



Stéphane Manuel Miroux Catarino

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Aplicação do toleranciamento na preparação de trabalho para fabrico em maquinaria

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Gonçalves Coelho

Vogais: Prof. Doutor António José Freire Mourão

Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado

Engenheiro Nuno Alexandre de Carvalho Guerin



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2014

Stéphane Manuel Miroux Catarino

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Aplicação do toleranciamento na preparação de
trabalho para fabrico em maquinaria**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado, FCT/UNL

Setembro, 2014

Aplicação do toleranciamento na preparação de trabalho para fabrico em maquinaria

Copyright © Stéphane Manuel Miroux Catarino, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

São várias as pessoas cuja colaboração e apoio tornaram possível a realização deste trabalho.

Gostaria, em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador, Professor Doutor António Mourão, pela oportunidade de realizar esta dissertação e confiança depositada em mim. Agradeço pela total disponibilidade para me receber no seu gabinete inúmeras vezes, pela constante ajuda e incentivo, por todas as sugestões, críticas e correções feitas durante a realização desta dissertação. Finalmente, quero agradecer a partilha de conhecimentos tanto num ambiente formal ou informal e acima de tudo pela sua amizade, por se ter revelado mais que um Professor.

Ao Eng. Nuno Guerin pela disponibilização de toda a informação necessária, pelo apoio, pela orientação e por estar sempre disponível para esclarecer qualquer dúvida.

A todo o corpo docente da FCT/UNL pela formação excelente que me proporcionaram e, em especial, a todos os professores com quem tive a sorte de aprender.

A todos os meus colegas com quem tive a oportunidade de trabalhar e passar excelentes momentos, em especial ao André Barreto, ao Fernando Aguiar e ao Jaime Machado, aos quais devo grande parte do meu sucesso escolar e quero ainda manifestar o meu apreço e consideração e desejar-lhes o melhor sucesso possível.

Aos restantes amigos por acreditarem em mim e pelas palavras de incentivo que me deram nos momentos menos bons.

Aos meus pais e irmãos, muito obrigado por todo o apoio e paciência nesta altura crucial da minha vida académica e no início de uma nova fase da minha vida, muito obrigado por tudo.

Por último, mas não menos importante, muito obrigado à minha namorada, Rita Amorim, que esteve incansavelmente ao meu lado com palavras de coragem e incentivo em todos os momentos.

A todos o meu mais sincero Muito Obrigado.

RESUMO

A dissertação pretende contribuir para a análise e explicação de métodos de toleranciamento com aplicação na preparação de fabrico, e culminar com o desenvolvimento de uma aplicação informática que permita automatizar parte do método. Estes procedimentos estudados visam a conversão/adaptação das tolerâncias do desenho de definição de um produto para o desenho de fabrico, no qual é de toda a conveniência repartir as tolerâncias pelas várias fases de produção.

São abordados dois métodos: o método dos ΔL e o método das cartas de tolerâncias, essencialmente presentes na bibliografia francesa e anglo-saxónica, respectivamente.

A partir de um exemplo aplicaram-se os dois métodos de modo a poder compará-los. Com base nos resultados concluiu-se que o método dos ΔL seria o melhor para realizar o caso de estudo fornecido por uma empresa em contexto de parceria e o que melhor se adequava ao desenvolvimento de um suporte informático.

Um componente mecânico cedido por uma empresa industrial constituiu o caso de estudo onde foi aplicado o método seleccionado na fase anterior – método dos ΔL – seguindo as várias etapas de resolução que o constituem, até ser possível concretizar uma simulação de fabrico com as respectivas cotas e tolerâncias de fabrico para cada operação.

Por fim compararam-se os resultados obtidos com os valores fornecidos pela empresa verificando-se uma grande correspondência o que permite ter uma perspectiva positiva quanto à utilidade do método no que diz respeito à preparação do trabalho para fabrico e a utilidade do programa desenvolvido.

Palavras-chave: Método dos ΔL , cartas de tolerâncias, tolerância de fabrico, preparação de trabalho, maquinação.

ABSTRACT

This dissertation aims to contribute to the analysis and explanation of tolerancing methods with application in the preparation for manufacture, and culminate with the development of a computer application that allows, in a way, the automation of the method. These studied procedures have in mind the conversion/adaptation of the endurance of the definition drawing of a product to the production drawing, in which is essential to distribute the endurances in the different production phases.

Two methods are discussed: the method of ΔL and the method of tolerance charts, essentially present in French and American literature respectively.

To compare the two methods previously mentioned, a practical example was used. The results obtained allowed to conclude that the method of ΔL will be the best option to build the case study (with the partnership of a company) and which one is the best for the development of a computer application.

The case study was built for a mechanical component given by an Industrial Company, where the method selected before was applied - method of ΔL – following several steps of resolution that consist the method, until it was possible to place a simulation of production with the corresponding parts and tolerances of production for each operation.

Finally the comparison of the obtained results with the values given by the Company, verifying a large correspondence which allows an optimistic outlook as far as the usefulness of this method is concerned in the preparation of process planning.

- **Keywords:** Method of ΔL , tolerance charts, manufacturing tolerance, process planning, machining.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT..	VII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	1
2 SOBRE O TOLERANCIAMENTO	5
2.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	5
2.2 DISPERSÕES ALEATÓRIAS E SISTEMÁTICAS	7
2.3 MÉTODOS DE TOLERANCIAMENTO PARA PREPARAÇÃO DE TRABALHO PARA FABRICO	9
3 MÉTODO DOS AL	11
3.1 INTRODUÇÃO	11
3.2 MODO DE APLICAÇÃO (ETAPAS)	11
3.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	13
3.3.1 Etapa 1 - Selecção de cotas.....	13
3.3.2 Etapa 2 – Proposta de realização da peça	13
3.3.3 Etapa 3 – Simulação de fabrico	14
3.3.4 Etapa 4 – Cálculo dos intervalos de tolerâncias impostos.....	14
3.3.5 Etapa 5 – Optimização da repartição de tolerâncias.....	16
3.3.6 Etapa 6 – Cálculo dos intervalos de tolerâncias totais.....	18
3.3.7 Etapa 7 – Cálculo das cotas médias de fabrico.....	19
3.3.8 Etapa 8 – Cotas de fabrico finais para cada fase	20
4 MÉTODOS DAS CARTAS DE TOLERÂNCIAS	23
4.1 INTRODUÇÃO	23

4.2	TRANSFERÊNCIA DE COTAS UTILIZANDO CADEIA DE VECTORES.....	23
4.2.1	Cadeia de vectores	25
4.2.2	Modo de aplicação	26
4.3	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	27
4.3.1	1º Passo de resolução – Definir as cotas de fabrico.....	29
4.3.2	2º Passo de resolução – Cotas em bruto e elementares	30
4.3.3	3º Passo de resolução – Representação das cadeias de cotas	31
4.3.4	4º Passo de resolução – Cálculo das dimensões mínimas e máximas para cada cadeia de cota.....	33
5	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS.....	37
5.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ΔL AO CASO TRATADO PELO MÉTODO DAS CARTAS DE TOLERÂNCIAS	37
5.1.1	Etapa 1- Seleção de cotas	37
5.1.2	Etapa 2 – Proposta de realização da peça	37
5.1.3	Etapa 3 – Simulação de fabrico	37
5.1.4	Etapa 4 - Calculo dos IT impostos.....	38
5.1.5	Etapa 5 - Optimização	39
5.1.6	Etapa 6 - Cálculo dos IT totais	40
5.1.7	Etapa 7 – Cálculo das cotas médias de fabrico.....	41
5.1.8	Etapa 8 – Cotas de fabrico finais para cada fase	42
5.2	RESULTADO DA COMPARAÇÃO	44
6	APLICAÇÃO INFORMÁTICA PARA OPTIMIZAÇÃO DE REPARTIÇÃO DE TOLERÂNCIAS NO MÉTODO DOS ΔL.....	49
6.1	INTRODUÇÃO	49
6.2	FLUXOGRAMA E MODO DE UTILIZAÇÃO	49
7	VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DOS ΔL COM CASO DA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL	53
7.1	PRODUTO EM ESTUDO	53
7.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO COM O PROGRAMA DESENVOLVIDO.....	53
7.2.1	Etapa 1- Seleção de cotas	54
7.2.2	Etapa 2 – Proposta de realização da peça	54
7.2.3	Etapa 3 – Simulação de fabrico	54
7.2.4	Etapa 4 - Cálculo dos IT impostos.....	55

7.2.5	Etapa 5 – Optimização.....	56
7.2.6	Etapa 6 - Cálculo dos IT totais	58
7.2.7	Etapa 7 - Cálculo das Cotas médias de fabrico	59
7.2.8	Etapa 8 – Cotas de fabrico finais para cada fase	60
7.3	RESULTADOS CALCULADOS E COMPARAÇÃO COM OS DA EMPRESA.....	62
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
9	REFERÊNCIAS	67
	ANEXOS..	69
A1	CÓDIGO EM MATLAB.....	69
A2	LINHAS DE CÓDIGO DO EXCEL	71
A3	MANUAL DO UTILIZADOR	79
9.1.1	A3.1 Abrir / correr programa.....	79
9.1.2	A3.2 Gravar	80
9.1.3	A3.3 Manual integrado no Excel	80
9.1.4	A3.4 Passos de resolução.....	81
A4	TABELAS CONSULTADAS	87
A5	DESENHOS TÉCNICOS.....	89

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Fluxograma da estrutura da dissertação e respectivos capítulos.....	3
Figura 2.1 - Influência das tolerâncias dimensionais nos custos de produção [1].....	5
Figura 2.2 – Efeito da utilização da Tecnologia de Grupo na preparação do trabalho (adaptado de [4]).....	7
Figura 2.3 - Dispersões de maquinação (adaptado de [5]).....	7
Figura 2.4 - Identificação das dispersões no torneamento (adaptado de [5]).....	8
Figura 3.1 - <i>Modus operandi</i> do Método dos ΔL	12
Figura 3.2 - Peça para estudo do Método dos ΔL (adaptado de [16])	13
Figura 3.3 - Simulação de fabrico (adaptado de [16])	14
Figura 3.4 - Percurso de Cf 9,10 (adaptado de [16])	15
Figura 4.1 - Desenho de definição da função.....	24
Figura 4.2 - Desenho de fabrico com referência A.....	24
Figura 4.3 - Desenho de definição da função.....	26
Figura 4.4 - Desenho de fabrico.....	26
Figura 4.5 - Desenho de definição justamente com desenho de fabrico.....	27
Figura 4.6 - Cadeia de vectores com a cota condição considerada no mínimo.....	27
Figura 4.7 - Cadeia de vectores com cota condição considerada na condição de máximo material.....	27
Figura 4.8 - <i>Modus operandi</i> do Método das Cartas de Tolerâncias.....	28
Figura 4.9 - Peça a fabricar.....	29
Figura 4.10 – Peça com as cotas longitudinais (adaptado de [18])	29
Figura 4.11 - Carta de tolerância - 1ºPasso.....	30
Figura 4.12 - Carta de tolerância - 2ºPasso.....	31
Figura 4.13 - Carta de tolerância - 3ºPasso.....	32
Figura 4.14 - Cadeia 3 (tentativa)	33
Figura 4.15 - Cadeia 8.....	33
Figura 4.16 - Cadeia 3.....	33
Figura 4.17 - Cadeia 7.....	34
Figura 4.18 - Cadeia 9.....	34
Figura 4.19 - Cadeia 10.....	34
Figura 4.20 - Cadeia 5.....	34
Figura 4.21 - Cadeia 6.....	35

Figura 4.22 - Carta de tolerância final.....	36
Figura 5.1 - Simulação de fabrico.....	38
Figura 5.2 - Cadeia de análise de tolerâncias.....	45
Figura 5.3 - Resultado final obtido pelo método dos ΔL	46
Figura 5.4 - Resultado final obtido pelo método das cartas de tolerâncias.....	46
Figura 6.1 - Fluxograma do funcionamento do programa em Excel.....	51
Figura 6.2 - Interface da aplicação informática.....	52
Figura 6.3 - Resultado final do programa.....	52
Figura 7.1 – Peça usada para validação do trabalho realizado na dissertação.....	53
Figura 7.2 – Secção da peça com selecção de cotas toleranciadas longitudinalmente...	54
Figura 7.3 - Simulação de fabrico da peça do caso de estudo.....	55

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Relações de cotas do Exemplo1.....	16
Tabela 2 - Δl envolvidos nas cotas do Exemplo1.....	16
Tabela 3 - Substituição dos Δl do Exemplo1.....	17
Tabela 4 - Exemplo 1 Primeira otimização.....	18
Tabela 5 - Exemplo1 Segunda otimização.....	18
Tabela 6 - Resumo das cotas de fabrico obtidas pelo método dos ΔL	21
Tabela 7 – Espessura mínima a ser arbitrada (adaptado de [18]).....	35
Tabela 8 - Relações de cotas.....	39
Tabela 9 - Dispersões envolvidas.....	39
Tabela 10 - Substituição dos valores das dispersões.....	40
Tabela 11 - 1ª otimização.....	40
Tabela 12 - 2ª otimização.....	40
Tabela 13 - Valor das dispersões definidas e arbitradas	40
Tabela 14 - Resumo das cotas finais obtidas pelo método dos ΔL	43
Tabela 15 - Comparação dos métodos dos ΔL e das cartas de tolerâncias.....	47
Tabela 16 - Otimização das dispersões das superfícies funcionais do caso de estudo..	57
Tabela 17 - Dispersões obtidas e arbitradas no caso de estudo.....	58
Tabela 18 - Resumo das cotas finais obtidas para o caso de estudo obtidas pelo método dos ΔL	61
Tabela 19 - Comparação de resultados obtidos com empresa.....	63
Tabela 20 - Gravar.....	80
Tabela 21 - Manual do utilizador.....	80
Tabela 22 - Passos de resolução, 1ºPasso.....	81
Tabela 23 - Passos de resolução, 2ºPasso.....	82
Tabela 24 - Passos de resolução, 3ºPasso.....	83
Tabela 25 - Passos de resolução, Mínimo.....	83
Tabela 26 - Passos de resolução, 1ªOtimização.....	84
Tabela 27 - Passos de resolução, Coef.....	84
Tabela 28 - Passos de resolução, Mudar Soma.....	85
Tabela 29 - Passos de resolução, Resto.....	85
Tabela 30 - Passos de resolução, 2ªOtimização.....	85

Tabela 31 - Espessura mínima de material a remover para torneamento (adaptado de [15])	87
Tabela 32 - Espessura mínima de remoção de material em função da operação de torneamento (adaptado de [15])	87
Tabela 33 - Valores de referência para apertos (adaptado de [6])	87
Tabela 34 - Tolerâncias para fundição injectada com precisão ([23]).....	87
Tabela 35 - Desenhos técnicos cedidos pela Empresa.....	89

Símbolos e abreviaturas

Cp – Cota projeto/definição

Cpf - Cota de preparação de fabrico

Cf – Cota de fabrico

Cf_{méd} – Cota de fabrico média

Da – Dispersão aleatória

Ds – Dispersão sistemática

Δl_i – Dispersão de maquinação da superfície i

Δl_i^j - Dispersão do aperto da face i na superfície j

ΔL – Dispersão admissível de uma cota de simulação que representa uma variação de posição de uma superfície num referencial fixo à máquina de produção

IT – Intervalo de tolerância

$\bar{d}$ – Dimensão média

n – Número de superfície

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objectivos da dissertação

A maioria dos órgãos mecânicos acabados por maquinaria sofrem diferentes operações de fabrico, algumas usando tecnologias e processos diferentes. Assim, para além da conversão/adaptação das tolerâncias do desenho de definição do produto para o desenho de fabrico, é de toda a conveniência determinar as tolerâncias de fabrico para as diversas fases da sua produção.

Este assunto é normalmente omissso na formação em engenharia, porém é da maior importância na indústria, em particular no fabrico em série. Todavia, é um assunto leccionado em engenharia mecânica nos países com uma indústria automóvel desenvolvida.

O objectivo do trabalho desenvolvido nesta dissertação é o estudo de métodos de toleranciamento para a preparação de trabalho para fabrico em maquinaria e o desenvolvimento de uma aplicação informática que contribua para a automatização do método considerado mais adequado.

1.2 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação é constituída por 8 capítulos, seguidos de referências e anexos.

No Capítulo 1, o presente, são apresentados os objectivos e a estrutura em fluxograma, com a informação relativa aos capítulos, como se pode observar na Figura 1.1.

O Capítulo 2 começa com o estudo dos conceitos básicos de toleranciamento, da importância das dispersões, tanto aleatórias como sistemáticas, no toleranciamento e acaba com a identificação de métodos de toleranciamento existentes para preparação de trabalho para fabrico.

No Capítulo 3, é apresentado o método dos ΔL , que representa a escola francesa, no qual é descrita pormenorizadamente as várias etapas que o constituem.

Com vista à selecção do método a ser alvo de estudo ao longo desta dissertação, foi estudado no Capítulo 4 o método das cartas de tolerância, sendo este mais comum na bibliografia anglo-saxónica.

O Capítulo 5 apresenta o processo de selecção do método a utilizar nesta dissertação. Para o efeito procedeu-se à comparação dos dois métodos utilizando o mesmo caso de toleranciamento para fabrico. A opção recaiu no método dos ΔL , o qual mostrou ser o mais completo e objectivo, o que iria possibilitar a sua automatização.

Depois de seleccionado o método, no Capítulo 6 foi desenvolvida uma folha de cálculo em VBA disponível no Excel para optimização do tempo gasto na aplicação do método.

No Capítulo 7 apresenta o estudo do toleranciamento para fabrico aplicado a um caso real da indústria automóvel. Este estudo, confrontado com a prática desenvolvida na empresa, mostrou a habilidade do método e a grande utilidade do suporte informático na rapidez da aplicação do mesmo.

Por fim, no Capítulo 8 são feitas conclusões e sugestões de possíveis trabalhos.

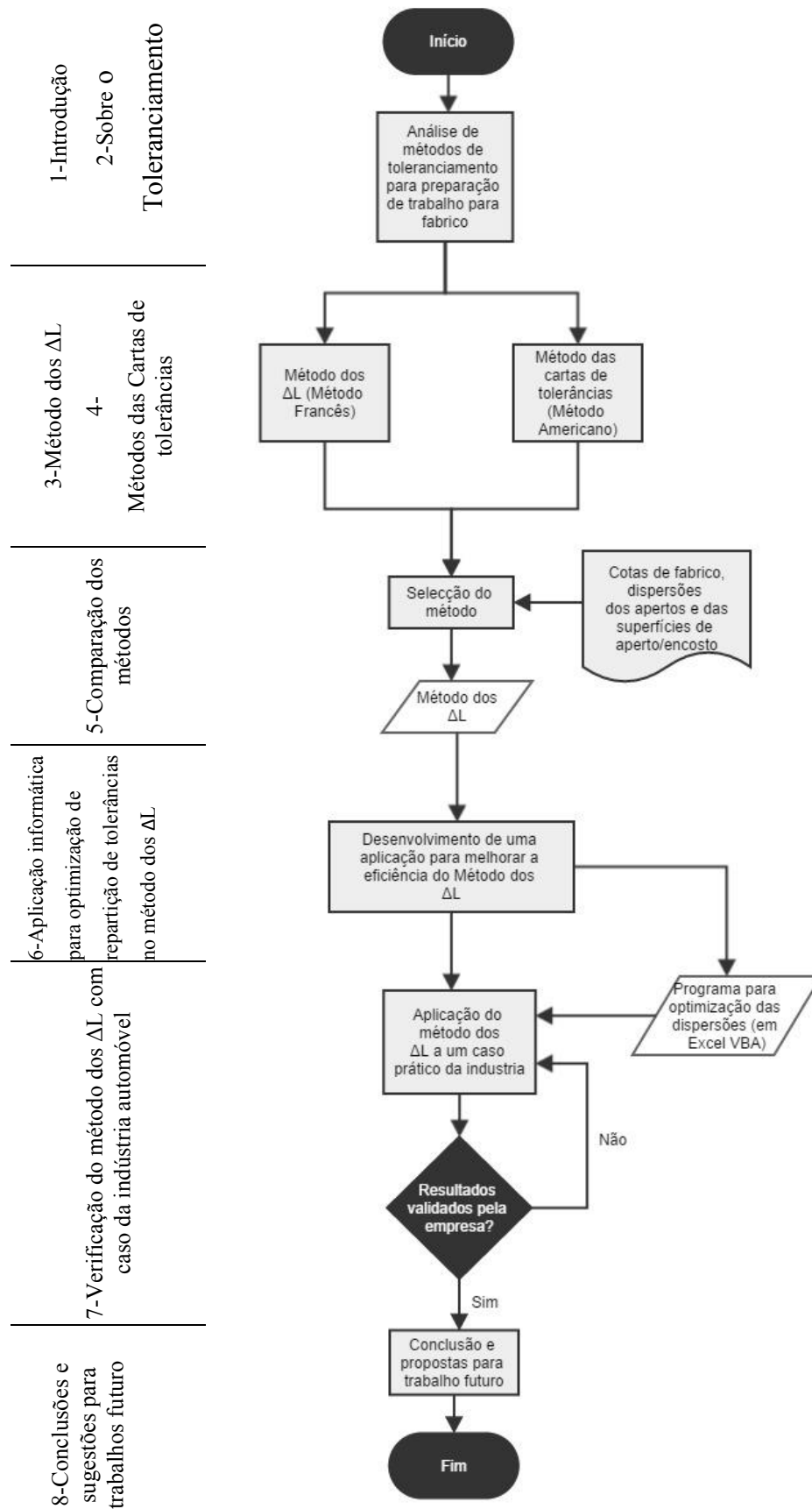


Figura 1.1 - Fluxograma da estrutura da dissertação e respectivos capítulos

2 SOBRE O TOLERANCIAMENTO

2.1 Conceitos básicos

O controlo de tolerâncias é muito importante durante o processo de fabrico para garantir que determinado componente que se pretende fabricar esteja conforme as especificações. É habitual relacionar o custo de fabrico da peça com a respectiva tolerância de fabrico, com base na Figura 2.1.

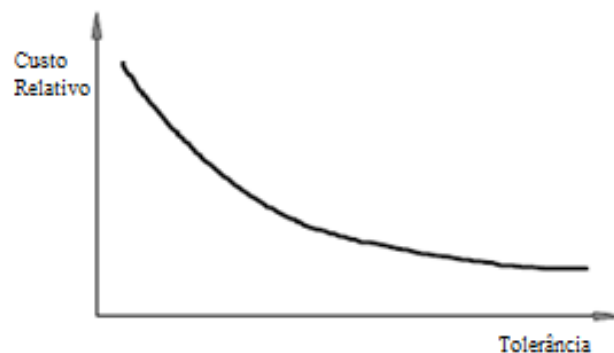


Figura 2.1 - Influência das tolerâncias dimensionais nos custos de produção [1]

Quanto mais complexos são os sistemas mecânicos mais apertadas são as tolerâncias e geralmente estão associadas a um número elevado de operações de maquinação dos seus componentes. As indústrias aeroespacial e automóvel são exemplos típicos desta crescente necessidade de controlo de tolerâncias. As características da peça fabricada, no que ao cumprimento das tolerâncias diz respeito, são conferidas na última operação. Todavia, esta operação é absolutamente independente das operações precedentes em termos da criação de condições que favorecem o cumprimento dos desvios máximos admissíveis. Assim, há necessidade de contemplar as diferentes operações de fabrico no planeamento do trabalho, com vista ao cumprimento das tolerâncias especificadas no projecto. Para dar resposta a esta necessidade nos últimos anos foram desenvolvidos vários métodos de estudo, dos quais, dois deles são tratados nesta dissertação, o método dos ΔL e as cartas de tolerâncias.

Para caracterizar corretamente uma operação de simulação de fabrico é preciso ter perfeito conhecimento de todas as dispersões que estão inerentes a um processo de maquinação. Significa isto, que é necessário conhecer as dispersões aleatórias (D_a), e as dispersões sistemáticas (D_s) que acontecem no decorrer da produção das peças de modo a conseguir a melhor repartição de tolerâncias possíveis. Sempre com o objetivo de

seleccionar a solução tecnológica que melhor corresponde às necessidades de forma a respeitar as condições impostas pelo caderno de encargos.

Em resumo, pode-se dizer que o fabricante da peça tem três opções disponíveis do ponto de vista dimensional [2]:

- Optar pela tecnologia que lhe permitirá realizar as formas da peça com uma precisão compatível com as tolerâncias,
- Atender à esperança média de vida da ferramenta para reduzir se necessário as variações de dimensão ao longo da maquinação,
- Definir os limitadores de fim de curso para obter as superfícies de referência.

É preciso ter sempre em mente que a selecção da solução tecnológica depende do número de peças a produzir e, naturalmente, depende do orçamento disponível, assim como da taxa de produção a alcançar [1]. A bibliografia francesa aborda muito a questão relacionada com o conhecimento do *modus operandi* dos processos. Há uma necessidade de reduzir os tempos de produção e a somar a isto, existe uma crescente necessidade de renovar os produtos ou efectuar pequenas alterações, logo é necessário por parte do gabinete de preparação do trabalho para fabrico reduzir o tempo necessário para estudos.

Em 1959 foi empregue pela primeira vez o termo de Tecnologia de Grupo, que é uma filosofia de organização e racionalização do projecto e fabrico de produtos, que tem como conceito básico identificar e agrupar os componentes de acordo com as suas similaridades. No que diz respeito à preparação de trabalho a organização pode melhorar a sua eficiência uma vez que planeamentos de processos similares podem ser recuperados e adaptados às novas situações (Figura 2.2).

No entanto, só em 1970 quando o uso dos computadores começou a generalizar-se deu-se um crescimento significativo nesta área [3]. Este conceito reside na tentativa de encontrar semelhanças do novo produto com produtos anteriormente fabricados, visto que quanto maior for o número de semelhanças maior será a rapidez da aplicação do método de fabrico.

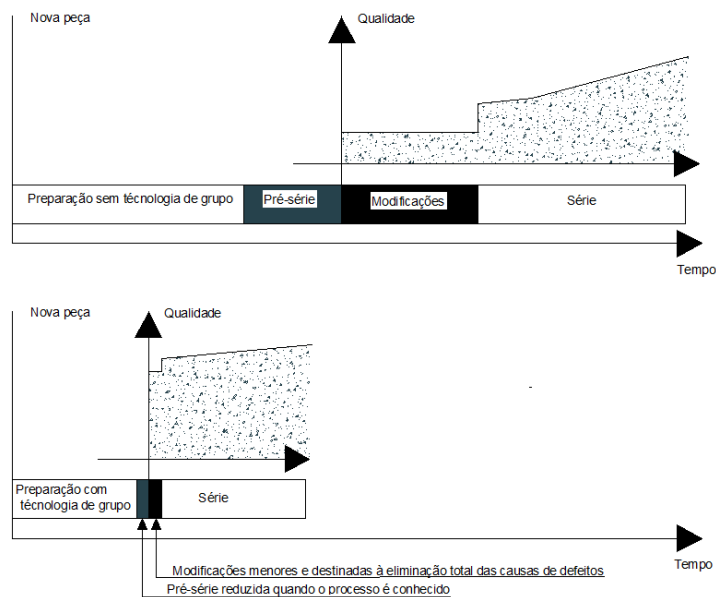


Figura 2.2 – Efeito da utilização da Tecnologia de Grupo na preparação do trabalho (adaptado de [4])

2.2 Dispersões aleatórias e sistemáticas

Para definir as cotas de fabrico para a maquinação é indispensável ter conhecimento dos vários tipos de dispersão que existem e as suas influências no processo de fabrico. Os tipos de dispersões inerentes ao processo de maquinação são as D_a e as D_s , como se pode observar na Figura 2.3.

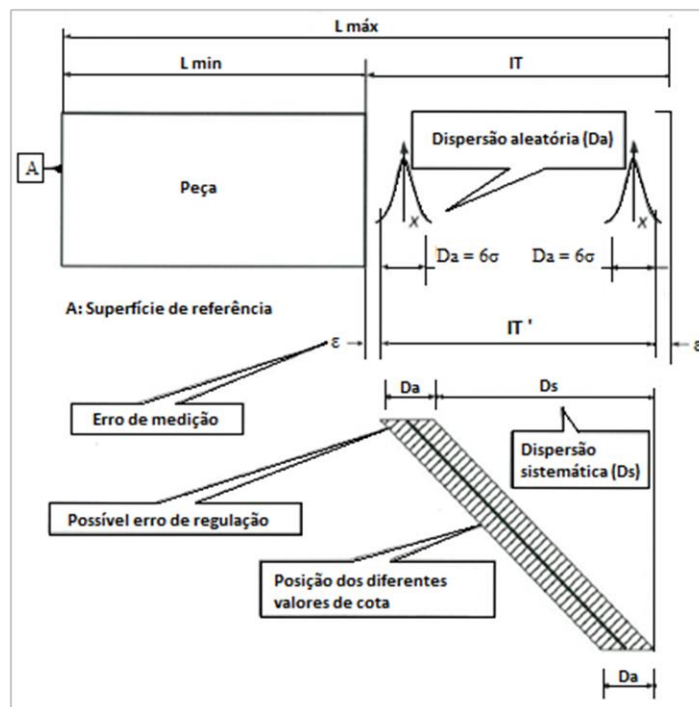


Figura 2.3 - Dispersões de maquinação (adaptado de [5])

Na Figura 2.4 apresenta-se o tipo de dispersões, representadas por Δ , que ocorrem num processo de maquinação, que engloba o sistema de fixação, a peça e o porta ferramentas. Estão representadas as sete dispersões [5]:

- $\Delta 1$ devido à forma, deformação e imprecisão dos apoios;
- $\Delta 2$ está associada aos defeitos micro geométricos da superfície (em bruto ou maquinada);
- $\Delta 3$ caracteriza a variação da posição da ponta da ferramenta devido ao desgaste;
- $\Delta 4$ Caracteriza a rigidez do porta ferramenta e do acoplamento com a ferramenta;
- $\Delta 5$ diz respeito à precisão do elemento de guia e caracteriza as deformações devidas aos esforços resultantes da maquinação;
- $\Delta 6$ depende dos tipos de limitadores (mecânicos, eletromecânicos, numéricos ...) e da velocidade de encosto;
- $\Delta 7$ caracteriza os efeitos de dilatação e vibração da máquina.

