores (Figura 12), e em caso de descompensação destas forças podem

surgir tensões indesejadas sobre os componentes do PCB, ou até mesmo à sua deformação mecânica.



*Figura 12 Agulhas de Teste (em baixo) e calcadores (em cima)*

Para a utilização dos adaptadores de teste é necessária a existência de um elemento que permita a ligação à instrumentação externa (interface elétrica). Esse elemento é chamado de *handler*, e é o local onde se faz a fixação e prensagem da cama de agulhas, para de seguida se proceder ao teste no circuito. O *interface* é assim constituído por duas partes que encaixam uma na outra, sendo que uma dessas partes se encontra representada na Figura 11 e a outra está presente no handler [2].

Normalmente, e principalmente a nível industrial, o handler funciona por acionamento pneumático.



*Figura 13 Handler*

### 2.2.3 Comparação Adaptadores de Teste vs. Sonda Voadora

Como já explicado anteriormente para a realização do teste ICT existem duas possibilidades que são os adaptadores de teste (camas de agulhas) ou as sondas voadoras. Ambos os modos isolam os componentes individualmente e testam as características eletrônicas de cada um, testando defeitos semelhantes, sendo a principal diferença a utilização ou não de agulhas fixas.

Assim, os adaptadores de teste possuem as agulhas fixas e são projetados e fabricados de acordo com a placa de circuito impresso em análise. A utilização das camas de agulhas proporciona uma rápida velocidade no teste, por unidade, e são normalmente utilizadas para realizar o controlo de produções estáveis e de alto volume.

Relativamente às sondas voadoras estas são utilizadas normalmente em estudos de protótipos uma vez que são programadas e reprogramadas facilmente, tornando assim este método ideal para produtos de baixo volume, como por exemplo protótipos. movem-se e são controladas eletromecanicamente. [14]

Na Tabela 2 Comparação Cama de Agulhas vs Sonda Voadora apresenta-se uma comparação entre estes dois modos de realização do teste no circuito (ICT).

*Tabela 2 Comparação Cama de Agulhas vs Sonda Voadora [5]*



	Camas de Agulhas	Sonda Voadora
Custos de Desenvolvimento dos Testes	Alto - Dezenas de milhares de euros	Baixo - Apenas programação
Tempo de conclusão do projeto	Superior a 4 semanas	Inferior a 1 semana
Cobertura do Teste	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não inclui inspeção ótica automatizada;</li> <li>- Projeto com mais restrições;</li> <li>- Custos elevados com a cama de agulhas e com a programação para acesso a ambos os lados do PCB.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pode incluir inspeção ótica automatizada;</li> <li>- Melhor acessos aos nós;</li> <li>- Teste de ambos os lados da placa de forma rentável.</li> </ul>
Suporte para alterações do design	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alterações são difíceis e demoradas;</li> <li>- Mais caro do que reprogramar uma sonda voadora.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil e barato - Atualizações dos programas rápidos</li> </ul>
Rapidez da operação e custo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teste muito rápido - Aproximadamente 1 minuto por unidade;</li> <li>- Baixo custo de teste por unidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teste tipicamente mais lento do que teste com camas de agulhas;</li> <li>- Alto custo por unidade.</li> </ul>

## 2.3 A Evolução do In-Circuit-Test (ICT)

Os sistemas de teste no circuito foram introduzidos no mercado pela primeira vez no final da década de 1970. Até a essa altura os métodos para controlar as placas de circuito impresso eram muito diferentes do que se vê na atualidade, assim como as placas eram muito menos evoluídas e, por isso, não exigiam um controlo tão sofisticado.

A montagem das placas de circuito impresso (PCB) era feita recorrendo a tecnologias de furação e várias diferenças existiam comparativamente ao que se vê atualmente. Nessa altura as placas de circuito impresso ainda só tinham componentes colocados de um único lado, os componentes maiores raramente tinham mais de 14 pinos, o espaçamento entre os pinos era habitualmente de 2,54 mm e as tensões utilizadas para alimentar as placas eram ainda só de 5,12 e 15 V. Relativamente à forma de inspeção, eram normalmente feitos testes funcionais, e utilizavam-se aparelhos de medição, tais como o multímetro. Estes testes eram demasiado demorados e complexos na sua execução [15].

Dada a simplicidade das placas, o método de inspeção visual manual (MVI) era suficiente para que se conseguissem identificar os erros nas placas, tendo sido o método que durante muitos anos foi utilizado. Posteriormente começou a perceber-se que este método tinha muitas desvantagens que estavam relacionadas com o erro humano, uma vez que a tarefa repetitiva de procura de defeitos causava cansaço e, consequentemente erros e falhas no controlo de qualidade das placas.

Depois de se verificar que existia a necessidade de arranjar um novo método, surgiu então a inspeção ótica automatizada (AOI) [3].

A partir de 1970 começam a introduzir-se as primeiras técnicas avançadas de teste que revolucionaram o processo de produção dos PCB's, alterando-se assim por completo o paradigma de todo o teste, passando-se a testar não apenas a funcionalidade das placas, mas também a funcionalidade de todos os componentes que a constituem. Surgem assim as primeiras camas de agulhas, com o objetivo de estabelecerem contactos elétricos com todo o PCB. Assim, os sistemas de teste ICT começaram a poder detetar locais em curto circuito, componentes ausentes, entre outros.

Todos os fabricantes viram uma grande oportunidade neste teste de controlo, uma vez que assim conseguiam ter a certeza de que a placa funcionaria corretamente quando chegasse ao cliente. Depois de verificarem que os testes no circuito traziam grandes benefícios quando comparado com os testes funcionais, os fornecedores começaram a adotar quase na sua totalidade este teste. Apesar de apresentar várias vantagens, o teste no circuito (ICT) também trouxe vários desafios para os fabricantes de PCB's, tais como: o acesso aos pontos de teste, requisitos de teste variáveis, diferentes filosofias de teste dependendo do segmento do mercado e, também, requisitos exigentes relativamente ao rendimento do teste nos fabricantes que possuem uma produção de grande volume.

Os sistemas de teste no circuito conseguiram então que a inspeção dos PCB's passasse de testes que duravam semanas para testes que duram apenas alguns minutos, através da utilização das camas de agulhas que fazem o contacto elétrico com pontos de teste nas placas, permitindo assim que cada componente seja estimulado e medido individualmente. A qualidade de cobertura do teste também melhorou com o teste no circuito, existindo um acesso direto a cada ponto que necessita de inspeção, resultando assim numa diminuição das falhas.

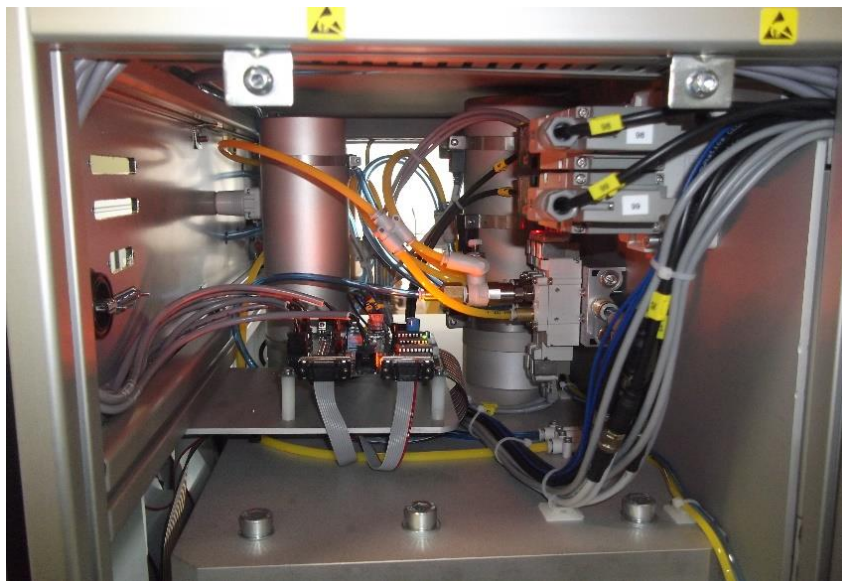
Em suma, os testes por ICT permitiram uma evolução de tal forma na precisão de teste que rapidamente os fabricantes de placas de circuito impresso aderiram aos mesmos, tornando-se no sistema de teste de maior escolha ainda atualmente [15].

## **2.4 Tipos de Adaptadores de Teste**

Existem várias formas de aplicar forças nos adaptadores de teste, e por isso, estes podem ser acionados de diferentes formas, umas mais rudimentares do que outras.



Em sistemas de teste mais sofisticados, a maior complexidade é conseguir garantir que as placas superior e inferior do adaptador de teste permanecem paralelas, à medida que a fixação ocorre. É muito importante que o paralelismo das placas seja garantido para que assim as agulhas de teste consigam entrar em contacto com os pontos de teste corretos. Estes sistemas mais sofisticados são os pneumáticos (Figura 14), onde a placa superior é pressionada contra a placa inferior através de cilindros pneumáticos. Neste caso, o processo pneumático ajuda a salvaguardar o movimento das agulhas, de forma a que sejam bem apontadas ao seu alvo.



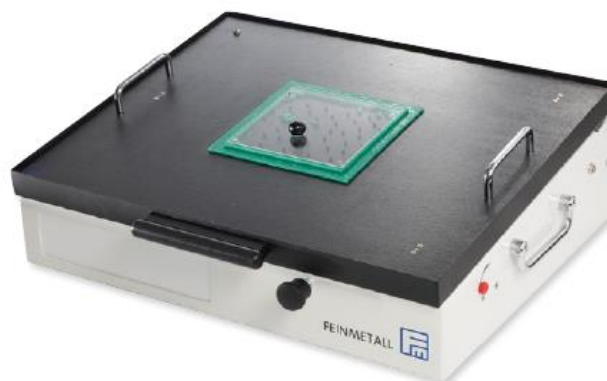
*Figura 14 Acionamento Pneumático*

Nos sistemas mais simples, cujo acionamento é manual (Figura 15 Acionamento Manual ), e que não são normalmente utilizados para produções de grande volume, existe a placa superior do adaptador que simplesmente é deslocada no sentido de entrar de forma descendente para provocar o contacto com a placa de circuito impresso. Neste caso, a placa de agulhas e a placa de circuito impresso são acionadas por um sistema mecânico mais simples, mas que não garante um alinhamento tão seguro, como por exemplo, através de alavancas.



*Figura 15 Acionamento Manual [16]*

Existem ainda os adaptadores de teste cujo acionamento é efetuado por vácuo (Figura 16). Neste caso, existe uma área selada entre a placa de agulhas e o produto a ser testado e quando o vácuo é aplicado essas duas partes juntam-se, realizando-se assim o contacto elétrico para que ocorra o teste [16]. Neste caso o alinhamento das agulhas é seguro, no entanto o curso é reduzido e a flexibilidade da operação pode ficar comprometida.



*Figura 16 Acionamento por Vácuo [17]*

## 2.5 Análise da Concorrência

De seguida apresenta-se uma análise de diversos sistemas de testes ICT existentes no mercado, e que são concorrentes dos sistemas fabricados pela Controlar SA.

A empresa FEINMETALL é uma empresa que também oferece adaptadores de teste muito semelhantes aos da Controlar. Sendo uma empresa de desenvolvimento de soluções de teste para testar componentes eletrónicos, esta empresa possui uma ampla gama de adaptadores de teste com acionamento manual, pneumático e por vácuo.

Os adaptadores de teste desta marca são feitos de acordo com as especificações de cada cliente, desenvolvendo também soluções industriais, e utilizando nos seus equipamentos de teste para ICT materiais que evitam a descarga eletroestática.

No caso dos equipamentos com funcionamento por vácuo, a FEINMETALL possui um kit básico (Figura 17 Kit básico FEINMETALL ) para cada sistema de teste, e adapta esse kit conforme as especificações diferentes de cada teste.

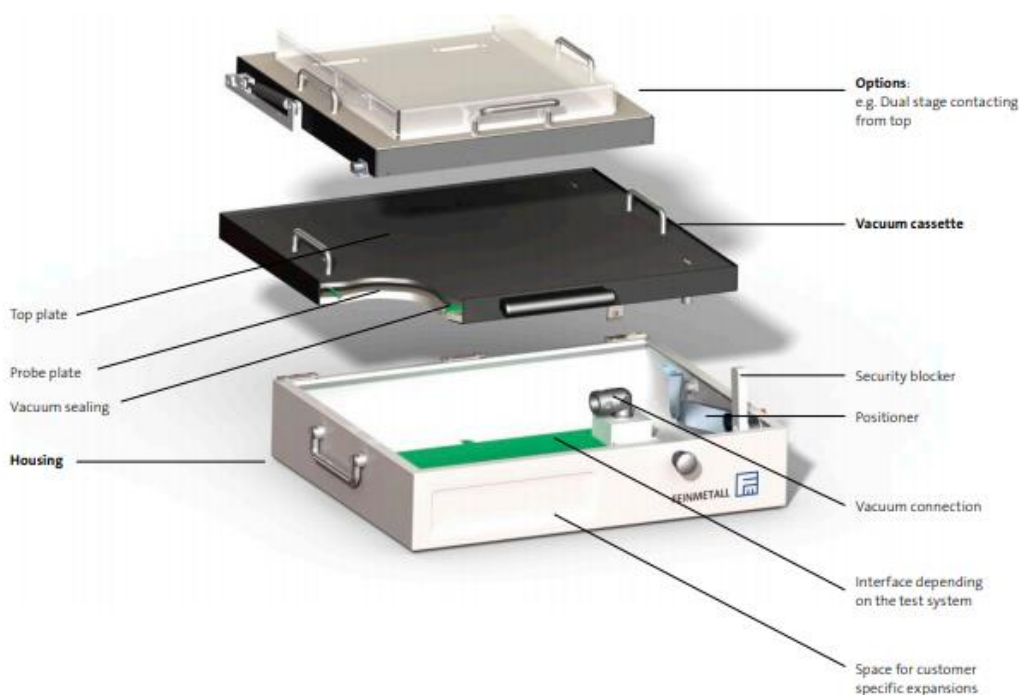


Figura 17 Kit básico FEINMETALL [17]

Esta empresa oferece ainda uma solução sofisticada, uma vez que um único adaptador de teste consegue realizar dois testes em simultâneo: teste no circuito e teste funcional. Para que tal aconteça, aquando da realização do teste no circuito a placa de

circuito impresso entra em contacto com todas as agulhas de teste que o sistema possui. Já para a realização do teste funcional, e visto a placa móvel conseguir deslocamentos diferentes conforme o que é necessário, apenas algumas agulhas de teste entrarão em contacto com o PCB realizando assim o teste (Figura 18 Tecnologia para dualidade de testes).

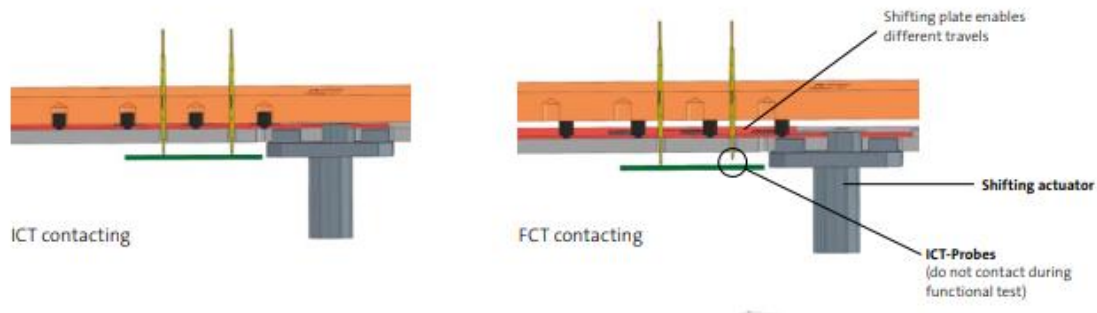
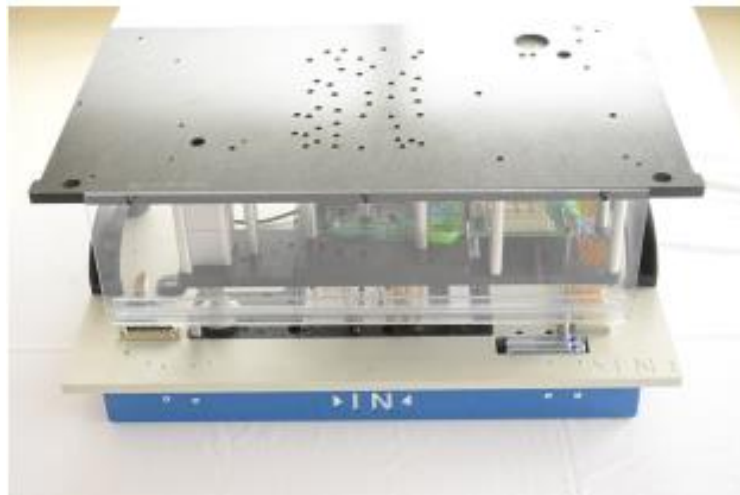


Figura 18 Tecnologia para dualidade de testes [17]

A Inside Limits é mais uma empresa existente no mercado, que também cria soluções de teste para o controlo da qualidade dos PCB's. Esta empresa com cerca de uma década, tem vindo a desenvolver várias soluções de teste, algumas delas referências atuais para fabricantes deste tipo de dispositivos.

Através da execução do serviço completo, desde a análise do projeto, até aos programas de testes, e dispositivos de testes já em fase de produção a Inside Limits tem vindo a desenvolver adaptadores de testes tanto para o teste no circuito como para o teste funcional. As camas de agulhas desta empresa são projetadas e montadas nas suas instalações, e tal como a Controlar SA, todos os projetos são customizados de acordo com os requisitos do cliente. Tal como se pode observar pela Figura 19 Adaptador de Teste - Inside Limits, os adaptadores de teste desta empresa são muito semelhantes aos que têm vindo a ser apresentados [18].



*Figura 19 Adaptador de Teste - Inside Limits [18]*

Outra empresa mundialmente conhecida no fabrico de equipamentos de testes automatizados é o IPTE. Esta empresa possui uma divisão inteiramente direcionada para desenvolver sistemas de automação, IPTE Factory Automation, destes sistemas destacam-se os sistemas que servem para teste e tratamento de placas de circuito impresso.

Um dos pontos fortes desta empresa são os seus handlers (Figura 20), que tal como explicado anteriormente, são os equipamentos onde se coloca os adaptadores de teste para depois se realizar o teste no circuito. [19]

Relativamente aos adaptadores de teste, esta empresa coloca-se mais na linha dos adaptadores manuais, sendo o dispositivo elétrico operado manualmente, neste caso existe pouca similaridade para com os adaptadores de teste da Controlar SA. [20]



*Figura 20 Handler - IPTE*



*Figura 21 Adaptador de Teste Manual – IPTE [19]*

Por fim, outra empresa que merece destaque a nível de soluções de teste para PCB's é a 6TL Engineering. A 6TL é um fornecedor de soluções de teste para os fabricantes de dispositivos eletrônicos, e é pioneira no conceito de modularidade de equipamentos de teste automatizados.

Esta empresa foca-se bastante na utilização de estruturas padronizadas tanto no projeto mecânico de handlers, como no projeto de novos adaptadores de teste. Através da utilização desses sistemas standard, a 6TL consegue manter a funcionalidade dos equipamentos, cumprindo sempre os requisitos do cliente, mas tudo isto com custo e tempo de projeção reduzidos [21]. Na Figura 22, é possível observar um kit standard para a parte superior dos adaptadores de teste que esta empresa possui, verificando-se que existe algumas diferenças comparativamente ao sistema de teste da Controlar SA, principalmente no que diz respeito ao material que constitui a placa superior.



*Figura 22 Kit 6TL [21]*

### **3. Fundamentos Teóricos**

O estudo dos materiais e do comportamento dos mesmos, é essencial para que se realizem bons projetos de máquinas [22]. A seleção de um material para uma peça é uma das decisões mais importantes que um projetista deve tomar e, normalmente, esta decisão é feita logo no início do processo de criação de uma máquina [23]. É essencial que exista o conhecimento das condições de um determinado projeto, de forma a que se verifique se o material tem ou não condições para cumprir uma determinada função.

Neste capítulo serão destacadas as propriedades mecânicas dos materiais, assim como as principais características dos materiais que são mais utilizados no projeto do adaptador de teste, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é estudar o comportamento mecânico dos componentes.

#### **3.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais**

As propriedades mecânicas dos materiais caracterizam o comportamento dos materiais, ou seja, a resposta que existe quando o material é submetido a um esforço externo, como por exemplo, uma força. Estas propriedades serão posteriormente utilizadas para definir os materiais no Ansys e, também são essenciais para entender o comportamento que ocorre nos materiais.

##### **3.1.1 Ensaio de Tração**

Inicialmente, para se obter algumas das propriedades de um material, é necessário submetê-lo a um ensaio de tração. Num ensaio de tração tem-se um provete (corpo de prova, Figura 23) que é colocado numa máquina apropriada para este tipo de testes, e lentamente é submetido à tração, até que o material rompa. Antes de se iniciar o teste, é registado o diâmetro original e comprimento de referência do provete, para que depois durante o teste sejam continuamente monitorizadas todas as variações dimensionais, de forma a que seja medida a deflexão. Além da parte dimensional do provete, é também monitorizada a força aplicada, obtendo-se no final o diagrama de tensão-deformação (Figura 24) do material sob tração [22] [23].



A carga é convertida em tensão através do cálculo apresentado na Equação 1:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} [22]$$

Equação 1 Cálculo da tensão (Pa)

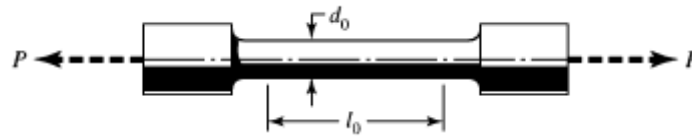


Figura 23 Exemplo de corpo de prova [23]

$\sigma$  – Tensão nominal

P – Força aplicada

$A_0$  – Área da secção transversal inicial

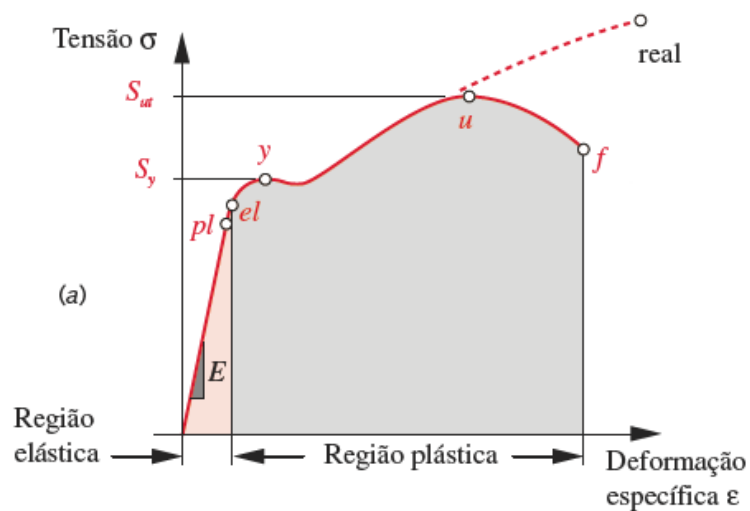


Figura 24 Diagrama tensão-deformação [22]

### 3.1.2 Tensão de Cedência

A tensão de cedência faz a separação entre o comportamento reversível e irreversível de um material [24].

Ao aplicar-se uma força num certo material, este irá apresentar numa fase inicial uma deformação elástica, ou seja, uma deformação reversível. Depois de retirada a carga aplicada sobre o material, o mesmo irá retornar à sua forma inicial. Mas, se o valor da força aplicada for aumentando de forma gradual, o material irá começar a deformar-se de

forma diferente, começando a apresentar deformações elásticas e plásticas, ou seja, deformações reversíveis e irreversíveis, respetivamente. A partir do momento em que o material começa a apresentar deformação plástica considera-se que se atingiu o valor crítico da tensão, atingindo-se o limite elástico do material [25].

Assim, o ponto marcado *el* na Figura 24 representa o limite elástico, ou seja, o ponto além do qual o material adquire uma deformação permanente, ultrapassando assim a sua tensão de cedência.

### 3.1.3 Tensão de Rotura

A tensão de rotura é considerada a maior tensão que um certo material pode suportar, imediatamente antes da rotura, e quando submetido à tração. Através da Figura 25, podemos verificar que um material após entrar na região plástica não rompe imediatamente, uma vez que o que vai acontecendo é uma estricção do mesmo até atingir a sua tensão limite de rotura. Após a rotura, existe uma queda na tensão, que é provocada pelo estrangulamento na área do corpo prova, o que provoca a fratura definitiva do material [22].



*Figura 25 Corpo de prova de tração após estricção*

### 3.1.4 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade ( $E$ ), também conhecido por módulo de Young, é a propriedade que mede a rigidez de um material sólido. Esta propriedade depende da composição química e da estrutura do material, e é calculada através da razão entre a tensão e deformação, desde que o material ainda se encontre dentro do limite elástico. A natureza elástica de um material pode ser descrita pela resiliência do mesmo, melhor dizendo, pela quantidade de energia que é desenvolvida após uma certa deformação [26].

É possível obter o módulo de elasticidade através do diagrama de tensão-deformação, Figura 24, uma vez que  $E$  define a inclinação da curva, sendo assim a

constante de proporcionalidade. A maior parte dos metais possui um comportamento linear, que segue a lei de Hooke [22].

### **3.2 Estudo dos Materiais**

O estudo e seleção dos materiais é importante no processo e desenvolvimento de qualquer produto. A escolha de um material é realizada em função das suas propriedades intrínsecas e, por isso, o conhecimento das mesmas assume um papel fundamental para a realização de qualquer projeto [27].

Neste capítulo, será feito um estudo das propriedades gerais dos materiais que mais são utilizados no projeto do adaptador de teste que são: materiais metálicos e poliméricos.

#### **3.2.1 Estudo das propriedades dos metais**

Os materiais metálicos (alumínio, cobre, ferro, prata, entre outros) são bastante utilizados no fabrico de equipamentos com diferentes funções e aplicações. Em função da quantidade de ferro que contêm os materiais metálicos são divididos em ferrosos e não-ferrosos. No caso dos metais ferrosos temos o aço e o ferro fundido, que possuem elevada quantidade de ferro, e relativamente aos metais não-ferrosos temos o alumínio, o cobre, o zinco, o titânio e o níquel, que possuem quantidades muito reduzidas de ferro [28]. Contudo, estes materiais não são utilizados na sua forma mais pura e, por isso, o que habitualmente é utilizado na indústria são ligas metálicas. No projeto do adaptador de teste os materiais metálicos que são utilizados são os aços e o alumínio.

Os aços são ligas metálicas de ferro e carbono e existem diferentes tipos deste material, uma vez que são diferenciados pelo teor de carbono que possuem. Comparativamente ao ferro fundido, estes apresentam um teor de carbono mais reduzido e propriedades diferenciadoras, por exemplo, a ductilidade que lhes permite serem facilmente deformáveis por forjagem, laminagem e extrusão. Dentro da categoria dos aços, temos o aço inoxidável também utilizado em componentes do adaptador de teste. O aço inoxidável é utilizado em diversas áreas da engenharia, principalmente em aplicações que exigem elevada resistência à corrosão. Este material apresenta um custo ainda elevado e, por esse motivo, é importante que seja utilizado de uma forma eficiente para

que se retire vantagem da sua elevada resistência. Normalmente este material é utilizado em chapas finas e as ligações soldadas devem ser colocadas em zonas não visíveis [27].

O alumínio é dos materiais metálicos mais utilizados na indústria e apresenta uma boa relação entre as suas propriedades e o custo. Relativamente às suas propriedades, o alumínio é um metal leve que possui uma baixa densidade, comparativamente com o aço (um terço da do aço), boa condutividade elétrica e térmica, ductilidade, fácil de maquinar e resistente à corrosão. Este material apresenta diversas aplicações que vão desde o fabrico de chapas, componentes e peças obtidas por maquinagem, estruturas aeroespaciais, embalagens, entre muitas outras [27].

#### *3.2.1.1 Deformação elástica e plástica*

O conceito de tensão é muito importante em engenharia, e a tensão máxima que cada material suporta é uma característica essencial. Todos os materiais reagem de uma forma diferente às tensões que lhe são submetidas e, por esse motivo, para a mesma tensão existirá uma deformação diferente, dependendo do material que a suporta. Assim, e como já visto anteriormente, a equação mais vulgarmente utilizada para o cálculo das tensões relaciona a força aplicada numa determinada secção e a área da mesma, designando-se por tensão (equação 9) [28].

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

*Equação 2 Cálculo tensão*

Qualquer estrutura submetida à ação de uma solicitação exterior sofre uma deformação, e o grau dessa deformação depende da magnitude da tensão imposta. As deformações podem ser reversíveis ou permanentes [28].

Quando a deformação é reversível a estrutura que sofre a força externa retoma à sua forma original, depois da força deixar de ser aplicada. A grande maioria dos metais, quando submetidos à tração com um nível relativamente baixo, seguem a Lei de Hooke Equação 3, sendo a deformação e a tensão proporcionais entre si [28].

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

*Equação 3 Lei de Hooke*

Assim, ao processo de deformação em que a tensão e a deformação são proporcionais dá-se o nome de deformação elástica [28].

Após o metal ultrapassar o seu limite elástico a deformação torna-se permanente, ou seja, estamos perante a fase de deformação plástica onde o material já não consegue recuperar a sua forma original. Na Figura 26, podemos observar as diferentes fases a que um material é submetido até chegar à fase plástica [28].

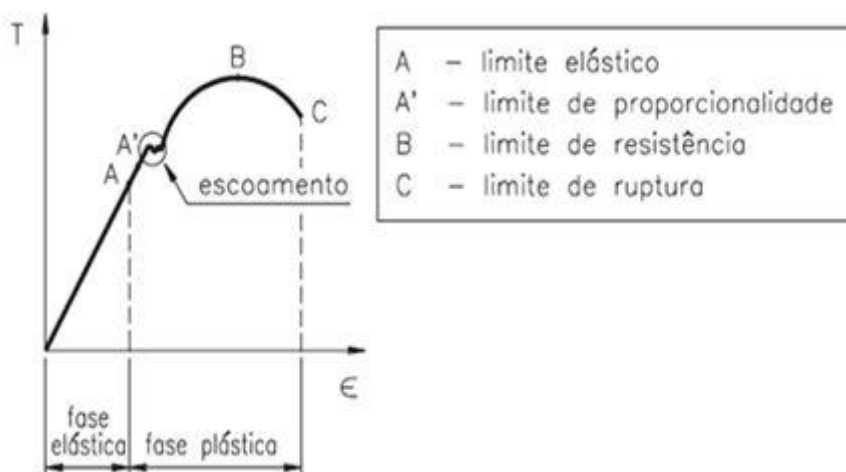


Figura 26 Diagrama Tensão-Deformação [29]

As características mecânicas dos metais são averiguadas através de ensaios tensão-deformação, que podem ser do tipo tração, compressão, torção e cisalhamento [28].

Como referido anteriormente, um material quando submetido a tensões sofre, inicialmente, uma deformação elástica, e a tensão e deformação são proporcionais entre si. A constante de proporcionalidade desta relação, que resulta do ensaio de tração e compressão, é o módulo de elasticidade (E) [28].

Através da análise do diagrama da Figura 26, é possível diferenciar várias fases que acontecem antes da rotura do metal [28].

### 3.2.2 Estudo das Propriedades dos Polímeros

Os polímeros, habitualmente, designados por plásticos têm como fonte principal o petróleo ou o carvão [22], e são materiais facilmente modificados através da ação de calor [27]. Existe uma grande diversidade de materiais poliméricos, alguns naturais, outros sintetizados pelo homem, e devido a essa grande variedade, torna-se complicado generalizar as propriedades mecânicas dos mesmos. De qualquer forma, e comparativamente aos metais, podemos verificar que os polímeros têm baixa densidade, baixa resistência, baixa rigidez, diagramas de tensão-deformação não lineares Figura 27,

baixa dureza, facilidade de fabricação e, por fim, uma excelente resistência elétrica e à corrosão [22].

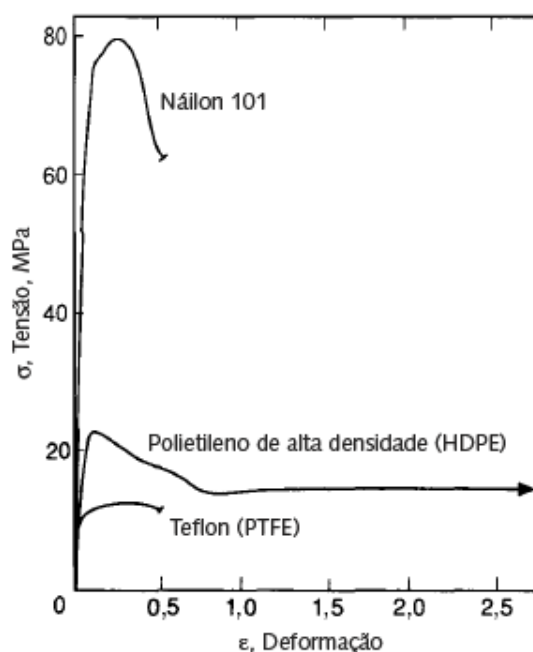


Figura 27 Gráfico tensão-deformação para três polímeros termoplásticos [22]

A facilidade de moldar os polímeros e, também o baixo peso de peças feitas neste material, leva a que este material seja utilizado em grande escala e, com diversas aplicações, desde sacos de plástico, garrafas, componentes automóveis, cablagens e eletricidade, etc. A utilização de polímeros no fabrico de peças caracteriza-se, essencialmente, por [27]:

- Possibilidade de obtenção de um produto final que não necessita de operações de acabamento;
- Elevada relação resistência/peso;
- Relativa facilidade de produção industrial;
- Boa resistência térmica e elétrica;

No projeto do adaptador de teste é importante considerar os materiais poliméricos, uma vez que o principal objetivo é a redução de peso, e os polímeros podem ser uma boa solução. Contudo, é necessário ter em conta que é necessário pensar noutros fatores além do peso, como por exemplo, a resistência do material a solicitações externas e, por isso, é sempre necessário verificar o comportamento do material para que se verifique se a solução é, ou não, viável. É de salientar que no adaptador de teste atual também já existe

a utilização destes materiais em alguns componentes, como por exemplo, poliamida (habitualmente chamada de nylon) na rampa e placas de contorno para o PCB, POM (polióxido de metileno) nos suportes de guias e o policarbonato (habitualmente chamado de acrílico) que é utilizado para proteção frontal do operador. Todos os materiais anteriormente mencionados encontram-se na categoria de termoplásticos, e são bastante abundantes no mercado e, com grande aplicação industrial, uma vez que são polímeros que podem facilmente ser deformados e novamente solidificados, sendo, por isso, facilmente recicláveis [27].

A poliamida (PA) é um material bastante flexível, fácil de processar e maquinar e é, normalmente, aplicado em produtos onde haja atrito, devido às excelentes propriedades de resistência mecânica que possui. Este material tem diversas aplicações, desde a utilização em forma de fibra para vestuário, como a utilização em componentes rígidos, como acontece no adaptador de teste [27]. O POM, é um polímero bastante similar à poliamida, só que mais rígido, com uma boa resistência à fadiga, baixo coeficiente de atrito e, com baixa tendência à rotura por fadiga. Este material é muito utilizado na indústria de construção de máquinas [27]. Por fim, o policarbonato (PC) possui propriedades superiores à maioria dos polímeros e, é um material que consegue aliar boas propriedades mecânicas com custos, facto este que o torna um material com grande uso. Este material apresenta elevada resistência ao impacto, elevada dureza e rigidez, boa estabilidade dimensional e boas propriedades elétricas. Este polímero é bastante utilizado na obtenção de peças através do processo de injeção e, é muitas vezes comercializado em chapas e placas obtidas por extrusão [27].

Tal como já foi referido anteriormente, os materiais que têm vindo a ser mencionados pertencem à família dos termoplásticos, mas é também importante falar dos polímeros termoendurecíveis uma vez que todas as placas do adaptador de teste são produzidas com papel fenólico, material este que provém da resina fenólica.

Os polímeros termoendurecíveis são plásticos onde o processo de polimerização é completado através de uma prensa de moldagem com a ação do calor, sendo o plástico liquefeito sob pressão [23]. São mais rígidos e mais frágeis que os termoplásticos e, depois de endurecidos tornam-se difíceis de modificar, tornando-se quebradiços quando aquecidos e, por isso, com difícil reutilização, contrariamente aos termoplásticos. A resina fenólica possui uma elevada rigidez, tem fácil moldação, excelentes propriedades

de isolamento elétrico, boas propriedades mecânicas e um custo atrativo para a indústria [27].



### 3.2 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos, mais vulgarmente designado por FEM (*Finite Element Method*), permite a discretização de um sistema contínuo através da aproximação das respostas por funções. O conceito básico deste método está na divisão de uma região complexa, meio contínuo, em sub-regiões mais simples que tornam a geometria menos complexa do que se tem originalmente. Estas sub-regiões possuem um tamanho finito, e um determinado número de pontos a partir dos quais se estabelece o campo de deslocamentos, vulgarmente designados por nós [30].

O método dos elementos finitos, tem vindo cada vez mais a tornar-se uma ferramenta essencial para a determinação de soluções numéricas numa vasta gama de problemas de engenharia. Este método requer a utilização de um elevado número de equações algébricas, e por esse motivo, é necessária a utilização de computadores com competências aceitáveis, permitindo assim que problemas complexos possam ser modelados com alguma facilidade. Assim, é possível testar os modelos antes de se construir os primeiros protótipos [31].

De seguida, será apresentado o exemplo mais simples do processo matemático para a análise com o método dos elementos finitos, recorrendo para isso ao método da rigidez direta, que é o método mais comum para a implementação do método dos elementos finitos. Para isso, considere-se uma mola linear, com uma certa rigidez, ou seja, constante elástica da mola, onde um deslocamento irá criar uma força no nó (Equação 4) [22].

$$k = \frac{f}{\Delta u}$$

*Equação 4 Cálculo da constante de uma mola*

Em notação matricial temos [22]:

$$[k]\{d\} = \{f\}$$

*Equação 5 Notação Matricial*

Onde  $k$  é a matriz rigidez,  $d$  é o vetor de deslocamento nodal e  $f$  é o vetor de forças internas do elemento.