Chama-se a atenção para a seguinte nota: as dispersões $\Delta 1$ e $\Delta 2$ intervêm em cada aperto de peça; a dispersão $\Delta 4$ intervêm cada vez que se efetua a troca de ferramenta; a dispersão $\Delta 6$ intervêm em cada fase que necessita de limitador; por fim, as dispersões restantes, ou seja, $\Delta 3$, $\Delta 5$ e $\Delta 7$ intervêm em cada peça da série.

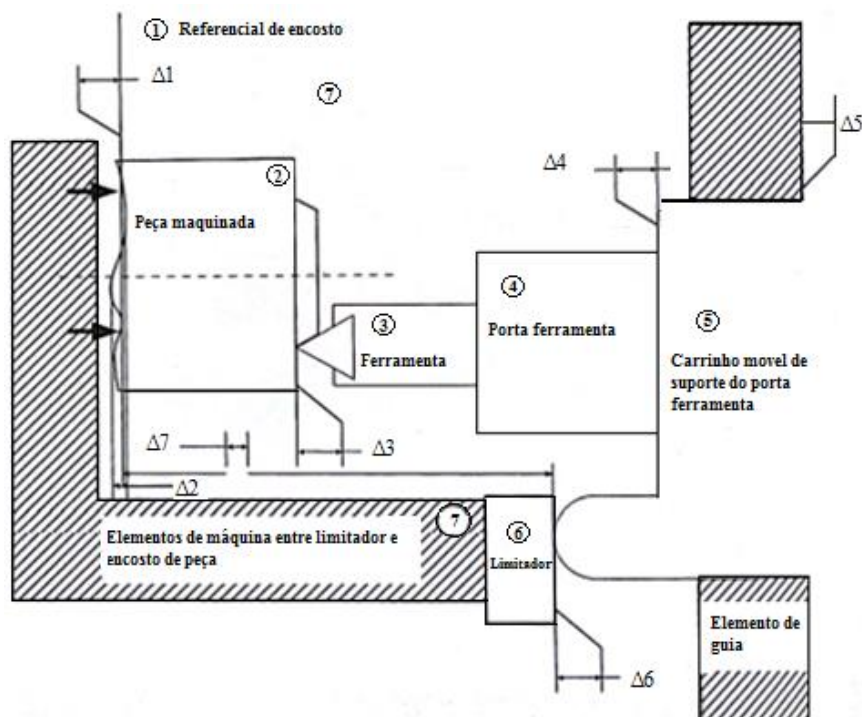


Figura 2.4 - Identificação das dispersões no torneamento (adaptado de [5])

Os cuidados a ter com os apoios prendem-se essencialmente com 4 regras fundamentais [6]:

- Definir o aperto sempre que possível em superfícies maquinadas;
- Fazer o encosto da peça com superfície funcional (evita a necessidade de transferência de cota);
- Escolher superfícies suficientemente grandes para posicionar correctamente a peça;
- Reduzir as hipóteses de deformações e de vibrações da peça, escolhendo uma zona próxima da superfície a ser maquinada.

2.3 Métodos de toleranciamento para preparação de trabalho para fabrico

O conceito primitivo do estudo de tolerâncias dimensionais como se tratam nesta dissertação prende-se com o facto de ser impossível fabricar uma peça com as suas dimensões exactas, ou seja, existirá sempre uma pequena variação que é inerente a qualquer processo de fabrico. Por outro lado, a questão de incluir tolerâncias dimensionais num desenho apenas faz sentido se a peça a fabricar seja componente de uma montagem em que pelo menos uma das suas superfícies seja funcional. Muitas vezes os responsáveis por realizar os projectos focam-se apenas nos aspectos funcionais das montagens e menosprezam o fabrico da peça. Ou seja, geralmente está-se perante uma situação em que se conhece funcionalmente a peça final, contudo não se sabe como se deve fabricar. Por outras palavras, tem-se as cotas funcionais que traduzem o funcionamento de um componente mas estas cotas como foi dito anteriormente nem sempre se apresentam como as mais adequadas para o fabrico do respectivo componente. A cotagem de fabrico deve traduzir explicita ou implicitamente a forma como a peça irá ser fabricada, logo deve ser feita por quem conhece as tecnologias e os processos de fabrico existentes e/ou disponíveis [7]. É esta a razão de ser da preparação de trabalho para fabrico (process planning ou méthodes na bibliográfica anglo-saxónica e francesa, respectivamente).

O objectivo desta dissertação prende-se essencialmente com este segundo ponto, ou seja, com a necessidade de realizar o dimensionamento de fabrico. Este trabalho é geralmente realizado com recurso às cartas de tolerâncias ou com o método dos ΔL e consistem em determinar, a partir de uma sequência de fabrico previamente estabelecido,

as cotas e as tolerâncias das etapas intermédias, quer isto dizer, as cotas e tolerâncias a serem obtidas em cada operação de maquinação.

Existem vários sistemas de projecto assistido por computador (CAD) que permitem a atribuição das tolerâncias para os vários componentes presentes numa montagem dos quais se destacam: CETOL 6 σ [8], Variation Analysis VisVSA [9], Sigmund [10], 3DCS [11], VarTran Software [12], Symphony [13]. Estes Softwares têm em comum o facto de serem uma ferramenta de análise dimensional muito poderosa e usados para simular processos de fabrico, montagem e prognosticar os valores e causas de variação. Porém, estes Softwares não entram em conflito com os métodos de toleranciamento estudados nesta dissertação uma vez que são complementares, quer isto dizer que estes métodos partem dos resultados obtidos com estes Softwares CAD.

3 MÉTODO DOS ΔL

3.1 Introdução

O método dos ΔL , também conhecido como método dos ΔL de Bourdet [14], foi desenvolvido por Pierre Bourdet [2] e consiste num ante projeto de maquinação. É seleccionado com o objetivo de estabelecer o desenho de fabrico da peça em bruto e a sequência de maquinação, ou seja, pretende estabelecer a simulação de maquinação. Para isso, é preciso conhecer o comportamento da peça em cada operação de maquinação sob o aspecto dimensional.

Quando se trata de assuntos relacionados com preparação de trabalho para fabrico está-se, forçosamente, perante um desenho com cotas de projecto. Por isso é necessário escolher quais os processos de fabrico necessários para realizar a peça e é neste passo que consiste a grande utilidade deste método, uma vez que, permite de uma forma sistemática encontrar uma sequência de maquinação válida para cada peça apresentando para cada etapa as cotas e tolerâncias respectivas.

3.2 Modo de aplicação (Etapas)

O método dos ΔL possibilita a sugestão sob a forma de gráfico de uma resolução sistemática da escolha de cotas de fabrico e da repartição de tolerâncias. Apesar de poder ser resolvido de várias maneiras, o método de resolução segue geralmente as seguintes etapas:

- Etapa 1: Observação e registo as cotas de projecto (C_p);
- Etapa 2: Proposta de um processo de realização da peça;
- Etapa 3: Realização de um gráfico de simulação do fabrico;
- Etapa 4: Cálculo dos intervalos de tolerância (IT), impostos pelas cotas bilaterais;
- Etapa 5: Optimização da repartição de tolerâncias;
- Etapa 6: Cálculo dos valores dos IT das cotas bilaterais;
- Etapa 7: Cálculo das dimensões médias ($\bar{d}$) de fabrico;
- Etapa 8: Cálculo e representação das cotas de fabrico nas respectivas fases de fabrico.

Na Figura 3.1 apresenta-se um fluxograma do *modus operandi* do método dos ΔL no qual se pode observar, as condições de aceitação ao longo da aplicação do método e, também, as várias operações que se devem cumprir na preparação de trabalho para fabrico.

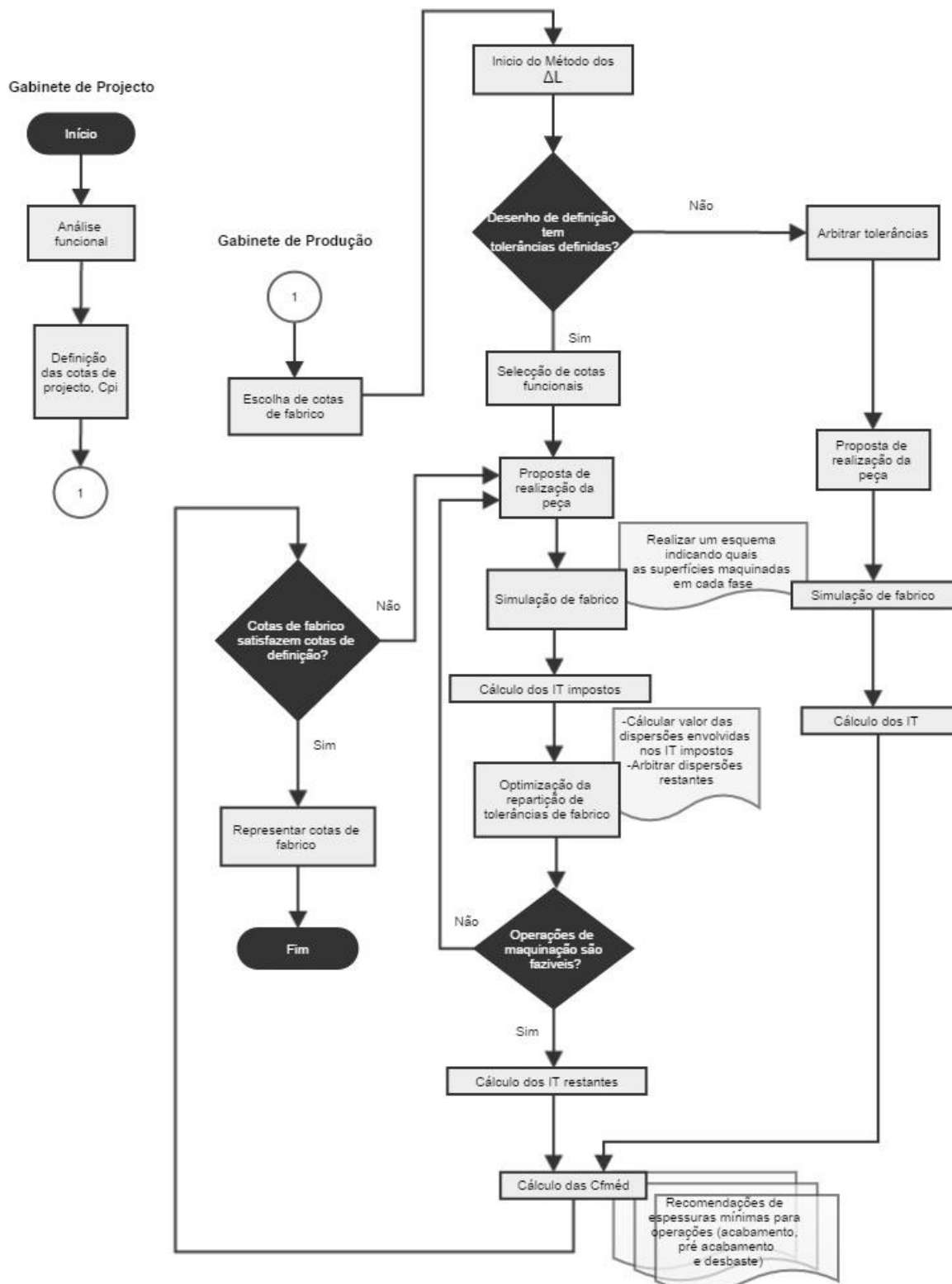


Figura 3.1 - *Modus operandi* do Método dos ΔL

3.3 Exemplo de aplicação

Na Figura 3.2 é estudado uma peça obtida por forjamento na qual é sugerido um conjunto de fases de maquinação que levam ao produto final. Como se pode observar são fornecidas cotas nominais, cotas mínimas e cotas tolerânciadas e pretende-se apresentar uma solução de maquinação com as respectivas cotas de fabrico e tolerâncias.

Chama-se a atenção para as seguintes considerações:

- A cota mínima de remoção de material para desbaste usada neste problema será de 2 mm, devendo ser sempre maior que 0,5mm [15];
- A sobre espessura para acabamento será de 0,2 mm [15].

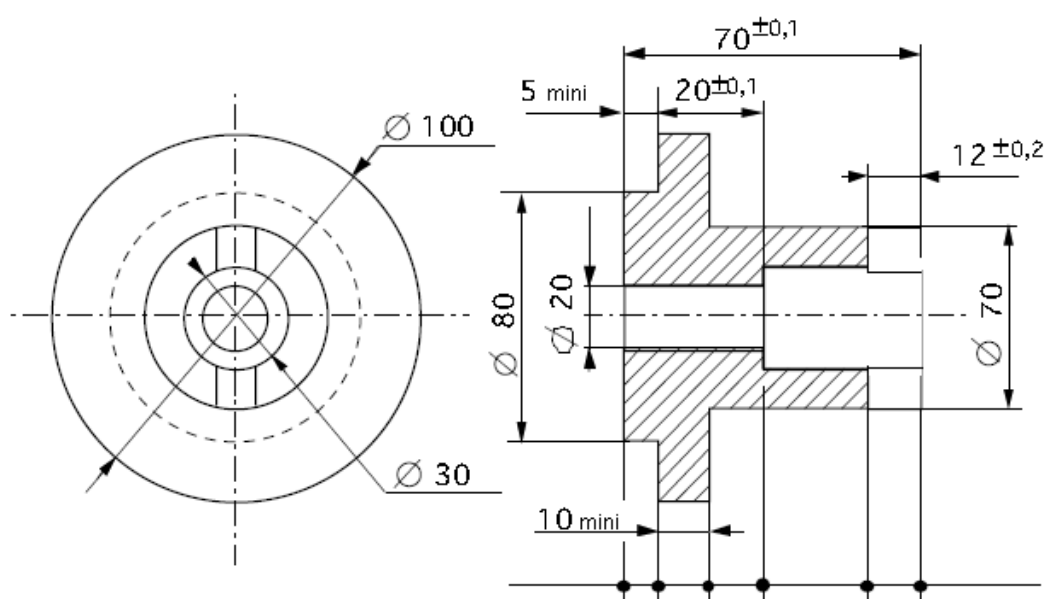


Figura 3.2 - Peça para estudo do Método dos ΔL (adaptado de [16])

3.3.1 Etapa 1 - Seleção de cotas

Como se pode observar da Figura 3.2 há três cotas bilaterais que são dadas pelas suas cotas máximas e mínimas ($70\pm 0,1$; $20\pm 0,1$; $12\pm 0,2$) e duas cotas unilaterais dadas pelas suas cotas mínimas (5 min e 10 min). Todas as cotas apresentadas ao longo desta dissertação que não tenham unidades são apresentadas como estando em mm.

3.3.2 Etapa 2 – Proposta de realização da peça

Como foi dito anteriormente esta peça resulta numa pré forma obtida por forjamento, a qual é submetida às seguintes etapas de maquinação:

- Torneamento cilíndrico de desbaste e de acabamento dos diâmetros 100 e 80 e das superfícies que lhes estão associadas;

- Torneamento cilíndrico de desbaste e de acabamento dos diâmetros 70, 20 e 30 e das superfícies que lhes estão associadas;
- Fresagem da ranhura de profundidade $12 \pm 0,2$;
- As respectivas fixações das peças para cada fase são apresentadas na Etapa 3.

3.3.3 Etapa 3 – Simulação de fabrico

Por convenção, uma cruz designa uma superfície criada na fase e um triângulo representa uma superfície de contacto entre a peça e o sistema de fixação (Figura 3.3). A dispersão admissível de uma cota de simulação que representa uma variação de posição de uma superfície num referencial fixo à máquina de produção apresenta-se como ΔL , no qual fica, Δl_i para fazer referência à superfície i criada e representa-se por Δl_i^j as superfícies de contacto. O índice i representa o número da superfície correspondente e o expoente j é o número da fase (etapa de maquinação) [17]. Resultando deste modo a Figura 3.3.

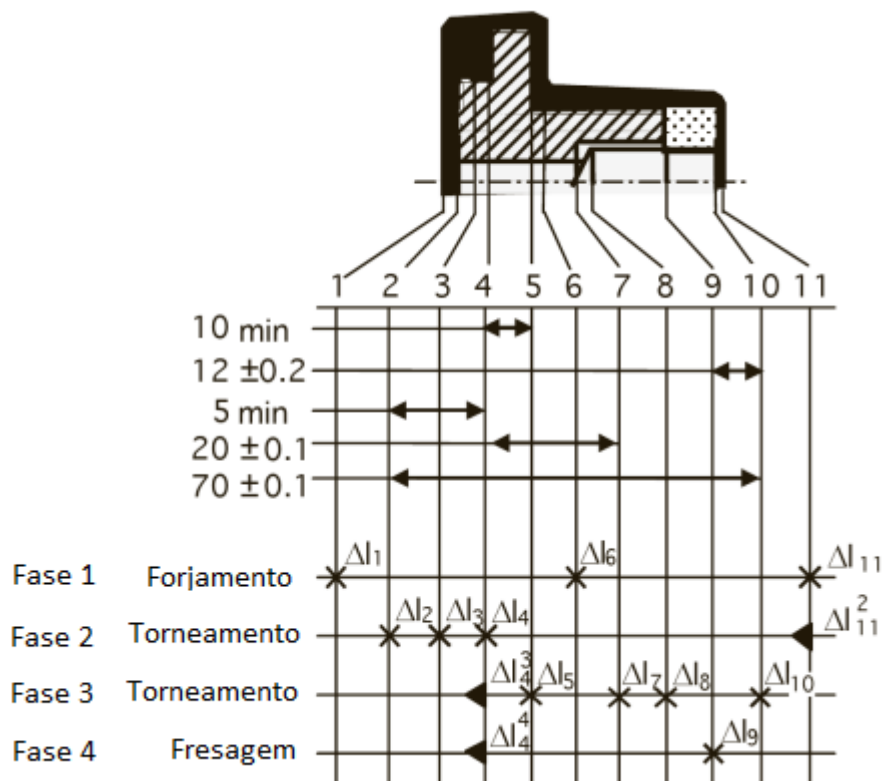


Figura 3.3 - Simulação de fabrico (adaptado de [16])

3.3.4 Etapa 4 – Cálculo dos intervalos de tolerâncias impostos

Cálculo dos IT impostos pelas cotas bilaterais faz-se do seguinte modo:

1. A expressão de tolerância da cota de fabrico $Cf_{9,10}$ corresponde à cota funcional $12 \pm 0,2$ entre as faces 9 e 10. Na qual, tem-se a seguinte relação

$$\Delta Cf_{9,10} = \underbrace{\Delta l_9 + \Delta l_4^4}_{\Delta Cf_{9,4}^4} + \underbrace{\Delta l_4^3 + \Delta l_{10}}_{\Delta Cf_{4,10}^3} \leq 0,4$$

Esta relação é obtida percorrendo o trajecto mínimo (que é único) assinalado na Figura 3.4. Este trajecto mínimo é obtido segundo duas regras:

- a) Escolher apenas uma única cota de fabrico por fase (linha) no qual o IT é a soma de dois Δl ;
- b) Passar de uma fase para outra através da mesma superfície, ou seja, a passagem de um nível para outro faz-se na vertical.

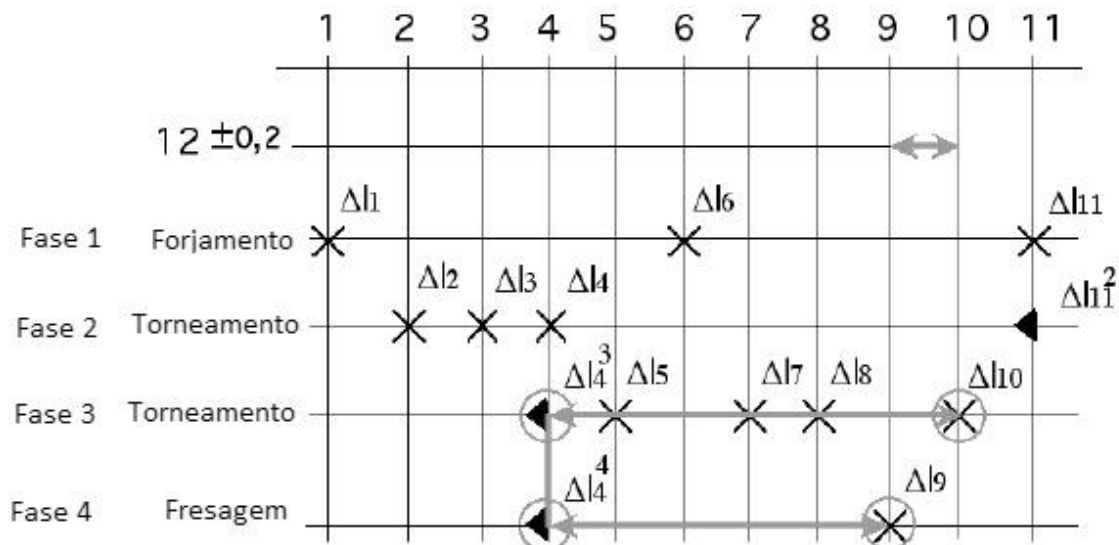


Figura 3.4 - Percurso de $Cf_{9,10}$ (adaptado de [16])

2. A expressão de tolerância da cota de fabrico $Cf_{4,7}$ corresponde à cota funcional $20 \pm 0,1$ entre as faces 4 e 7, na qual se tem a seguinte relação:

$$\Delta Cf_{4,7}^3 = \Delta l_4^3 + \Delta l_7 \leq 0,2$$

3. A expressão da tolerância de fabrico $Cf_{2,10}$ corresponde à cota funcional de $70 \pm 0,1$ entre as superfícies 2 e 10, na qual se tem a seguinte relação:

$$\Delta Cf_{2,10} = \underbrace{\Delta l_2 + \Delta l_4}_{\Delta Cf_{2,4}^2} + \underbrace{\Delta l_4^3 + \Delta l_{10}}_{\Delta Cf_{4,10}^3} \leq 0,4$$

Pode apresentar-se as 3 expressões precedentes sob a forma de tabela (Tabela 1).

Tabela 1 - Relações de cotas do Exemplo1

Cotas	Superfícies	Relações	$\leq IT$
12 $\pm$ 0,1	9-10	$\Delta l_9 + \Delta l_4^4 + \Delta l_4^3 + \Delta l_{10}$	0,4
20 $\pm$ 0,1	4-7	$\Delta l_4^3 + \Delta l_7$	0,2
70 $\pm$ 0,1	2-10	$\Delta l_2 + \Delta l_4 + \Delta l_4^3 + \Delta l_{10}$	0,2

3.3.5 Etapa 5 – Optimização da repartição de tolerâncias

A optimização da repartição de tolerâncias consiste em aumentar os valores de IT de modo a que seja o maior possível, desde que não viole as condições impostas pelo gabinete de projecto. Convém lembrar que quanto maior for o IT mais económico é o processo de fabrico.

A Tabela 2 serve para observar quais os valores de Δl envolvidos em cada dimensão da cota (marcado com X).

Os coeficientes começam todos por ser 1, passando a ser 0 quando o valor de Δl for o optimizado. Quer isto dizer que passa a ser 0 (célula bloqueada) quando é o mínimo valor possível.

Tabela 2 - Δl envolvidos nas cotas do Exemplo1

Dim ¹	S ²	$\leq IT$	Δl_2	Δl_4	Δl_7	Δl_9	Δl_{10}	Δl_4^3	Δl_4^4	Σ^3	n ⁴	Σ/n^5	R ⁶
Coef ⁷	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
12	9-10	0,4				X	X	X	X		4		
20	4-7	0,2			X			X			2		
70	2-10	0,2	X	X			X	X			4		

Na Tabela 3, é feita a substituição de X pelos respectivos valores iniciais sem ser feita a optimização.

Calculo auxiliar:

Para dimensão 12 tem-se IT= 0,4 e uma vez que se tem o valor de n deve ser feita a seguinte operação para obter o valor de Δl :

$$\frac{IT}{n} = \frac{0,4}{4} = 0,1$$

Eq. 1

¹ Dim - Dimensão da cota

² S - Superfícies envolvidas na respectiva cota

³ Σ - Soma dos valores de Δl

⁴ n - Número de Δl envolvidos em cada linha

⁵ Σ/n - Divisão da soma dos valores de Δl com numero de Δl envolvidos em cada linha

⁶ R - Resto entre IT e Σ

⁷ Coef - Coeficiente de optimização

Seguindo o mesmo procedimento, com recurso à Eq. 1, obtém-se o valor de Δl para as respetivas dimensões 20 e 70.

Tabela 3 - Substituição dos Δl do Exemplo1

Dim	S	$\leq IT$	Δl_2	Δl_4	Δl_7	Δl_9	Δl_{10}	Δl_4^3	Δl_4^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
12	9-10	0,4				0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	4	0,1	0
20	4-7	0,2			0,1			0,1		0,2	2	0,1	0
70	2-10	0,2	0,05	0,05			0,05	0,05		0,2	4	0,05	0

Uma vez preenchida a Tabela 3, deve-se fazer a optimização dos valores de Δl . A optimização é feita observando qual o menor valor de Δl numa determinada coluna. Uma vez observado esse valor, deve-se substituir os restantes valores dessa coluna por esse valor.

Obtém-se deste modo a primeira optimização (Tabela 4) e fazendo a segunda e última optimização obtém-se a Tabela 5. A segunda optimização é um passo muito importante, visto que consiste em repartir o resto pelas superfícies que ainda não têm coeficiente igual a 0.

Ou seja, para a dimensão 12 observa-se que ainda há duas superfícies, Δl_9 e Δl_4^4 , que ainda têm coeficiente igual a 1. Por isso, deve-se repartir o resto por estas duas superfícies, $R=0,1$. Dividindo este valor por dois obtém-se 0,05, sendo este o valor que se deve acrescentar a cada superfície e de seguida deve-se mudar o coeficiente para 0. Observa-se ainda que a dimensão 20 ainda tem Δl_7 com coef igual a 1, logo deve-se somar ao seu valor o valor do resto, ficando deste modo Δl_7 igual a 0,15.

Os valores obtidos são:

$$\Delta l_2 = 0,05 ; \Delta l_4 = 0,05 ; \Delta l_7 = 0,15 ; \Delta l_9 = 0,15 ; \Delta l_{10} = 0,05 ; \Delta l_4^3 = 0,05 ; \Delta l_4^4 = 0,15$$

Como se pode notar nem todos os valores de Δl estão incluídos nas tabelas precedentes. Isto deve-se ao facto destes intervalos não estarem constrangidos pelas cotas bilaterais impostas pelas cotas funcionais. Assim sendo, a sua escolha é feita pelo responsável pela preparação de trabalho que define as cotas de preparação de fabrico (Cpf) de modo a obter um custo mínimo sem constrangimentos em particular:

$$\Delta l_3 = 0,15 ; \Delta l_5 = 0,15 ; \Delta l_8 = 0,15 ; \Delta l_{11}^2 = 0,3$$

Tabela 4 - Exemplo 1 Primeira otimização

Dim	S	$\leq IT$	Δl_2	Δl_4	Δl_7	Δl_9	Δl_{10}	Δl_4^3	Δl_4^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	0	0	1	1	0	0	1	-	-	-	-
12	9-10	0,4				0,1	0,05	0,05	0,1	0,3	4	0,075	0,1
20	4-7	0,2			0,1			0,05		0,15	2	0,075	0,05
70	2-10	0,2	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>			<u>0,05</u>	<u>0,05</u>		0,2	4	0,05	0

Tabela 5 - Exemplo1 Segunda otimização

Dim	S	$\leq IT$	Δl_2	Δl_4	Δl_7	Δl_9	Δl_{10}	Δl_4^3	Δl_4^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
12	9-10	0,4				0,15	0,05	0,05	0,15	0,4	4	-	0
20	4-7	0,2			0,15			0,05		0,2	2	-	0
70	2-10	0,2	0,05	0,05			0,05	0,05		0,2	4	-	0

3.3.6 Etapa 6 – Cálculo dos intervalos de tolerâncias totais

Pretende-se calcular os valores dos IT das cotas bilaterais e unilaterais. Como foi referido anteriormente deve-se, considerar como mínimo de remoção de material para desbaste 2 mm e como mínimo de acabamento 0,2 mm.

4. Para a cota de fabrico entre as superfícies 4 e 5 (corresponde a cota 10 min) tem-se o seguinte intervalo de tolerância:

$$\Delta Cf_{4,5}^3 = \Delta l_4^3 + \Delta l_5 = 0,05 + 0,15 = 0,2$$

5. Para o intervalo de tolerância das cotas de fabrico entre as superfícies 2 e 4 (corresponde a cota 5 min):

$$\Delta Cf_{2,4}^2 = \Delta l_2 + \Delta l_4 = 0,05 + 0,05 = 0,1$$

6. Para o intervalo de tolerância da cota para desbaste entre as superfícies 1 e 2:

$$\Delta Cf_{1,2} = \underbrace{\Delta l_1 + \Delta l_{11}}_{\Delta Cf_{1,11}^1} + \underbrace{\Delta l_{11}^2 + \Delta l_2}_{\Delta Cf_{11,2}^2} = 2 \text{ (estado bruto)} + 0,35 = 2,35$$

7. Para o intervalo de tolerância da cota para desbaste entre as superfícies 5 e 6:

$$\Delta Cf_{5,6} = \underbrace{\Delta l_5 + \Delta l_4^3}_{\Delta Cf_{5,4}^3} + \underbrace{\Delta l_4 + \Delta l_{11}^2}_{\Delta Cf_{4,11}^2} + \underbrace{\Delta l_{11} + \Delta l_6}_{\Delta Cf_{11,6}^1} = 0,2 + (0,05 + 0,3) + 2 = 2,55$$

8. Para o intervalo de tolerância da cota para desbaste entre as superfícies 10 e 11:

$$\Delta C_{f_{10,11}} = \underbrace{\Delta l_{10} + \Delta l_4^3}_{\Delta C_{f_{10,4}}^3} + \underbrace{\Delta l_4 + \Delta l_{11}^2}_{\Delta C_{f_{4,11}}^2} = (0,05 + 0,05) + (0,05 + 0,3) = 0,45$$

9. Para o intervalo de tolerância da cota de acabamento entre as superfícies 3 e 4:

$$\Delta C_{f_{3,4}}^2 = \Delta l_3 + \Delta l_4 = 0,15 + 0,05 = 0,2$$

10. Para o intervalo de tolerância da cota de acabamento entre as superfícies 7 e 8:

$$\Delta C_{f_{7,8}}^2 = \Delta l_7 + \Delta l_8 = 0,15 + 0,15 = 0,3$$

3.3.7 Etapa 7 – Cálculo das cotas médias de fabrico

É correcto afirmar que, caso as 10 condições impostas nas etapas anteriores se confirmarem ao longo da produção desta peça, então a peça estará conforme as cotas de projeto.

Para se saber qual o número de cotas de fabrico médias existentes na peça deve-se resolver a equação $\bar{d} = n - 1$ em que $\bar{d}$ corresponde a dimensão média e n ao número de superfícies. Assim sendo, uma vez que se tem 11 superfícies nesta peça tem-se deste modo $\bar{d} = 10$ (Eq. 2)

$$\bar{d} = n - 1 = 11 - 1 = 10$$

Eq. 2

Sendo assim, apresentam-se de seguida as seguintes 10 dimensões médias:

$$\begin{aligned}\overline{d_{9,10}} &= 12 \\ \overline{d_{4,7}} &= 20 \\ \overline{d_{2,10}} &= 70 \\ \overline{d_{4,5}} &= 10min + \frac{\Delta C_{f_{4,5}}^3}{2} = 10 + \frac{0,2}{2} = 10,1 \\ \overline{d_{2,4}} &= 5min + \frac{\Delta C_{f_{2,4}}^2}{2} = 5 + \frac{0,1}{2} = 5,05 \\ \overline{d_{1,2}} &= 2min + \frac{\Delta C_{f_{1,2}}}{2} = 2 + \frac{2,35}{2} = 3,175 \\ \overline{d_{5,6}} &= 2min + \frac{\Delta C_{f_{5,6}}}{2} = 2 + \frac{2,55}{2} = 3,275 \\ \overline{d_{10,11}} &= 2min + \frac{\Delta C_{f_{10,11}}}{2} = 2 + \frac{0,45}{2} = 2,225 \\ \overline{d_{3,4}} &= 0,2min + \frac{\Delta C_{f_{3,4}}^2}{2} = 0,2 + \frac{0,2}{2} = 0,3\end{aligned}$$

$$\overline{d}_{7,8} = 0,2min + \frac{\Delta Cf_{7,8}}{2} = 0,2 + \frac{0,3}{2} = 0,35$$

3.3.8 Etapa 8 – Cotas de fabrico finais para cada fase

Para concluir o toleranciamento pelo método dos ΔL deve-se calcular e apresentar as cotas de fabrico (Cf) finais por cada fase de fabrico.

Fase 1:

$$Cf_{1,11} = (\overline{d}_{1,2} + \overline{d}_{2,10} + \overline{d}_{10,11}) \pm \frac{\Delta l_1 + \Delta l_{11}}{2} = (3,175 + 70 + 2,225) \pm 1 = 75,4 \pm 1$$

$$\begin{aligned} Cf_{6,11} &= [\overline{d}_{1,11} - (\overline{d}_{1,2} + \overline{d}_{2,4} + \overline{d}_{4,5} + \overline{d}_{5,6})] \pm \frac{\Delta l_6 + \Delta l_{11}}{2} \\ &= [75,4 - (3,175 + 5,05 + 10,1 + 3,275)] \pm 1 = 53,8 \pm 1 \end{aligned}$$

As cotas de fabrico da fase 1 estão representadas em A na Tabela 6.

Fase 2:

$$Cf_{2,4} = \overline{d}_{2,4} \pm \frac{\Delta l_2 + \Delta l_4}{2} = 5,05 \pm 0,05$$

$$Cf_{2,11} = (\overline{d}_{2,10} + \overline{d}_{10,11}) \pm \frac{\Delta l_2 + \Delta l_{11}^2}{2} = (70 + 2,225) \pm 0,175 = 72,225 \pm 0,175$$

$$Cf_{3,4} = \overline{d}_{3,4} \pm \frac{\Delta l_3 + \Delta l_4}{2} = 0,3 \pm 0,1$$

$$\begin{aligned} Cf_{4,11} &= [\overline{d}_{1,11} - (\overline{d}_{1,2} + \overline{d}_{2,4})] \pm \frac{\Delta l_4 + \Delta l_{11}^2}{2} = [75,4 - (3,175 + 5,05)] \pm 0,175 \\ &= 67,175 \pm 0,175 \end{aligned}$$

As cotas de fabrico da fase 2 estão representadas em B na Tabela 6.. A seta ($\leftarrow$) representada na B representa a superfície de encosto para maquinação.

Fase 3:

$$Cf_{4,5} = \overline{d}_{4,5} \pm \frac{\Delta l_4^3 + \Delta l_5}{2} = 10,01 \pm 0,1$$

$$Cf_{4,7} = \overline{d}_{4,7} \pm \frac{\Delta l_4^3 + \Delta l_7}{2} = 20 \pm 0,1$$

$$Cf_{4,10} = (\overline{d}_{2,10} - \overline{d}_{2,10}) \pm \frac{\Delta l_4^3 + \Delta l_{10}}{2} = (70 - 5,05) \pm 0,05 = 64,95 \pm 0,05$$

$$Cf_{7,8} = \overline{d}_{7,8} \pm \frac{\Delta l_7 + \Delta l_8}{2} = 0,35 \pm 0,15$$

As cotas de fabrico da fase 3 estão representadas em C na Tabela 6.

Fase 4:

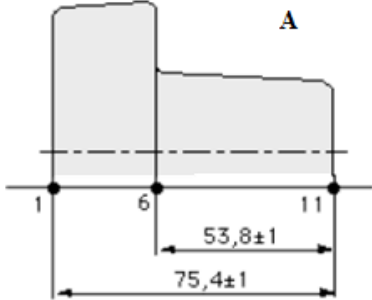
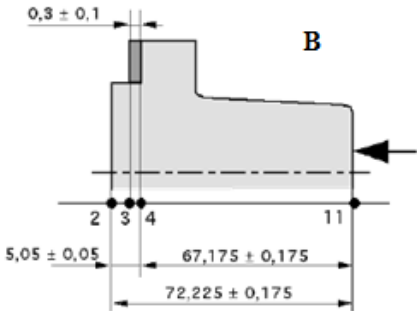
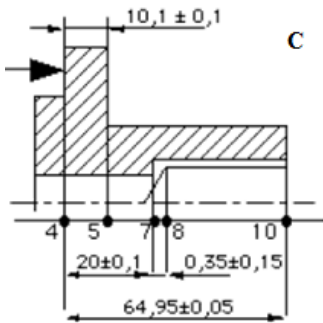
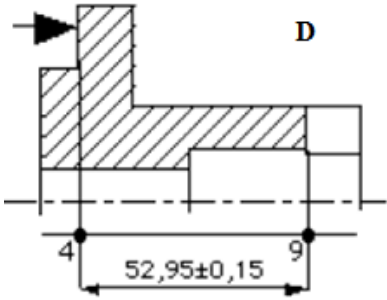
$$Cf_{4,9} = [\overline{d_{2,10}} - (\overline{d_{2,4}} + \overline{d_{9,10}})] \pm \frac{\Delta l_4^4 + \Delta l_9}{2} = [70 - (5,05 + 12)] \pm 0,15$$

$$= 52,95 \pm 0,15$$

As cotas de fabrico da fase 4 estão representadas em D na Tabela 6..

O resultado da simulação de fabrico pelo método dos ΔL é sintetizado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo das cotas de fabrico obtidas pelo método dos ΔL

Fase 1 $Cf_{1,11}=75,4\pm 1$ $Cf_{6,11}=53,8\pm 1$	 A
Fase 2 $Cf_{2,4}=5,05\pm 0,05$ $Cf_{2,11}=72,225\pm 0,175$ $Cf_{3,4}=0,3\pm 0,1$ $Cf_{4,11}=67,175\pm 0,175$	 B
Fase 3 $Cf_{4,5}=10,01\pm 0,1$ $Cf_{4,7}=20\pm 0,1$ $Cf_{4,10}=64,95\pm 0,05$ $Cf_{7,8}=0,35\pm 0,15$	 C
Fase 4 $Cf_{4,9}=52,95\pm 0,15$	 D

4 MÉTODOS DAS CARTAS DE TOLERÂNCIAS

4.1 Introdução

Segundo a bibliografia anglo-saxónica, quando se pensa em cartas de tolerância, está-se a fazer alusão ao dimensionamento para fabrico. O método consiste fundamentalmente em determinar a partir de um processo ou ciclo de fabrico previamente estabelecido, as cotas e as tolerâncias dos produtos intermédios, ou seja, as cotas e tolerâncias a serem obtidas em cada operação elementar [18].

O gráfico de tolerâncias é um método utilizado para apresentar as cotas de fabrico de uma peça ou o modo sequencial de todas as fases ao longo da sua produção. O grande propósito da sua utilização é permitir descrever passo a passo os processos de maquinação [19]. Proporciona ainda um controlo detalhado no decorrer da produção para garantir que as dimensões e tolerâncias obtidas no processo correspondem às especificações do desenho de projecto [20]. Contudo, antes de iniciar a construção da carta de tolerâncias é necessário ter tomadas as decisões iniciais que dizem respeito ao processo de fabrico. Estas decisões são essencialmente [21]:

- As sequências de operações a serem realizadas;
- A escolha de máquinas para cada operação baseada nas suas capacidades;
- As características de dimensionamento para cada operação;
- A escolha da superfície de referência para cada operação.

Uma vez tomadas todas estas decisões é então possível realizar a carta de tolerâncias, e assim definir as dimensões e tolerâncias requeridas para cada processo de maquinação.

4.2 Transferência de cotas utilizando cadeia de vectores

Antes de dar início à exposição do método das cartas de tolerâncias é essencial compreender, em primeiro lugar, como funciona a transferência de cotas utilizando cadeia de vectores. A transferência de cotas tem por base o facto de que duas ou mais cotas com as respectivas tolerâncias provocam na cota resultante uma dispersão igual à soma das tolerâncias das cotas [18]. Em suma, a transferência de cotas permite alterar a cotação do desenho de definição de uma peça de modo a facilitar a execução das operações de maquinação envolventes no processo de fabrico. Para além disso, as cartas de tolerâncias

geram ainda condições favoráveis para maior qualidade no trabalho, visto que especifica em concreto as operações de maquinação e permite o controlo do trabalho realizado. A transferência de cotas nunca pode gerar situações em que as cotas funcionais não são cumpridas.

Para melhor compreensão de como funciona esta transferência de cotas, sugere-se a análise do seguinte caso. Admita-se que se tem a Figura 4.1, desenho de definição de uma peça em que as cotas assinaladas são funcionais. No entanto, estas cotas podem não se apresentar como as cotas mais convenientes para a realização da peça. Pretende-se que a peça seja realizada com a face de referência em A, tal como indicado na Figura 4.2. Como resultado da comparação da análise das duas figuras, Figura 4.1 e Figura 4.2 observa-se o seguinte:

- A cota B é uma cota condição na Figura 4.1 e uma cota resultante na Figura 4.2.
- A cota C do desenho de fabrico não existe no desenho de definição.
- A cota A designa-se por cota comum visto que é cota funcional na Figura 4.1 e cota de fabrico na Figura 4.2.

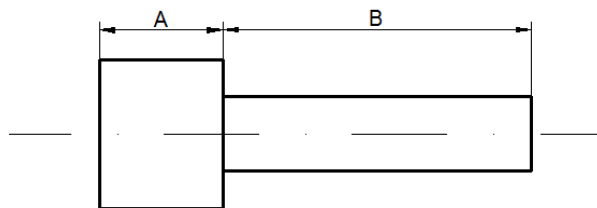


Figura 4.1 - Desenho de definição da função

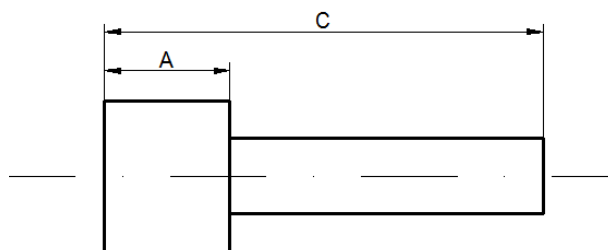


Figura 4.2 - Desenho de fabrico com referência A

A cota do desenho de definição que não aparece no desenho de fabrico é denominada como cota condição (cota resultante no desenho de fabrico). A condição imposta na transferência de cotas para a realização do desenho de fabrico é garantir a dimensão pretendida da cota condição, uma vez que, são estas as cotas sujeitas ao controlo da qualidade. Por isso, é crucial garantir que a cota (C) criada no desenho de fabrico tenha

um valor tal, que diminuída ou somada - conforme o caso - à cota comum aos dois desenhos (A), Figura 4.1 e Figura 4.2, permita reencontrar os valores da cota condição.

Em 4.2, por uma questão de simplificação, e uma vez que se pretende apenas expor este método de estudo apenas se trata do caso mais directo que acontece quando tolerância de B é superior à tolerância de A, ou seja, $t(B) > t(A)$.

Condições nas transferências de cotas [18]:

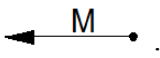
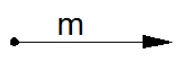
- A transferência de uma cota só é possível se a tolerância da cota condição for maior que a tolerância da cota comum aos desenhos de definição e de fabrico $t(B) > t(A)$;
- A tolerância da cota criada é igual à diferença entre a tolerância da cota condição e da cota comum, $t(C) = t(B) - t(A)$;
- A tolerância da cota condição é igual à soma da tolerância da cota criada e da cota comum, $t(B) = t(C) + t(A)$;
- A transferência de cota origina sempre um aperto das tolerâncias das cotas de fabrico e, inevitavelmente, a maiores dificuldades e custos de maquinação. Ou seja, a transferência de cota só deve ser empregue se realmente existirem vantagens que compense este aperto de tolerâncias.

4.2.1 Cadeia de vectores

Como foi dito anteriormente a cadeia de vectores é utilizada no dimensionamento de fabrico durante a realização da carta de tolerância. A cadeia de vectores deve ser fechada, significa isto que onde começa tem de acabar, e é formada pelos vectores correspondentes à cota condição, à cota comum e à cota a ser criada, podendo ser [18]:

- Cadeia de cálculo, quando se pretende calcular a cota de fabrico (criada), conhecendo a cota comum e a cota condição.
- Cadeia de verificação, quando se pretende verificar os limites resultantes para a cota condição, conhecendo a cota comum e a cota de fabrico.

É comum, quando se começa a definir a cadeia de vectores, definir o vector correspondente à cota condição antes dos demais, sendo a sua direcção:

- À esquerda para a cota condição no máximo  ;
- À direita para a cota condição no mínimo .

A cota condição pode ser considerada, indiferentemente, no máximo ou no mínimo. No entanto, daí resultará o sentido percorrido para completar a cadeia de vectores, ou seja, obtém-se a direcção das cotas de fabrico (cota comum e cota criada).

A cota comum e a cota condição sendo do mesmo tipo (por exemplo, ambas no máximo ou no mínimo) têm direcções inversas, por outro lado; se forem de tipos diferentes (por exemplo, a cota condição no máximo e a cota comum no mínimo) têm a mesma direcção.

4.2.2 Modo de aplicação

Partindo do desenho de projecto/definição representado na Figura 4.3, pretende-se realizar a peça conforme o desenho de fabrico (Figura 4.4).

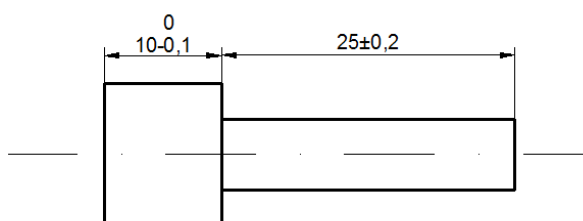


Figura 4.3 - Desenho de definição da função

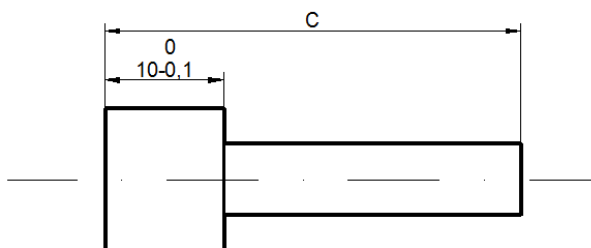


Figura 4.4 - Desenho de fabrico

Como primeira abordagem ao problema, pode-se observar que a cota de $25 \pm 0,2$ corresponde à cota condição e $10_{-0,1}$ à cota comum. Vai-se considerar a cota condição no mínimo, tal como foi dito anteriormente. A escolha entre considerar a cota condição no mínimo ou no máximo é indiferente. Resulta deste modo a resolução apresentada na Figura 4.5.

Uma vez tendo o esquema e a tabela presentes na Figura 4.6 pode-se concluir que $C_{\min} = 34,8$ e $C_{\max} = 34,8 + \text{tolerância} = 34,8 + 0,3 = 35,1$. Por outro lado, caso a cota condição tivesse sido considerada no máximo obter-se-ia a Figura 4.7, na qual $C_{\max} = 35,1$ e $C_{\min} = 35,1 - 0,3 = 34,8$.

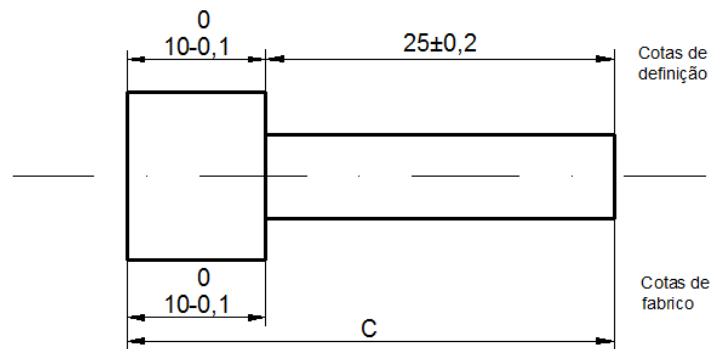


Figura 4.5 - Desenho de definição justamente com desenho de fabrico

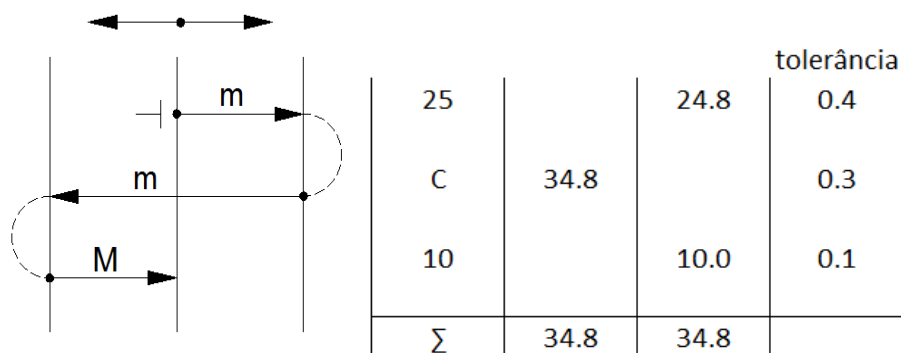


Figura 4.6 - Cadeia de vectores com a cota condição considerada no mínimo

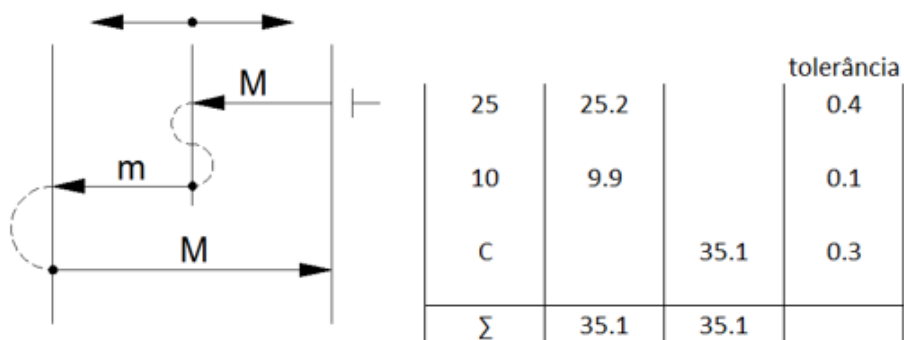


Figura 4.7 - Cadeia de vectores com cota condição considerada na condição de máximo material

4.3 Exemplo de aplicação

As cartas de tolerâncias mostram de forma ordenada, clara e compreensível as dimensões as tolerâncias e o material a remover em todo o ciclo. A Figura 4.8 apresenta as etapas de resolução sob a forma de fluxograma para o método das cartas de tolerância.

A peça na qual se pretende aplicar este método é a peça da Figura 4.9 (Exemplo adaptado com base em [18])

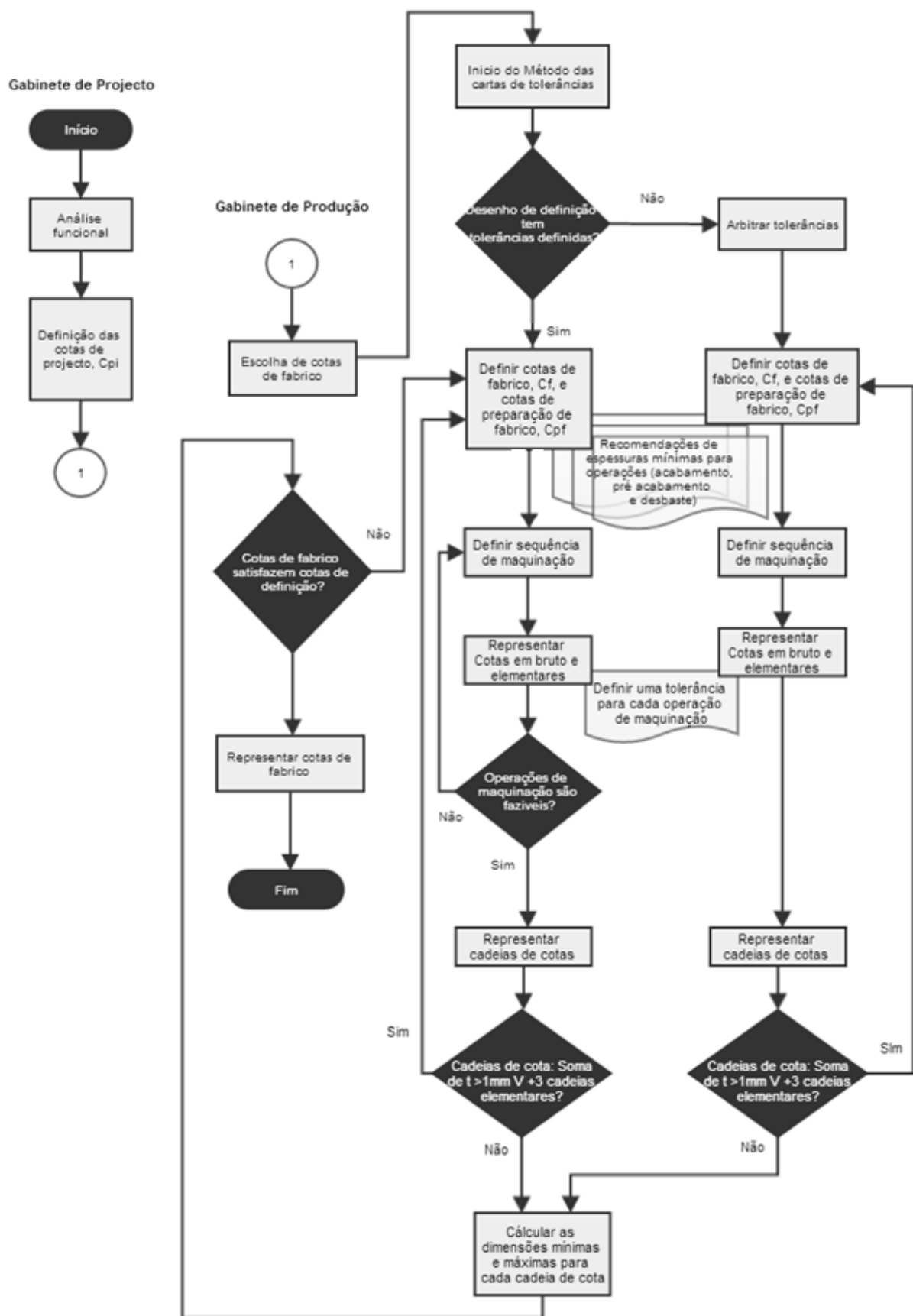


Figura 4.8 - *Modus operandi* do Método das Cartas de Tolerâncias

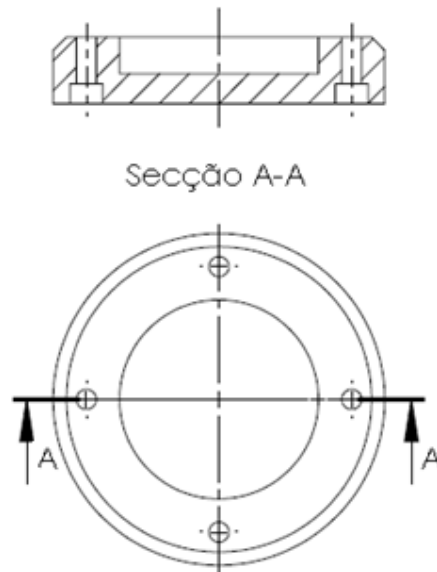


Figura 4.9 - Peça a fabricar

Apenas as cotas longitudinais serão consideradas, pelo que as cotas que serão alvo de estudo são as esquematicamente apresentadas na Figura 4.10.

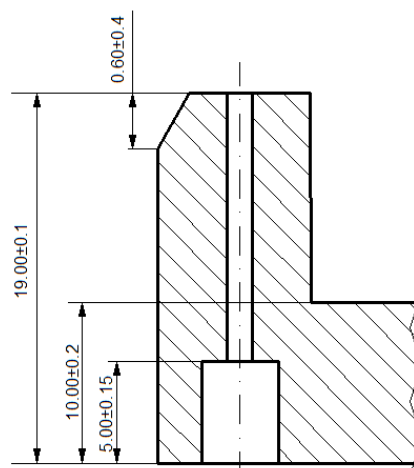


Figura 4.10 – Peça com as cotas longitudinais (adaptado de [18])

4.3.1 1º Passo de resolução – Definir as cotas de fabrico

O primeiro passo que se deve realizar consiste em construir a tabela da Figura 4.11, na qual, encontram-se indicadas:

- As cotas de fabrico indicadas num esboço da peça, sendo que:
 - a. Cada cota recebe um número de ordem apontado na REF;
 - b. Os limites das cotas são apontados nas colunas mínimo (m) e máximo (M);
 - c. As tolerâncias são apontadas na coluna t.

- As cotas de sobre espessura/cotas elementares que definem a superfície a ser maquinada em cada operação. Estas cotas quando existentes devem ser dispostas abaixo das cotas de fabrico. Sendo estas cotas, as cotas com REF 5 a 10.
- As espessura mínimas, que segundo o autor do qual foi baseado esta resolução, consideram-se que de modo geral [18]:
 - d. Para desbaste valores compreendidos entre 0,30 a 1,00 mm, cota 5, 6 e 10;
 - e. Para acabamento valores compreendidos entre 0,10 a 0,30 mm, cota 7, 8 e 9;
 - f. Para rectificação valores compreendidos entre 0,02 a 0,05 mm.