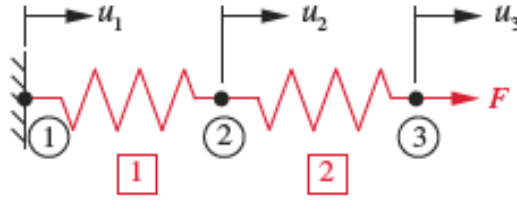


Figura 28 Modelo - Malha com 2 elementos e 3 nós

Considerando a Figura 28, temos dois elementos simples que conectados entre si formam uma malha de elementos finitos simples, constituída por três nós. O elemento 1 é fixo, devido ao encastramento, criando assim uma restrição de movimento, e no nó 3 temos uma força aplicada. Tendo em consideração a equação 5, temos que [22]:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{22} \\ f_{32} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

As forças que podemos observar na equação 6 e 7 são forças internas que acontecem nos nós. Para o equilíbrio de todo o sistema, a soma das forças nodais deve ser igual às forças externas aplicadas. Para se descobrir o valor das forças externas apenas temos de somar as forças que atuam em cada nó, obtendo-se assim [22]:

- Nó 1:  $f_{11} = F_1$
- Nó 2:  $f_{21} + f_{22} = F_2$
- Nó 3:  $f_{32} = F_3$

Das equações anteriormente apresentadas, resulta [22]:

$$\begin{cases} k_1 u_1 - k_1 u_2 = F_1 \\ -k_1 u_1 + (k_1 + k_2) u_2 - k_2 u_3 = F_2 \\ -k_2 u_2 + k_2 u_3 = F_3 \end{cases} \quad (9)$$

Se colocarmos as equações anteriores na forma matricial, temos que [22]:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$[k]\{D\} = \{F\} \quad (11)$$

Através da equação 10 conseguimos determinar os deslocamentos nodais que ocorrem para o sistema apresentado. Após a determinação dos deslocamentos, é possível

obter as forças de reação que ocorrem nos nós, através das equações 6 e 7. Posteriormente, podemos calcular as deformações derivando os deslocamentos e as tensões a partir das deformações obtidas e através das propriedades do material [22].

Apesar deste exemplo ser o mais simples que podemos ter, este contém as fases essenciais para se solucionar um problema estático recorrendo ao método dos elementos finitos [22].

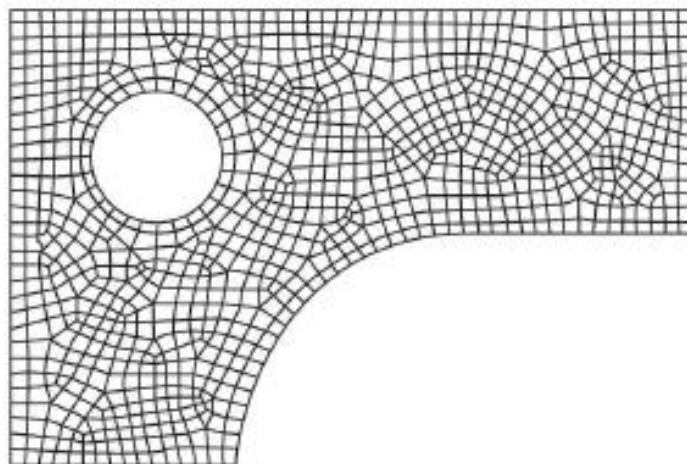
Desde 1950, com os avanços da tecnologia, foi investido um grande esforço não só no desenvolvimento do método dos elementos finitos como também na implementação dos mesmos nos computadores, através de softwares avançados. Assim, através do rápido avanço das tecnologias de computação, e com a eficiência dos computadores foi possível criar rotinas que permitissem a resolução de matrizes, assim como, capacidades gráficas para que fosse possível visualizar a fase de pré-processamento onde se constrói o modelo, e até mesmo a geração automática de malha, seguida dos resultados [23].

Apesar do método dos elementos finitos ser uma técnica avançada para o estudo do comportamento mecânico das estruturas, esta tem por base a discretização do domínio de uma estrutura contínua, e por isso, possui alguns erros associados, são eles [23]:

- 1) **Erros computacionais:** Erros provenientes de arredondamentos, provenientes em cálculos em ponto flutuante dos computadores. Normalmente, os softwares comerciais para uso deste método concentram-se na redução deste erro.
- 2) **Erros de discretização:** A geometria das estruturas e a distribuição dos deslocamentos varia repetidamente e, por isso, a introdução de um número finito de elementos pode causar erros de correspondência da geometria com a distribuição dos deslocamentos. Por exemplo, uma geometria com carácter geométrico curvo pode causar este tipo de erros, pois os elementos da malha podem não ser os mais adequados.

### 3.2.1 Malha

A rede de elementos e nós que discretiza uma determinada região é chamada de malha, e a densidade desta aumenta à medida que se colocam mais elementos no interior de uma determinada região (Figura 29) [23].



*Figura 29 Exemplo de geração de malha*

Atualmente com os softwares avançados para utilização do método dos elementos finitos, a geração de malha torna-se um processo bastante simples, e que acontece automaticamente. Relativamente ao tipo de malha, normalmente os programas atuais oferecem quadriláteros lineares, ou então uma malha mista de quadriláteros e triângulos nas regiões com geometrias mais complexas de uma determinada estrutura. Em relação à qualidade da malha, estas podem ser mais grosseiras ou mais refinadas, dependendo do número de elementos que a constitui. Normalmente, quando se quer minimizar o tempo de processamento utiliza-se as malhas mais grosseiras, onde os elementos são maiores, e para peças simples onde o gradiente de tensão é mais reduzido estas malhas até acabam por resultar bem. Pelo contrário, em regiões onde existem grandes concentrações de tensão, já se exige uma malha mais refinada de modo a se obter resultados verdadeiros [22].

### 3.2.1 Convergência

A geração de malha implica que o utilizador saiba em que altura deve parar de fazer o refinamento da mesma, e para isso, o mais indicado é que se faça um teste de convergência [22].

Para começar o teste de convergência começa-se por definir uma malha menos refinada, calculando-se, por exemplo, as tensões. Verifica-se as zonas onde as tensões são maiores, e aplica-se uma redução no tamanho dos elementos da malha, tornando-a mais refinada, calculando-se de novo as tensões. Depois de se obter os novos valores, compara-

se com os valores anteriormente obtidos, para diferentes densidades de malhas, e se existir uma grande diferença entre valores é um sinal de que a malha ainda não se encontra suficientemente refinada. Então, procede-se novamente ao refinamento e voltamos a comparar os valores. Existirá um ponto a partir do qual os valores começam a convergir, e é nesse ponto que podemos concluir que já temos uma malha apropriada para a estrutura em análise, convergindo assim a solução para o valor real (Figura 30) [22].

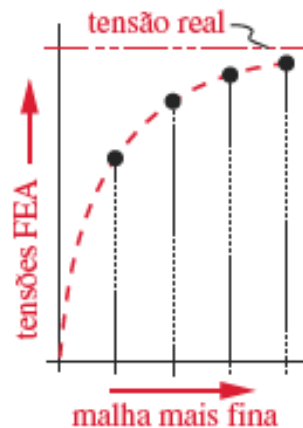


Figura 30 Refinamento da Malha [22]

### 3.3 Ansys

O *Ansys* é um programa computacional de simulações para engenharia que tem por base o método dos elementos finitos, e que permite efetuar estudos do comportamento das estruturas, estudo das melhores geometrias e o estudo das propriedades dos materiais de uma forma muito mais facilitada [32].

O *Ansys Workbench* é uma das várias ferramentas do *Ansys*, enquadrando-se na categoria de programas de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE), e tem como principal objetivo facilitar a vida dos engenheiros auxiliando e facilitando diversas etapas de desenvolvimento e dimensionamento dos projetos. Com a utilização deste software consegue-se reduzir o tempo e custo de todo o processo de desenvolvimento de projetos, melhorias nas peças antes de se ter custos com a fabricação e, por fim, a probabilidade de falha dos componentes [32].

A utilização do método dos elementos finitos através destes softwares exigem muito do hardware do computador em processamento de dados, armazenamento de

informações e, também em processamento de imagens. A realização das simulações neste programa divide-se em três fases, são elas [32]:

- Pré-processamento: Nesta fase consideram-se todas as definições necessárias para a realização da simulação. Aqui inclui-se a definição da geometria das peças, os materiais, a malha e, também, as condições de contorno. A escolha dos materiais é feita no parâmetro “*Engineering Data*” onde se pode selecionar um material já pré-definido pelo programa, ou então criar um material onde se insere todas as propriedades do mesmo. A definição da geometria pode ser importada de outro programa CAD, por exemplo, *SolidWorks* ou então criar a geometria na ferramenta de desenho do *Ansys, DesignModeler*. Em relação às condições de contorno estas muitas vezes estão já automaticamente definidas pelo programa, mas pode ser necessário acrescentar novas condições, para que o software entenda as ligações existentes entre diferentes peças.
- Processamento: Definição das condições iniciais da simulação, tais como, forças aplicadas, apoios existentes, ou seja, todos os parâmetros que se pretendem analisar.
- Pós- processamento: Fase onde se obtém os resultados depois de todos os dados inseridos.

### 3.3.1 Análise Estática

A análise estática é um dos vários tipos de análise que o Ansys é capaz de fazer, através do cálculo dos efeitos das condições de carregamento estático nas estruturas, não sendo assim considerados os efeitos de inércia e amortecimento, que podem ser provocados por cargas que variam em função do tempo [32].

Através deste tipo de análise é possível determinar as tensões, deslocamentos, deformações específicas e forças existentes nas estruturas e, assume-se que os carregamentos estáticos são aplicados lentamente em relação ao tempo. Em relação aos tipos de carregamentos que podem ser aplicados neste tipo de análise temos: forças e pressões, forças inerciais, como por exemplo a gravidade, ou então a imposição de deslocamentos [32].



## 4 Proposta e análise de alterações

Ao longo deste capítulo irá ser apresentado o trabalho prático realizado, onde serão identificados os componentes alvo de estudo, propostas de otimização, simulação numérica, possível processo de fabrico dos componentes propostos e, por fim, sugestão de montagem dos mesmos.

### 4.1 Base do Adaptador

A base dos adaptadores de teste é o componente responsável por suportar toda a máquina quando esta se encontra no exterior do handler (Figura 31) e, também tem como função guardar toda a instrumentação necessária para o funcionamento do equipamento.



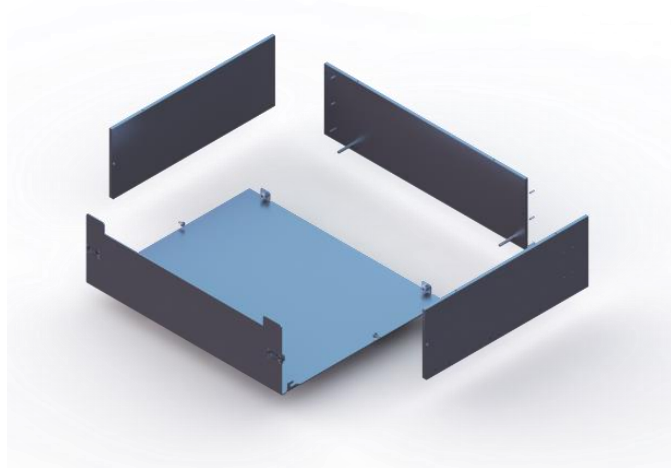
*Figura 31 Adaptador de teste - Exterior do handler*

Atualmente a base do adaptador de teste da Controlar SA é produzida em alumínio, constituída por três placas com 6 mm de espessura, e uma tampa manuseável no mesmo material e com 2 mm de espessura (Figura 32). Estas placas laterais possuem furos na parte superior para que depois se consiga ligar a base à placa de papel fenólico inferior. Este componente representa uma massa considerável no peso total do equipamento, refletindo-se em 4 kg, e por isso considerou-se ser essencial estudar e otimizar este componente de forma a obter-se uma estrutura mais leve e com menos componentes.

Relativamente às placas de alumínio estas são todas ligadas através de parafusos M3, e existem também encaixes na tampa que permitem que esta se mantenha bem



fechada, utilizando para isso fechos snaplock, que permitem facilmente abrir e fechar a tampa. Além dos fechos existem também dois pinos na placa de alumínio traseira, que encaixam na tampa, quando esta se encontra a fechar, garantindo assim maior segurança.



*Figura 32 Vista explodida da base*

Para a realização do teste no circuito o adaptador de teste é colocado no handler onde a parte superior fica distanciada da parte inferior do mesmo, uma vez que é colocada num suporte próprio que a máquina possui. A parte superior apenas desce quando o PCB se encontra pronto para a realização do teste, entrando assim as agulhas em contacto com o mesmo.

A parte inferior do adaptador de teste é colocada numa abertura existente no handler (Figura 33) que possui as mesmas dimensões que a base de alumínio.



*Figura 33 Abertura no handler para base de alumínio*

A base de alumínio não sofre esforços provenientes da parte superior do adaptador de teste, nem do cilindro pneumático que o handler possui, uma vez que a força proveniente do cilindro pneumático (3000 N) apenas será transmitida ao papel fenólico que se encontra conectado à base por ligações aparafusadas. Deste modo, para se verificar o comportamento mecânico do componente é essencial entender-se qual o pior caso possível a que pode estar submetido, que neste caso é a situação em que o adaptador se encontra fora no handler (Figura 31) tendo a base de sustentar o peso próprio de todo o adaptador e toda a instrumentação que possui no seu interior.

Na Tabela 3 Requisitos base do adaptador podem-se observar os requisitos técnicos e funcionais que mais se valorizam neste componente.

*Tabela 3 Requisitos base do adaptador*

Requisitos	
Dimensional	443 x 360 x 135 (mm)
Tensão Equivalente de Von-Mises	$< 280 \text{ Mpa}$
Deslocamento	$< 2 \text{ mm}$
Suporte de Cargas	$\geq 20 \text{ kg}$
Funcional	Tampa móvel para manutenção

Relativamente ao requisito dimensional, temos dimensões que são previamente definidas de acordo com as especificações do handler que será utilizado para a realização do teste ICT. A nível funcional, e seguindo as orientações dos clientes, sabe-se que a tampa tem de ser móvel para que haja um fácil contacto com a instrumentação que se encontra no interior da base. Este requisito é importante uma vez que essa instrumentação é várias vezes alvo de manutenção e, por isso, a importância de um fácil acesso ao interior deste componente. A nível da tensão que é aceite para este projeto, tem de ser inferior a 280 Mpa, e este valor foi definido através da tensão de cedência do alumínio, material em que atualmente o componente é projetado. Caso se decida otimizar este componente através da mudança de material este requisito terá de ser revisto, uma vez que o que se pretende é que a base do adaptador de teste não sofra deformações plásticas. Em relação aos deslocamentos permitidos para esta estrutura, definiu-se previamente que deveriam ser inferiores a 2 mm uma vez que existe instrumentação elétrica alojada nas paredes laterais da base e, por isso, grandes deslocamentos poderiam causar estragos. Por fim, a nível de suporte de cargas é essencial que a base do adaptador suporte no mínimo 20 kg, que é a totalidade do peso do adaptador.

#### 4.1.2 Simulação Numérica – Base Atual

O estudo do comportamento mecânico da base atual é bastante importante para que se compreenda se a base está ou não sobredimensionada. Além disso, é importante verificar quais as tensões e deslocamentos que a estrutura sofre para que assim seja possível comparar com as propostas de otimização que serão apresentadas nos capítulos seguintes.

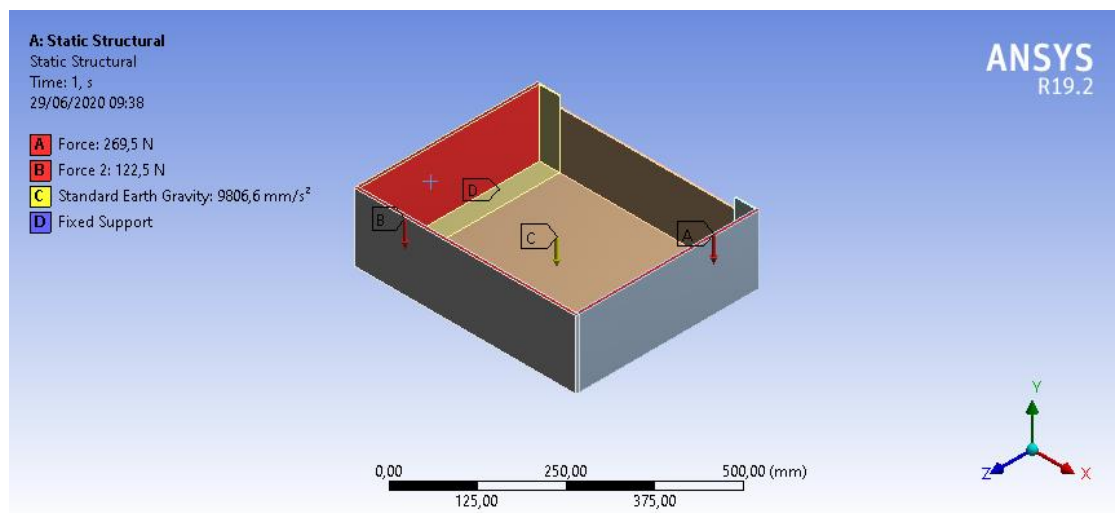
Antes de se iniciar a simulação numérica é importante a correta definição do material que é utilizado, as propriedades do material utilizado foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se na tabela seguinte:

Alumínio 5083	
Densidade	2700 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	6,9 x 10 <sup>10</sup> Pa
Coefficiente de Poisson	0,33
Tensão de Cedência	280 Mpa

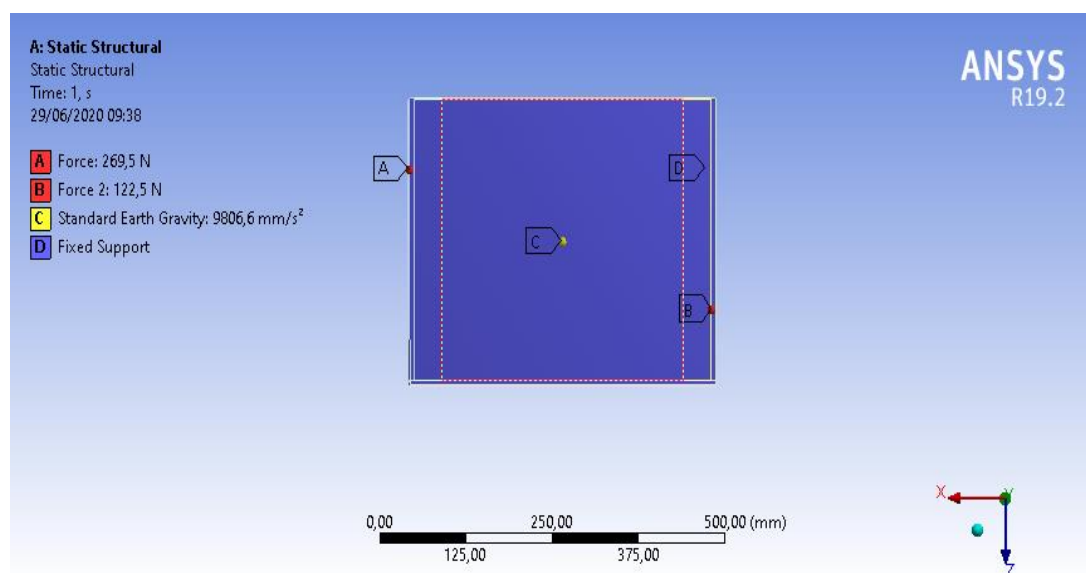
*Tabela 4 Definição de Propriedades*

Para efetuar a simulação numérica foi necessário estudar quais os esforços e apoios que estão presentes na base. Para tal, é essencial entender-se qual o pior caso possível a que a base pode estar submetida, que neste caso é a situação em que o adaptador se encontra fora no handler tendo a base de sustentar o peso próprio de todo o adaptador e toda a instrumentação que possui no seu interior. Assim sendo, considerou-se (Figura 34):

- Força vertical aplicada na espessura da base, com o valor de 269,5 N, que corresponde ao peso próprio do adaptador, com um valor superior para que exista uma margem de segurança;
- Força vertical aplicada no interior das paredes laterais, com o valor de 122,5 N, que corresponde à instrumentação que normalmente se encontra no interior do adaptador de teste. Aqui considerou-se o pior caso possível, ou seja, 12,5 kg só de instrumentação;
- Força gravítica;
- Suporte fixo (apoio duplo) em toda a parte inferior da base do adaptador, uma vez que esta fica alojada inferiormente.