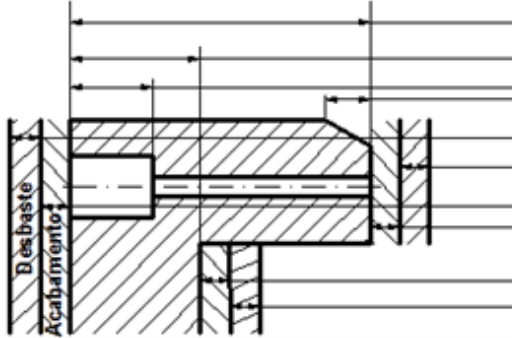
Carta de Tolerância - Cotas Longitudinais		Produto: Peça				
		REF	Minimo m	Máximo M	t	Cadeia
		1	18.90	19.10	0.2	
		2	9.80	10.20	0.4	
		3	4.85	5.15	0.3	
		4	0.20	1.00	0.8	
		5	0.50			
		6	0.50			
		7	0.20			
		8	0.20			
		9	0.20			
		10	0.50			
Cotas em bruto e elementares						
Cadeias de cotas		Cadeia			t	

Figura 4.11 - Carta de tolerância - 1ºPasso

4.3.2 2º Passo de resolução – Cotas em bruto e elementares

Uma vez construída esta tabela deve-se introduzir as cotas da peça em bruto e cotas elementares. Estas cotas são introduzidas de acordo com a sequência de fabrico da peça, significa isto que começa-se por introduzir B1 e B2 sendo estas as cotas em bruto, que neste caso poderia ser resultado de um forjamento (Figura 4.12).

Chama-se a atenção para as tolerâncias na coluna t, que foram indicadas de acordo com a capacidade da máquina em realizar essa operação e de acordo com as cotas impostas. Por exemplo, como se verá a seguir, a cota de REF 3 resulta de D e E, logo a soma das tolerâncias destas duas não poderia ultrapassar 0.3. Assim sendo, decidiu-se atribuir uma tolerância de 0.15 a D e a E.

4.3.3 3º Passo de resolução – Representação das cadeias de cotas

O terceiro passo consiste em completar as cadeias de cota para cada REF, as quais, devem manter a ordem presente na Figura 4.11. O número de cadeia de cotas tem de corresponder ao número de REF, quer isto dizer que, se existem 10 REF devem existir 10 cadeias de cotas. Obtém-se deste modo a Figura 4.13, na qual se pode observar que as cadeias 1, 2 e 4 correspondem respectivamente a REF F, REF H e REF G, daí resulta o facto de se apresentar como cota directa. Ou seja, não é necessário realizar cálculos presentes no capítulo seguinte para encontrar o seu valor.

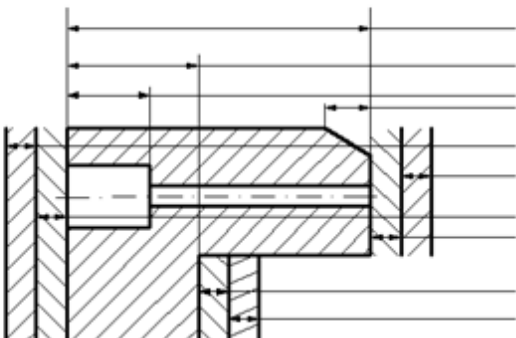
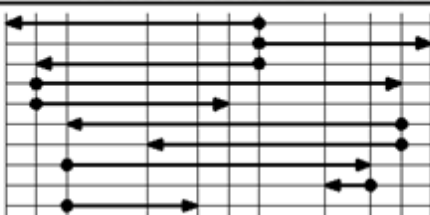
Carta de Tolerância - Cotas Longitudinais		Produto: Peça				
		REF	Mínimo m	Máximo M	t	Cadeia
		1	18.90	19.10	0.2	
		2	9.80	10.20	0.4	
		3	4.85	5.15	0.3	
		4	0.20	1.00	0.8	
		5	0.50			
		6	0.50			
		7	0.20			
		8	0.20			
		9	0.20			
		10	0.50			
Cotas em bruto e elementares						
		B1				
		B2				
		A			0.5	
		B			0.3	
		C			0.3	
		D			0.15	
		E			0.15	
		F	18.90	19.10	0.2	
		G	0.20	1.00	0.8	
		H	9.80	10.20	0.4	
Cadeias de cotas		Cadeia	← →		t	

Figura 4.12 - Carta de tolerância - 2ºPasso

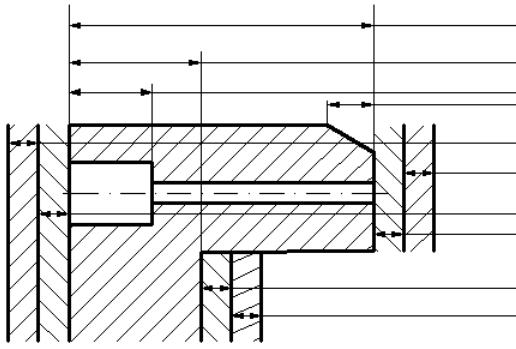
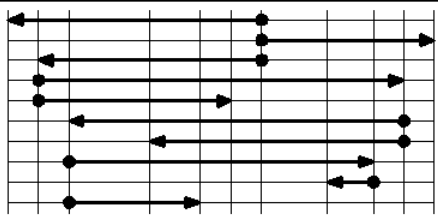
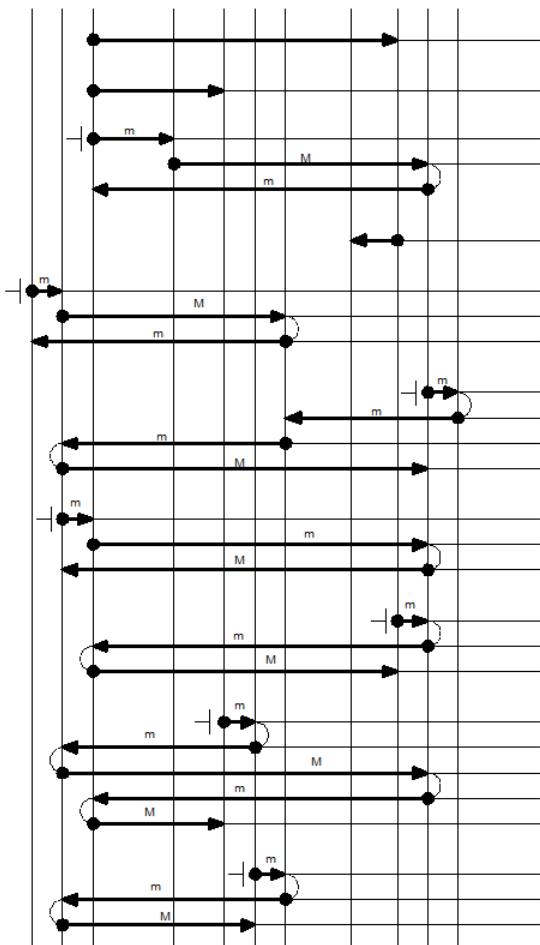
Carta de Tolerância - Cotas Longitudinais		Produto: Peça				
		REF	Mínimo m	Máximo M	t	Cadeia
		1	18.90	19.10	0.2	
		2	9.80	10.20	0.4	
		3	4.85	5.15	0.3	
		4	0.20	1.00	0.8	
		5	0.50			
		6	0.50			
		7	0.20			
		8	0.20			
		9	0.20			
		10	0.50			
Cotas em bruto e elementares						
		B1 B2 A B C D E F G H			0.5 0.3 0.3 0.15 0.15 0.2 0.8 0.4	
Cadeias de cotas		Cadeia			t	
		1	Directa	F	0.2	
		2	Directa	H	0.4	
		3		4.85	0.3	
		E			0.15	
		D			0.15	
		4	Directa	G	0.8	
		5		0.50		
		A			0.5	
		B1				
		6		0.5		
		B2				
		A			0.5	
		B			0.3	
		7		0.20		
		D			0.15	
		B			0.3	
		8		0.20		
		D			0.15	
		F		19.10	0.2	
		9		0.20		
		C			0.3	
		B			0.3	
		D			0.15	
		H		10.20	0.4	
		10		0.50		
		A			0.5	
		C			0.3	

Figura 4.13 - Carta de tolerância - 3ºPasso

4.3.4 4º Passo de resolução – Cálculo das dimensões mínimas e máximas para cada cadeia de cota

Neste 4º e último passo de resolução deve-se proceder ao cálculo das cadeias de cotas definidas anteriormente. Deve-se começar pelas cadeias de cotas com o mínimo de incógnitas possíveis, ou seja, vai-se começar pelas cadeias de cotas que incluem F, G ou H. Isto para evitar que se tenha uma equação com mais de uma incógnita. Por exemplo, começando pela cadeia 3.

- ▶ Cadeia 3 (Figura 4.14):

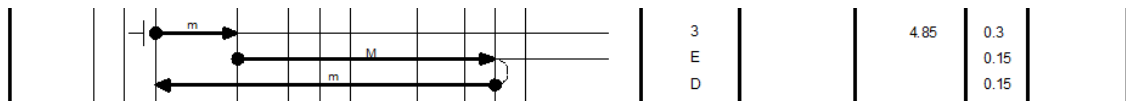


Figura 4.14 - Cadeia 3 (tentativa)

Utilizando os conhecimentos adquiridos em 4.2.1 obtém-se:

$3_m + E_M = D_m \Leftrightarrow 9,80 + E_M = D_m$, sendo E e D ainda uma incógnita está-se perante uma equação com duas incógnitas, pelo que não é possível concluir quais os valores para E e D.

Sendo assim, deve-se, como referido anteriormente, começar pelas cadeias de cotas que incluem F, G ou H visto estas serem as cotas directas e já se conhecer os seus valores.

Neste caso vai-se começar pela cadeia de cota 8.

- ▶ Cadeia 8 (Figura 4.15):

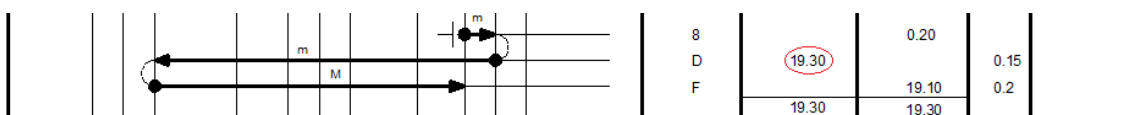


Figura 4.15 - Cadeia 8

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$8_m + F_M = D_m \Leftrightarrow 0,20 + 19,10 = D_m \Leftrightarrow D_m = 19,30$ e um vez que a tolerância para D é 0,15 então $D_M = 19,30 + t_D = 19,30 + 0,15 = 19,45$.

- ▶ Cadeia 3 (Figura 4.16):

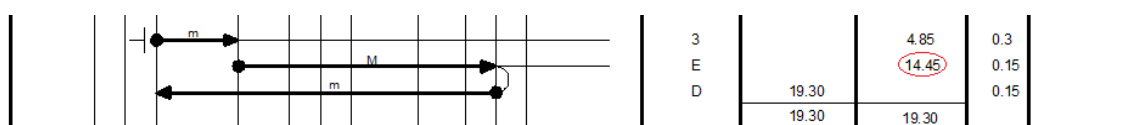


Figura 4.16 - Cadeia 3

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$3_m + E_M = D_m \Leftrightarrow 4,85 + E_M = 19,30 \Leftrightarrow E_M = 19,30 - 4,85 = 14,45$, sendo $t_E = 0,15$ obtém-se $E_m = 14,45 - 0,15 = 14,30$.

► Cadeia 7 (Figura 4.17):

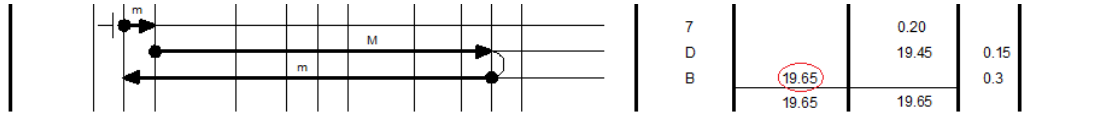


Figura 4.17 - Cadeia 7

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$7_m + D_M = B_m \Leftrightarrow 0,20 + 19,45 = B_m \Leftrightarrow B_m = 19,65$, sendo $t_B = 0,30$ obtém-se $B_M = 19,65 + 0,30 = 19,95$.

► Cadeia 9, Figura 4.18:

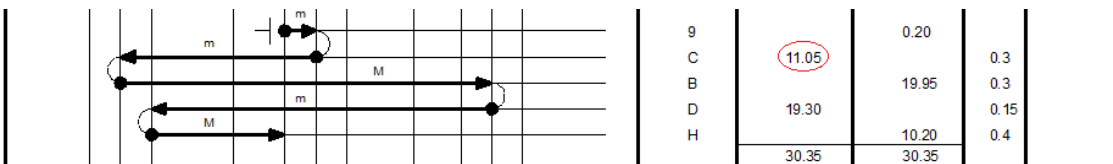


Figura 4.18 - Cadeia 9

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$9_m + B_M + H_M = C_m + D_m \Leftrightarrow 0,20 + 19,95 + 10,20 - 19,30 = C_m \Leftrightarrow C_m = 11,05$, sendo $t_C = 0,3$ obtém-se $C_M = 11,05 + 0,30 = 11,35$.

► Cadeia 10, Figura 4.19:

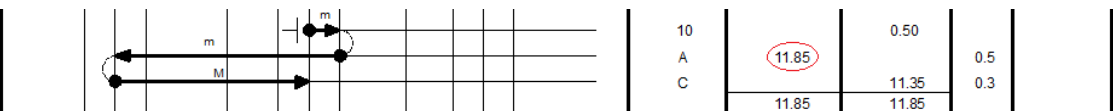


Figura 4.19 - Cadeia 10

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$10_m + C_M = A_m \Leftrightarrow A_m = 0,50 + 11,35 = 11,85$, sendo $t_A = 0,5$ obtém-se $A_M = 11,85 + 0,50 = 12,35$.

► Cadeia 5, Figura 4.20:

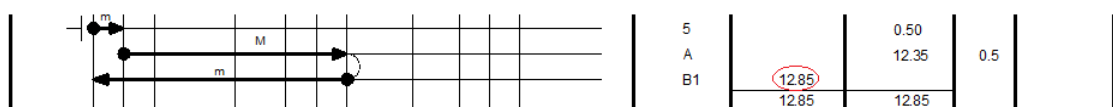


Figura 4.20 - Cadeia 5

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$5_m + A_M = B1_m \Leftrightarrow B1_m = 0,50 + 12,35 = 12,85$.

► Cadeia 6, Figura 4.21:

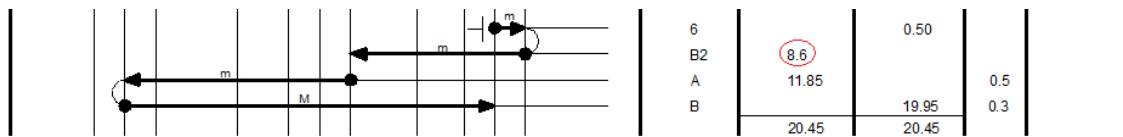


Figura 4.21 - Cadeia 6

Resolvendo a cadeia de vectores obtém-se:

$$6_m + B_M = B_{2m} + A_m \Leftrightarrow B_{2m} = 0,50 + 19,95 - 11,85 = 8,60.$$

Uma vez calculadas todas as cadeias deve-se proceder ao preenchimento da carta de tolerâncias (Figura 4.22).

Por vezes, em determinadas cadeias de cotas, quando a cadeia de cotas compreende mais de três cotas elementares, como é o exemplo das cadeias 9 e 6, ou quando a soma das tolerâncias for superior a um milímetro deve-se optar por escolher uma espessura mínima inferior. Para isso, é comum recorrer aos valores indicados na Tabela 7.

Tabela 7 – Espessura mínima a ser arbitrada (adaptado de [18])

Número de cotas elementares existentes na cadeia	2 a 3		Mais de 3
Superfície a ser maquinada	Plana	Raio	Plana
Espessura mínima para:	(em mm)		
Desbaste	0,30	0,50	0,20
Semi acabamento	0,20	0,30	0,10
Acabamento	0,10	0,20	0,05
1ª Rectificação	0,05	0,10	0,00

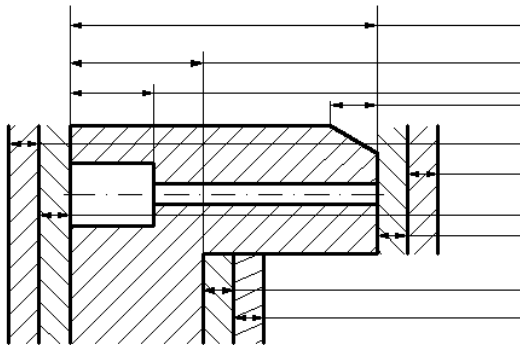
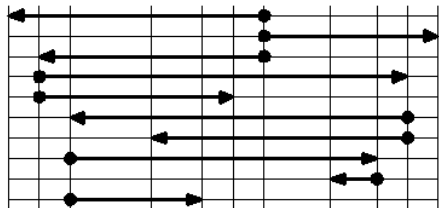
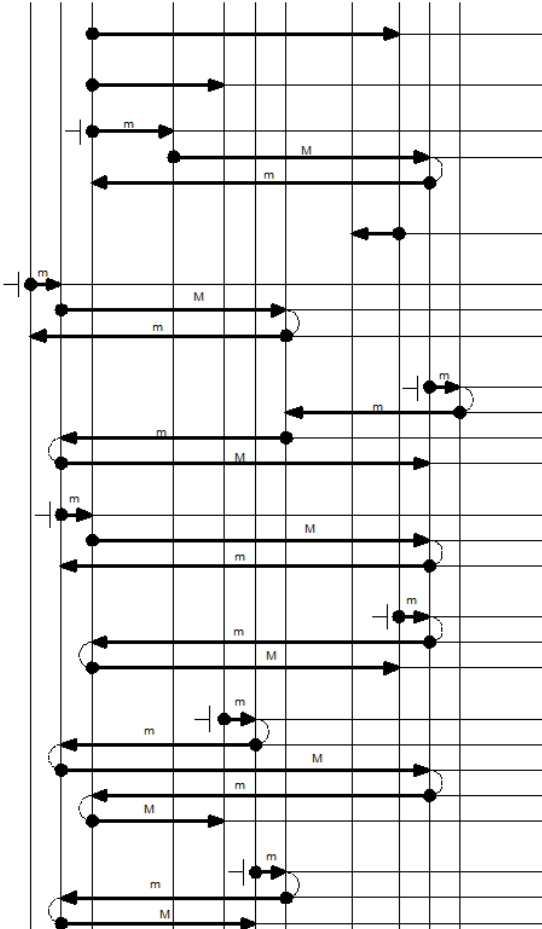
Carta de Tolerância - Cotas Longitudinais		Produto: Peça				
		REF	Mínimo m	Máximo M	t	Cadeia
		1	18.90	19.10	0.2	
		2	9.80	10.20	0.4	
		3	4.85	5.15	0.3	
		4	0.20	1.00	0.8	
		5	0.50			
		6	0.50			
		7	0.20			
		8	0.20			
		9	0.20			
		10	0.50			
Cotas em bruto e elementares						
	OP 10	B1	12.90			5
	OP 10	B2	8.60			6
	OP 20	A	11.85	12.35	0.5	10
	OP 30	B	19.65	19.95	0.3	7
	OP 40	C	11.05	11.35	0.3	9
	OP 50	D	19.30	19.45	0.15	8
	OP 60	E	14.30	14.45	0.15	3
	OP 60	F	18.90	19.10	0.2	1
		G	0.20	1.00	0.8	4
		H	9.80	10.20	0.4	2
Cadeias de cotas		Cadeia			t	
	1	Directa	F	0.2		
	2	Directa	H	0.4		
	3		4.85	0.3		
	E		14.45	0.15		
	D	19.30		0.15		
	4	19.30	19.30	0.8		
		Directa	G			
	5		0.50	0.5		
	A		12.35			
	B1	12.85		0.5		
		12.85	12.85			
	6		0.50	0.3		
	B2	8.6				
	A	11.85		0.15		
	B		19.95			
		20.45	20.45	0.2		
	7		0.20			
	D		19.45	0.3		
	B	19.65				
		19.65	19.65	0.15		
	8		0.20			
	D	19.30		0.2		
	F		19.10			
		19.30	19.30	0.3		
	9		0.20			
	C	11.05		0.3		
	B		19.95			
	D	19.30		0.4		
	H		10.20			
		30.35	30.35	0.5		
	10		0.50			
	A	11.85		0.3		
	C		11.35			
		11.85	11.85			

Figura 4.22 - Carta de tolerância final

5 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

5.1 Aplicação do Método dos ΔL ao caso tratado pelo método das cartas de tolerâncias

Neste capítulo pretende-se apresentar o resultado da aplicação do método dos ΔL na peça que foi alvo de estudo em 4.3, de modo a conseguir-se realizar um estudo comparativo de qual o melhor método. Assim sendo, a peça que se pretende estudar e as cotas que serão alvo de estudos apresentam-se respectivamente nas Figura 4.9 e Figura 4.10.

5.1.1 Etapa 1- Seleção de cotas

Como se pode observar na Figura 4.10, há quatro cotas bilaterais que devem ser alvo de estudo e às quais o desenho de fabrico deve corresponder. Tem-se então as seguintes cotas:

- $19,00 \pm 0,1$;
- $10,00 \pm 0,2$;
- $5,00 \pm 0,15$;
- $0,6 \pm 0,4$.

5.1.2 Etapa 2 – Proposta de realização da peça

Esta peça será resultado de vários processos de maquinação sobre um disco que será proveniente de um varão o qual, será cortado com recurso a uma serra:

- Torneamento de desbaste e de acabamento;
- Torneamento de desbaste, de acabamento e realizar o chanfro;
- Furação;
- As respectivas fixações das peças para cada fase são apresentadas na Etapa 3.

5.1.3 Etapa 3 – Simulação de fabrico

Como simulação de fabrico foi sugerida a ordem de maquinação representada na Figura 5.1.

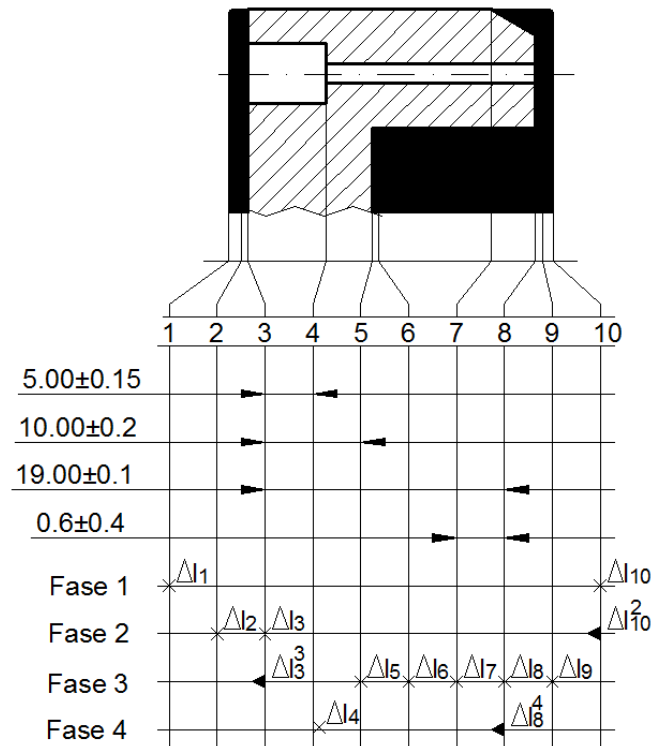


Figura 5.1 - Simulação de fabricação

5.1.4 Etapa 4 - Calculo dos IT impostos

Deve-se realizar o cálculo dos IT impostos pelas cotas bilaterais:

- 1) A expressão de tolerância da cota de fabrico $Cf_{3,4}$ corresponde à cota funcional $5,00 \pm 0,15$ entre as faces 3 e 4 na qual tem-se a seguinte relação:

$$\Delta Cf_{3,4} = \underbrace{\Delta l_3^3 + \Delta l_8^4}_{\Delta Cf_{3,8}^3} + \underbrace{\Delta l_8^4 + \Delta l_4}_{\Delta Cf_{4,8}^4} \leq 0,3$$

- 2) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{3,5}$ corresponde à cota funcional $10,00 \pm 0,2$ entre as faces 3 e 5:

$$\Delta Cf_{3,5} = \Delta l_3^3 + \Delta l_5 \leq 0,4$$

- 3) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{3,8}$ corresponde à cota funcional $19,00 \pm 0,1$ entre as faces 3 e 8:

$$\Delta Cf_{3,8} = \Delta l_3^3 + \Delta l_8 \leq 0,2$$

- 4) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{3,5}$ corresponde à cota funcional $0,60 \pm 0,4$ entre as faces 7 e 8:

$$\Delta Cf_{7,8} = \Delta l_7 + \Delta l_8 \leq 0,8$$

Por uma questão de simplificação de análise dos IT anteriormente estudados, deve-se colocar sob a forma de tabela, obtendo-se deste modo a Tabela 8.

Tabela 8 - Relações de cotas

Cotas	Superfícies	Relações	IT
5,00±0,15	3-4	$\Delta l_3^3 + \Delta l_8 + \Delta l_8^4 + \Delta l_4$	0,3
10,00±0,2	3-5	$\Delta l_3^3 + \Delta l_5$	0,4
19,00±0,1	3-8	$\Delta l_3^3 + \Delta l_8$	0,2
0,60±0,4	7-8	$\Delta l_7 + \Delta l_8$	0,8

5.1.5 Etapa 5 - Optimização

Seguindo o mesmo procedimento apresentado no Capítulo 3, deve-se começar por realizar uma tabela na qual se introduz as superfícies intervenientes nas cotas bilaterais definidas, e proceder à sua optimização. Resulta desta forma a Tabela 9, a Tabela 10, a Tabela 11 e a Tabela 12.

Os valores obtidos são:

$$\Delta l_4 = 0,075 ; \Delta l_5 = 0,325 ; \Delta l_7 = 0,725 ; \Delta l_8 = 0,075 ; \Delta l_3^3 = 0,075 ; \Delta l_8^4 = 0,075$$

Observando a Figura 5.1, observa-se que nem todas as dispersões estão ainda definidas. Observando a Figura 5.1, observa-se que nem todas as dispersões estão ainda definidas. Isto deve-se ao facto destes intervalos não estarem constrangidos pelas cotas bilaterais. Assim definiu-se que as dispersões em falta corresponderiam às seguintes:

$$\Delta l_2 = 0,15 ; \Delta l_3 = 0,075 ; \Delta l_6 = 0,15 ; \Delta l_9 = 0,15 , \Delta l_{10}^2 = 0,15$$

Ou seja, as dispersões definidas e as dispersões arbitradas são as representadas na Tabela 13.

Tabela 9 - Dispersões envolvidas

Dim	S	≤IT	Δl_4	Δl_5	Δl_7	Δl_8	Δl_3^3	Δl_8^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
5,00	3-4	0,3	X			X	X	X	0,3	4	0,075	
10,00	3-5	0,4		X			X		0,4	2	0,2	
19,00	3-9	0,2				X	X		0,2	2	0,1	
0,60	7-9	0,8			X	X			0,8	2	0,4	

Tabela 10 - Substituição dos valores das dispersões

Dim	S	$\leq IT$	Δl_4	Δl_5	Δl_7	Δl_8	Δl_3^3	Δl_8^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
5,00	3-4	0,3	0,075			0,075	0,075	0,075	0,3	4	0,075	
10,00	3-5	0,4		0,2			0,2		0,4	2	0,2	
19,00	3-9	0,2				0,1	0,1		0,2	2	0,1	
0,60	7-9	0,8			0,4	0,4			0,8	2	0,4	

Tabela 11 - 1ª optimização

Dim	S	$\leq IT$	Δl_4	Δl_5	Δl_7	Δl_8	Δl_3^3	Δl_8^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	0	1	1	0	0	0	-	-	-	-
5,00	3-4	0,3	<u>0,075</u>			<u>0,075</u>	<u>0,075</u>	<u>0,075</u>	0,3	4	0,075	0
10,00	3-5	0,4		0,2			0,075		0,275	2	0,138	0,125
19,00	3-9	0,2				0,075	0,075		0,15	2	0,075	0,05
0,60	7-9	0,8			0,4	0,075			0,475	2	0,238	0,325

Tabela 12 - 2ª optimização

Dim	S	$\leq IT$	Δl_4	Δl_5	Δl_7	Δl_8	Δl_3^3	Δl_8^4	Σ	n	Σ/n	R
Coef	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
5,00	3-4	0,3	0,075			0,075	0,075	0,075	0,3	4	-	0
10,00	3-5	0,4		0,325			0,075		0,4	2	-	0
19,00	3-9	0,2				0,075	0,075		0,15	2	-	0,05
0,60	7-9	0,8			0,725	0,075			0,8	2	-	0

Tabela 13 - Valor das dispersões definidas e arbitradas

Dispersões definidas	Dispersões arbitradas
$\Delta l_4 = 0,075$	$\Delta l_2 = 0,15$
$\Delta l_5 = 0,325$	$\Delta l_3 = 0,075$
$\Delta l_7 = 0,725$	$\Delta l_6 = 0,15$
$\Delta l_8 = 0,075$	$\Delta l_9 = 0,15$
$\Delta l_3^3 = 0,075$	$\Delta l_{10}^2 = 0,15$

5.1.6 Etapa 6 - Cálculo dos IT totais

De modo a ser mais directa a análise comparativa dos resultados finais das cotas de fabrico através deste método dos ΔL com o método das cartas de tolerância, optou-se por definir os mesmos valores de desbaste e de acabamento, com 0,5 e 0,2 mm respectivamente.

5) O IT entre as superfícies 1 e 2, espessura de desbaste:

$$\Delta C_{f_{1,2}} = \underbrace{\Delta l_1 + \Delta l_{10}}_{\Delta C_{f_{1,10}}} + \underbrace{\Delta l_{10}^2 + \Delta l_2}_{\Delta C_{f_{10,2}}} = 0,5 + 0,15 + 0,15 = 0,8$$

6) O IT entre as superfícies 2 e 3, espessura de acabamento:

$$\Delta C_{f_{2,3}} = \Delta l_2 + \Delta l_3 = 0,15 + 0,075 = 0,225$$

7) O IT entre as superfícies 5 e 6, espessura de acabamento:

$$\Delta C_{f_{5,6}} = \Delta l_5 + \Delta l_6 = 0,325 + 0,15 = 0,475$$

8) O IT entre as superfícies 8 e 9, espessura de acabamento:

$$\Delta C_{f_{8,9}} = \Delta l_8 + \Delta l_9 = 0,075 + 0,15 = 0,225$$

9) O IT entre as superfícies 9 e 10, espessura de desbaste:

$$\Delta C_{f_{9,10}} = \underbrace{\Delta l_9 + \Delta l_3^3}_{\Delta C_{f_{9,3}}} + \underbrace{\Delta l_3 + \Delta l_{10}^2}_{\Delta C_{f_{3,10}}} = 0,15 + 0,075 + 0,075 + 0,15 = 0,8$$

5.1.7 Etapa 7 – Cálculo das cotas médias de fabrico

O número de cotas médias de fabrico médio corresponde a n-1 dimensões médias independentes, logo, uma vez que se tem 10 superfícies tem-se 9 dimensões médias:

$$\bar{d} = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Sendo estas dimensões médias:

$$\overline{d_{3,4}} = 5,00$$

$$\overline{d_{3,5}} = 10,00$$

$$\overline{d_{3,8}} = 19,00$$

$$\overline{d_{7,8}} = 0,60$$

$$\overline{d_{1,2}} = 0,50 \text{ min} + \frac{\Delta C_{f_{1,2}}}{2} = 0,50 + \frac{0,8}{2} = 0,9$$

$$\overline{d_{2,3}} = 0,20 \text{ min} + \frac{\Delta C_{f_{2,3}}}{2} = 0,20 + \frac{0,225}{2} = 0,312$$

$$\overline{d_{5,6}} = 0,20 \text{ min} + \frac{\Delta C_{f_{5,6}}}{2} = 0,20 + \frac{0,475}{2} = 0,437$$

$$\overline{d_{8,9}} = 0,20 \text{ min} + \frac{\Delta C_{f_{8,9}}}{2} = 0,20 + \frac{0,225}{2} = 0,312$$

$$\overline{d_{9,10}} = 0,50 \text{ min} + \frac{\Delta C_{f_{9,10}}}{2} = 0,50 + \frac{0,8}{2} = 0,9$$

5.1.8 Etapa 8 – Cotas de fabrico finais para cada fase

Fase 1:

$$C_{f_{1,10}} = (\overline{d_{1,2}} + \overline{d_{2,3}} + \overline{d_{3,8}} + \overline{d_{8,9}} + \overline{d_{9,10}}) \pm \frac{\Delta l_1 + \Delta l_{10}}{2} = (0,90 + 0,312 + 19,00 + 0,312 + 0,90) \pm \frac{0,5}{2} = 21,424 \pm 0,25$$

As cotas de fabrico da fase 1 estão representadas em A Tabela 14.

Fase 2:

$$C_{f_{2,10}} = (\overline{d_{2,3}} + \overline{d_{3,8}} + \overline{d_{8,9}} + \overline{d_{9,10}}) \pm \frac{\Delta l_2 + \Delta l_{10}^2}{2} = (0,312 + 19,00 + 0,312 + 0,90) \pm \frac{0,3}{2} = 20,524 \pm 0,15$$

$$C_{f_{2,3}} = (\overline{d_{2,3}}) \pm \frac{\Delta l_2 + \Delta l_3}{2} = 0,312 \pm \frac{0,225}{2} = 0,312 \pm 0,112$$

As cotas de fabrico da fase 2 estão representadas em B Tabela 14.

Fase 3:

$$C_{f_{3,5}} = \overline{d_{3,5}} \pm \frac{\Delta l_3 + \Delta l_5}{2} = 10,00 \pm \frac{0,4}{2} = 10,00 \pm 0,20$$

$$C_{f_{5,6}} = \overline{d_{5,6}} \pm \frac{\Delta l_5 + \Delta l_6}{2} = 0,437 \pm \frac{0,475}{2} = 0,437 \pm 0,237$$

$$C_{f_{7,8}} = \overline{d_{7,8}} \pm \frac{\Delta l_7 + \Delta l_8}{2} = 0,60 \pm \frac{0,8}{2} = 0,6 \pm 0,40$$

$$C_{f_{8,9}} = \overline{d_{8,9}} \pm \frac{\Delta l_8 + \Delta l_9}{2} = 0,312 \pm \frac{0,225}{2} = 0,312 \pm 0,112$$

$$C_{f_{3,8}} = \overline{d_{3,8}} \pm \frac{\Delta l_3^3 + \Delta l_8}{2} = 19,00 \pm \frac{0,15}{2} = 19,00 \pm 0,075$$

As cotas de fabrico da fase 3 estão representadas em C Tabela 14.

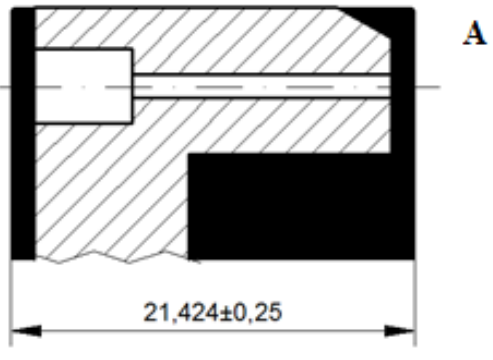
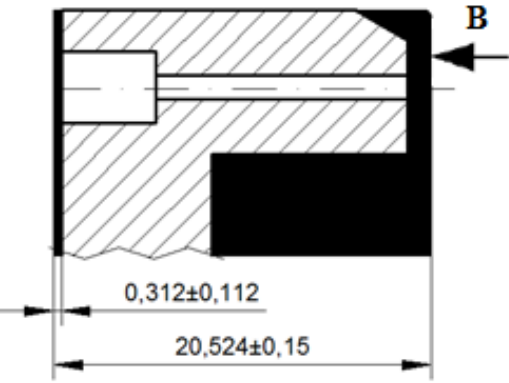
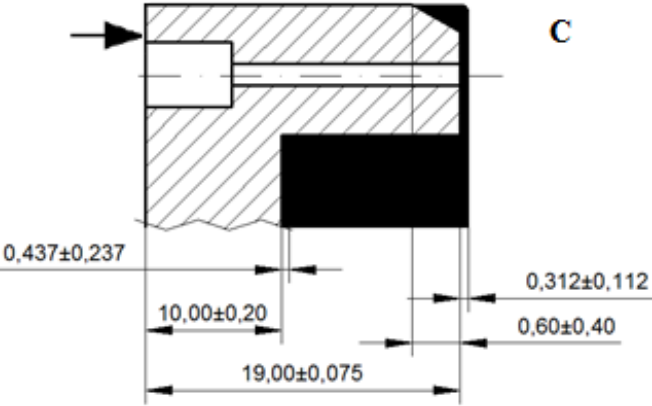
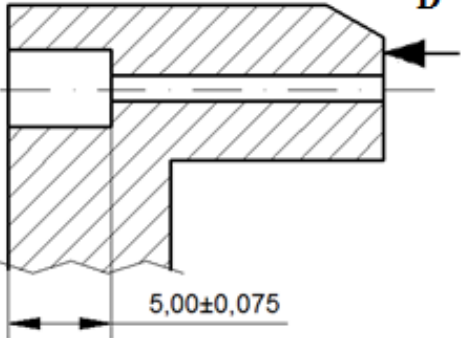
Fase 4:

$$C_{f_{3,4}} = \overline{d_{3,4}} \pm \frac{\Delta l_3^3 + \Delta l_4}{2} = 5,00 \pm \frac{0,15}{2} = 5,00 \pm 0,075$$

A cota de fabrico da fase 4 está representada em D Tabela 14.

A Tabela 14 apresenta a síntese das cotas de fabrico obtidas pelo método dos ΔL .

Tabela 14 - Resumo das cotas finais obtidas pelo método dos ΔL

Fase 1 $Cf_{1,10} = 21,424 \pm 0,25$	 Diagram A shows a cross-section of a mechanical part. A horizontal dimension line at the bottom indicates a length of $21,424 \pm 0,25$. The part has a hatched upper section and a solid black lower section. A small rectangular feature is visible on the left side.
Fase 2 $Cf_{2,10} = 20,524 \pm 0,15$ $Cf_{2,3} = 0,312 \pm 0,112$	 Diagram B shows a cross-section of the same mechanical part. Two horizontal dimension lines are present: one at the bottom indicating $20,524 \pm 0,15$ and another above it indicating $0,312 \pm 0,112$. An arrow labeled 'B' points to the right side of the part.
Fase 3 $Cf_{3,5} = 10,00 \pm 0,20$ $Cf_{5,6} = 0,437 \pm 0,237$ $Cf_{7,8} = 0,6 \pm 0,40$ $Cf_{8,9} = 0,312 \pm 0,112$ $Cf_{3,8} = 19,00 \pm 0,075$	 Diagram C shows a cross-section of the mechanical part with several dimensions. From left to right, the dimensions are: $0,437 \pm 0,237$, $10,00 \pm 0,20$, $0,312 \pm 0,112$, $0,60 \pm 0,40$, and a total dimension of $19,00 \pm 0,075$ at the bottom. An arrow points to the left side of the part.
Fase 4 $Cf_{3,4} = 5,00 \pm 0,075$	 Diagram D shows a cross-section of the mechanical part. A horizontal dimension line at the bottom indicates a length of $5,00 \pm 0,075$. An arrow labeled 'D' points to the right side of the part.

5.2 Resultado da comparação

Neste ponto pretende-se fazer a comparação dos dois métodos, o método dos ΔL o método das cartas de tolerâncias. Como se pode constatar da leitura dos capítulos anteriores são ambos métodos de toleranciamento usados para preparação de trabalho para fabrico. Significa isto que ambos partem do desenho de definição do produto e resultam no desenho de fabrico apresentando as várias fases de maquinação. Desta forma, permitem o controlo dimensional durante as várias fases de maquinação.

Tal como foi dito na introdução desta dissertação, este assunto é normalmente omissa na formação em engenharia, porém é de extrema importância na indústria, em particular no fabrico em série, uma vez que quando se trata de produzir em grandes séries, é essencial garantir que as peças estão conforme o especificado, caso contrário, a empresa pode sujeitar-se a grandes prejuízos.

O estudo das etapas que constituem o processo de fabrico requer um conhecimento elevado das tolerâncias e desvios inerentes aos vários processos de maquinação. Por isso, é importante ter conhecimento das tolerâncias e desvios inerentes aos vários processos de maquinação pelo facto de possibilitar deste modo a repartição das tolerâncias pelas várias fases de maquinação ou pelas várias peças que constituem componentes de uma montagem. Significa isto que, por exemplo, numa montagem entre duas peças, inevitavelmente uma delas será mais fácil de obter que a outra. Ou seja, seria conveniente aumentar a tolerância nas peças mais difíceis/caras de produzir e reduzir a tolerância nas peças mais baratas, mantendo a tolerância total do conjunto dentro dos limites especificados no projecto. Como primeira abordagem a esse estudo poder-se-ia usar o Software Matlab e com recurso ao código presente em ANEXOS-A1 Código em Matlab seria possível estudar a capacidade⁸ de determinado processo e assim proceder à distribuição de tolerâncias entre os vários componentes [22]. Que como se pode observar o Matlab tem uma função específica para este tipo de estudo o que facilmente se consegue perceber entre que valores se está a trabalhar e quais os processos de maquinação mais capazes, sendo deste modo possível proceder à repartição de tolerância entre os vários componentes que constituem uma montagem.

As tolerâncias estudadas neste caso tratam-se das tolerâncias de montagem e das tolerâncias dos componentes. Sendo a primeira geralmente especificada com bases nos requisitos de desempenho, que tanto podem ser de aperto, incerto ou folga conforme seja

⁸ Mais conhecido pelo termo inglês *capability*.

conveniente para cada função, ao passo que as tolerâncias dos componentes estão sobretudo relacionadas com a capacidade do processo produtivo sendo a sua análise condicionada pela condição de montagem. Esquemáticamente pode representar-se esta análise segundo a Figura 5.2.

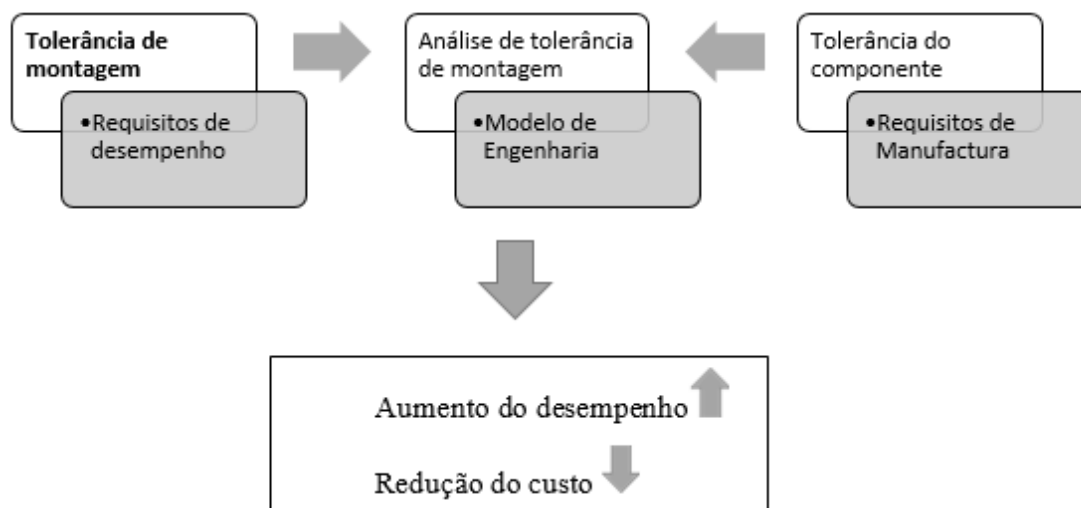


Figura 5.2 - Cadeia de análise de tolerâncias

Neste caso, o “trabalho da engenharia” apresenta-se como uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento sustentável das produções em grandes séries no que concerne em encontrar uma boa relação para as tolerâncias, de forma a procurar um melhor desempenho associado a uma redução dos custos de fabrico [3].

Uma vez presente a importância do trabalho de preparação de fabrico percebe-se que é determinante para a preparação do trabalho de fabrico ter um método que nos auxilie nesse campo. Sendo assim, procedeu-se à comparação dos dois métodos afim de seleccionar qual o melhor para ser implementado num suporte informático (Microsoft Excel, VBA).

Como primeira abordagem sugere-se a análise do *modus operandi* de cada um dos métodos (Figura 3.1 e Figura 4.8) que, como se pode observar, são ambos muito bem estruturados e seguem uma sequência lógica de operações que, quando cumpridas, resultam numa ferramenta de auxílio na obtenção de desenhos de fabrico.

De 4.3 e de 5.1 obtiveram-se dois resultados diferentes para a mesma peça porém partilham evidentemente algumas semelhanças. Convém relembrar que a peça na qual foi aplicado o método das cartas de tolerâncias provinha de uma peça forjada já com uma forma semelhante à final ao passo que no método dos ΔL provinha de uma bolacha resultante de um varão. Logo, é de prever que no primeiro método exista mais uma cota

que no segundo, uma vez que no primeiro seria necessário garantir uma espessura mínima para acabamento e desbaste ao passo que na segunda a espessura para desbaste seria automaticamente garantida. Agrupando todas as cotas no mesmo desenho obtém-se a Figura 5.3 e a Figura 5.4.

Uma das principais características que leva à selecção do método dos ΔL reside no facto de este contemplar as dispersões nos apoios, apertos e apresentar de forma destacada as várias fases de maquinação. O facto de considerar as dispersões nos apertos e nos apoios constituiu uma vantagem em comparação com o método das cartas de tolerâncias, visto que o aperto da peça condiciona o processo de maquinação. Outras observações podem ser vistas na Tabela 15.

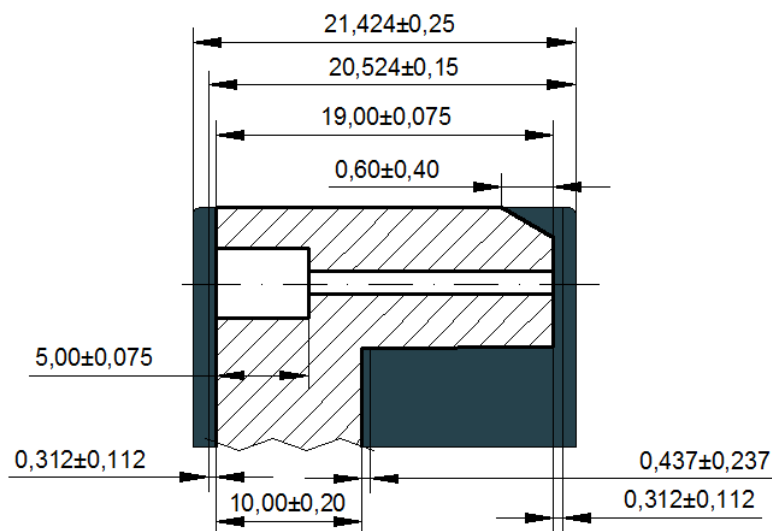


Figura 5.3 - Resultado final obtido pelo método dos ΔL

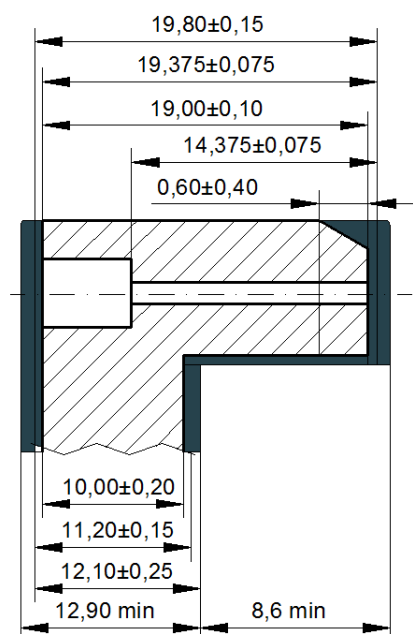


Figura 5.4 - Resultado final obtido pelo método das cartas de tolerâncias

Tabela 15 - Comparação dos métodos dos ΔL e das cartas de tolerâncias

Comparação dos dois métodos		
Crítérios de comparação	Método dos ΔL	Método das cartas de tolerâncias
Explicita apoios?	Sim	Não
Atribui dispersão aos apertos?	Sim	Não
Maior perceptibilidade das fases de maquinação?	Sim	Não
Explicita as cadeias de cotas do processo de atribuição de tolerâncias nas diversas fases?	Sim	Sim
Facilidade de distribuição de tarefas por várias empresas?	Sim	Não
Permite obter as tolerâncias para cada fase de fabrico?	Sim	Não
Garante a existência de material para desbaste?	Sim	Sim
Possibilita perceber se especificações de projecto são economicamente viáveis?	Sim	Sim
Permite apurar se cotas de fabrico satisfazem cotas de definição?	Sim	Sim

6 APLICAÇÃO INFORMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DE REPARTIÇÃO DE TOLERÂNCIAS NO MÉTODO DOS ΔL

6.1 Introdução

Uma das actividades inicialmente propostas para realizar ao longo desta dissertação consistiu em desenvolver uma aplicação informática que servisse de apoio a um dos métodos de preparação de fabrico. Com base no capítulo anterior decidiu-se que o suporte informático seria aplicado para o Método dos ΔL .

Optou-se por realizar esta aplicação informática no Microsoft Excel, mais concretamente em VBA por ser uma ferramenta com os recursos ideais para este tipo de aplicações. Soma-se ainda a vantagem de ser um programa de acesso fácil.

Da leitura dos capítulos anteriores pode-se constatar que o método dos ΔL tem várias etapas, no entanto, a etapa 5 (optimização da repartição de tolerâncias) é a mais morosa e complexa no que consta a cálculos e por outro lado é a única que pode ser automatizada pelo que a escolha da etapa a ser automatizada recaiu nesta mesma etapa. Com recurso a esta aplicação é possível otimizar as dispersões das superfícies funcionais relacionadas entre si por cotas funcionais.

6.2 Fluxograma e modo de utilização

A inserção de dados no programa e a realização das várias etapas propostas na sua resolução demoram cerca de 3 minutos e a sua resolução segue a sequência apresentada na Figura 6.1. O tempo de inserção dos valores, quais as superfícies envolventes em cada dimensão toleranciada, está também associado ao conhecimento do utilizador, caso não se trate da primeira vez que recorre ao suporte informático não terá de ler todas as instruções e demorará menos de 3 minutos. Por outro lado, caso se decida resolver esta etapa manualmente facilmente está-se perante um exercício que pode levar mais de uma hora e passível de cometer erros. Por esta mesma razão quanto mais complexa for a peça, ou por outras palavras, quantas mais dimensões e dispersões estiverem envolvidas no toleranciamento mais vantajosa se torna a utilização desta aplicação informática.

Relativamente à interface do programa procurou-se fazer algo simples e intuitivo, resultando deste modo na Figura 6.2. O mesmo se fez para as várias etapas de resolução, no entanto, apesar de existirem instruções em cada passo de resolução incluiu-se no

programa um manual do utilizador resumido (onde é possível compreender a função de cada botão) na interface da aplicação e ainda em um manual detalhado em ANEXOS-A3 Manual do utilizador. Da observação da Figura 6.2 constata-se que existem vários botões no qual cada um tem a seguinte função:

- O **Manual do utilizador** permite aceder a uma pequeno resumo breve explicação da utilidade de cada botão;
- O **1ºPasso** serve para construir a primeira tabela que será o ponto de partida para a resolução deste problema, uma vez que, irá definir as dimensões tolerânciadas (Dim), as suas superfícies envolventes (Sup), o respectivo intervalo de tolerância (IT), e o número de dispersões (Delta L) envolvidas nessas dimensões tolerânciadas;
- O **2ºPasso** serve para identificar quais as dispersões que correspondem a cada dimensão com o número 100 e ainda para identificar o nome de cada DeltaL;
- No **3ºPasso** serve para copiar a segunda coluna. Uma vez copiada a tabela, vai-se substituir os valores de 100 pelos valores correctos.
- O **Mínimo** serve para encontrar o menor valor de cada coluna (menor valor dos Delta L) na terceira tabela;
- Na **1ªOptimização** serve para copiar a terceira tabela (compreender os valores mínimos calculados). Esta optimização consiste em verificar se em cada coluna os valores correspondem ao menor valor calculado em Mínimo;
- O **Coef** serve para identificar se o valor do DeltaL já é o menor possível. Caso seja verificado que o valor é efectivamente o menor possível então muda o valor do Coef=1 para Coef=0;
- O **Mudar Soma** serve para procede à correcção do somatório dos DeltaL.
- O **Resto** serve para fazer a diferença entre o IT e o valor do somatório. Sendo um valor indispensável para realizar o passo seguinte, mais concretamente, a 2ªOptimização.
- A **2ª Optimização** consiste na última etapa na qual, onde pretende-se repartir o valor do resto pelas células que ainda não têm Coef=0.

Resolvendo esta aplicação informática, por exemplo com base na Tabela 8 obtém-se as tabelas presentes na Figura 6.3 e como se pode observar correspondem aos valores obtidos no 5.

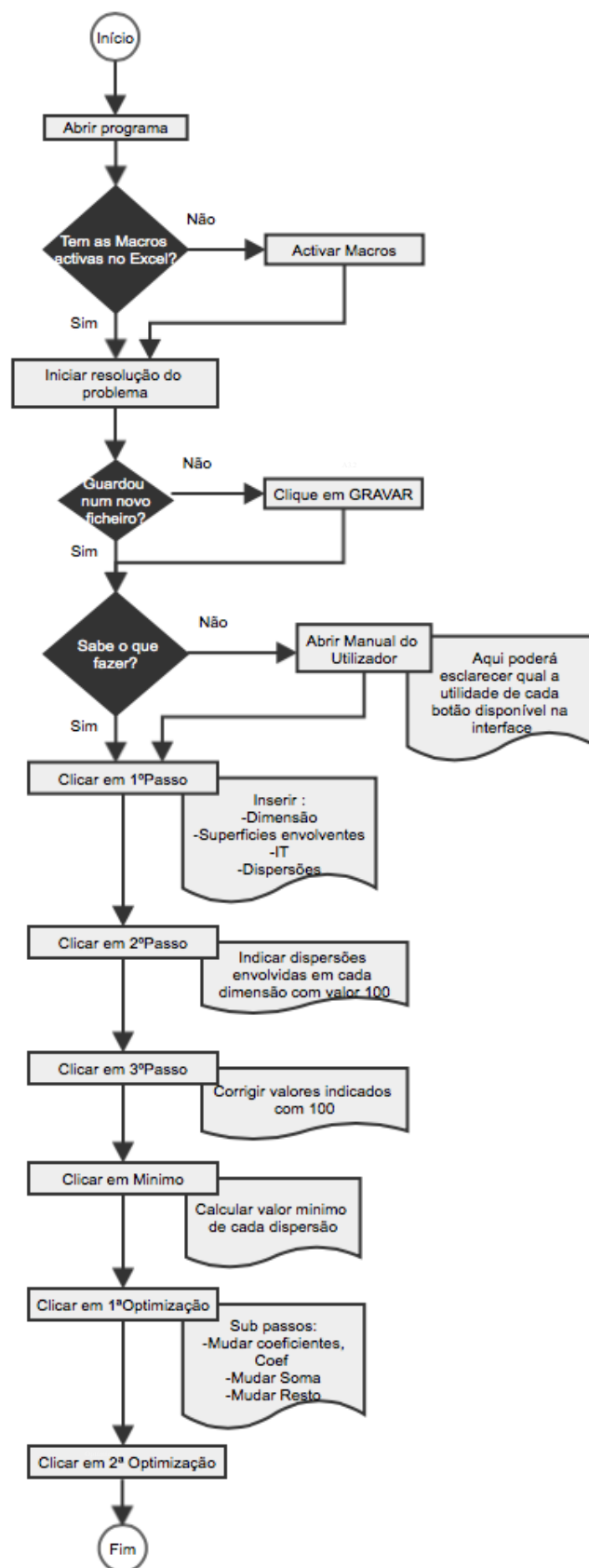


Figura 6.1 - Fluxograma do funcionamento do programa em Excel

Manual do utilizador

GRAVAR

1ºPasso

2ºPasso

3ºPasso

Minimo

1ª
Optimização

Coef

Mudar Soma

Resto

2ª
Optimização

Dim	Sup	<=IT	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	-	-	-	-

Figura 6.2 - Interface da aplicação informática

Dim	Sup	<=IT	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
5	(3)(4)	0,3							0,3			
10	(3)(5)	0,4							0,4			
19	(3)(9)	0,2							0,2			
0,6	(7)(9)	0,8							0,8			

Dim	Sup	<=IT	Delta L4	Delta L5	Delta L7	Delta L8	Delta L3,3	Delta L8,4	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
5	(3)(4)	0,3	100			100	100	100	0,3	4	0,075	
10	(3)(5)	0,4		100			100		0,4	2	0,2	
19	(3)(9)	0,2				100	100		0,2	2	0,1	
0,6	(7)(9)	0,8			100	100			0,8	2	0,4	

Dim	Sup	<=IT	Delta L4	Delta L5	Delta L7	Delta L8	Delta L3,3	Delta L8,4	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
5	(3)(4)	0,3	0,075			0,075	0,075	0,075	0,3	4	0,075	
10	(3)(5)	0,4		0,2			0,2		0,4	2	0,2	
19	(3)(9)	0,2				0,1	0,1		0,2	2	0,1	
0,6	(7)(9)	0,8			0,4	0,4			0,8	2	0,4	
Min/columa			0,075	0,2	0,4	0,075	0,075	0,075				
Min total			0,075									

Dim	Sup	<=IT	Delta L4	Delta L5	Delta L7	Delta L8	Delta L3,3	Delta L8,4	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	0	1	1	0	0	0	-	-	-	-
5	(3)(4)	0,3	0,075			0,075	0,075	0,075	0,3	4	0,075	0
10	(3)(5)	0,4		0,2			0,075		0,275	2	0,1375	0,125
19	(3)(9)	0,2				0,075	0,075		0,15	2	0,075	0,05
0,6	(7)(9)	0,8			0,4	0,075			0,475	2	0,2375	0,325
Min/columa			0,075	0,2	0,4	0,075	0,075	0,075				
Min total			0,075									

Dim	Sup	<=IT	Delta L4	Delta L5	Delta L7	Delta L8	Delta L3,3	Delta L8,4	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
5	(3)(4)	0,3	0,075			0,075	0,075	0,075	0,3	4	0,075	0
10	(3)(5)	0,4		0,325			0,075		0,4	2	0,2	0
19	(3)(9)	0,2				0,075	0,075		0,15	2	0,075	0,05
0,6	(7)(9)	0,8			0,725	0,075			0,8	2	0,4	0
Min/columa			0,075	0,325	0,725	0,075	0,075	0,075				
Min total			0,075									

Figura 6.3 - Resultado final do programa

7 VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DOS ΔL COM CASO DA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

7.1 Produto em estudo

O componente mecânico utilizado neste caso de estudo foi cedido por uma das empresas fornecedoras líderes no sector da indústria automóvel.