*Figura 34 Esforços considerados na estrutura*



*Figura 35 Apoio considerado*

Depois de todas as informações colocadas foi possível obter os gráficos dos deslocamentos e tensões. É de salientar que durante todo o processo foi efetuado refinamento da malha, até que se chegasse a um ponto de convergência dos valores, e obtiveram-se os seguintes resultados:

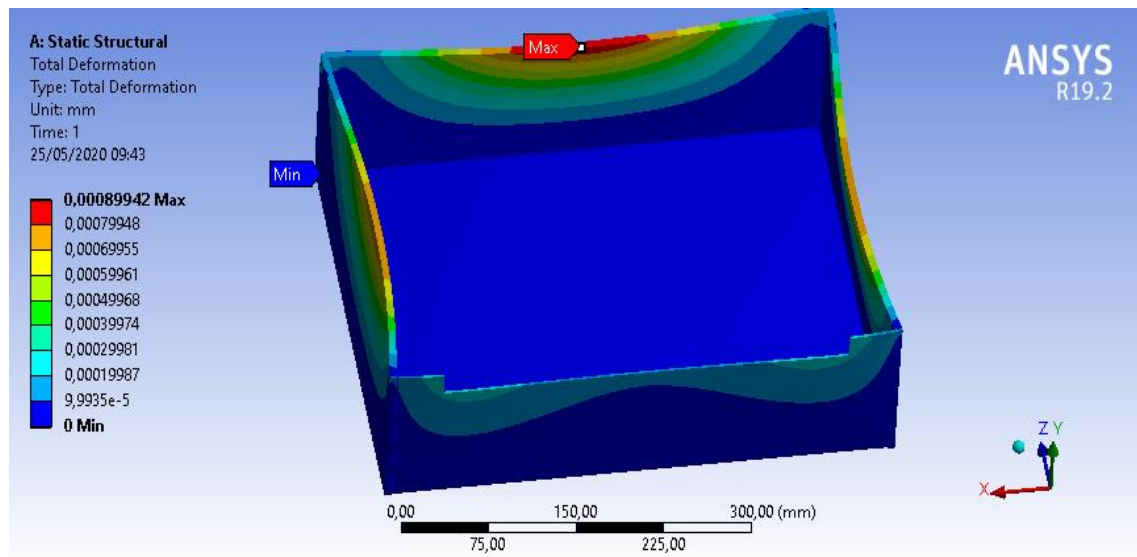


Figura 36 Deslocamento - Base Atual

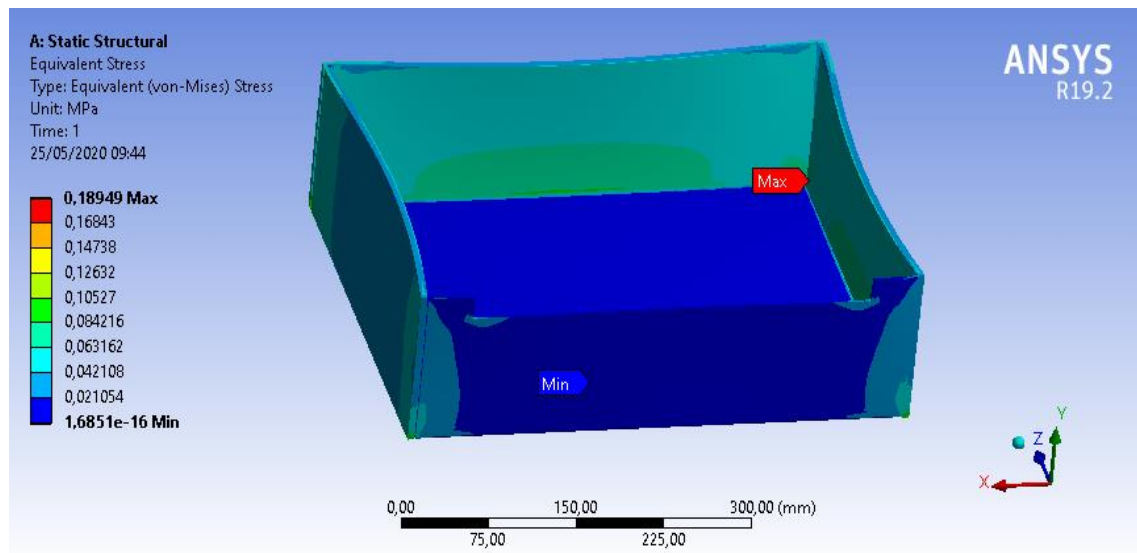


Figura 37 Tensões Equivalentes - Base Atual

Como é possível observar pela Figura 36, a base atual de alumínio sofre um deslocamento bastante reduzido, perto de 0 mm. Este facto é um primeiro sinal de que podemos estar perante uma base sobredimensionada.

Através das propriedades do material previamente definidas, é possível saber que a tensão de cedência do alumínio é de 280 Mpa, valor este a partir do qual a deformação do alumínio deixa de ser elástica e passa a ser plástica. Para o caso em estudo, o objetivo é que a deformação seja sempre elástica, uma vez que é importante que a base do adaptador de teste mantenha sempre a sua forma. É importante referir que tanto as

imagens dos deslocamentos como das tensões não estão à escala, tendo sofrido um aumento de 0,5 vezes, para ser possível ter uma precessão visual melhor.

Observando a Figura 37, podemos verificar que a base com as dimensões atuais praticamente não sofre qualquer tipo de tensões, verificando assim que o valor obtido na simulação do Ansys é bastante reduzido, muito longe do valor máximo de cedência. Assim, é possível verificar que esta estrutura se encontra bastante sobredimensionada e, por isso, será alvo de modificações geométricas que levarão à redução da massa.

## 4.2 Propostas de Otimização – Base do Adaptador

Neste subcapítulo serão apresentadas várias propostas de otimização para o componente que tem vindo a ser apresentado, de salientar que no Anexo A se encontram disponíveis os desenhos técnicos das mesmas.

### 4.2.1. Proposta 1 – Chapa Metálica em “U”

A proposta que podemos ver na Figura 38, trata-se de uma chapa em alumínio, que possui uma dobra na parte superior para que seja possível efetuar as ligações à placa de papel fenólico. Esta chapa possui 1,5 mm de espessura, e relativamente à tampa não existem quaisquer alterações, comparativamente ao que existe na tampa atualmente utilizada, sendo os encaixes utilizados iguais ao que atualmente é utilizado.



*Figura 38 Chapa Metálica*

Este tipo de estrutura possui várias vantagens face à estrutura que atualmente é utilizada, uma vez que a montagem será facilitada através da redução de componentes e, também porque a massa total da base irá diminuir de 4 kg para 1,8 kg, redução esta que é

bastante significativa e que se irá refletir numa redução da massa total de todo o adaptador de teste.

Esta solução também pode sofrer alterações a nível da montagem, uma vez que podemos substituir os parafusos que ligam a dobra da chapa ao papel fenólico por rebites roscados. A utilização dos rebites roscados permitiriam uma montagem mais rápida, uma vez que através de um alicate de rebites conseguimos facilmente garantir esta ligação, não sendo assim necessário a utilização de porcas. No caso de se manterem os parafusos, outra solução possível é as porcas serem previamente unidas à chapa, através do processo de brasagem, tornando assim um pouco mais rápido a montagem deste componente.

#### 4.2.1.1 Simulação Numérica – Chapa Metálica em “U”

Após ter sido efetuado o estudo da base que atualmente o adaptador de teste possui, é importante verificar o comportamento mecânico das propostas de otimização, uma vez que não se pretende apenas otimizar o peso do componente, mas também continuar a ter um bom comportamento a nível de tensões e deslocamentos.

No Ansys Workbench, começou-se por definir as propriedades do material, que neste caso são iguais às do alumínio 5083, utilizado nas simulações anteriores, e de seguida colocou-se a geometria em estudo considerando-se os mesmos apoios e esforços que foram anteriormente apresentados na Figura 34 e Figura 35. Assim, para as mesmas condições os dados obtidos para os deslocamentos e tensões foram:

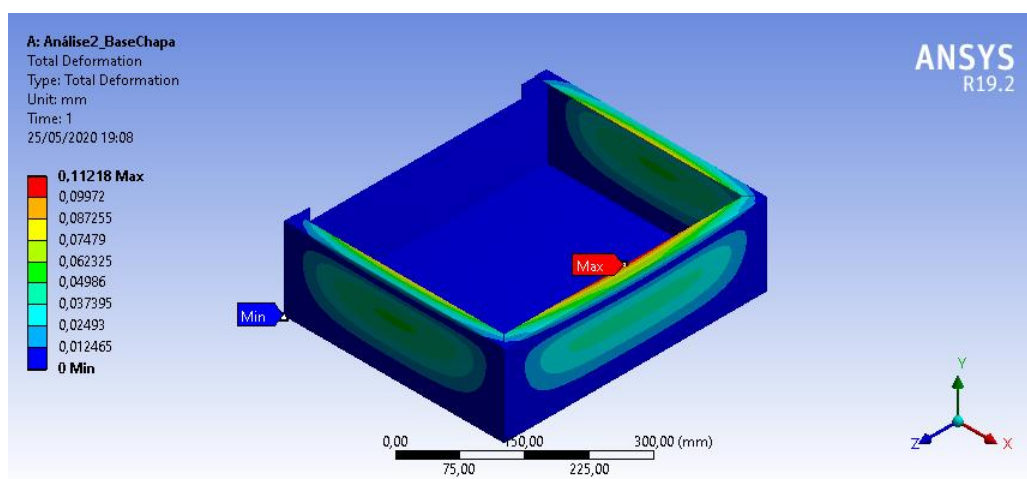


Figura 39 Deslocamento - Chapa em "U"



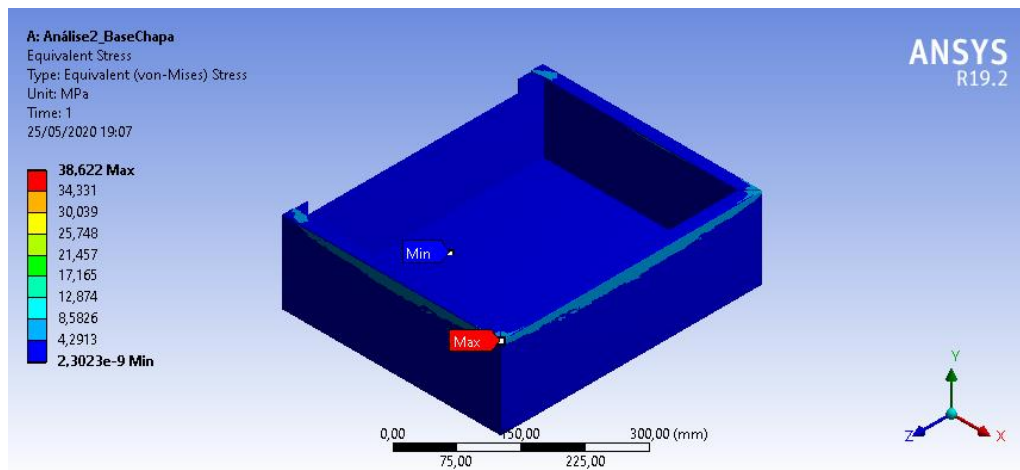


Figura 40 Tensões Equivalentes - Chapa em “U”

Através da Figura 39, podemos verificar que a estrutura proposta para otimização não sofre praticamente deslocamentos, para os esforços a que está submetida. O valor máximo de deslocamentos que a chapa metálica sofre é de 0,11 mm, o que se revela um valor irrelevante para o tipo de estrutura que temos.

Relativamente às tensões que existem na estrutura em estudo, quando esta é submetida a compressão, podemos confirmar na Figura 40, que os esforços que a base sofre não são suficientes para causar tensões elevadas e que causem deformação plástica na estrutura. É possível verificar que existe um ponto crítico onde a tensão é de 38 Mpa, ponto esse que se situa nos vértices superiores, mas este ponto não será um problema uma vez que o valor máximo da tensão se encontra bastante distante dos valores da tensão máxima de cedência.

Com a análise do comportamento da estrutura a nível de tensões e deslocamentos máximos é possível verificar que os requisitos previamente estabelecidos estão a ser cumpridos, não entrando a chapa em deformações plásticas, uma vez que as tensões máximas se encontram distantes dos 280 Mpa, valor para o qual o alumínio entra em cedência.

#### 4.2.1.2 Processo de Fabrico

Relativamente ao processo de fabrico desta chapa metálica teríamos quinagem, furação e roscagem.

A quinagem é um processo de fabrico bastante utilizado na indústria, e consiste na alteração da forma de chapas metálicas, ou seja, com este processo conseguimos obter geometrias variadas, através de uma deformação plástica do material metálico. Relativamente à máquina que é utilizada para este processo de fabrico, denomina-se por quinadora. Estas máquinas normalmente possuem uma mesa comprida e estreita, onde depois se instalam ferramentas que permitem a dobragem da chapa metálica, as matrizes e o punção, que são ferramentas adaptáveis a diversas dimensões e geometrias. No caso da chapa metálica em “U” em alumínio, o tipo de quinagem utilizado é a quinagem em V, onde a chapa é deformada até encostar às ferramentas, ficando a folga entre o punção e a matriz igual à espessura da chapa, neste caso 1,5 mm. Com a quinagem em V consegue-se obter uma chapa dobrada com 90°, dobragem que é necessária tanto para as paredes laterais como para a dobragem na parte superior da chapa onde assenta o papel fenólico. Este processo é também utilizado para a tampa do adaptador de teste [32].

Na imagem seguinte está representada a forma como irá ocorrer o processo de fabrico da base do adaptador em chapa de alumínio, caso esta proposta de otimização seja adotada pela Controlar.

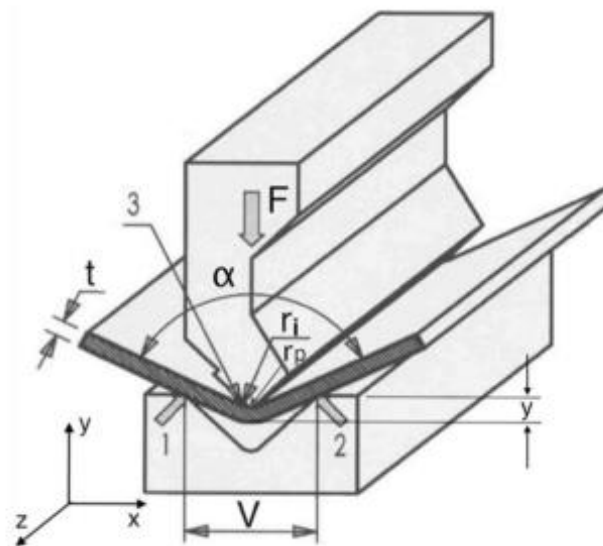


Figura 41 Processo de Quinagem [33]

A força aplicada ( $F$ ) e o valor de penetração ( $y$ ) criam um gradiente de tensão ao longo da espessura. A dobra pretendida é obtida através da ultrapassagem do limite elástico, ou seja, na presença de uma deformação plástica. A abertura da matriz, designada por  $V$ , é a distância entre os dois apoios da matriz, onde se coloca a chapa metálica, induz-

se uma força e obtém-se assim o ângulo da quinagem ( $\alpha$ ). Representado por  $r_i$  temos o raio interior da quinagem, raio este que depende da distância entre os dois apoios da matriz. Em suma, a força de quinagem corresponde à força que é necessária aplicar durante o processo, e a profundidade é definida como o grau de penetração do punção na matriz, obtendo-se o ângulo final da quinagem [32].

O segundo processo que seria utilizado para obtenção da base de alumínio é a furação que é a operação de maquinagem que tem como objetivo a abertura e alargamento de furos, através da utilização de uma broca [27].

Por fim, o último processo utilizado é a roscagem que tem como objetivo a realização de rosca, e para esta operação são utilizados machos, que permitem a abertura a abertura de roscas em furos [27]. Esta última operação só irá ocorrer se a empresa optar por continuar a utilizar parafusos, em vez dos rebites roscados propostos na otimização.

#### 4.2.2 Proposta 2 – Mudança de Material

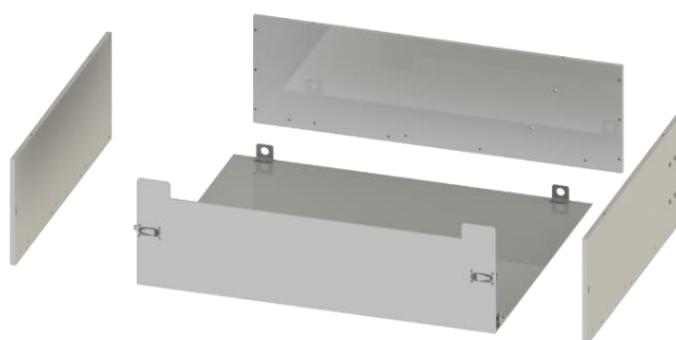
Após o estudo da primeira proposta de mudança da base surgiu outra hipótese, que seria alterar o tipo de material, ou seja, alterar o metal por um polímero. Dadas as características dos polímeros, é necessário que além do cumprimento dos requisitos inicialmente expostos se tenha em conta se haverá ou não deterioração das propriedades do material durante a realização do teste no circuito. Esta possível alteração também irá alterar o requisito inicial referente à tensão equivalente de Von-Mises, uma vez que o valor que se encontra na tabela X, foi escolhido tendo em conta a tensão de cedência do alumínio.

Dentro da categoria dos polímeros existem vários materiais que podiam ser escolhidos para o estudo em questão, mas verificou-se que o policarbonato compacto pode apresentar-se como uma boa solução. O policarbonato pode ser encontrado sob diversas espessuras e formas, e oferece a possibilidade de ser quinado, algo que nem todos os materiais poliméricos oferecem. Este material possui excelentes propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, destacando-se a alta resistência ao impacto e baixa densidade e na Tabela 5 podemos verificar as suas propriedades:

*Tabela 5 Propriedades do Material*

<b>Policarbonato Compacto</b>	
Densidade	1200 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	$2,69 \times 10^9$ Pa
Coefficiente de Poisson	0,39
Tensão de Cedência	60 Mpa

Assim, na Figura 42, podemos observar outra hipótese de otimização da base. Com a utilização deste material toda a geometria e design da base seria mantida, mesmo a tampa iria manter-se a ser quinada.



*Figura 42 Base em Policarbonato*

A solução apresentada possui as dimensões iguais à base original, mantendo-se a espessura das placas com 6 mm, de modo a que se continue a utilizar parafusos M3, parafusos estes que são mais usuais no mercado. Relativamente à alteração do peso desta estrutura, comparativamente ao que atualmente existe, consegue-se uma redução bastante significativa, existindo uma diminuição da massa de 4 kg para 1,6 kg. A nível da montagem não existiriam alterações.

#### *4.2.2.1 Simulação Numérica – Base em Policarbonato*

Mais uma vez, para se verificar o comportamento da proposta em estudo recorreu-se ao Ansys Workbench onde foram feitos estudos a nível de tensões e deformações. Os resultados obtidos podem ser observados nas figuras seguintes:

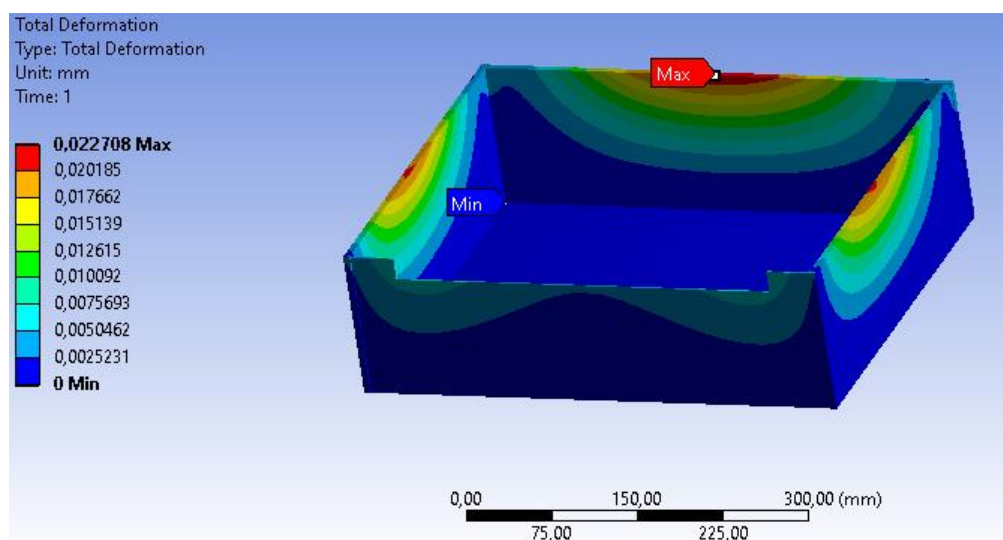


Figura 43 Deslocamentos - Base Policarbonato

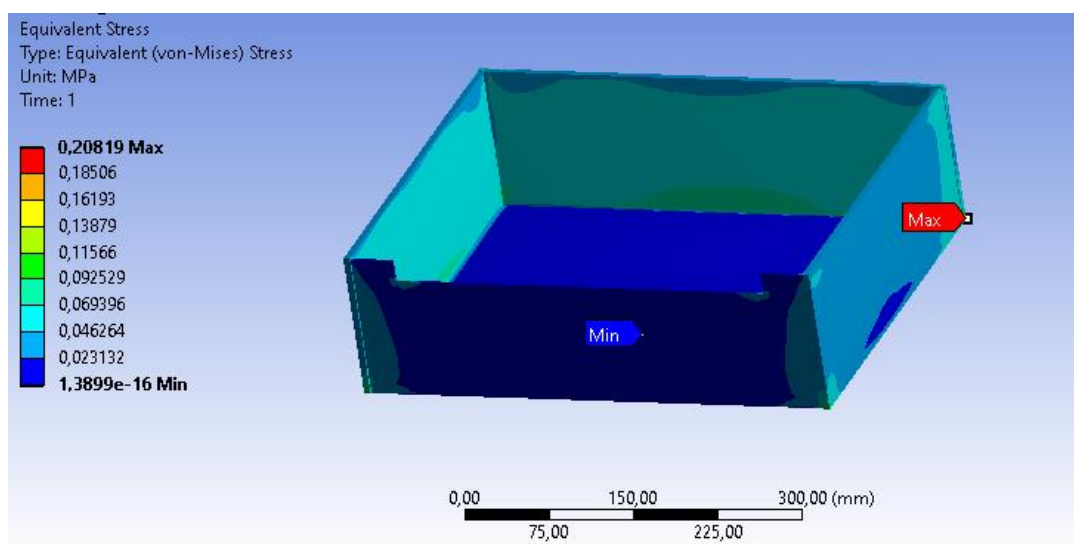


Figura 44 Tensões Equivalentes - Base Policarbonato

Analisando a Figura 43 podemos verificar que apesar de estarmos a utilizar uma família de materiais diferentes do que atualmente é utilizado, os deslocamentos são bastante reduzidos para as condições a que base está sujeita. Mais uma vez, os deslocamentos totais do componente não chegam a 1 mm e, por isso, relativamente a este parâmetro o componente mostra-se viável.

A tensão de cedência do policarbonato compacto situa-se nos 60 Mpa, e observando a Figura 44, verificamos que o valor máximo da tensão na base de policarbonato será de 0,20 Mpa, valor esse que se encontra muito distante do valor

máximo de cedência, concluindo-se novamente que a base do adaptador de teste praticamente não sofre qualquer tipo de tensões.

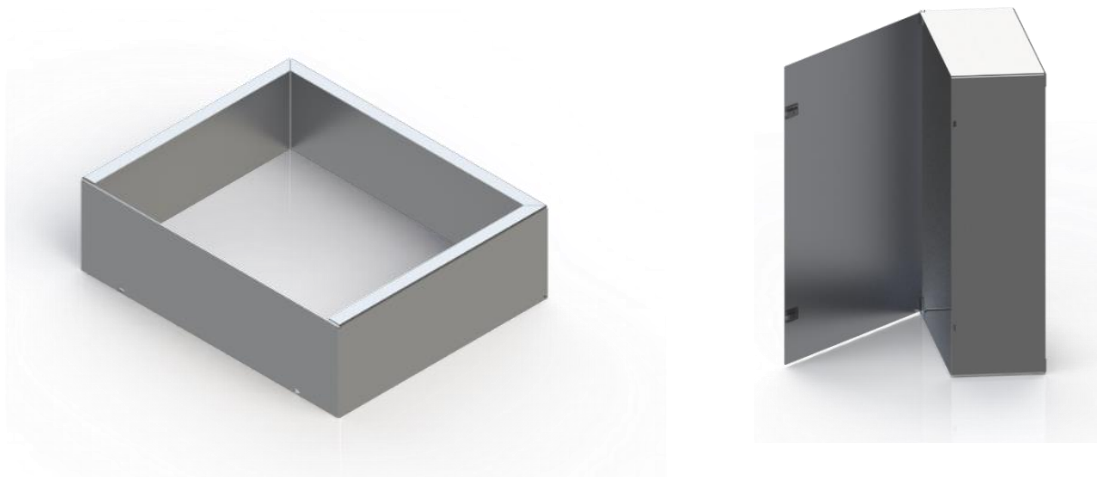
#### 4.2.2.2 Processo de Fabrico

Para se obter a base em policarbonato é necessário que inicialmente se compre placas deste material e que se proceda ao corte das mesmas, com as dimensões pretendidas. Será necessário o corte de 4 placas: placas laterais, placa traseira e placa para a tampa.

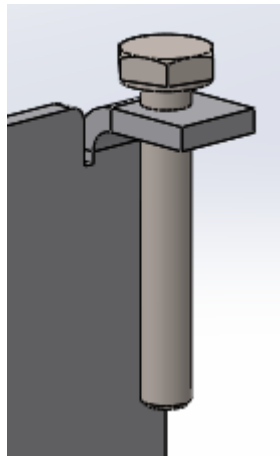
Após o corte das placas existem três destas onde apenas será necessário realizar furação e roscagem. A furação e a roscagem é feita de igual forma à que anteriormente foi apresentada. Depois, para a tampa em policarbonato é necessário proceder-se à quinagem do mesmo. Como é um material polimérico é necessário que se tenham alguns cuidados adicionais para que não se quebre o material. Para se obter peças moldadas em policarbonato com elevada qualidade é necessário que se aqueça o material de forma uniforme, e após o aquecimento procede-se à dobragem considerando as dimensões e ângulos pretendidos.

#### 4.2.3 Proposta 3 – Chapa quadrada com base rotativa

A última proposta de otimização para o componente que tem vindo a ser apresentado trata-se novamente de uma chapa, mas desta vez quadrada, e com a base rotativa. Nas Figura 45 e Figura 46, podemos observar a nova proposta de otimização:



No caso apresentado nas figuras anteriores, temos uma chapa com uma geometria quadrada, que será soldada num dos lados para unir as duas pontas. Esta chapa na parte superior possui três dobras, onde o papel fenólico posteriormente irá ser colocado e preso através de parafusos ou rebites. Como referido inicialmente, um dos requisitos deste componente é que a parte inferior da base do adaptador de teste seja movível. Assim, nesta proposta manteve-se a tampa mas com uma forma diferente, uma vez que neste caso a placa inferior terá uma rotação até 90°, continuando assim a existir um total acesso a todo a instrumentação que se encontra no interior da base. Esta rotação será permitida através de um encaixe previamente definido, por exemplo, um parafuso, que permite a rotação da placa (Figura 47).

*Figura 47 Encaixe que permite rotação*

A estrutura acima apresentada é constituída por uma chapa de 1,5 mm de espessura, e feita em alumínio. Relativamente ao peso da estrutura este será de aproximadamente 1,6 kg, o que representa um decréscimo significativo comparativamente aos 4 kg que se verificam atualmente. Com esta nova proposta é possível facilitar a montagem e, consequentemente, diminuir ao tempo da mesma uma vez que há uma redução no número de componentes.

#### *4.2.3.1 Simulação Numérica - Chapa quadrada com base rotativa*

Mais uma vez realizaram-se testes recorrendo ao software Ansys, e as conclusões foram muito semelhantes às obtidas nas estruturas anteriores. A base do adaptador de teste é um componente que sofre poucos esforços e, por esse motivo, as tensões e

deslocamento obtidos são bastante reduzidos. Nas figuras seguintes é possível observar o gráfico dos deslocamentos e tensões:

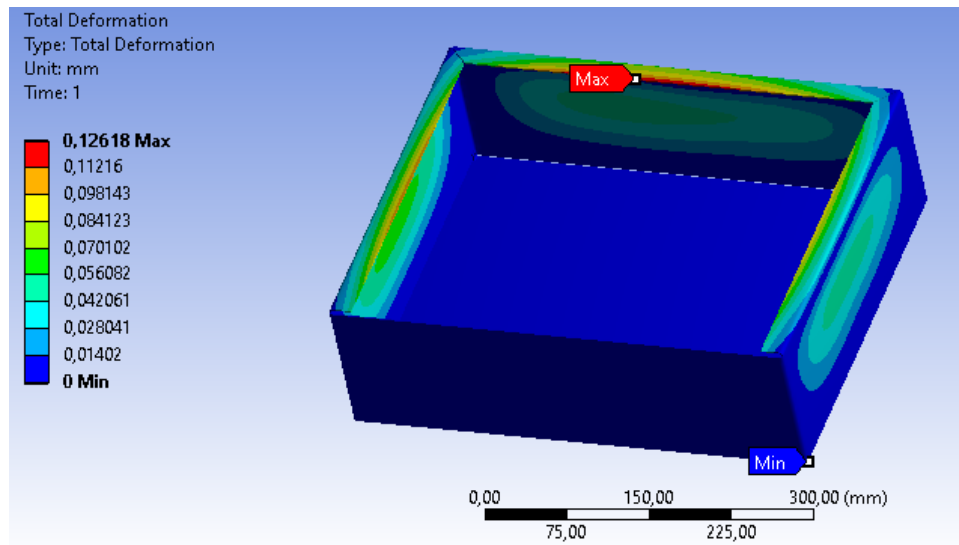


Figura 48 Deslocamentos - Chapa Quadrada

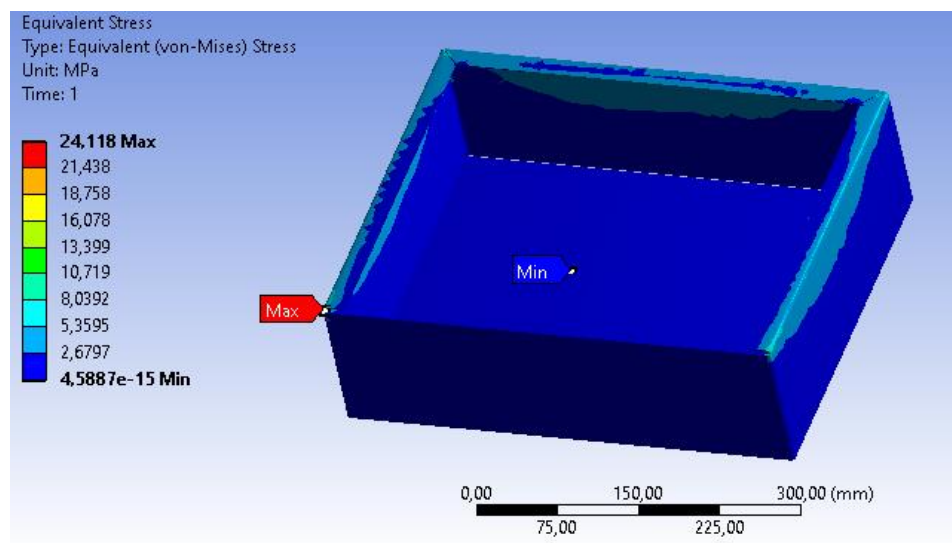


Figura 49 Tensões - Chapa Quadrada

Novamente podemos observar pela Figura 48, que o deslocamento máximo que a estrutura sofre não chega 1 mm, e este valor máximo ocorre nas dobras superiores da chapa onde o papel fenólico fica colocado.

Relativamente ao parâmetro das tensões, é possível observar na Figura 49, que a tensão máxima que a chapa irá sofrer ronda os 24 Mpa, valor este que ocorrerá apenas nos vértices. Apesar disso, o valor máximo da tensão é muito reduzido quando comparado com a tensão de cedência do alumínio, 280 Mpa. Assim, mais uma vez, verifica-se que



não irá existir uma deformação plástica, caso esta proposta seja definida para a base do adaptador de teste.

#### 4.2.3.2 Processo de Fabrico

Relativamente ao processo de fabrico desta proposta de otimização é muito semelhante ao processo descrito na proposta de otimização 1. Como se trata mais uma vez de uma chapa dobrada, o processo que terá de ser utilizado para obtenção do componente é a quinagem. A diferença entre a proposta 1 e esta proposta, é que neste caso existe mais uma dobra, uma vez que a chapa é quadrada e não em “U”. Depois da quinagem na chapa principal, tem-se a quinagem na zona dos encaixes e, posterior furação para colocação dos rebites roscados.

#### 4.2.4 Análise das Propostas – Base do Adaptador

Após a análise das várias propostas de alteração, é possível concluir que a base de alumínio que atualmente é utilizada está bastante sobredimensionada, uma vez que através das simulações numéricas realizadas conseguimos verificar que praticamente não existem deformações nem tensões elevadas. Assim, é possível ter a certeza que este componente pode ser otimizado de forma a que se consiga concretizar o objetivo principal, ou seja, a redução do peso. Através da Tabela 6 é possível analisar os diferentes resultados para cada uma das propostas.

*Tabela 6 Comparação de Resultados*

	Resultados		
	Tensões Equivalentes de Von-Mises (Mpa)	Deslocamentos (mm)	Massa (kg)
Base Atual	0,18	0,0008	4
Proposta 1 (Chapa em "U")	38,62	0,11	1,8
Proposta 2 (Chapa quadrada)	24,11	0,12	1,5
Proposta 3 (Policarbonato)	0,20	0,022	1,6

Depois de apresentadas e analisadas várias propostas para este componente, verifica-se que todas podem ser utilizadas uma vez que se mostram a nível do comportamento mecânico aprovadas. Apesar das propostas estarem aprovadas quando ao comportamento mecânico, é também necessário avaliar outros parâmetros, por

exemplo, custo, facilidade de realizar furações, maior credibilidade perante o cliente, entre outras.

Nos subcapítulos do processo de fabrico foram explicados os prós e contras de cada proposta e, por esse motivo, provavelmente a hipótese de otimização onde se recorre a uma alteração do material poderá não ser a mais viável, uma vez que esta proposta poderá causar constrangimentos na altura de realizar furos. Além disso, esta proposta representa um maior custo no fabrico do adaptador de teste. Em relação às propostas 1 e 2, a proposta 1 é valorizada uma vez que mantém a tampa exatamente igual ao que existe atualmente, fator este que é valorizado tanto pela empresa como pelos clientes, que preferem não alterar em demasia este componente.

Assim, a solução que representa uma maior fiabilidade e qualidade para a nova base do adaptador é a proposta 1, onde se tem uma chapa em forma de “U”.

### **4.3 Conjunto Casquilho/Espigão**

Um dos sistemas com maior importância para o adaptador de teste, e que é um dos responsáveis pelo sucesso, ou não, do teste no circuito, é o sistema de guiamento da parte superior até à parte inferior do adaptador (Figura 50). Cada adaptador de teste possui dois conjuntos destes sistemas o que representa um peso total de 660 g e cada conjunto faz em média 300000 ciclos.



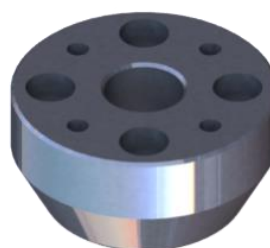
*Figura 50 Conjunto responsável pelo guiamento*

Este conjunto é constituído pelo casquilho e espigão que são colocados na placa superior e na placa inferior encontra-se uma chumaceira, um rolamento de esferas linear e, por fim, uma tampa que é colocada na parte inferior da chumaceira.