A peça utilizada está representada na Figura 7.1 e constitui parte de um compressor de ar condicionado. O desenho técnico encontra-se em ANEXOS-A5 Desenhos técnicos.

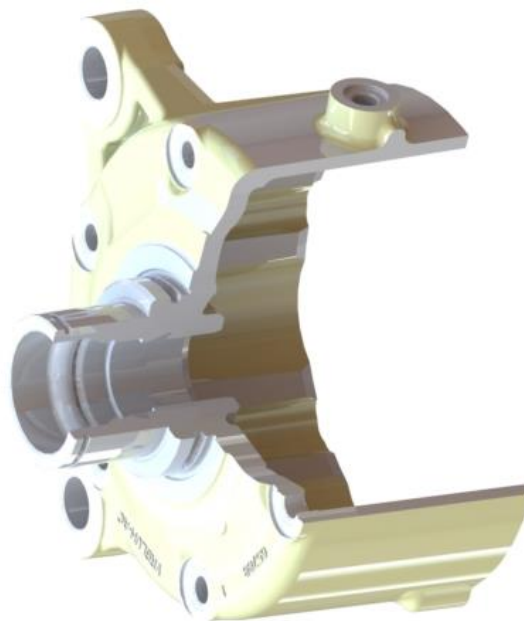


Figura 7.1 – Peça usada para validação do trabalho realizado na dissertação

7.2 Aplicação do método com o programa desenvolvido

Neste capítulo vai aplicar-se o método dos ΔL à maquinação da peça do caso de estudo. Durante a sua aplicação foram feitas algumas considerações, nomeadamente:

- Não se consideram as ferramentas de corte e de aperto em cada operação;
- A espessura mínima de remoção de material para o alumínio é de 0,75 mm [15];
- A peça provém da fundição injectada onde se consegue obter um desvio de 0,25 mm para valores de precisão (este valor foi obtido com recurso a
- Tabela 34 presente nos ANEXOS-A4 Tabelas consultadas), onde se pode observar tendo a peça em estudo aproximadamente 100 mm de comprimento

então tem-se um desvio de $\pm(0,05+3 \times 0,025)$ que corresponde a um IT de 0,25 mm);

- São necessários dois apertos.

7.2.1 Etapa 1- Seleção de cotas

As cotas alvo de estudo neste capítulo são as cotas longitudinais presentes no desenho de maquinação cedido pela empresa (ANEXOS-A5 Desenhos técnicos) no qual foram seleccionadas as cotas toleranciadas representadas na Figura 7.2.

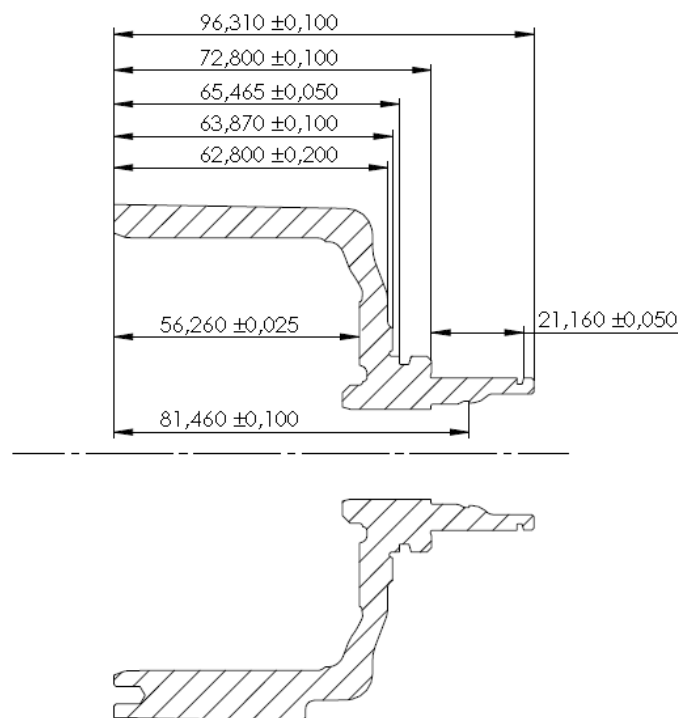


Figura 7.2 – Secção da peça com selecção de cotas toleranciadas longitudinalmente

7.2.2 Etapa 2 – Proposta de realização da peça

Esta peça em alumínio provém de várias fases de maquinação realizadas numa peça em bruto resultante de fundição injectada. O processo de fundição injectada é o processo normalmente usado nestas peças visto ser um processo tecnológico com elevado rigor geométrico, bom acabamento superficial, alta cadência e baixo custo de produção [23]

7.2.3 Etapa 3 – Simulação de fabrico

Para esta peça foi sugerida a simulação de fabrico presente na Figura 7.3. Como se pode observar, a peça final é obtida com recurso a apenas dois apertos (Fase 2 e Fase 3) e existem 15 superfícies que têm de ser maquinadas/toleranciadas.

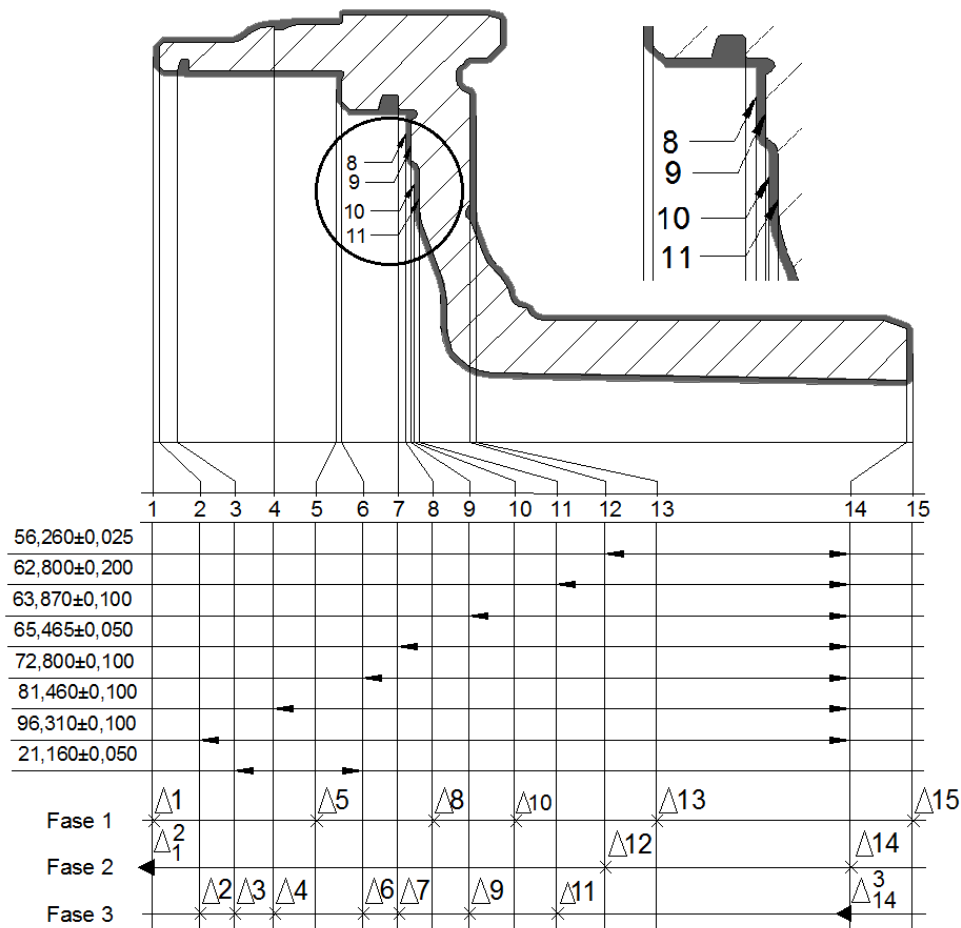


Figura 7.3- Simulação de fabrico da peça do caso de estudo

7.2.4 Etapa 4 - Cálculo dos IT impostos

Uma vez que já se tem a simulação de fabrico, deve-se proceder ao cálculo dos IT impostos pelas cotas bilaterais:

- 1) A expressão de tolerância da cota de fabrico $Cf_{12,14}$ corresponde à cota funcional $56,260 \pm 0,025$ entre as faces 12 e 14, na qual se tem a seguinte relação:

$$\Delta Cf_{12,14} = \Delta l_{12} + \Delta l_{14} \leq 0,05$$

- 2) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{11,14}$ corresponde à cota funcional $62,800 \pm 0,200$ entre as faces 11 e 14:

$$\Delta Cf_{11,14} = \Delta l_{11} + \Delta l_{14}^3 \leq 0,4$$

- 3) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{9,14}$ corresponde à cota funcional $63,870 \pm 0,100$ entre as faces 9 e 14:

$$\Delta Cf_{9,14} = \Delta l_9 + \Delta l_{14}^3 \leq 0,2$$

- 4) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{7,14}$ corresponde à cota funcional $65,465 \pm 0,050$ entre as faces 7 e 14:

$$\Delta Cf_{7,14} = \Delta l_7 + \Delta l_{14}^3 \leq 0,1$$

- 5) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{6,14}$ corresponde à cota funcional $72,800 \pm 0,100$ entre as faces 6 e 14:

$$\Delta Cf_{6,14} = \Delta l_6 + \Delta l_{14}^3 \leq 0,2$$

- 6) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{4,14}$ corresponde à cota funcional $81,460 \pm 0,100$ entre as faces 4 e 14:

$$\Delta Cf_{4,14} = \Delta l_4 + \Delta l_{14}^3 \leq 0,2$$

- 7) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{2,14}$ corresponde à cota funcional $96,310 \pm 0,100$ entre as faces 2 e 14:

$$\Delta Cf_{2,14} = \Delta l_2 + \Delta l_{14}^3 \leq 0,2$$

- 8) A tolerância da cota de fabrico $Cf_{3,6}$ corresponde à cota funcional $21,160 \pm 0,050$ entre as faces 3 e 6:

$$\Delta Cf_{3,6} = \Delta l_3 + \Delta l_6 \leq 0,1$$

7.2.5 Etapa 5 – Optimização

Como apresentado no Capítulo 6, nesta etapa vai ser aplicado o programa informático desenvolvido em VBA, o qual permite a optimização das dispersões das superfícies funcionais, relacionadas entre si por cotas funcionais. Com a sua utilização conseguiu-se obter resultados correctos e em muito menos tempo em comparação com a resolução manual. Na Tabela 16 apresenta-se o resultado obtido com a aplicação informática.

Por sua vez, na Tabela 17 apresentam-se as dispersões obtidas através do Excel e as dispersões arbitradas com base na informação apresentada anteriormente referente à fundição injectada.

Tabela 16 - Optimização das dispersões das superfícies funcionais do caso de estudo

Dim	Sup	<=IT	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Delta L	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
56,26	{12}{14}	0,05											0,05			
62,8	{11}{14}	0,4											0,4			
63,87	{9}{14}	0,2											0,2			
65,465	{7}{14}	0,1											0,1			
72,8	{6}{14}	0,2											0,2			
81,46	{4}{14}	0,2											0,2			
96,31	{2}{14}	0,2											0,2			
21,16	{3}{6}	0,1											0,1			

Dim	Sup	<=IT	Delta L2	Delta L3	Delta L4	Delta L6	Delta L7	Delta L9	Delta L11	Delta L12	Delta L14	Delta L14.3	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
56,26	{12}{14}	0,05								100	100	100	0,05	2	0,025	
62,8	{11}{14}	0,4							100			100	0,4	2	0,2	
63,87	{9}{14}	0,2						100				100	0,2	2	0,1	
65,465	{7}{14}	0,1					100					100	0,1	2	0,05	
72,8	{6}{14}	0,2				100						100	0,2	2	0,1	
81,46	{4}{14}	0,2			100							100	0,2	2	0,1	
96,31	{2}{14}	0,2	100									100	0,2	2	0,1	
21,16	{3}{6}	0,1		100		100							0,1	2	0,05	

Dim	Sup	<=IT	Delta L2	Delta L3	Delta L4	Delta L6	Delta L7	Delta L9	Delta L11	Delta L12	Delta L14	Delta L14.3	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
56,26	{12}{14}	0,05								0,025	0,025		0,05	2	0,025	
62,8	{11}{14}	0,4							0,2			0,2	0,4	2	0,2	
63,87	{9}{14}	0,2						0,1				0,1	0,2	2	0,1	
65,465	{7}{14}	0,1					0,05					0,05	0,1	2	0,05	
72,8	{6}{14}	0,2				0,1						0,1	0,2	2	0,1	
81,46	{4}{14}	0,2			0,1							0,1	0,2	2	0,1	
96,31	{2}{14}	0,2	0,1									0,1	0,2	2	0,1	
21,16	{3}{6}	0,1		0,05		0,05							0,1	2	0,05	
Min/coluna			0,1	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,2	0,025	0,025	0,05				
Min total			0,025													

Dim	Sup	<=IT	Delta L2	Delta L3	Delta L4	Delta L6	Delta L7	Delta L9	Delta L11	Delta L12	Delta L14	Delta L14.3	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	-	-	-	-
56,26	{12}{14}	0,05								0,025	0,025		0,05	2	0,025	0
62,8	{11}{14}	0,4							0,2			0,05	0,25	2	0,125	0,15
63,87	{9}{14}	0,2						0,1				0,05	0,15	2	0,075	0,05
65,465	{7}{14}	0,1					0,05					0,05	0,1	2	0,05	0
72,8	{6}{14}	0,2				0,05						0,05	0,1	2	0,05	0,1
81,46	{4}{14}	0,2			0,1							0,05	0,15	2	0,075	0,05
96,31	{2}{14}	0,2	0,1									0,05	0,15	2	0,075	0,05
21,16	{3}{6}	0,1		0,05		0,05							0,1	2	0,05	0
Min/coluna			0,1	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,2	0,025	0,025	0,05				
Min total			0,025													

	Sup	<=IT	Delta L2	Delta L3	Delta L4	Delta L6	Delta L7	Delta L9	Delta L11	Delta L12	Delta L14	Delta L14.3	Somatório	n	Somatório/n	Resto
Coef	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
56,26	{12}{14}	0,05								0,025	0,025		0,05	2	0,025	0
62,8	{11}{14}	0,4							0,35			0,05	0,4	2	0,2	0
63,87	{9}{14}	0,2						0,15				0,05	0,2	2	0,1	0
65,465	{7}{14}	0,1					0,05					0,05	0,1	2	0,05	0
72,8	{6}{14}	0,2				0,05						0,05	0,1	2	0,05	0,1
81,46	{4}{14}	0,2			0,15							0,05	0,2	2	0,1	0
96,31	{2}{14}	0,2	0,15									0,05	0,2	2	0,1	0
21,16	{3}{6}	0,1		0,05		0,05							0,1	2	0,05	0
Min/coluna			0,15	0,05	0,15	0,05	0,05	0,15	0,35	0,025	0,025	0,05				
Min total			0,025													

Tabela 17 - Dispersões obtidas e arbitradas no caso de estudo

Dispersões definidas no Excel	Dispersões arbitradas
$\Delta l_{14} = 0,025$	$\Delta l_{15} = 0,25$
$\Delta l_{12} = 0,025$	$\Delta l_{13} = 0,25$
$\Delta l_{11} = 0,35$	$\Delta l_{10} = 0,25$
$\Delta l_9 = 0,15$	$\Delta l_8 = 0,25$
$\Delta l_7 = 0,05$	$\Delta l_5 = 0,25$
$\Delta l_6 = 0,05$	$\Delta l_1 = 0,25$
$\Delta l_4 = 0,15$	$\Delta l_1^2 = 0,1$
$\Delta l_3 = 0,05$	-
$\Delta l_2 = 0,15$	-
$\Delta l_{14}^3 = 0,05$	-

7.2.6 Etapa 6 - Cálculo dos IT totais

Os IT apresentados são relativos apenas a uma operação de acabamento, uma vez que através do processo de fundição injectada se consegue acabamentos geométricos e superficiais bons, logo não existe a necessidade de operações de desbaste:

9) O IT entre as superfícies 1 e 2, espessura de acabamento:

$$\Delta Cf_{1,2} = \Delta l_1^2 + \Delta l_{14} + \Delta l_{14}^3 + \Delta l_2 = 0,1 + 0,025 + 0,05 + 0,15 = 0,325$$

10) O IT entre as superfícies 5 e 6, espessura de acabamento:

$$\begin{aligned} \Delta Cf_{5,6} &= \Delta l_5 + \Delta l_1 + \Delta l_1^2 + \Delta l_{14} + \Delta l_{14}^3 + \Delta l_6 \\ &= 0,25 + 0,25 + 0,1 + 0,025 + 0,05 + 0,05 = 0,725 \end{aligned}$$

11) O IT entre as superfícies 8 e 9, espessura de acabamento:

$$\begin{aligned} \Delta Cf_{8,9} &= \Delta l_8 + \Delta l_1 + \Delta l_1^2 + \Delta l_{14} + \Delta l_{14}^3 + \Delta l_9 \\ &= 0,25 + 0,25 + 0,1 + 0,025 + 0,05 + 0,15 = 0,825 \end{aligned}$$

12) O IT entre as superfícies 10 e 11, espessura de acabamento:

$$\begin{aligned} \Delta Cf_{10,11} &= \Delta l_{10} + \Delta l_1 + \Delta l_1^2 + \Delta l_{14} + \Delta l_{14}^3 + \Delta l_{11} \\ &= 0,25 + 0,25 + 0,1 + 0,025 + 0,05 + 0,35 = 1,025 \end{aligned}$$

13) O IT entre as superfícies 12 e 13, espessura de acabamento:

$$\Delta Cf_{12,13} = \Delta l_{13} + \Delta l_1 + \Delta l_1^2 + \Delta l_{12} = 0,25 + 0,25 + 0,1 + 0,025 = 0,625$$

14) O IT entre as superfícies 14 e 15, espessura de acabamento:

$$\Delta C_{f_{14,15}} = \Delta l_{15} + \Delta l_1 + \Delta l_1^2 + \Delta l_{14} = 0,25 + 0,25 + 0,1 + 0,025 = 0,625$$

7.2.7 Etapa 7 - Cálculo das Cotas médias de fabrico

Para calcular as $C_{f_{méd}}$ é necessário ter em conta a informação do sub capítulo 7.2, na qual se refere a necessidade de garantir uma espessura mínima de 0,75 mm para cada operação de acabamento.

O número de cotas de fabrico médio corresponde a n-1 dimensões médias independentes, portanto, uma vez que se tem 15 superfícies tem-se 14 dimensões médias,

$$\bar{d} = n - 1 = 15 - 1 = 14$$

Tem-se deste modo as seguintes dimensões médias:

$$\overline{d_{12,14}} = 56,260$$

$$\overline{d_{11,14}} = 62,800$$

$$\overline{d_{9,14}} = 63,870$$

$$\overline{d_{7,14}} = 65,465$$

$$\overline{d_{6,14}} = 72,800$$

$$\overline{d_{4,14}} = 81,460$$

$$\overline{d_{2,14}} = 96,310$$

$$\overline{d_{3,6}} = 21,160$$

$$\overline{d_{1,2}} = 0,75(\text{espessura mínima de remoção para o alumínio}) + \frac{\Delta C_{f_{1,2}}}{2}$$

$$= 0,75 + \frac{0,35}{2} = 0,925$$

$$\overline{d_{5,6}} = 0,75 + \frac{\Delta C_{f_{5,6}}}{2} = 0,75 + \frac{0,725}{2} = 1,112$$

$$\overline{d_{8,9}} = 0,75 + \frac{\Delta C_{f_{8,9}}}{2} = 0,75 + \frac{0,825}{2} = 1,162$$

$$\overline{d_{10,11}} = 0,75 + \frac{\Delta C_{f_{10,11}}}{2} = 0,75 + \frac{1,025}{2} = 1,262$$

$$\overline{d_{12,13}} = 0,75 + \frac{\Delta C_{f_{12,13}}}{2} = 0,75 + \frac{0,625}{2} = 1,062$$

$$\overline{d_{14,15}} = 0,75 + \frac{\Delta C_{f_{14,15}}}{2} = 0,75 + \frac{0,625}{2} = 1,062$$

7.2.8 Etapa 8 – Cotas de fabrico finais para cada fase

Fase 1:

$$\begin{aligned} Cf_{13,15} &= \overline{d_{12,14}} + \overline{d_{14,15}} - \overline{d_{12,13}} \pm \frac{\Delta l_{13} + \Delta l_{15}}{2} \\ &= 56,26 + 1,062 - 1,062 \pm \frac{0,25 + 0,25}{2} = 56,26 \pm 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cf_{10,15} &= \overline{d_{10,11}} + \overline{d_{11,4}} + \overline{d_{14,15}} \pm \frac{\Delta l_{10} + \Delta l_{15}}{2} \\ &= 1,262 + 62,80 + 1,062 \pm \frac{0,25 + 0,25}{2} = 65,124 \pm 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cf_{8,15} &= \overline{d_{8,9}} + \overline{d_{9,14}} + \overline{d_{14,15}} \pm \frac{\Delta l_8 + \Delta l_{15}}{2} = 1,162 + 63,87 + 1,062 \pm \frac{0,25 + 0,25}{2} \\ &= 66,094 \pm 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cf_{5,15} &= \overline{d_{5,6}} + \overline{d_{6,14}} + \overline{d_{14,15}} \pm \frac{\Delta l_5 + \Delta l_{15}}{2} = 1,112 + 72,80 + 1,062 \pm \frac{0,25 + 0,25}{2} \\ &= 74,974 \pm 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cf_{1,15} &= \overline{d_{1,2}} + \overline{d_{2,14}} + \overline{d_{14,15}} \pm \frac{\Delta l_1 + \Delta l_{15}}{2} = 0,925 + 96,31 + 1,062 \pm \frac{0,25 + 0,25}{2} \\ &= 68,297 \pm 0,25 \end{aligned}$$

As cotas de fabrico da fase 1 estão representadas em A na Tabela 18.

Fase 2:

$$\begin{aligned} Cf_{1,14} &= \overline{d_{1,2}} + \overline{d_{2,14}} \pm \frac{\Delta l_1^2 + \Delta l_{14}}{2} = 0,925 + 96,31 \pm \frac{0,1 + 0,025}{2} = \\ &= 97,235 \pm 0,062 \end{aligned}$$

$$Cf_{12,14} = \overline{d_{12,14}} \pm \frac{\Delta l_{12} + \Delta l_{14}}{2} = 56,26 \pm \frac{0,025 + 0,025}{2} = 56,26 \pm 0,025$$

As cotas de fabrico da fase 2 estão representadas em B na Tabela 18.

Fase 3:

$$Cf_{2,14} = \overline{d_{2,14}} \pm \frac{\Delta l_2 + \Delta l_{14}^3}{2} = 96,31 \pm \frac{0,15 + 0,05}{2} = 96,31 \pm 0,10$$

$$Cf_{3,6} = \overline{d_{3,6}} \pm \frac{\Delta l_3 + \Delta l_6}{2} = 21,16 \pm \frac{0,05 + 0,05}{2} = 21,16 \pm 0,05$$

$$Cf_{4,14} = \overline{d_{4,14}} \pm \frac{\Delta l_4 + \Delta l_{14}^3}{2} = 81,46 \pm \frac{0,15 + 0,05}{2} = 81,46 \pm 0,10$$

$$Cf_{6,14} = \overline{d_{6,14}} \pm \frac{\Delta l_6 + \Delta l_{14}^3}{2} = 72,80 \pm \frac{0,05 + 0,05}{2} = 72,80 \pm 0,05$$

$$Cf_{7,14} = \overline{d_{7,14}} \pm \frac{\Delta l_7 + \Delta l_{14}^3}{2} = 65,465 \pm \frac{0,05 + 0,05}{2} = 65,465 \pm 0,05$$

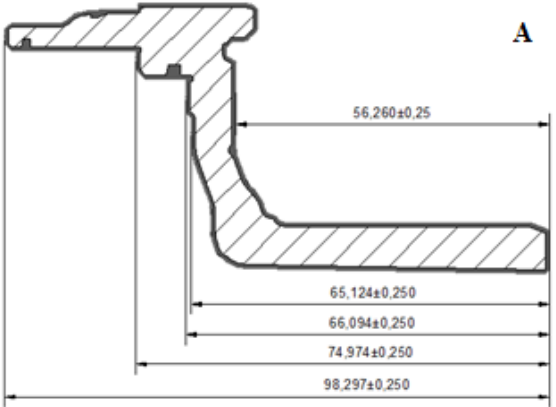
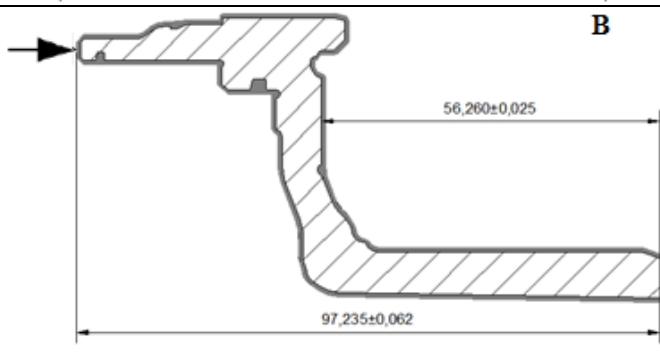
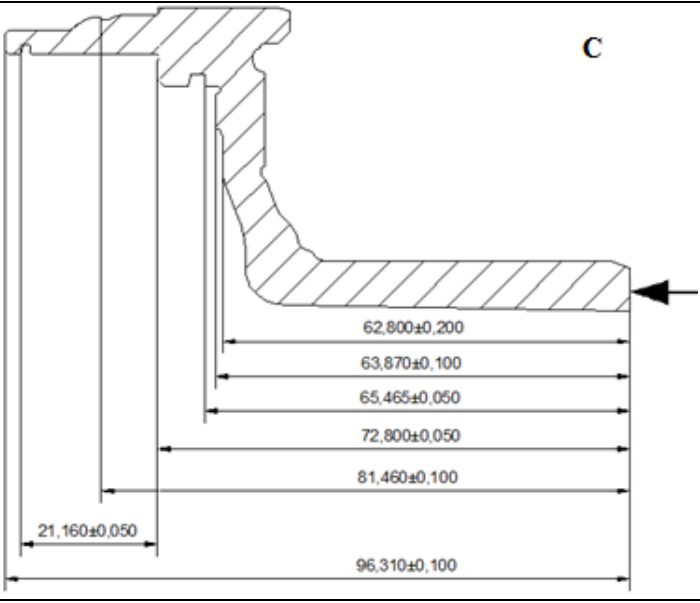
$$Cf_{9,14} = \overline{d_{9,14}} \pm \frac{\Delta l_9 + \Delta l_{14}^3}{2} = 63,87 \pm \frac{0,15 + 0,05}{2} = 63,87 \pm 0,10$$

$$Cf_{11,14} = \overline{d_{11,14}} \pm \frac{\Delta l_{11} + \Delta l_{14}^3}{2} = 62,80 \pm \frac{0,35 + 0,05}{2} = 62,80 \pm 0,20$$

As cotas de fabrico da fase 3 estão representadas em C na Tabela 18.

A Tabela 18 apresenta a simulação de fabrico com as respectivas cotas obtidas pelo método dos ΔL .