O casquilho e espigão são componentes essenciais no adaptador de teste uma vez que têm como função o correto guiamento da parte superior até à parte inferior do adaptador. É muito importante que o espigão seja resistente de forma a evitar empenos, uma vez que se o mesmo não estiver no correto alinhamento todo o teste ao PCB pode ficar comprometido, pois as agulhas de teste não irão contactar com o local inicialmente definido para controlo. Atualmente o espigão utilizado pela Controlar (Figura 51), possui 10 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro, e pesa 90 g. Este componente é feito em aço inoxidável (AISI 304), e o aço é temperado de forma a aumentar a resistência e dureza do material. Através deste tratamento térmico consegue-se que o espigão sofra menos desgaste, tornando-se assim mais durável, fatores muito importantes uma vez que se trata de um componente de guiamento que por vezes, em caso de empeno, pode embater na chumaceira e sofrer maior desgaste. Este componente é colocado à pressão na placa intermédia de calcadores. Relativamente ao casquilho (Figura 52), este componente tem como função ajudar a manter a posição do espigão e encontra-se aparafusado à placa intermédia de calcadores, e possui 40 mm de diâmetro. A nível de material é também produzido em aço inoxidável, e tem de peso 144 g.



*Figura 51 Espigão - AISI 304*



*Figura 52 Casquilho - AISI 304*

Como referido anteriormente na parte inferior do adaptador, mais precisamente na placa de agulhas inferior, encontra-se a chumaceira que tem no seu interior o rolamento de esferas linear e, por fim, a tampa que segura o rolamento (Figura 53).



*Figura 53 Chumaceira, rolamento e tampa*

A chumaceira possui uma forma cónica relacionada com a entrada do espigão, desta forma facilita e ajuda o correto alinhamento das placas. Este componente é feito em alumínio e possui acabamento com jato de microesferas de vidro, que permite a eliminação de rebarbas das peças, sem que haja alterações dimensionais no componente. O rolamento de esferas linear é utilizado para garantir uma diminuição do atrito, facilitando assim a passagem do espigão, quando este está a realizar o movimento ascendente e descente da parte superior do adaptador de teste. Por fim, o último componente que faz parte deste sistema é a tampa que fica colocada debaixo da chumaceira e que tem como principal função segurar o rolamento, e para manutenção do mesmo (Figura 54). Este componente é produzido em alumínio e é também sujeito a um acabamento de microesferas de vidro.



Figura 54 Vista inferior chumaceira - Tampa

Atualmente a montagem do casquilho e do espigão na placa de papel fenólico não é a mais correta, uma vez que o espigão é colocado à pressão na placa recorrendo a um martelo de nylon. O correto posicionamento do espigão é feito recorrendo a uma técnica de tentativa/erro, através de parafusos de cabeça cilíndrica que são colocados na parte superior do casquilho (Figura 55). Estes parafusos são colocados em quatro posições do casquilho, e o operador coloca-os mais ou menos no interior do furo, conforme seja necessário. Várias vezes existe a necessidade de montar e desmontar os componentes até que se consiga o alinhamento mais correto, perdendo-se assim tempo na montagem.

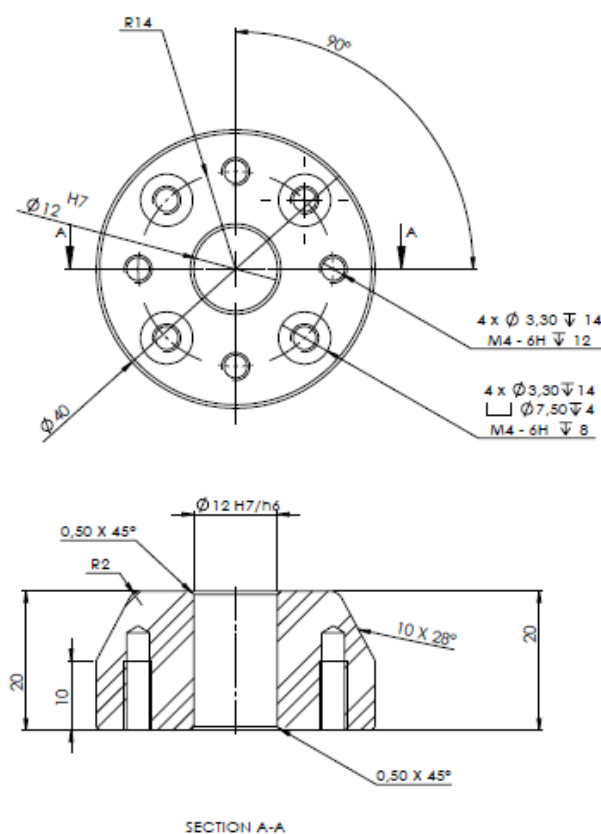


Figura 55 Casquilho Original

O conjunto de componentes que tem vindo a ser apresentado é bastante importante na totalidade do adaptador de teste. Assim, é importante o estudo dos componentes, e também a procura de possíveis otimizações, para que seja possível verificar se estes componentes têm as dimensões corretas para os esforços a que estão submetidos. Para tal é necessário ter em consideração os requisitos do espigão e do casquilho, que serão apresentados na Tabela 7.

*Tabela 7 Requisitos do espigão e casquilho*

Requisitos	
Dimensional Comprimento do espigão	100 mm
Deslocamento	<2 mm
Material	Aço inoxidável
Funcional	Conseguir correto alinhamento do espigão; Manter ou arranjar novo método que permita alinhar o espigão

Relativamente ao requisito dimensional, relacionado com o comprimento do espigão, este foi previamente definido pela empresa uma vez que anteriormente já tinham sido realizados testes e definido que para o espigão cumprir devidamente a sua função o comprimento tinha de ser de 10 cm. Em relação ao material é requisito manter o aço inoxidável para o espigão e casquilho, sendo que o espigão tem sempre de ser temperado para assim possuir melhores propriedades mecânicas. O aço inoxidável além da sua elevada resistência, tem também elevada resistência à corrosão e, por esse motivo, apesar de ter um custo superior a outros tipos de aços, é preferencialmente utilizado para estes componentes. Por fim, a nível funcional é essencial que qualquer alteração que seja feita, consiga manter o correto alinhamento do espigão, e preferencialmente pretende-se alterar o método utilizado atualmente uma vez que é pouco prático.

#### 4.3.1 Simulação Numérica – Espigão/Casquilho Atual

Quando a parte superior do adaptador de teste está no handler, é colocada num suporte próprio e, por isso, o adaptador acaba por não ter de suportar diretamente o esforço que a máquina faz sobre o adaptador ( $\approx 3000\text{N}$ ). Por este motivo, para este componente foi realizado um estudo diferente do que foi anteriormente apresentado para a base do adaptador. Neste caso, optou-se por verificar qual é a força máxima horizontal que o atual espigão suporta sem que o mesmo se deforme permanentemente, e para tal colocou-se forças com valores diferentes, até se chegar perto do valor máximo da tensão

limite de elasticidade, ou seja, o valor a partir do qual o material se deformará plasticamente.

Este estudo é importante uma vez que o eixo do espigão ao ser colocado entre o papel fenólico e o casquilho pode não se encontrar corretamente alinhado com o eixo do furo do casquilho, e isso fará com que o componente aquando da descida da parte superior do adaptador embata na lateral da chumaceira, o que causará um esforço no mesmo, como é possível observar na Figura 56.



*Figura 56 Exemplo de espigão mal alinhado*

Mais uma vez, antes de se iniciar a simulação é bastante importante definir as propriedades de todos os materiais para que assim se consiga os resultados mais fidedignos possíveis.



Tabela 8 Propriedades dos Materiais

	Aço Inoxidável 304	Papel Fenólico
Densidade	8000 kg/m <sup>3</sup>	1350 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	1,9 x 10 <sup>11</sup> Pa	7,44 x 10 <sup>9</sup> Pa
Coefficiente de Poisson	0,29	0,35
Tensão de Cedência	206 Mpa	120 Mpa

Assim para a análise destes componentes, através da simulação numérica no Ansys Workbench, foi colocado um encastramento nas paredes laterais do papel fenólico, força gravítica e uma força horizontal colocada na ponta do espigão (Figura 57).

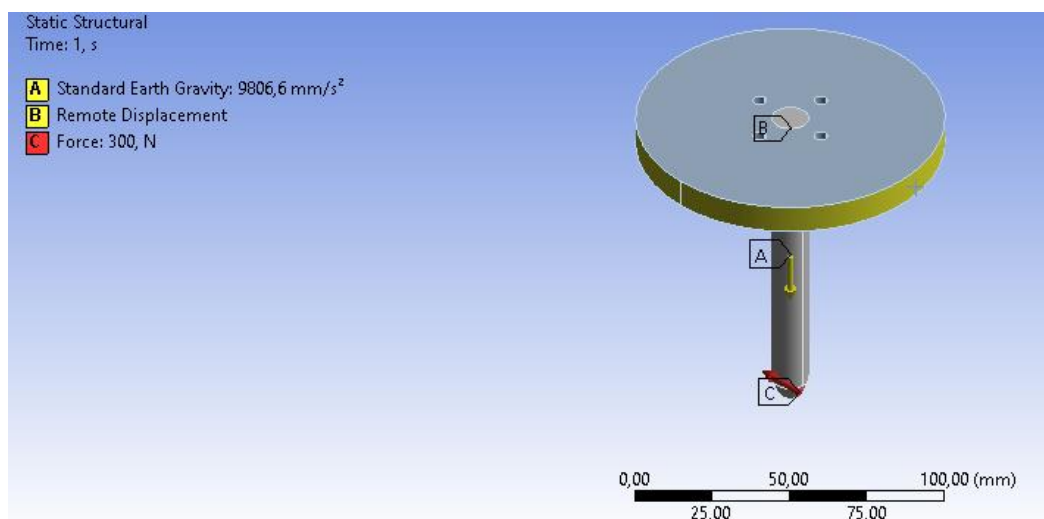
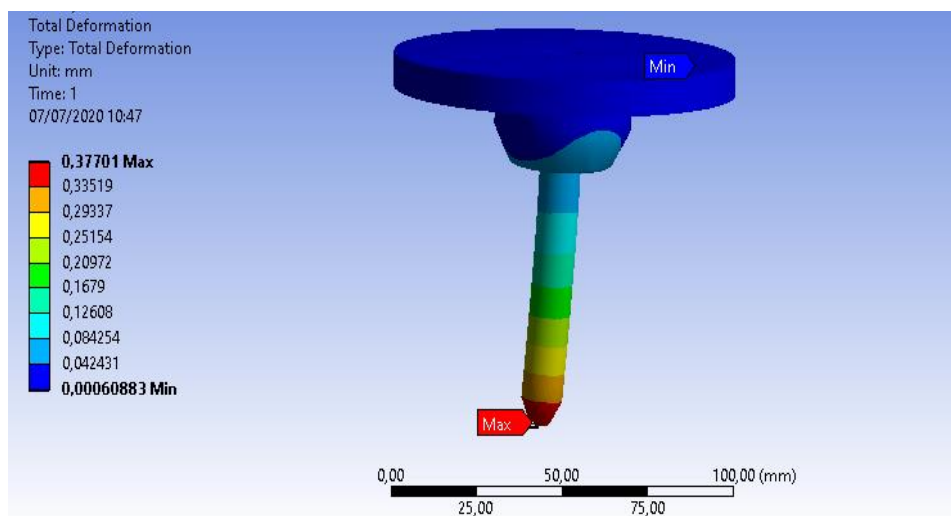


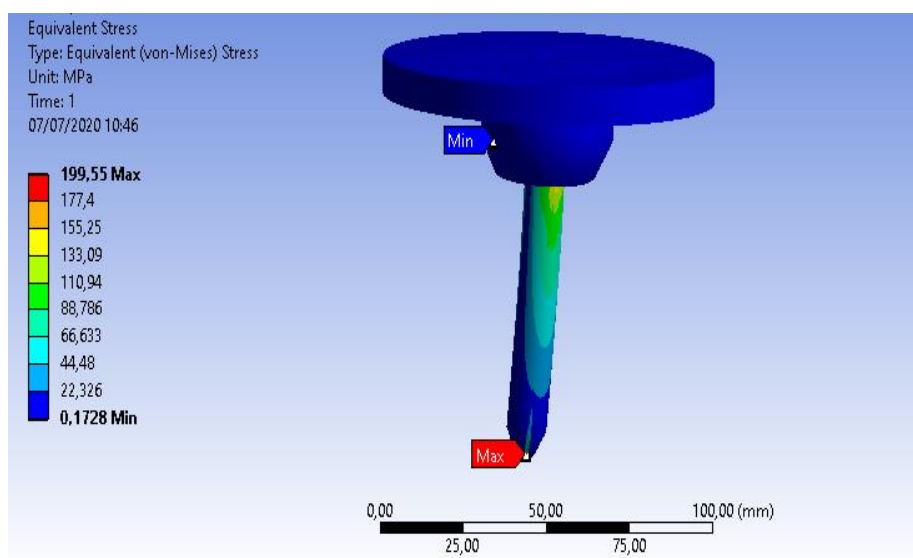
Figura 57 Apoios e esforços considerados

A força horizontal foi aumentada gradualmente, de forma a conseguir-se verificar qual o limite máximo que o espigão suporta, sem apresentar deformação plástica. Após a realização de vários testes através do Ansys foi possível concluir que atualmente o espigão consegue suportar uma força máxima de aproximadamente 300N, sem que se deforme permanentemente. Esta força é bastante considerável e excessiva, uma vez que este componente nunca sofre uma força com um valor tão elevado. De qualquer forma, esta simulação servirá como comparação para todas as propostas de otimização que serão apresentadas.

Após a definição das propriedades do papel fenólico e do aço inoxidável, e depois de colocado o apoio existente no sistema assim como os esforços, obtiveram-se os gráficos dos deslocamentos e tensões equivalentes.



*Figura 58 Deslocamentos – Sistema Atual*



*Figura 59 Tensões Equivalentes - Sistema Atual*

Depois de realizadas as simulações numéricas para o conjunto do espigão e casquilho, é possível verificar que estes componentes são bastante resistentes, apesar de estarem sujeitos a uma força com elevado valor. O deslocamento máximo para uma força de 300 N é de 0,37 mm (Figura 58), valor considerável, uma vez que o espigão é um componente responsável pelo alinhamento, tendo em conta que a força que está a ser aplicada é bastante superior ao que existe realmente, podemos concluir que o espigão pode ser alvo de otimização, de forma a reduzir a sua massa. Relativamente às tensões,

podemos verificar pela Figura 59, que a tensão máxima ocorre no espigão, e apresenta o valor máximo de 199 Mpa. Este valor já se encontra perto da tensão de cedência do aço inoxidável, 206 Mpa. Os valores obtidos nas simulações anteriores servirão de comparação para as propostas de otimização que serão de seguida apresentadas.

## **4.4 Propostas de Otimização – Conjunto Casquilho/Espigão**

Neste subcapítulo serão apresentadas várias propostas de otimização para o sistema de componentes que tem vindo a ser apresentado, de salientar que no Anexo A se encontram disponíveis os desenhos técnicos das mesmas.

### **4.4.1 Proposta 1 – Peça Única**

A primeira proposta de otimização para os componentes designados por casquilho e espigão consiste em tornar estes dois componentes num apenas. Neste caso teríamos uma peça única obtida através de torneamento, o que tornaria mais fácil a montagem, uma vez que seria apenas necessário encaixar o componente, e aparafusar nos furos previamente feitos no casquilho. Relativamente ao material utilizado, este seria o mesmo que atualmente é usado, aço inoxidável. Além da alteração anteriormente referida, surgem nesta proposta também duas hipóteses de melhoria, a primeira relacionada com a forma como se faz o alinhamento, e a segunda com a tampa que segura o rolamento.

Como referido anteriormente, o alinhamento deste sistema de guiamento é feito de uma forma pouco prática e pouco convencional, pois recorre-se a técnicas de tentativa/erro com os parafusos de cabeça cilíndrica. Assim, como forma de otimizar este processo surgiu a ideia de se substituir os parafusos por pernos roscados com oco hexagonal (ISO 4026), componentes estes normalizados e com um custo reduzido. Os pernos roscados seriam utilizados de forma diferente dos parafusos uma vez que iriam entrar por baixo do casquilho e embater no papel fenólico, sendo depois rodados conforme o necessário para assim alinhar corretamente o espigão.

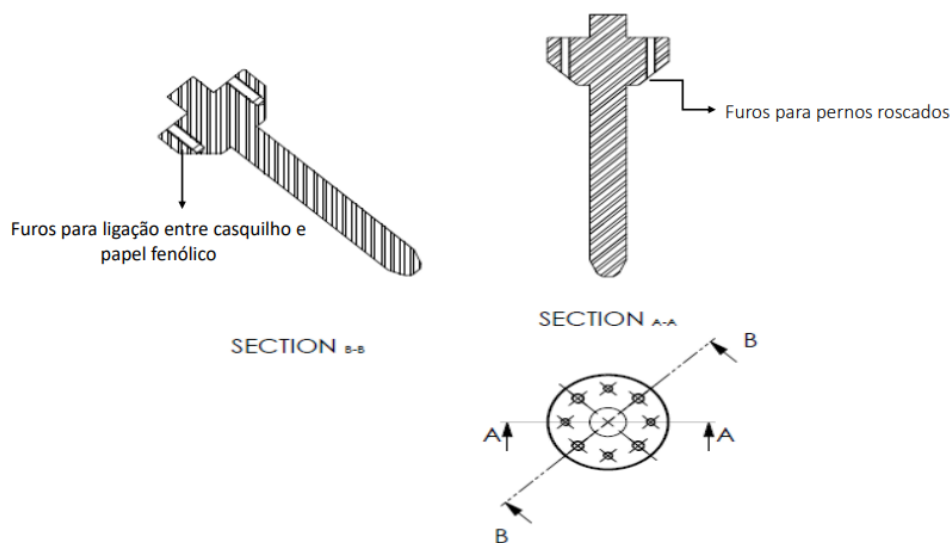


Figura 60 Peça Única

A segunda proposta de melhoria que foi estudada é a substituição da tampa que se encontra por baixo do rolamento, por um freio (Figura 61). Este freio será alojado na parte inferior da chumaceira, numa ranhura interior que o componente terá, e facilitará a montagem uma vez que apenas será necessário um alicate para colocar e retirar, em caso de manutenção, o freio. Apesar de a tampa que é utilizada ter uma massa consideravelmente pequena, esta mudança acaba por também ajudar no objetivo de redução de peso.



Figura 61 Vista inferior chumaceira - Freio

É de salientar que estas últimas duas propostas podem ser utilizadas mesmo que se continue a utilizar o casquilho e o espigão como peças individuais, uma vez que são alterações fáceis de aplicar e que trarão vantagens ao adaptador de teste.