Tabela 18 - Resumo das cotas finais obtidas para o caso de estudo obtidas pelo método dos ΔL

Fase 1 $Cf_{13,15} = 56,26 \pm 0,25$ $Cf_{10,15} = 65,124 \pm 0,25$ $Cf_{8,15} = 66,094 \pm 0,25$ $Cf_{5,15} = 74,974 \pm 0,25$ $Cf_{1,15} = 68,297 \pm 0,25$	A 
Fase 2 $Cf_{1,14} = 97,235 \pm 0,062$ $Cf_{12,14} = 56,26 \pm 0,025$	B 
Fase 3 $Cf_{2,14} = 96,31 \pm 0,10$ $Cf_{3,6} = 21,16 \pm 0,05$ $Cf_{4,14} = 81,46 \pm 0,10$ $Cf_{6,14} = 72,80 \pm 0,05$ $Cf_{7,14} = 65,465 \pm 0,05$ $Cf_{9,14} = 63,87 \pm 0,10$ $Cf_{11,14} = 62,80 \pm 0,20$	C 

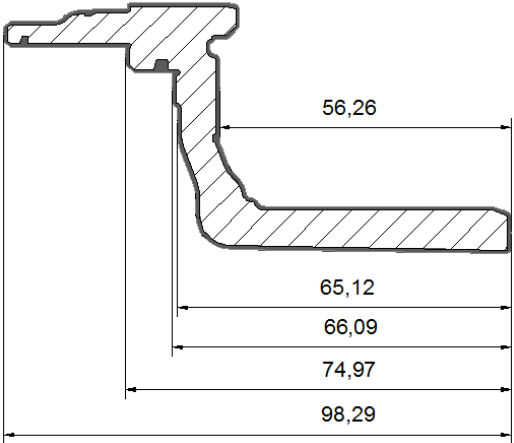
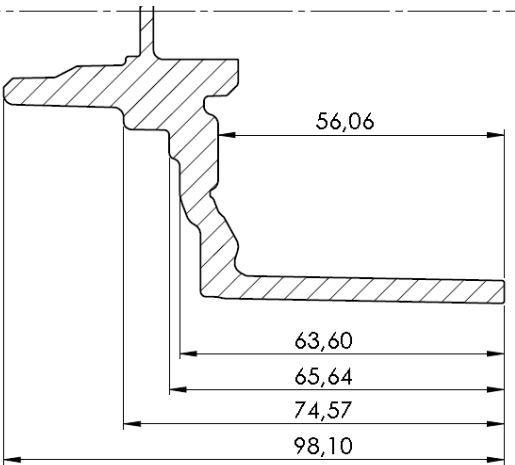
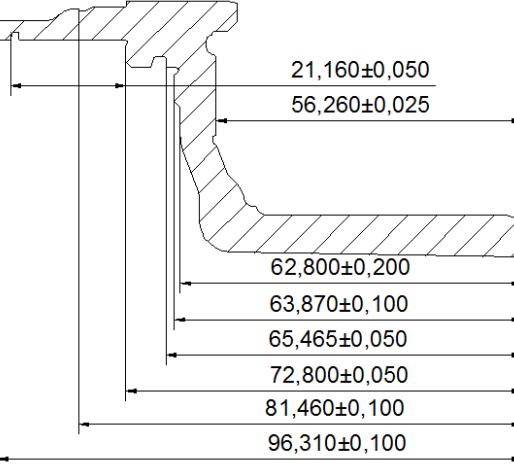
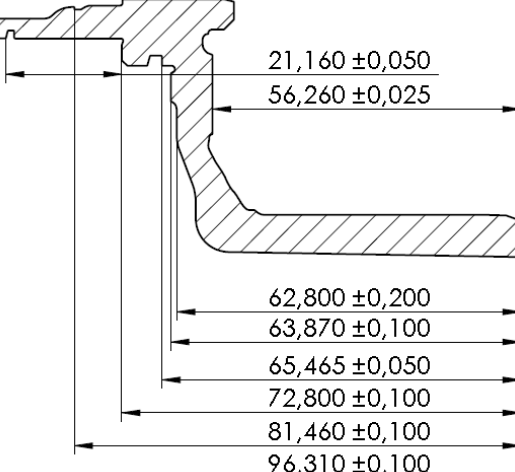
7.3 Resultados calculados e comparação com os da empresa

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do método comparado com os resultados fornecidos pelos desenhos da empresa.

No decorrer deste trabalho não era do conhecimento do autor a metodologia utilizada na empresa, contudo convém referir que funciona com uma excelente produtividade e não existe nenhum problema de qualidade. Assim, o pretendido neste capítulo consiste em verificar qual a discrepância dos valores obtidos com a aplicação do método em estudo com os da empresa. Quer isto dizer, que o pretendido não consiste em apresentar uma nova solução para a empresa mas sim perceber quais as capacidades deste método em aproximar os resultados obtidos com a sua aplicação aos resultados já obtidos pela empresa.

No que respeita a peça em bruto existe uma diferença numa das cotas iniciais o que pode acarretar um acréscimo de custos, uma vez que, poderá implicar a necessidade de realizar mais um passo de maquinação. Estando deste modo envolvidos custos, tais como desgaste da ferramenta e tempos de fabrico. A discrepância dos valores pode dever-se aos factores não estudados como o desgaste da ferramenta e as dispersões em 2.2 e aos factores não controláveis (Da). Quanto às restantes cotas pode-se observar uma satisfatória aproximação de resultados. Ficando deste modo demonstrado que este método pode constituir uma forte ferramenta na preparação de trabalho para fabrico, uma vez que, seguindo os passos de resolução e recorrendo ao suporte informático desenvolvido chega-se a resultados muito satisfatórios num curto espaço de tempo quando já se domina o método.

Tabela 19 - Comparação de resultados obtidos com empresa

Resultados obtidos	Resultados da empresa
Peça em bruto de fundição	
 56,26 65,12 66,09 74,97 98,29	 56,06 63,60 65,64 74,57 98,10
Após maquinação	
 21,160±0,050 56,260±0,025 62,800±0,200 63,870±0,100 65,465±0,050 72,800±0,050 81,460±0,100 96,310±0,100	 21,160 ±0,050 56,260 ±0,025 62,800 ±0,200 63,870 ±0,100 65,465 ±0,050 72,800 ±0,100 81,460 ±0,100 96,310 ±0,100

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer da dissertação apresentou-se um breve enquadramento do conceito de tolerância e da importância da consideração de dispersões aquando da preparação do trabalho para fabrico no que respeita a trabalhos para grandes séries. Seguidamente, estudou-se dois métodos, um sobretudo usado na escola francesa, método dos ΔL , e outro essencialmente presente na bibliografia anglo-saxónica, o método das cartas de tolerâncias. Após este estudo ter sido concluído, a escolha do método a ser automatizado recaiu no método dos ΔL por ser o mais completo e objectivo. Finalmente, concluiu-se esta dissertação com a aplicação do método dos ΔL a um caso real da indústria em parceria com uma empresa.

Da análise dos métodos de toleranciamento expostos nesta dissertação permitem concluir que:

- Conferem a possibilidade de determinar a capacidade de obter as tolerâncias especificadas no projecto;
- São uma ferramenta fundamental na repartição de trabalho a realizar por cada etapa de maquinação;
- Fornecem um meio eficiente de estabelecer a tolerância de fabrico para cada operação,
- Asseguram a cota mínima de remoção do material para cada operação de maquinação;
- São uma ferramenta muito útil para proporcionar o controlo do processo de fabrico da peça, uma vez que a sequência de maquinação fica dividida por etapas, tornando deste modo fácil controlar as diferentes fases de maquinação;
- São úteis na determinação das cotas em brutos para fundição ou para forjamento, por exemplo, definindo assim as sobre espessuras das pré-forma;
- Consideram os desvios dos apertos, no caso do método dos ΔL .

Contudo, este método dos ΔL não é de fácil compreensão e requer muito trabalho para perceber como funciona. É um processo que solicita o conhecimento das várias etapas que se devem cumprir durante a aplicação do método e é ainda um processo demorado a aplicar. E um dos objectivos a cumprir com a realização desta dissertação prendeu-se essencialmente em tornar este método o mais perceptível possível e em realizar uma aplicação informática que permitisse automatizar parte do método e, assim,

obter ganhos de tempo notáveis em comparação com a resolução analítica. Apresentou-se ainda vários exemplos de aplicação do método relativamente mais simples que o caso de estudo, de modo a tornar acessível a compreensão do método.

Com a comparação dos resultados obtidos com a aplicação do método dos ΔL ao caso de estudo - um componente mecânico cedido pela empresa industrial - permitiu verificar uma grande correspondência de valores. Porém, como se pode observar da leitura deste documento foram tomadas algumas considerações, nomeadamente, a espessura mínima de remoção do material, tolerância para fundição, tolerância para aperto, foram ainda arbitradas algumas dispersões, que inevitavelmente têm consequência nos resultados obtidos pelo que se justificam deste modo as pequenas diferenças dos valores obtidos. Contudo, ficou demonstrado que este método constitui uma ferramenta muito competitiva no que diz respeito à preparação do trabalho para fabrico, visto que seguindo a metodologia de resolução e recorrendo ao suporte informático consegue-se resultados muito satisfatórios num curto intervalo de tempo, quando evidentemente se domina o método, reduzindo de horas para minutos.

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível adquirir importantes conhecimentos na área de toleranciamento de fabrico que o autor considera serem realmente importantes na formação de um estudante de engenharia, sobretudo em engenharia mecânica, dado que realizar uma boa preparação de trabalho para fabrico é crucial para a indústria, em particular no fabrico em grande série. Todavia, é um assunto pouco abordado nos planos curriculares de engenharia mecânica em Portugal e seria interessante se este assunto pudesse ser estudado mais aprofundadamente nas diferentes unidades curriculares. Talvez, deste modo, se abrisse um campo de oportunidades no mercado de trabalho para os estudantes visto que as empresas têm uma grande dificuldade em encontrar pessoas capazes de fazer este trabalho de preparação para fabrico.

Eventuais trabalhos futuros, em parceria com a empresa, poderiam passar por fazer um estudo dos desvios dos apertos das várias etapas de maquinaria para perceber quais as tolerâncias que se conseguem obter em cada fase e qual a espessura mínima de remoção possível para o equipamento disponível no fabrico da peça. Deste modo, seria possível compreender a importância e o peso efectivo que têm os apertos no toleranciamento das superfícies a ser maquinadas. Outros assuntos poderiam ser abordados em futuros trabalhos tais como estudar as deformações existentes na peça com recurso a elementos finitos e estender este estudo a tolerâncias geométricas.

9 REFERÊNCIAS

- [1] A. Mourão, *Introdução à industrialização do produto*, UNL-FCT-DEMI, 2003.
- [2] B. Anselmetti, P. Padilla, L. Mathieu et M. Raboyeau, *Production Mecanique*, Dunod, 1986.
- [3] S. Kalpakjian e S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 4th ed., New York: Prentice-Hall, 2001, p. 1148.
- [4] OFPPT, Marrocos, 2003.
- [5] J. P. Cordebois e M. Colombié, *Fabrication par usinage*, Dunod, 2008.
- [6] P. Depeyre, *Fabrication Mecanique*, Université de la Reunion, 2005.
- [7] A. Mourão, *Dimensionamento funcional e tecnológico*, UNL-FCT-DEMI, 2004.
- [8] Sigmetrix, [Online]. Available: <http://www.sigmetrix.com>. [Acedido em 02 Setembro 2014].
- [9] Siemens, [Online]. Available: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-planning/dimensional-quality/variation-analysis.shtml. [Acedido em 02 Setembro 2014].
- [10] Varatech Sigmund, [Online]. Available: <http://www.varatech.com/company.html>. [Acedido em 02 Setembro 2014].
- [11] DCS, [Online]. Available: <http://www.3dcs.com/3dcs-analyst.html>. [Acedido em 02 Setembro 2014].
- [12] Taylor Enterprises, [Online]. Available: <http://www.variation.com/>. [Acedido em 02 Setembro 2014].
- [13] Symphony Technologies, [Online]. Available: <http://www.symphonytech.com/index.htm>. [Acedido em 02 Setembro 2014].
- [14] A. Lehtihet, S. Ranade e P. Dewan, “Comparative evaluation of tolerance control chart models,” *International Journal of Production Reserch*, p. 20, 14 Novembro 2010.
- [15] R. Maranzana, *Élément de Fabrication Mécanique*, École de Technologie Supérieure, 2004.

- [16] P. Bourdet, *Chaines de Cotes Unidirectionnelles*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003.
- [17] B. Anselmetti, *Tolérancement - Cotation de fabrication et métrologie*, vol. 3, Lavoisier, 2003, pp. 69-70.
- [18] O. Lopes, *Elementos para Fabricação Mecânica em Série*, São Paulo: Edgard Blucher, 1983, pp. 126-136.
- [19] H. C. Zhang, *Advanced Tolerancing Techniques*, Texas: John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [20] D. P. M. Pandey, *Tolerance Charts*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, 2006.
- [21] T. J. Drozda e C. Wick, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol. I Machining, Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- [22] Z. L. Pereira e J. G. Requeijo, *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, Campus da Caparica: Prefácio, 2008, pp. 409-414.
- [23] N. A. D. C. A. NADCA, "Engineering & Design: Coordinate Dimensioning," 7th ed., NADCA, 2009, pp. iv, 4A-7, 8.

ANEXOS

A1 Código em Matlab

```
Media = input('Insira qual o valor da média: ');
DesvioPadrao = input('Insira o valor do desvio padrão: ');
a = input('Qual a dimensão da amostra, a, da matriz [a,b]? ');
b = input('qual a dimensão da amostra, b, da matriz [a,b]? ');

data = normrnd(Media,DesvioPadrao,a,b);
LI = input('Insira o limite inferior, LI: ');
LS = input('Insira o limite superior, LS: ');

%mu — Sample mean
%sigma — Sample standard deviation
%P — Estimated probability of being within the lower (L)
%and upper (U) specification limits
%Pl — Estimated probability of being below L
%Pu — Estimated probability of being above U
%Cp — (U-L)/(6*sigma)
%Cpl — (mu-L)/(3.*sigma)
%Cpu — (U-mu)/(3.*sigma)
%Cpk — min(Cpl,Cpu)

S = capability(data,[LI LS]);
capaplot(data,[LI LS]);
grid on
```

Figura A 1 - Código em Matlab para estudar capacidade de um processo

A2 Linhas de código do Excel

Workbook:

```
Private Sub Workbook_Open()
    Dim MSG, Style, Title, A, MyString
    MSG = "Última revisão feita a 13/09/2014" & Chr(13) & Chr(13) & "Notas importantes: " & Chr(13) & "-  
Leia primeiro o Manuel do utilizador" & Chr(13) & "-Para gravar clique em GRAVAR para se certificar que  
nao perde o ficheiro original ( fica guardado na mesma directoria que o anterior )"  
    Style = vbOKOnly  
    Title = "Suporte informático de apoio ao Método dos Delta L "  
    A = MsgBox(MSG, Sair, Title)
End Sub

Private Sub Workbook_BeforeClose(Cancel As Boolean)
    If MsgBox("Tem a certeza que pretende fechar o documento ?", 36, "Realizado por Stéphane Catarino") =  
vbNo Then  
        Cancel = True  
    End If
End Sub
```

Module 1:

```
Private C As Integer
Private A As Integer
Function ColumnLetter(ColumnNumber As Integer) As String
    If ColumnNumber > 26 Then
        ColumnLetter = Chr(Int((ColumnNumber - 1) / 26) + 64) & _  
Chr(((ColumnNumber - 1) Mod 26) + 65)
    Else
        ColumnLetter = Chr(ColumnNumber + 64)
    End If
End Function

Sub Primeiro_Passo()
    MsgBox "O primeiro passo na resolução deste método passa por construir "_  
& "a primeira tabela, para isso deve completar os seguintes passos"  
    C = InputBox("Quantas dimensões toleranciadas a ser analisadas? ")
    D = 1
    Do While D <= C
        D = D + 1
        Rows("7:7").Select
        Selection.Insert Shift:=xlDown, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove
        Range("D7:J7").Select
        Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
        With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
            .LineStyle = xlContinuous
            .Weight = xlThin
            .ColorIndex = xlAutomatic
        End With
        With Selection.Borders(xlEdgeTop)
            .LineStyle = xlContinuous
            .Weight = xlThin
            .ColorIndex = 1
        End With
        With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
            .LineStyle = xlContinuous
            .Weight = xlThin
            .ColorIndex = xlAutomatic
        End With
        With Selection.Borders(xlEdgeRight)
            .LineStyle = xlContinuous
            .Weight = xlThin
            .ColorIndex = xlAutomatic
        End With
    End With
```

```

        With Selection.Borders(xlInsideVertical)
            .LineStyle = xlContinuous
            .Weight = xlThin
            .ColorIndex = xlAutomatic
        End With
        With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
            .LineStyle = xlContinuous
            .Weight = xlThin
            .ColorIndex = xlAutomatic
        End With
    Loop
    E = 1
    MsgBox "Nota: Ser-lhe-á pedido que insira: " & Chr(13) & "-Dimensão, Dim" & Chr(13) & "-Superfícies, Sup" & Chr(13) & "-Intervalos de tolerancia, IT"
    Do While E <= C
        E = E + 1
        Range("D" & 5 + E).Select
        ActiveCell.Value = InputBox("Insira a dimensão")
        Range("E" & 5 + E).Select
        ActiveCell.Value = InputBox("Insira as superfícies que delimitam essa dimensão dentro de () como por exemplo (3)(5)")
        Range("F" & 5 + E).Select
        ActiveCell.Value = InputBox("Insira o IT correspondente a essa dimensão")
        Range("G" & 5 + E).Select
        ActiveCell.Value = Range("F" & 5 + E)
    Loop
    A = InputBox("Quantas dispersões estão envolvidas nas dimensões toleranciadas? ")
    B = 1
    Do While B <= A
        B = B + 1
        Columns("G:G").Select
        Selection.Insert Shift:=xlToRight, CopyOrigin:=xlFormatFromLeftOrAbove
        Range("G6").Select
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
        Range("G5").Select
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "Delta L"
    Loop
    Comprimentotabela = ActiveSheet.UsedRange.SpecialCells(xlCellTypeLastCell).Address
    Range("D5:" & Comprimentotabela).Select
    Selection.Copy
    Range("D" & 7 + C + 4).Select
    ActiveSheet.Paste
    Dim iUltimaLinha As Long
    Dim iUltimaColuna As Long
    Dim rng As Range
    Set rng = ActiveSheet.UsedRange.SpecialCells(xlCellTypeLastCell)
    iUltimaLinha = rng.Row 'Recupera a última linha
    iUltimaColuna = rng.Column 'Recupera a última coluna
    Dim t As Integer
    Dim u As Integer
    t = iUltimaColuna
    u = iUltimaLinha
    r = ColumnLetter(t - 2)
    k = ColumnLetter(t - 3 - A)
    J = ColumnLetter(t - 4)
    Dim o As Integer
    Dim v As Integer
    Range(r & u - C + o + 1).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=COUNTIF(RC[" & -A - 1 & "]:RC[-2],"">0"")"
    B = ActiveCell.Column
    D = ActiveCell.Row
    ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(D + C - 1, B))
    Dim z As Integer
    s = ColumnLetter(t - 1)
    z = 0
    Do While z < C
        z = z + 1

```

```

        Range(s & u - C + z).Select
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-2]/RC[-1]"
    Loop

    MsgBox "Para continuar clique no 2ºPasso"
End Sub

Sub Segundo_Passo()
    MsgBox "Indique: " & Chr(13) & "-Digite 100 nas células onde correspondem as dispersões envolventes na dimensão" & Chr(13) & "-O nome dos Delta L, por exemplo DeltaL1 para dispersão na superfície um, ou se a dispersão for para superfície de aperto então substituir por Delta L1,2 , significa superfície 1 fase de maquinação 2, "
End Sub

Sub Copiar_selec• ao()
    Dim UserRange As Range
    Dim ondecolar As Range
    On Error GoTo Cancelar
    Range("D" & 6 + C + 6 + C + 5).Select
    Set UserRange = Application.InputBox(Prompt:="Selecione a tabela que quer copiar", Title:="Tabela a copiar", Type:=8)
    UserRange.Copy ActiveCell
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

Sub substituir_X()
    On Error GoTo Cancelar
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + 1).Select
    m = 0
    While m <> A
        ActiveCell.Offset(0, m).FormulaR1C1 = "=IF(R[" & -C - 6 & "]C<>""""",R[" & -C - 6 & "]C[" & A + 2 - m & "],""""")"
        ActiveCell.Offset(0, m).Select
        p = ActiveCell.Column
        o = ActiveCell.Row
        ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(o + C - 1, p))
        ActiveCell.Offset(0, -m).Select
        m = m + 1
    Wend
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

Sub encontrar_min()
    On Error GoTo Cancelar
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 1).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MIN(R[" & -C & "]C:R[-1]C)"
    B = ActiveCell.Column
    D = ActiveCell.Row
    ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(D, B + A - 1))
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 2).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MIN(R[-1]C:R[-1]C[" & A - 1 & "])"
    Range("F" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 2).Select
    ActiveCell.Value = "Min total"
    Range("F" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 1).Select
    ActiveCell.Value = "Min/coluna"
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

Sub Terceiro_Passo()
    MsgBox "Neste passo deve copiar a segunda tabela, siga as indicações"
    Copiar_selec• ao
    MsgBox "Uma vez copiada a tabela, vai-se substituir os valores de 100"
    substituir_X
    MsgBox "Para continuar clique no Minimo"

```

```

End Sub

Sub Quarto_Passo()
    MsgBox "Neste passo vai-se encontrar o menor valor da dispersão em cada coluna"
    encontrar_min
    MsgBox "Para continuar clique na 1ªOptimização"
End Sub

Sub otimizar()
    On Error GoTo Cancelar
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 7).Select
    m = 0
    While m < C
        ActiveCell.Offset(m, 0).FormulaR1C1 = "=IF(R[" & -C - 6 & "]C<>""""",R[" & -6 - m &
        "]"C[0],""""")"
        ActiveCell.Offset(m, 0).Select
        o = ActiveCell.Column
        p = ActiveCell.Row
        ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(p, o + A - 1))
        ActiveCell.Offset(-m, 0).Select
        m = m + 1
    Wend
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

Sub Primeira_optimização()
    MsgBox "Neste passo deve copiar a terceira tabela ( Deve incluir os valores minimos calculados ), siga as
    indicações"
    Dim UserRange As Range
    Dim ondecolar As Range
    Range("D" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 5).Select
    Set UserRange = Application.InputBox(Prompt:="Selecione a tabela que quer copiar", Title:="Tabela a
    copiar", Type:=8)
    UserRange.Copy ActiveCell
    otimizar
    MsgBox "Para continuar a primeira optimização clique no Coef"
End Sub

Sub coef()
    On Error GoTo Cancelar
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 6).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 =
        "=IF(OR(COUNTIF(R[1]C:R[" & C & "]C,"">0""")>1,MIN(R[1]C:R[" & C & "]C)=R[-4]C7),0,1)"
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

Sub Mudar_Coef()
    MsgBox "Quando se faz a primeira optimização de seguida deve-se mudar os valores dos Coef, de 1 para 0
    quando o valor de Delta L já é o maior possivel"
    coef
    B = ActiveCell.Column
    D = ActiveCell.Row
    ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(D, B + A - 1))
    MsgBox "Para continuar clique no Mudar Soma"
End Sub

Sub Somatorio()
    On Error GoTo Cancelar
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 7).Offset(0, A).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(RC[" & -A & "]:RC[-1])"
    B = ActiveCell.Column
    D = ActiveCell.Row
    ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(D + C - 1, B))
    Exit Sub
    Cancelar:

```

```

End Sub

Sub Mudar_Somatorio()
    MsgBox "Vai-se agora corrigir os valores do somatório"
    Somatorio
    MsgBox "Para continuar clique no Resto"
End Sub

s

Sub Ver_resto()
    On Error GoTo Cancelar
    Range("G" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 7).Offset(0, A + 3).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[" & -A - 4 & "]-RC[-3]"
    B = ActiveCell.Column
    D = ActiveCell.Row
    ActiveCell.AutoFill Destination:=Range(ActiveCell, Cells(D + C - 1, B))
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

Sub Resto()
    MsgBox "Vai-se agora calcular o valor do Resto"
    Ver_resto
    MsgBox "Para continuar clique na 2ªOptimização"
End Sub

Sub Segunda_optimização()
    MsgBox "Esta etapa, a 2ªOptimização corresponde à ultima etapa"
    Dim UserRange As Range
    Dim ondecolar As Range
    Range("D" & 6 + C + 6 + C + 6 + C + 6 + C + 5).Select
    Set UserRange = Application.InputBox(Prompt:="Selecione a tabela que quer copiar(Incluir novamente os valores minimos)", Title:="Tabela a copiar", Type:=8)
    UserRange.Copy ActiveCell
    MsgBox " Agora deve subsituir os valores que não estão otimizados, para isso siga o passo seguinte:" & Chr(13) & "NOTA: a condição > deve estar entre aspas"
    opt_segundo
    MsgBox "Para concluir:" & Chr(13) & "-Copie a célula activa e copie nas células que não têm coef = 0" & Chr(13) & "-Mude os Coef=1 para Coef = 0"
End Sub

Sub opt_segundo()
    On Error GoTo Cancelar
    Set formula = Application.InputBox(Prompt:="Na ultima tabela clique no primeiro valor que tem coef = 1 ", Title:="Onde aplicar formula", Type:=8)
    formula.Select
    ActiveCell.Value = Application.InputBox(Default:="ex, =I50+$T50/(COUNTIF($I50:$K50;aspa>0aspa)+COUNTIF($M50:$O50;aspa>0aspa))", Prompt:="Todas as operações são na tabela anterior e na mesma linha" & Chr(13) & "a=Digite a célula correspondente na tabela anterior" & Chr(13) & "b=Clique no resto ( elimine o 2º$)" & Chr(13) & "(c,d) e (e,f) = intervalos que têm coef = 1(apague os segundos $", Title:="Aplicar formula, =a+b/(COUNTIF(c:d;aspa>0aspa)+COUNTIF(e:f;aspa>0aspa)", Type:=0)
    Exit Sub
    Cancelar:
End Sub

```

Module 2:

```

Sub Manual_do_utilizador_Click()
    Dim MSG, Style, Title, A, Sair, B, C, D, E, F, G, H, I, MyString
    'iniciais
    MSG = "Deseja abrir o manual de instruções?" ' definir mensagem
    Style = vbYesNo ' Define buttons.
    Sair = vbOKOnly ' definir botao
    Title = "Manual de instruções" ' definir titulo
    'para cada botao
    A = "1ºPasso: " & Chr(13) & "O 1ºPasso serve para construir a tabela, que será o ponto de partida para a resolução deste problema uma vez que irá definir as dimensões toleranciadas, as suas superfícies envolventes,

```

Sup, o respectivo intervalo de tolerância ,IT e o numero de dispersões , Delta L, envolvidas nessas dimensões toleranciadas."

B = "2ºPasso: " & Chr(13) & "-Serve para identificar quais as dispersões que correspondem a determinada dimensão, com o numero 100, e ainda para identificar correctamente o nome de cada DeltaL. Que deve ser preenchido da seguinte forma:" & Chr(13) & "-Caso seja relativo a apenas uma superfície, a, sem apertado escreva apenas Delta La" & Chr(13) & "-Caso seja relativo a uma superfície, a, com apertado na fase de maquinação, b, escreva Delta La,b"

C = "3ºPasso: " & Chr(13) & "-Neste passo deve-se copiar a segunda coluna. Ter em atenção que deve manter o mesmo espaçamento das colunas anteriores. Quer isto dizer que deve colar 4 linhas abaixo a tabela antecedente. Uma vez copiada a tabela, deve-se substituir os valores de 100 pelos valores correctos. "

D = "Mínimo: " & Chr(13) & "-Este passo serve para encontrar o menor valor de cada coluna dos valores dos DeltaL na tabela três."

E = "1ª Optimização: " & Chr(13) & "-Neste passo tem de copiar a terceira tabela (compreender os valores mínimos) mantendo novamente um espaçamento de 4 linhas para a tabela anterior. Esta optimização consiste em verificar em cada coluna se os valores correspondem ao menor valor calculado anteriormente, ou seja, procura em cada coluna qual o menor valor e substitui todos os valores dessa coluna pelo menor valor."

F = "Coef: " & Chr(13) & "-Este passo serve para identificar se o valor do DeltaL já é o menor possível. E caso seja verificado que o valor é o menor possível então bloqueia a célula, ou seja, fica coef igual a 0. "

G = "Mudar Soma: " & Chr(13) & "-Uma vez feita a 1ª optimização, é necessário proceder à correcção do somatório dos DeltaL. Uma vez que alguns destes valores podem ter sido alterado."

H = "Resto: " & Chr(13) & "-Serve para calcular o resto, ou seja, faz a diferença entre o IT e o valor do somatório. Sendo um valor indispensável para realizar o passo seguinte, mais concretamente, a 2ªOptimização."

I = "2ªOptimização:" & Chr(13) & "-Consiste na ultima etapa. Na qual pretende-se repartir o valor do resto pelas células que ainda não têm coef igual a 0. E uma vez feita esta repartição fica-se com o maior valor possível para essas dispersões DeltaL. E uma vez concluída essa repartição deve-se trocar o Coef igual a 1 por Coef igual a 0."

Response = MsgBox(MSG, Style, Title)

If Response = vbYes Then ' User chose Yes.