#### 4.4.1.1 Simulação Numérica – Peça Única

Após o estudo da proposta de otimização é importante verificar se a estrutura tem um bom comportamento mecânico. Para isso, é essencial que mais uma vez se repitam os testes para verificar qual o deslocamento e tensão máxima que irá ocorrer. A realização dos testes, através do Workbench, são bastante importantes uma vez que são a única forma de se conseguir prever o comportamento da estrutura. Para que seja possível comparar os resultados, a força utilizada neste teste foi novamente de 300 N, e novamente colocada horizontalmente na extremidade do espigão. Após o refinamento da malha, obtiveram-se os seguintes resultados:

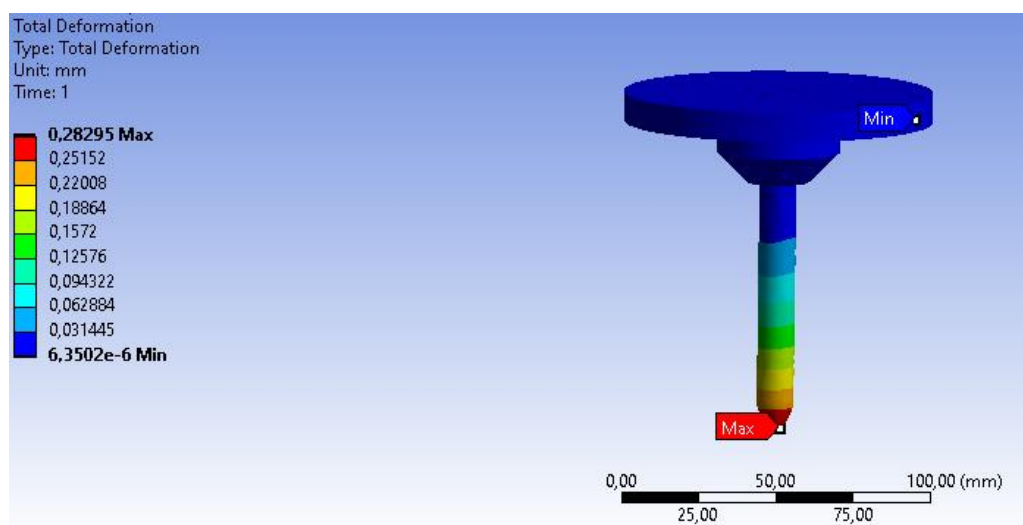


Figura 62 Deslocamentos - Peça Única

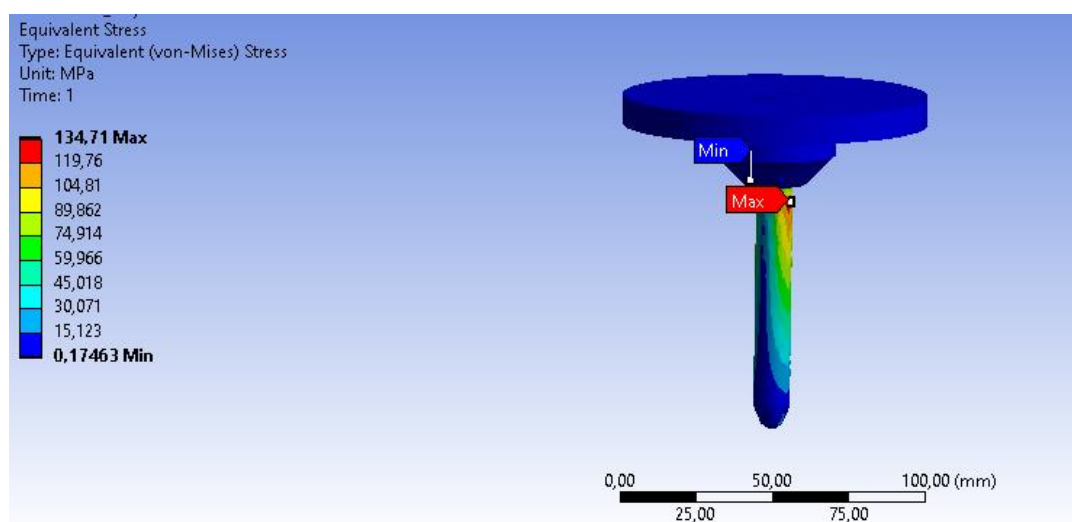


Figura 63 Tensões Equivalentes - Peça Única

Pela análise da Figura 62 e Figura 63 podemos confirmar que o comportamento desta nova proposta é muito semelhante ao que temos atualmente. Na imagem Figura 62, onde podemos observar os deslocamentos que ocorrem nesta simulação, verificamos que tanto o deslocamento máximo como o deslocamento mínimo ocorrem no mesmo local que na estrutura utilizada atualmente. Este facto ajuda a comprovar que a simulação se encontra a ser bem realizada. Através da figura Figura 63 é possível verificar que esta nova proposta de estrutura consegue suportar forças maiores, uma vez que para a mesma força de 300 N, tanto os deslocamentos como as tensões diminuem. O facto destes valores diminuírem é um aspeto vantajoso para esta proposta de otimização, uma vez que em caso de queda ou em caso de incorreto alinhamento, o espigão irá suportar uma força consideravelmente grande ao embater na chumaceira. Mais uma vez, a tensão máxima não ultrapassa a tensão máxima de cedência, não existindo assim a possibilidade dos componentes se deformarem plasticamente.

#### *4.4.1.2 Processo de fabrico*

Relativamente ao processo de fabrico do espigão e casquilho, como peça única, o processo mais indicado é o torneamento. De forma, a se conseguir uma peça com maior qualidade, e com menor probabilidade de erro, é aconselhável que o torneamento seja feito recorrendo a um torno de comando numérico. O torneamento permite a obtenção de peças de revolução, possibilitando a obtenção de peças com diferentes tipos de superfícies, por exemplo, cónicas. Neste processo a peça a ser maquinada roda em torno de um eixo, e quando a ferramenta entra em contacto com a peça, provoca o arranque de material, obtendo-se assim, o perfil desejado [27]. O furo passante que a zona do casquilho tem no centro pode e deve ser feito ainda no torno, para que assim se garanta a concentricidade do furo.

A restante furação destes componentes deve ser feita através de uma furadora de bancada, uma vez que se tratam de furos normais com rosqueamento.

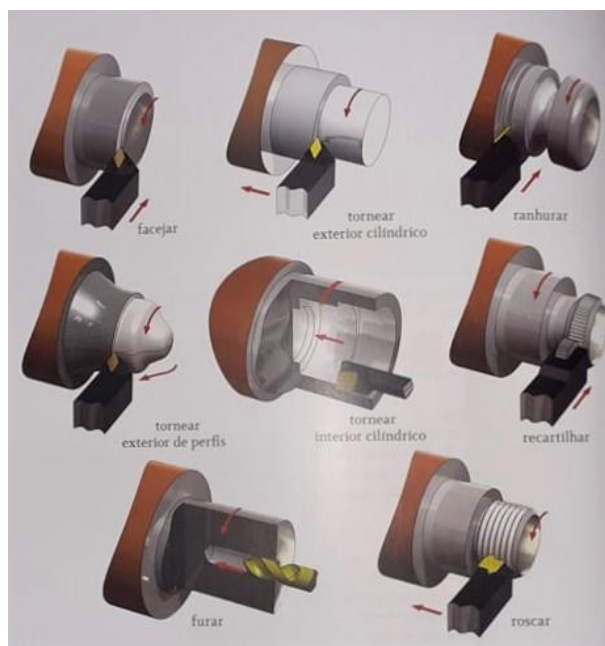


Figura 64 Etapas do processo de torneamento

#### 4.4.2 Proposta de Otimização 2 – Tubo Calibrado

A segunda proposta de otimização que surgiu é um pouco diferente do que atualmente existe, uma vez que a ideia será utilizar um tubo calibrado ao metro, estrutura esta que facilmente se encontra no mercado. Na Figura 65 é possível observar a proposta.

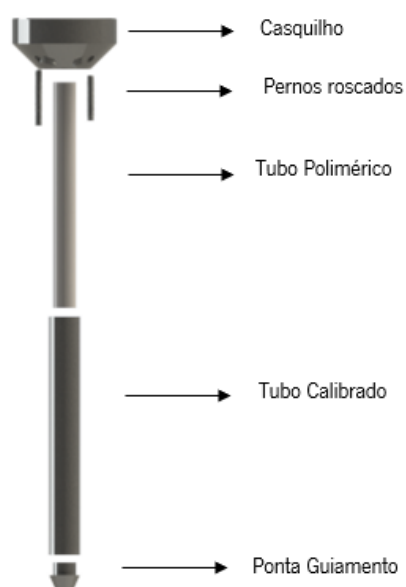


Figura 65 Proposta de Otimização 2 – Tubo

Nesta proposta de otimização o casquilho mantém-se com as dimensões atuais, 40 mm de diâmetro exterior e um furo passante de 12 mm onde estará o espigão. O espigão

será contruído de forma diferente, uma vez que é dividido em duas partes, no exterior um tubo calibrado em aço inoxidável (Figura 66) e no interior deste tubo um varão polimérico, em POM (Polióxido de Metileno).



*Figura 66 Vista Isométrica - Tubo Calibrado*

A vantagem de termos o espigão constituído por dois materiais é que conseguimos garantir uma diminuição do peso deste componente, mas, sem que ocorra diminuição na qualidade das suas propriedades. Os tubos calibrados ao metro são bastante utilizados no mercado, principalmente em casos de estruturas metálicas, mas pode vir a ser uma boa solução de otimização do adaptador de teste, uma vez que seriam cumpridos os requisitos do espigão. Com a utilização do tubo calibrado consegue-se, tal como acontece atualmente, temperar este componente de forma a que a sua resistência aumente. Relativamente às dimensões do tubo este teria um diâmetro exterior de 12 mm, comprimento de 93 mm e espessura de 1,5 mm. Dentro do tubo calibrado, e de forma a dar mais consistência e estabilidade ao espigão será colocado um varão polimérico, neste caso POM, que é um material bastante utilizado no mercado e com um preço relativamente baixo. Este varão será colocado no interior do tubo em aço inoxidável recorrendo a uma prensa hidráulica, e terá de diâmetro 9 mm.

Além dos dois elementos referidos anteriormente, é ainda necessário uma ponta de guiamento que estará ligada através de encaixe ao tubo calibrado. Este componente é essencial uma vez que é imprescindível que se tenha um elemento que guie através da chumaceira. Este componente é também feito em aço inoxidável pois poderá ser alvo de grande desgaste.



Apesar do espigão atual pesar apenas 90 g, ou seja, em dois conjuntos, representa um peso total de 180 g, através desta proposta de otimização o espigão passará a ter uma massa total de 44 g.

Ao nível da parte inferior deste sistema de peças, constituído pela chumaceira e o rolamento, a única alteração sugerida, tal como na proposta de otimização 1, é a utilização de um freio de forma a segurar o rolamento linear.

#### 4.4.2.1 Simulação Numérica – Tubo Calibrado

Mais uma vez, e tendo em conta as mesmas condições das simulações anteriores, recorreu-se ao Ansys para verificar se esta proposta de otimização está ou não apta para ser utilizada no adaptador de teste. Foi necessário identificar e diferenciar em cada componente o material que o constitui, sendo que nesta simulação foram considerados três materiais diferentes: papel fenólico (placa superior), aço inoxidável 304 (tubo exterior) e POM (varão interior).

Para uma força horizontal com a intensidade de 300 N, os resultados obtidos foram os seguintes:

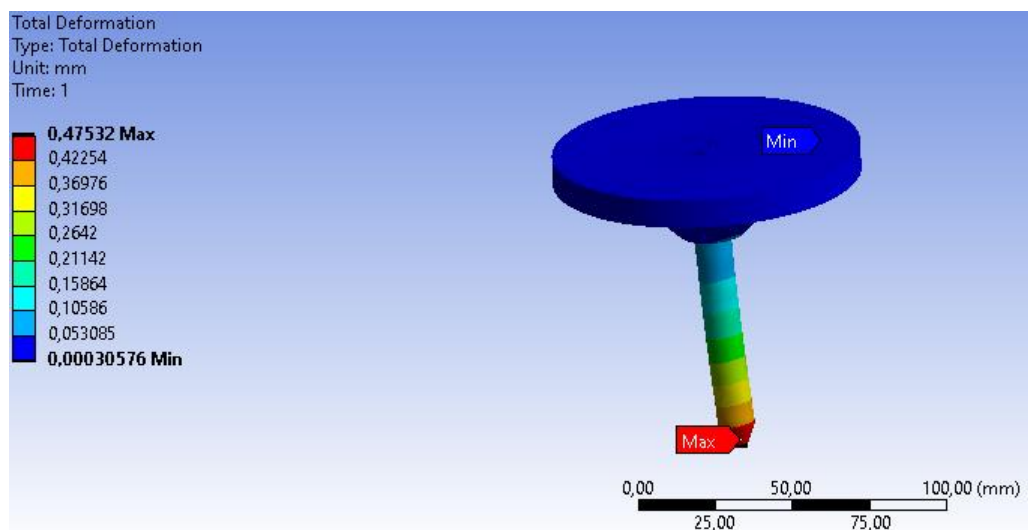


Figura 67 Deslocamentos - Tubo Calibrado

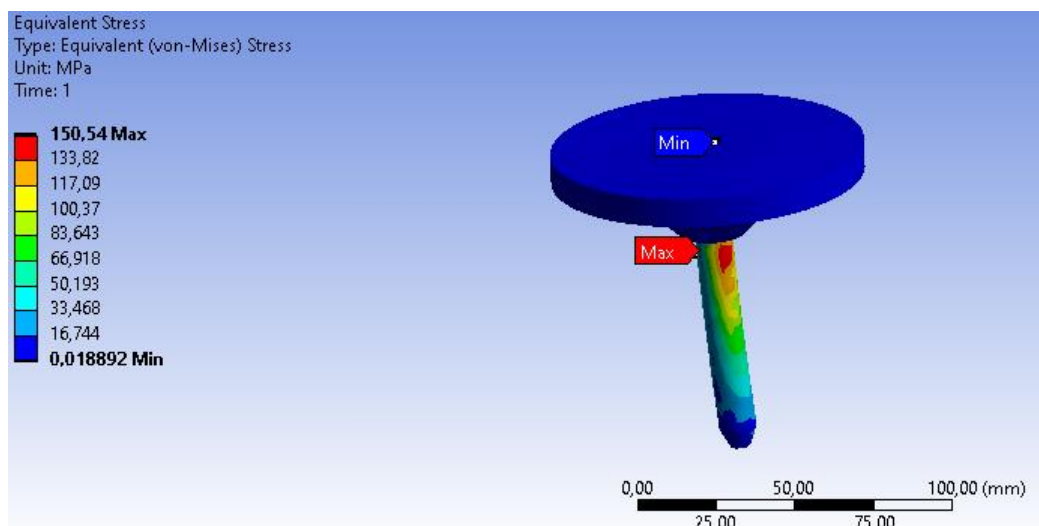


Figura 68 Tensões - Tubo Calibrado

Novamente, podemos verificar que nesta simulação o comportamento dos componentes é semelhante ao que foi apresentado nos casos anterior.

Ao nível dos deslocamentos os valores aumentaram um pouco quando comparado com as simulações anteriores, uma vez que neste caso temos um deslocamento de 0,47mm. Como o espigão é um componente de guiamento, o aumento de deslocamentos para forças de grandes intensidades pode não ser um aspeto muito favorável. De qualquer forma, não é suposto que este componente sofra forças desta dimensão, a não ser que haja descuido por parte do operador ou incorreto posicionamento dos componentes e, por isso, pode ser opção de otimização a considerar uma vez que o peso do conjunto é reduzido. Relativamente às tensões, podemos observar pela Figura 68, que diminuem consideravelmente em relação ao sistema que existe atualmente continuando assim abaixo do limite de elasticidade do aço inoxidável.

Nesta proposta a desvantagem pode estar relacionada com o custo, pois como temos mais componentes o custo também pode aumentar.

#### 4.4.2.2 Processo de Fabrico

No caso desta proposta de otimização temos o tubo calibrado ao metro, em aço inoxidável, e o varão polimérico, que são componentes que apenas é necessário comprar ao fornecedor e cortar com o comprimento pretendido. Estes componentes estão já normalizados facilitando assim o processo.

O casquilho e a ponta de guiamento são componentes obtidos através do processo de torneamento. Por fim, a furação é novamente feita recorrendo a uma furadora de bancada.

Relativamente à montagem do varão polimérico e da ponta de guiamento, esta deve ser feita com recurso a uma prensa hidráulica, uma vez que são componentes que têm de entrar à pressão.

#### 4.4.3 Análise das Propostas – Sistema Casquilho/Espigão

Na Tabela 9 será apresentada uma comparação entre as várias simulações que foram realizadas para o sistema de guiamento do adaptador de teste, de forma a ser mais fácil comparar e analisar as diferentes propostas.

*Tabela 9 Comparação de Propostas*

	Resultados		
	Tensões Equivalentes de Von-Mises (Mpa)	Deslocamentos (mm)	Massa (g)
Casquilho/ Espigão Atual	199,5	0,37	250
Proposta 1 (Peça Única)	134,7	0,28	230
Proposta 2 (Tubo calibrado)	150,5	0,47	182

Após a análise do casquilho e espigão atual concluiu-se que este sistema de peças pode ser sujeito a otimizações, principalmente para que se cumpra o objetivo de redução de peso. Verificou-se que atualmente o deslocamento do espigão é bastante reduzido, caso seja sujeito a forças elevadas, mas as tensões equivalentes ficam perto da tensão de cedência do material e, por isso, qualquer proposta de otimização deverá melhorar de forma a que não haja o risco do componente se deformar plasticamente.

As duas propostas de otimização que foram apresentadas cumprem o objetivo de redução de peso, assim como tensões e deslocamentos aceitáveis. Como o espigão na realidade não sofre nenhum carregamento cíclico, é esperado que o tempo de vida dos componentes seja o mesmo que atualmente (400000 ciclos). Ao nível do alinhamento do espigão é aconselhado que a técnica usada atualmente seja modificada, por exemplo, através da utilização de parafusos roscados que enroscam no casquilho e, ao entrar em

contacto com o papel fenólico realizam o alinhamento (Figura 65). É também aconselhado que a tampa utilizada para segurar o rolamento linear seja trocada por um freio, de forma a utilizar um componente normalizado.

Por fim, o custo e a opinião do cliente têm extrema importância na hora de mudança de componentes e, por esse motivo, só através de um protótipo funcional será possível ter a certeza qual das propostas de otimização será mais vantajosa.

## 4.5 Kit Acrílico Móvel

A estrutura que está representada na Figura 69, é o kit de acrílico móvel. Este conjunto de componentes serve como proteção do operador, sendo o principal objetivo o operador não colocar as mãos nas agulhas de teste superiores.



Figura 69 Kit Acrílico Móvel

Depois do PCB ser colocado no handler, a parte superior do adaptador de teste desce para que as agulhas de teste consigam contactar com o PCB. Ao mesmo tempo que o adaptador tem um movimento descendente, a proteção em polycarbonato tem também o mesmo movimento, sendo que a placa de polycarbonato fica suprimida para cima. Quando acaba o teste, a parte superior volta a subir, e a placa de polycarbonato desce, de modo a que o operador enquanto substitui o PCB, não toque com as mãos nas agulhas superiores. Este sistema de componentes é essencial para que se evitem os acidentes. O kit de acrílico móvel é constituído por diversas peças e materiais.

O polycarbonato frontal, ou acrílico, é o componente responsável pela proteção do operador. A placa de polycarbonato tem 4 mm de espessura e um peso total de 110 g. Esta placa de polycarbonato tem propriedades particulares, uma vez que é um material dissipativo, que controla a eletricidade estática (ESD). Além disso, este material tem uma

boa resistência aos choques, impede descargas electrostáticas e é transparente, motivo pelo qual é muito utilizado na proteção de máquinas. A chapa frontal, é feita em aço com baixo teor de carbono (1.0330 DCI) e é colocada entre a placa superior e a placa intermédia de calcadores, ambas em papel fenólico, através de parafusos. Este componente pesa 338 g e tem como função suportar os componentes que constituem o kit de acrílico. Dentro dessa chapa são colocadas as guias e os suportes das mesmas (Figura 70), para que exista assim movimento ascendente e descendente do policarbonato. As guias são feitas em aço inoxidável e os suportes em POM, polióxido de metileno, e ambas são compradas diretamente ao fornecedor. Neste conjunto de componentes existem duas guias e dois suportes uma vez que é necessário que o acrílico esteja ligado aos dois lados da chapa de aço, e representa um peso total de 120 g.



*Figura 70 Guias e Suportes*

Por fim, o último componente deste sistema de peças é o balastro, feito em papel fenólico (Figura 69), está unido ao policarbonato através de parafusos e funciona como contrapeso do mesmo, de forma a facilitar a descida do acrílico. Este componente pesa 90g.

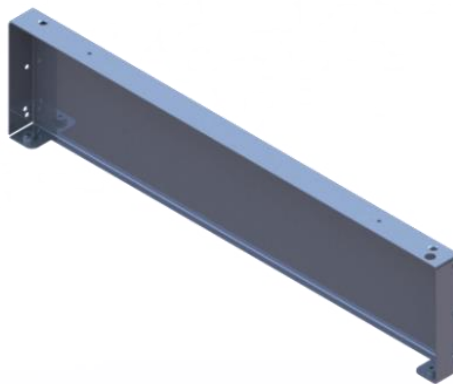
Assim, podemos concluir que o peso total do kit que tem vindo a ser apresentado é de aproximadamente 1 kg, peso ainda considerável, visto ser um sistema de peças que apenas serve para proteção e, por esse motivo, merece ser alvo de estudo, numa tentativa de redução do número de componentes e peso.

#### 4.5.1 Proposta de Otimização 1 – Mudança material

Em qualquer equipamento ou componente, é essencial que se utilizem materiais de qualidade. Ao efetuar-se a escolha de um material é sempre necessário ter em conta

características como a densidade (relacionada com a massa final dos produtos), resistência, qualidade e durabilidade e custo.

A chapa de aço, Figura 71, que pertence ao conjunto de acrílico móvel ainda representa algum peso no sistema. O aço utilizado neste componente é um aço com baixo teor de carbono, com densidade de aproximadamente  $7000 \text{ kg/m}^3$ , e é um aço que é utilizado em chapas que não têm requisitos muito exigentes, ou seja, é um aço de uso geral [27].



*Figura 71 Chapa em Aço – Atual*

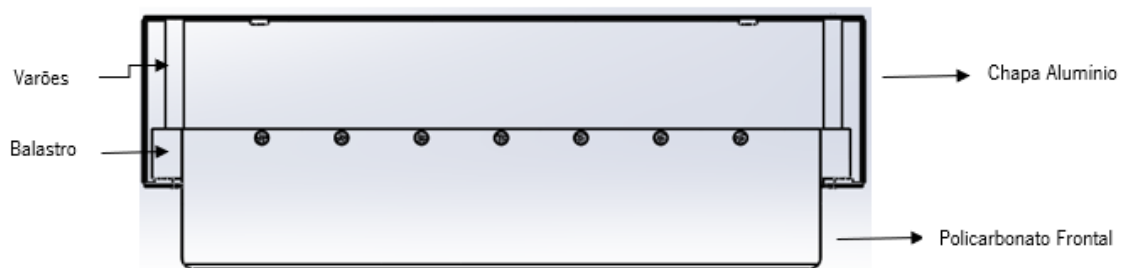
Como este componente não sofre esforços, e apenas serve para suporte da placa de acrílico e das guias é possível otimizá-lo de forma a diminuir a massa do mesmo. Para tal, foi necessário procurar dentro do grupo dos materiais metálicos qual o material mais semelhante ao aço que se adequa, e com um valor de densidade mais reduzido.

Através da análise dos materiais é possível concluir que o alumínio é um material que se ajusta perfeitamente para este componente. Ao utilizarmos uma liga de alumínio de baixa resistência conseguimos manter o aspeto exterior do componente e reduzir o peso do componente, uma vez que o alumínio é um metal leve, com densidade aproximadamente um terço da do aço. Além disso, este metal apresenta uma grande durabilidade e excelente resistência à corrosão [27]. Com esta alteração, conseguimos reduzir a massa da chapa para 130 g, ou seja, mais de metade do peso atual.

#### 4.5.2 Proposta de Otimização 2 – Redução de componentes

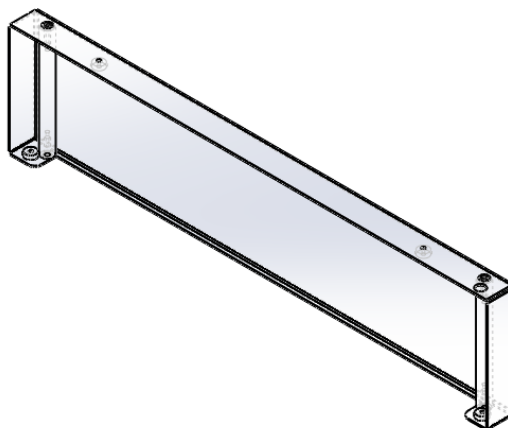
Após verificação da possibilidade de alterar a chapa em aço para alumínio começou a estudar-se a possibilidade de reduzir o número de componentes deste sistema

de peças, uma vez que ainda temos um número considerável de componentes, 7. Para tal, foi necessário verificar quais os componentes que podiam ser modificados, concluindo-se que provavelmente as guias e suportes das guias, podem ser alteradas de forma a facilitar o sistema. Surgiu assim uma nova proposta de otimização, Figura 72, com um número de componentes mais reduzido e uma menor massa.



*Figura 72 Proposta de otimização 2*

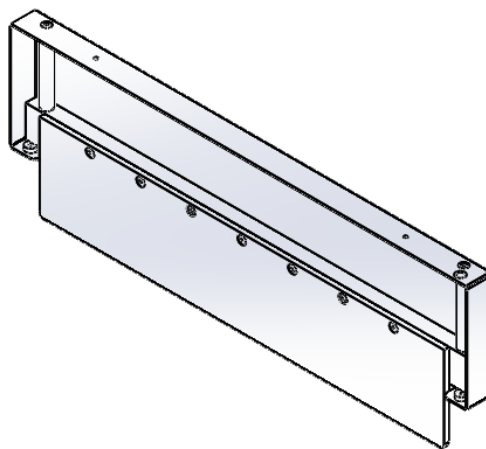
Nesta nova proposta de otimização, a principal diferença é a substituição das guias e suportes das mesmas por dois varões em aço inoxidável. Com esta alteração, será possível reduzir o número de componentes, facilitar a montagem do sistema de peças e reduzir a massa total. Os dois varões terão um diâmetro exterior de 8 mm e a escolha do aço inoxidável deve-se ao facto de serem dois componentes que vão servir para deslizamento de outro componente e, por esse motivo, irá sofrer algum desgaste. Para evitar que os varões tenham um ciclo de vida pequeno o aço inoxidável é o material mais acertado a utilizar. Além disso, estes componentes irão ter um furo roscado nas extremidades, de modo a que se consiga ligar o varão à chapa de alumínio (Figura 73).



*Figura 73 Perspetiva Isométrica - Chapa e varões*

Outra modificação efetuada nesta proposta foi a mudança de material do balastro de papel fenólico, alterando-se para ABS. Como este componente serve apenas para contrapeso do acrílico não é necessário utilizar-se o papel fenólico, pois este componente irá trazer mais peso para o sistema de peças. Assim, a proposta é trocar-se o material do balastro para um material polimérico, que irá cumprir o objetivo do componente e reduzir o custo visto o ABS ter um custo mais reduzido que o papel fenólico. Por fim, o policarbonato frontal mantém-se nas dimensões e design atuais.

Com esta alteração, o peso final deste sistema de peças é 383 g, conseguindo-se reduzir o peso atual de aproximadamente 1 kg.



*Figura 74 Perspetiva Isométrica - Kit Completo*

## **5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros**

### **5.1 Conclusões**

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível estabelecer a ponte entre o ensino universitário e o mundo empresarial, apesar de ter sido por pouco tempo, uma vez que devido à pandemia de Covid-19 a realização do estágio dentro da sede da empresa foi cancelado. O objetivo desta dissertação centrava-se na otimização de peso num dos vários adaptadores de teste que a Controlar possui, objetivo este que foi conseguido quase na sua totalidade. O estudo apresentado permitiu adquirir conhecimentos sob a forma como se desenvolve um projeto de uma máquina, desde a conceção dos componentes até à escolha apropriada de materiais. Deste modo, foi possível aplicar vários conhecimentos que foram adquiridos nas diferentes unidades curriculares do curso.



Neste trabalho começou por se analisar pormenorizadamente o adaptador de teste, que seria alvo de estudo. Após a análise de todos os componentes verificou-se quais seriam os componentes onde seria mais vantajoso realizar alterações. Realizaram-se simulações numéricas nos componentes atuais, de forma a se conseguir verificar se existiam problemas de sobre dimensionamento e, também para se analisar se os materiais que têm vindo a ser utilizados são os mais corretos. Após a análise das tensões e deformações dos componentes atuais, foi possível concluir se os mesmos eram ou não passíveis de modificações e, também se eram componentes onde podiam existir alterações, uma vez que era necessário que a Controlar aceitasse as modificações nesses componentes.

Analisando os resultados de uma forma global considera-se que os objetivos foram cumpridos, uma vez que através da adoção de algumas propostas de otimização que estão presentes neste trabalho, será possível reduzir a massa dos adaptadores de teste. No caso da base do adaptador, e dependendo da proposta de otimização escolhida pela empresa, conseguirá reduzir-se entre 55% a 62,5% o peso da base, uma vez que existirá uma redução de peso sempre acima dos 2 kg. No segundo componente estudado, o casquilho e o espigão, consegue-se novamente uma redução de peso nos componentes, sendo que na primeira proposta apresentada temos uma redução de 8% e, na segunda proposta uma redução de 27%. Além desta redução de peso, consegue-se também uma otimização a nível de montagem dos componentes e a utilização de componentes normalizados. Por fim, no caso do kit de acrílico móvel com a utilização das duas propostas de otimização em conjunto consegue-se otimizar o peso em 62%, através de uma redução significativa do número de componentes e, também através da utilização de materiais diferentes.

No projeto conceptual verificou-se que a utilização de uma ferramenta de modelação, SolidWorks, tem uma grande utilidade ao longo de todo o projeto. O software além de permitir uma visão tridimensional do modelo da máquina, permite alterações rápidas nos componentes, simulação de movimento de peças móveis e, também permite a realização dos desenhos técnicos dos componentes de uma forma muito mais rápida e eficaz.

A realização de um protótipo era uma das tarefas que constava na presente dissertação, tarefa essa que não foi possível concluir, pela impossibilidade de frequentar a empresa e a universidade, devido à pandemia que se vive atualmente. Também não foi

possível criar uma estimativa de custos, devido à dificuldade em obter o custo individual de cada componente junto do fornecedor.

A nível pessoal este trabalho permitiu conhecer uma área diferente da engenharia, que é a projeção de máquinas para controlo de PCB's, permitiu a melhoria de conhecimentos de modelação através de SolidWorks, desenhos técnicos, simulações numéricas e, também um estudo mais pormenorizado de materiais. Por fim, na presente dissertação ficou em falta uma aplicação prática e, a possibilidade de ver o adaptador de teste a funcionar na realidade.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Atualmente, e derivado de todo o rápido avanço tecnológico, é fulcral que as empresas estejam numa constante procura de evolução. Por isso, apresentam-se neste subcapítulo algumas sugestões de melhoria que a Controlar pode optar por implementar.

Em projetos futuros de adaptadores de teste sugere-se que haja uma implementação de simulações numéricas que possam validar a máquina e todos os principais componentes, uma vez que o método dos elementos finitos é bastante fiável. Com esta prática, a empresa conseguirá verificar se possui ou não componentes sobredimensionados, por exemplo.

Outra sugestão é a compra de uma prensa hidráulica para facilitar a colocação de componentes colocados à pressão. Atualmente, é prática da empresa a colocação de vários componentes com um martelo de nylon, facto que leva a vários problemas de alinhamento. A sugestão é que se verificasse a vantagem da compra deste equipamento, estudando-se, posteriormente, a percentagem problemas que se conseguiu eliminar.

Neste trabalho, um dos requisitos era que as placas de papel fenólico não fossem alteradas, pois a mudança das mesmas implicaria alterações nas furações e agulhas de teste. Uma recomendação é que estas placas pudessem ser alvo de estudo e de realização de ensaio mecânicos.



## Referências

- [1] “Controlar,” [Online]. Available: [https://www.controlar.pt/\\_quem\\_somos\\_2](https://www.controlar.pt/_quem_somos_2). [Acedido em 9 Dezembro 2019].
- [2] Controlar - Eletrónica Industrial e Sistemas, “Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico,” 2018.
- [3] Cal Houdek ; Caltronics, *Inspection and testing methods for PCBs: An Overview*, pp. 1-7.
- [4] C. Lotz, P. Collins e D. Wiatrowski, “Functional Board Test,” *Functional Board Test - Coverage Analysis*, pp. 1-2, 24 Maio 2006.
- [5] OCM Manufacturing, “Powerful Circuit Test: ICT & Flying Probe,” pp. 1-4.
- [6] F. R. Leta, F. F. Feliciano e F. P. R. Martins, “Computer Vision System for Printed Circuit Board Inspection,” pp. 1-4, 2008.
- [7] Vision Engineering, “Vision Engineering,” [Online]. Available: <https://www.visioneng.us/products/stereo-microscopes/lynx-vs8-pcb-inspection-microscope/>. [Acedido em 9 Novembro 2019].
- [8] EMSG, “EMSG - Electronic Manufacturing Services Group,” [Online]. Available: <https://emsginc.com/resources/pcb-inspection-techniques-and-technologies/>. [Acedido em 27 Novembro 2019].
- [9] R. M. C. Costa, “Controlador Boundary-Scan,” ISEP.
- [10] ALLPCB, “ALLPCB,” [Online]. Available:  
] [https://www.allpcb.com/pcba\\_inspection/fct.html](https://www.allpcb.com/pcba_inspection/fct.html). [Acedido em 9 Novembro 2019].
- [11] G. R. Blacwell, “Teaching In-Circuit Test (ICT),” *Teaching In-Circuit Test (ICT) - Techniques in Electrical Engineering Technology*, pp. 1-2.
- [12] Matric, “ICT Testing Vs Flying Probe Testing,” Agosto 2018. [Online]. Available:  
] <https://blog.matric.com/ict-testing-vs-flying-probe-testing>.
- [13] EIIT, “eiit - fixturing,” [Online]. Available:  
] <http://www.eiit.com/fixturing/?lang=en>. [Acedido em 13 Janeiro 2019].
- [14] Matric, “Matric,” 01 Agosto 2018. [Online]. Available: <https://blog.matric.com/ict-testing-vs-flying-probe-testing>. [Acedido em 18 Dezembro 2019].
- [15] Alan J. Albee, “The Evolution of ICT: PCB Technologies, Test Philosophies, and Manufacturing Business Models are Drivind In-Circuit Test Evolution and Innovation,” *The Evolution of ICT*, pp. 1-6, 2012.

- [16 B. Neal, *Design Guide: Introduction to Automated Test Fixtures*, 2019.  
]
- [17 FEINMETALL, “FEINMETALL, Test Fixtures,” [Online]. Available:  
] [https://www-ee.perel.fi/files/hierarchy/44798104/test\\_fixtures\\_2012\\_en.pdf](https://www-ee.perel.fi/files/hierarchy/44798104/test_fixtures_2012_en.pdf).  
[Acedido em 13 Janeiro 2019].
- [18 Inside Limits, “Inside Limits,” [Online]. Available:  
] <http://www.insidelimits.pt/index2.html>. [Acedido em 17 Abril 2020].
- [19 IPTE, “IPTE - About IPTE,” [Online]. Available: [https://www.ipte.com/about-](https://www.ipte.com/about-ipte/)  
] [ipte/](https://www.ipte.com/about-ipte/). [Acedido em 9 Novembro 2019].
- [20 IPTE, “IPTE,” [Online]. Available:  
] [https://www.ipte.com/fileadmin/media/Datasheets/05-](https://www.ipte.com/fileadmin/media/Datasheets/05-Test_Handling/EN_TestHandlers.pdf)  
Test\_Handling/EN\_TestHandlers.pdf. [Acedido em 9 Novembro 2019].
- [21 6TL Engineering, “6TL Engineering,” 20 01 2010. [Online]. Available:  
] <https://6tlengineering.com/wp-content/uploads/pdfs/A2603.pdf>. [Acedido em 13  
Novembro 2019].
- [22 R. L. Norton, *Machine Design*, 4th edition, Massachusetts: Bookman, 2010.  
]
- [23 R. G. Budynas e J. K. Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, 8th  
] edition in SI Units, AMGH Editora Ltda., 2008.
- [24 [Online]. Available:  
] [http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S\\_Estruturas/Resistencia\\_materiais\\_LEG/upgra-](http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Resistencia_materiais_LEG/upgrade/Cap3.pdf)  
de/Cap3.pdf). [Acedido em 16 Setembro 2020].
- [25 E. Hearn, *Mechanics of Materials Volume 1: An Introduction to the Mechanics of*  
] *Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*, Elsevier  
Science, 1997.
- [26 M. C. Seljan. [Online]. Available: [https://www.maxwell.vrac.puc-](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/30943/30943.PDF)  
] [rio.br/30943/30943.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/30943/30943.PDF). [Acedido em 16 Setembro 2020].
- [27 A. M. Ramos, C. M. Relvas, J. Simões e L. M. Mota, *Engenharia + Design - da*  
] *ideia ao produto*, Publindústria, 2017.
- [28 J. William D. Callister, *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma*  
] *Introdução*, LTC, 1999.
- [29 [Online]. Available: <https://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>.  
] [Acedido em 1 outubro 2020].
- [30 J. F. Meireles, “Análise dinâmica de estruturas por modelos de elementos finitos  
] identificados experimentalmente,” Universidade do Minho, 2008.

- [31 Chandeupatla, T.R. and A.D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in  
] Engineering, Prentice Hall, 2002.
- [32 J. A. B. Pacheco, Utilização de Quinadoras e Guilhotinas (Quinagem e Corte),  
] 1992.
- [33 J. A. B. a. A. D. S. (Pacheco, “ A simulação numérica por elementos finitos na  
] validação de um critério para o projecto de quinadoras de quinadoras minorando as  
variação angulares ao longo do comprimento.” 2011.
- [34 TERADYNE, “Changing Economics of In-Circuit Test”.*How New In-Circuit Test  
] Systems Boost Productivity and Lower Costs of High Volume Production Test.*
- [35 6TL Engineering, “6TL Engineering,” [Online]. Available:  
] <https://6tlengineering.com/product/interchangeable-cassette-kit-250x300mm-for-6tl-08/>. [Acedido em 13 Novembro 2019].