MsgBox "Por favor, veja qual o passo que pretende esclarecer e na caixa de dialogo seguinte digite esse o botao 2ºPasso" & Chr(13) & "-Clique 3 para esclarecer o botão 3ºPasso " & Chr(13) & "-Clique 4 para esclarecer o botão Mínimo" & Chr(13) & "-Clique 5 para o botão 1ªOptimização" & Chr(13) & "-Clique 6 para o botão Coef" & Chr(13) & "-Clique 7 para o botão Mudar Soma" & Chr(13) & "-Clique 8 para o botão Resto" & Chr(13) & "-Clique 9 para o botão 2ªOptimiza•ção"

escolha = InputBox(Prompt:="Insira o número correspondente a sua dúvida", Title:="Manual do utilizador")

Select Case escolha

Case Is = 0

MsgBox "Não escolheu nenhuma opção válida"

Case Is = 1

A = MsgBox(A, Sair, Title)

Case Is = 2

B = MsgBox(B, Sair, Title)

Case Is = 3

C = MsgBox(C, Sair, Title)

Case Is = 4

D = MsgBox(D, Sair, Title)

Case Is = 5

D = MsgBox(E, Sair, Title)

Case Is = 6

D = MsgBox(F, Sair, Title)

Case Is = 7

D = MsgBox(G, Sair, Title)

Case Is = 8

D = MsgBox(H, Sair, Title)

Case Is = 9

D = MsgBox(I, Sair, Title)

Case Is > 9

MsgBox "Não escolheu nenhuma opção válida"

End Select

Else

Exit Sub

End If

End Sub

Modulo 3:

```
Sub Sava_as()  
    A = InputBox("Qual o nome com que quer gravar o documento?")  
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=A & ".xslm", FileFormat:=xlOpenXMLWorkbookMacroEnabled,  
    CreateBackup:=False  
End Sub  
  
Sub FCT()  
    Dim MSG, Style, Title, A, MyString  
    MSG = "Trabalho desenvolvido por Stephane Catarino para servir de suporte informatico ao metodo de  
    toleranciamento estudado no decorrer da dissertação, Método dos Delta L" & Chr(13) & Chr(13) & "Com  
    orientação do Prof. Dr. António Mourão"  
    Style = vbOKOnly  
    Title = "Dissertação em Engenharia Mecanica na FCT-UNL"  
    A = MsgBox(MSG, Sair, Title)  
End Sub
```


A3 Manual do utilizador

9.1.1 A3.1 Abrir / correr programa

Para conseguir correr o programa deve activar as macros. Para isso siga os seguintes passos:

Clicar em Ficheiro – Opções – Personalizar Friso - adicionar Programador

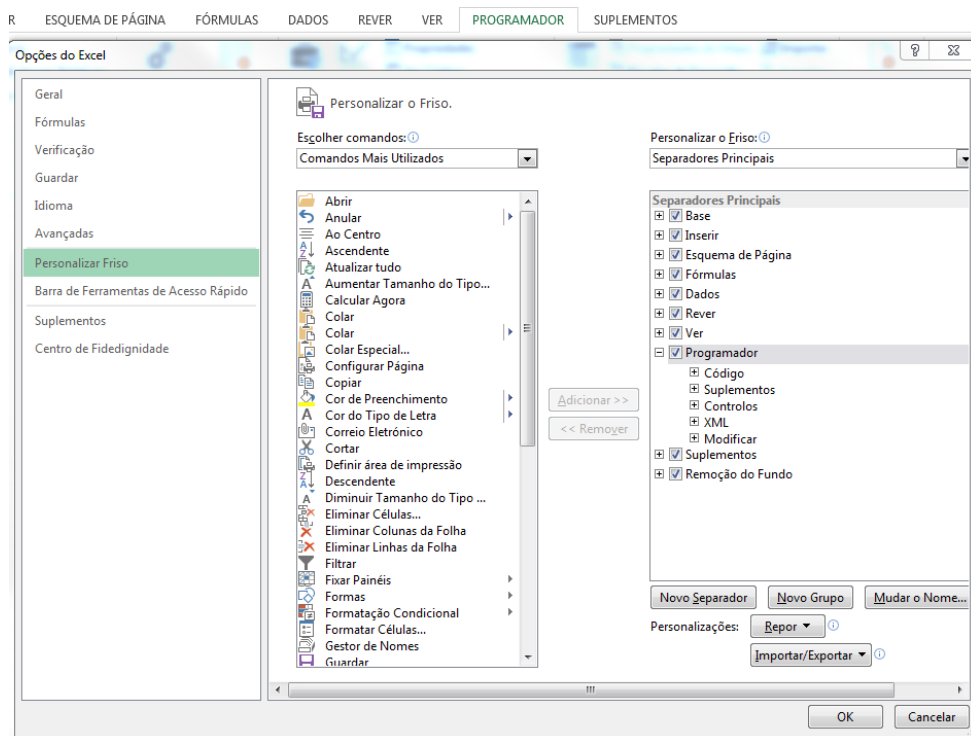


Figura A 2 - Opções do Excel

De seguida clicar no separador Programador-Segurança de Macros e activar a 4ª opção.

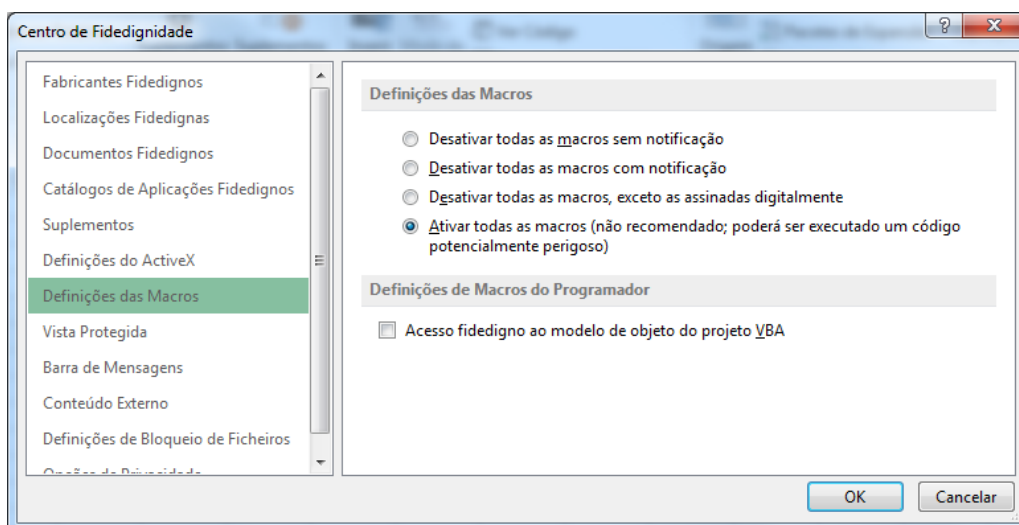
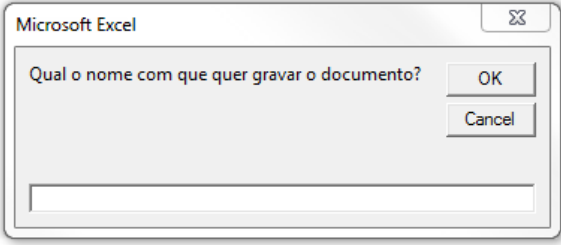


Figura A 3 - Activar macros

9.1.2 A3.2 Gravar

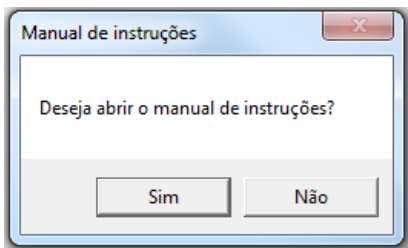
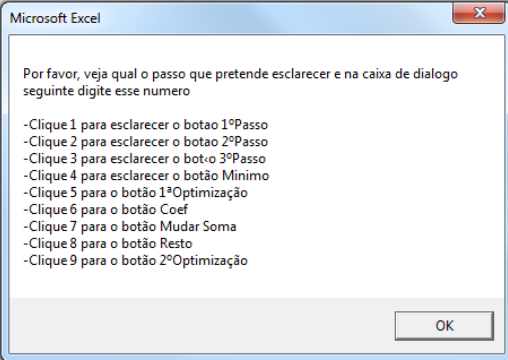
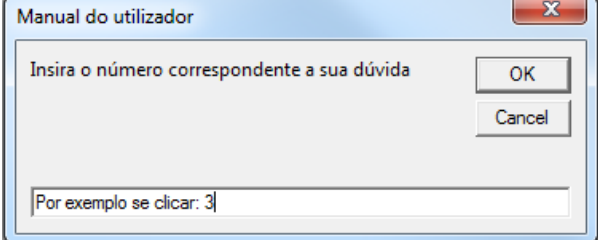
Para gravar clicar em Gravar para se certificar que não perde o ficheiro original. Isto porque quando corre uma Macro esta torna-se irreversível.

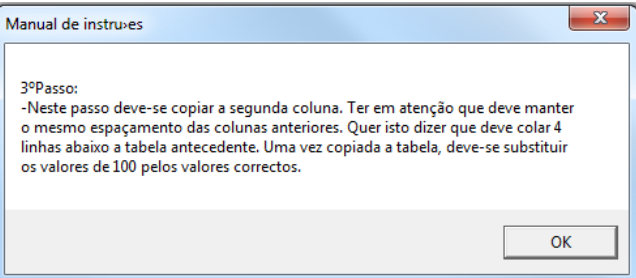
Tabela 20 - Gravar

	Deve-se escrever o nome com que pretende guardar o documento. O documento é guardado na mesma diretoria que a actual.
---	--

9.1.3 A3.3 Manual integrado no Excel

Tabela 21 - Manuel do utilizador

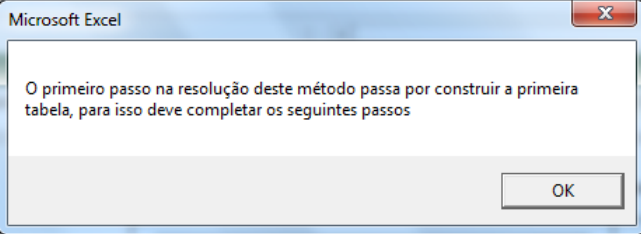
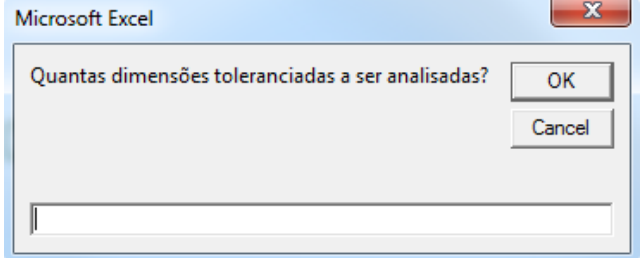
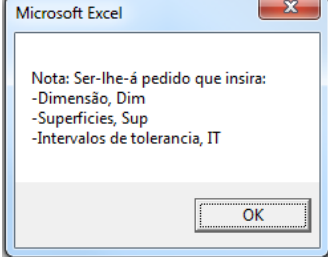
	Clicar em manual do utilizador
	Deve-se ler os tópicos aqui apresentados para clicar no numero que corresponde ao botão que quer esclarecer
	Escrever o número correspondente à dúvida.

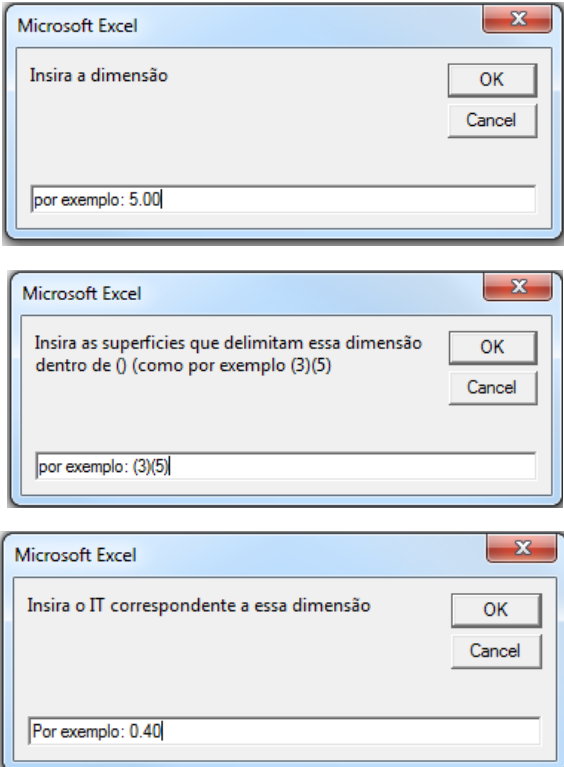
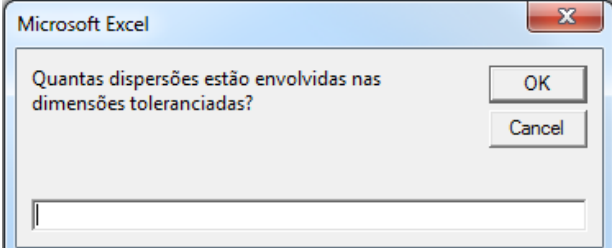
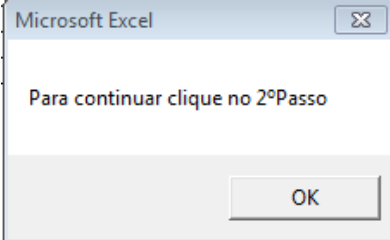
	
---	--

9.1.4 A3.4 Passos de resolução

1ºPasso

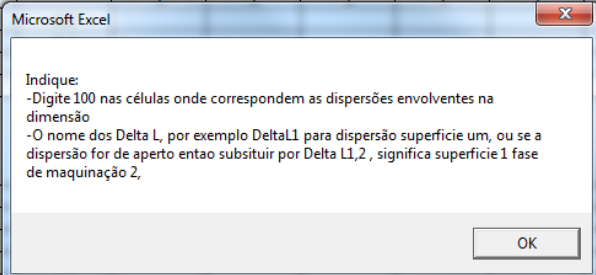
Tabela 22 - Passos de resolução, 1ºPasso

	Clicar em 1ºPasso.
	Deve-se indicar o número de dimensões tolerânciadas que o seu problema envolve.
	Nota informativa do que vem de seguida.

 The first dialog box asks to 'Insira a dimensão' (Insert the dimension) with an example of '5.00'. The second asks to 'Insira as superfícies que delimitam essa dimensão dentro de () (como por exemplo (3)(5))' (Insert the surfaces that delimit this dimension within () (like for example (3)(5))) with an example of '(3)(5)'. The third asks to 'Insira o IT correspondente a essa dimensão' (Insert the IT corresponding to this dimension) with an example of '0.40'.	Estas três caixas de texto aparecem o número de vezes correspondente ao número de dimensões que tem a tolerâncias. 1 - Caso a dimensão tenha casas decimais deve-se usar o ponto, por exemplo 5.00 2 - Caso essa dimensão seja relativa a superfície X e Y deve-se inserir (X)(Y) 3 – O valor do intervalo de tolerância (IT) deve ser igualmente caso tenha casas decimais separado por um ponto.
 The dialog box asks 'Quantas dispersões estão envolvidas nas dimensões toleranciadas?' (How many dispersions are involved in the dimensioned tolerances?).	Deve-se inserir o número de dispersões envolvidas nas dimensões a toleranciar.
 The dialog box contains the text 'Para continuar clique no 2ºPasso' (To continue click on the 2nd Step) and an OK button.	O próximo passo consiste no 2º Passo

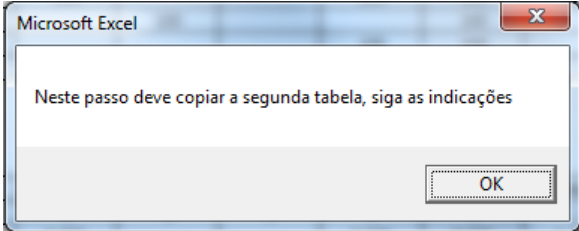
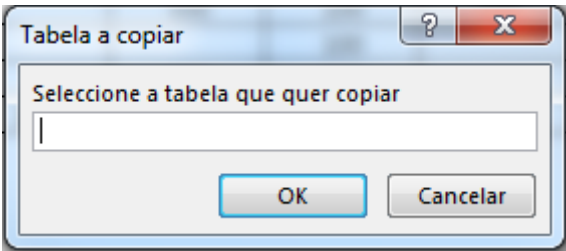
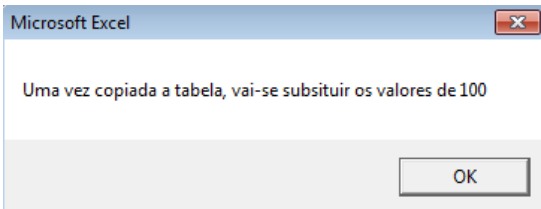
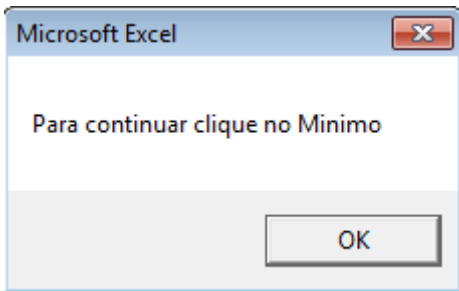
2º Passo

Tabela 23 - Passos de resolução, 2ºPasso

 The dialog box contains the following instructions: 'Indique: - Digite 100 nas células onde correspondem as dispersões envolventes na dimensão - O nome dos Delta L, por exemplo DeltaL1 para dispersão superfície um, ou se a dispersão for de aperto então substituir por Delta L1,2, significa superfície 1 fase de maquinação 2,'	Deve-se escrever o número 100 nas células que intersectam as dispersões e as respectivas dimensões. E ainda substituir o nome dos Delta L pelos correctos.
--	---

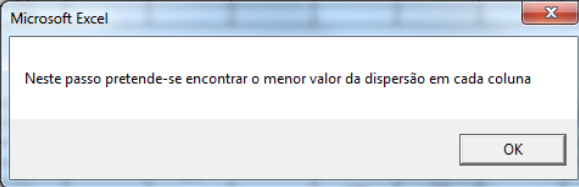
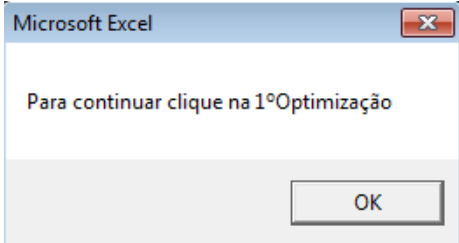
3º Passo

Tabela 24 - Passos de resolução, 3ºPasso

	Neste passo começa-se por copiar a segunda tabela.
	Seleccionar a tabela que se pretende copiar.
	Este passo consite em alterar os valores de 100 pelos valores correctos.
	O próximo passo consiste no em encontrar o valor mínimo de cada coluna.

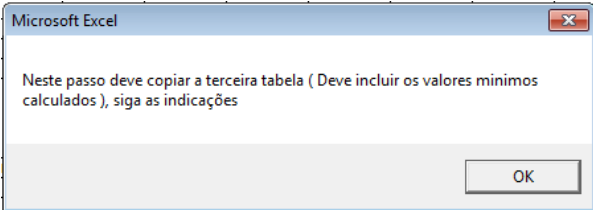
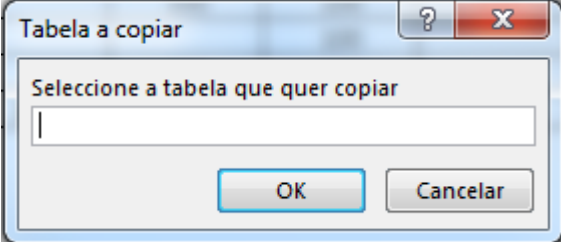
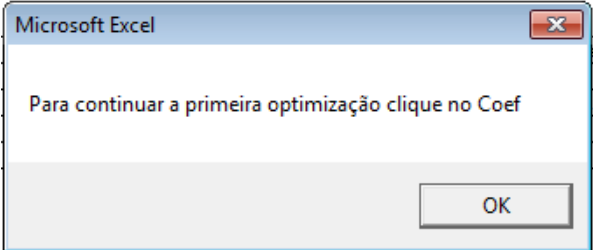
Mínimo

Tabela 25 - Passos de resolução, Mínimo

	Neste passo pretende-se encontrar o menor valor de cada dispersão.
	O próximo passo é a 1ª optimização

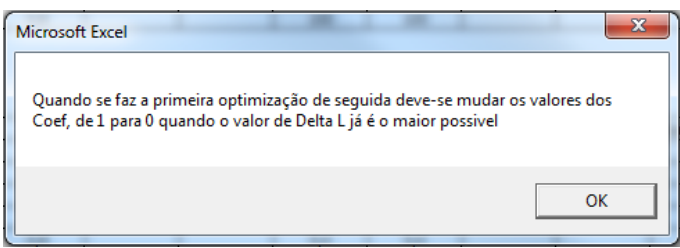
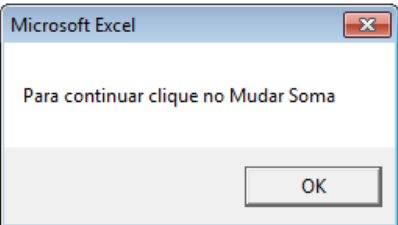
1ª Optimização

Tabela 26 - Passos de resolução, 1ª Optimização

	Esta etapa consiste na 1ª Optimização
	Deve seleccionar a 3ª tabela com os valores minimos incluidos
	Para continuar deve proceder as sub etapas desta 1ª optimização. Que corresponde em clicar no Coef, Mudar Soma e Resto por esta ordem.

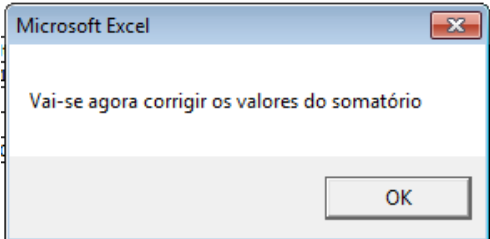
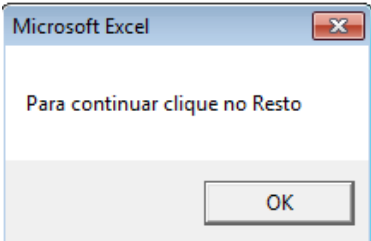
Coef

Tabela 27 - Passos de resolução, Coef

	Neste passo deve-se proceder à correcção dos valores dos coeficientes, Coef. Na qual como indica, deve-se proceder à alteração dos Coef=1 para Coef=0 nas dispersões que já têm o seu valor máximo.
	Próximo passo consiste em clicar no Mudar Soma

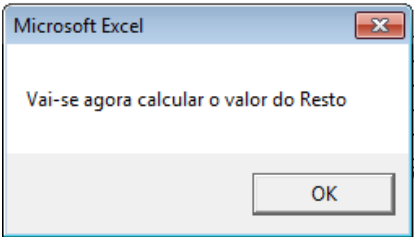
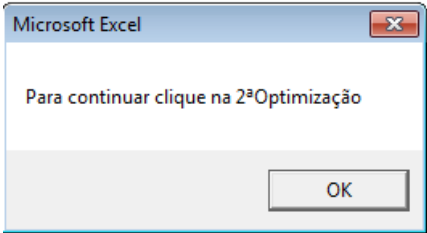
Mudar Soma

Tabela 28 - Passos de resolução, Mudar Soma

	Neste passo deve-se corrigir o valor do somatório. Que após a 1ªOptimização deixaram de estar correctos.
	Para continuar, deve-se clicar no botão Resto

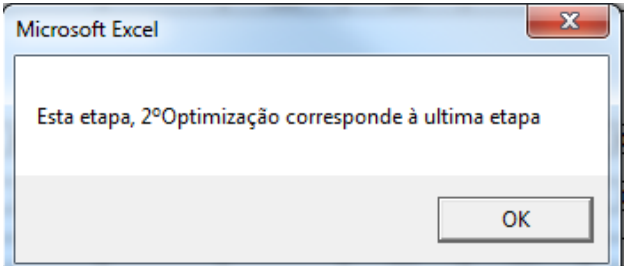
Resto

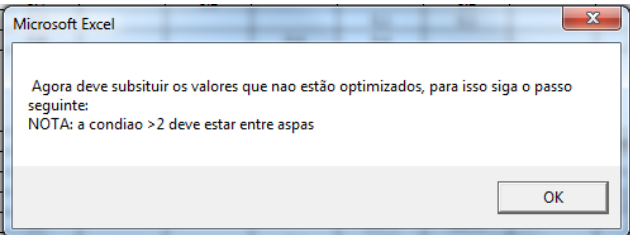
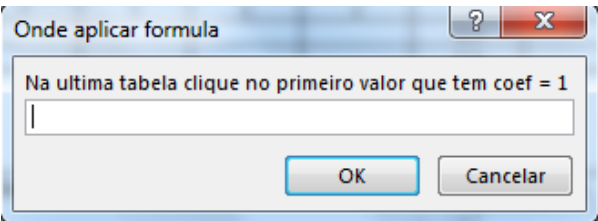
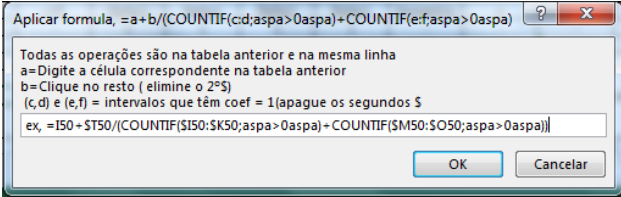
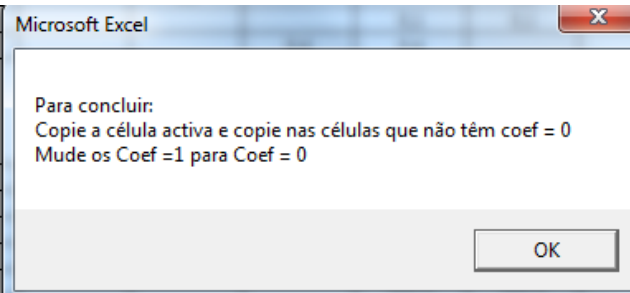
Tabela 29 - Passos de resolução, Resto

	Este é o último passo da 1ª Optimização
	O próximo passo, consiste na 2ª Optimização

2º Optimização

Tabela 30 - Passos de resolução, 2ºOptimização

	Deve-se seguir os passos que permitem proceder à criação da tabela 5, os passos são idênticos aos efectuados no 3ºPasso.
---	---

	Uma vez criada a tabela 5 deve-se substituir os valores que ainda não estão otimizados.
	Deve-se seleccionar a célula que contém o 1º valor do Delta L ainda por otimizar, ou seja, deve escolher o 1º valor que tem Coef = 1.
	A formula a aplicar é, $=a+b/(COUNTIF(c:f;">0")+COUNTIF(e:f;">0"))$, onde todas as operações são efectuadas na tabela anterior, ou seja, na tabela 4. Deve-se substituir as letras por: - <u>a</u> é a célula da tabela anterior, tabela 4, que corresponde à posição da célula activa; - <u>b</u> deve-se clicar na célula do resto da mesma linha do valor de <u>a</u>; - <u>c</u> e <u>d</u>, <u>e</u> e <u>f</u> devem ser os intervalos (apagar os segundos \$) de valores que têm coef=1 , deve-se criar o número de intervalos necessários até abranger todos os Coef=1
	Deve-se copiar a célula activa e colar nas células que têm coef=1, pode fazer com auxílio do atalho Ctrl+c para copiar e Ctrl+v para colar. Para concluir esta resolução substitua os Coef=1 por Coef=0.

A4 Tabelas consultadas

Tabela 31 - Espessura mínima de material a remover para torneamento (adaptado de [15])

Material	Espessura mínima de material (mm)
Ligas de aço	0,125
Alumínio	0,75

Tabela 32 - Espessura mínima de remoção de material em função da operação de torneamento (adaptado de [15])

Operação em tornamento	Cota mínima de remoção (mm)
Desbaste	1
Semi-acabamento	0,5
Acabamento	0,2
Acabamento abrasivo	0,05

Tabela 33 - Valores de referência para apertos (adaptado de [6])

Tipos de aperto	Dispersão, ΔL (mm)
Área de encosto fixa em superfície usinada	0,01
Área de encosto fixa em superfície em bruto	0,3 a 0,5

Tabela 34 - Tolerâncias para fundição injectada com precisão ([23])

Table P-4A-1 Tolerances for Linear Dimensions (Precision)

In inches, three-place decimals (.xxx); In millimeters, two-place decimals (.xx)

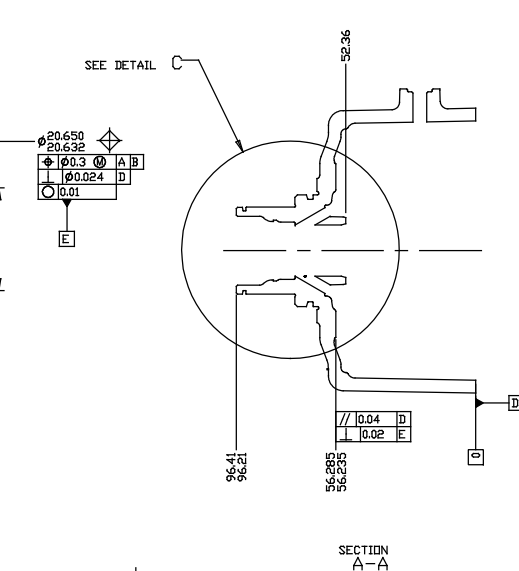
Length of Dimension "E1"	Casting Alloys			
	Zinc	Aluminum	Magnesium	Copper
Basic Tolerance up to 1" (25.4mm)	± 0.002 (A) (± 0.05 mm)	± 0.002 (± 0.05 mm)	± 0.002 (± 0.05 mm)	± 0.007 (± 0.18 mm)
Additional Tolerance for each additional inch over 1" (25.4mm)	± 0.001 (± 0.025 mm)	± 0.001 (± 0.025 mm)	± 0.001 (± 0.025 mm)	± 0.002 (± 0.05 mm)

A5 Desenhos técnicos

Este anexo contém os desenhos técnicos cedidos pela empresa.

Tabela 35 - Desenhos técnicos cedidos pela Empresa

Desenho	Página
Maquinado	91
Fundição	93



CONFIDENTIAL

