



Nuno Miguel Ribeiro Martinho

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Contributo para a análise do toleranciamento em
SolidWorks™**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado, FCT-UNL
Co-orientador: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro, 2021

Contributo para a análise do toleranciamento em SolidWorks

Copyright © Nuno Miguel Ribeiro Martinho, 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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Prof. Doutor António Mourão, não só pela oportunidade de realizar esta dissertação, mas também por todo o incentivo e orientação no decorrer da mesma. A sua disponibilidade e simpatia, assim como o seu conhecimento sobre a matéria, foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Rui Martins, por ter acompanhado esta dissertação de perto e estar sempre disponível para me assistir.

Não posso deixar de agradecer de forma especial aos meus Pais, que desde sempre estiveram ao meu lado. O seu apoio, palavras de incentivo e carinho tiveram um papel determinante em tudo o que alcancei até hoje. À minha irmã Cátia e ao meu irmão Tomás, o meu mais sincero obrigado, por estarem sempre comigo e não me deixarem desistir.

Por fim, quero agradecer a todos os meus colegas e amigos, por todas as maratonas de estudo e noitadas de festa. Foi um privilégio poder partilhar este percurso com vocês.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo analisar e compreender o funcionamento dos recursos de toleranciamento dimensional do *software SolidWorks*, contribuindo com documentação para a temática.

Este trabalho surge devido à inexistência de documentação acerca dos módulos de toleranciamento e análise de tolerâncias deste *software*. A ausência desta documentação, aliada com a crescente adoção do uso de programas de CAD para o projeto de peças e sistemas mecânicos, aumenta a possibilidade da realização de um mau toleranciamento. As consequências de um mau toleranciamento podem ser desastrosas, especialmente a nível monetário, sendo importante a sua prevenção.

Numa primeira fase, foi necessário realizar um levantamento das funcionalidades de cotação e toleranciamento. Feito esse levantamento, abordou-se a configuração dos parâmetros que os caracterizam, seguido de uma breve demonstração da sua utilização.

Na fase seguinte, procurou-se verificar de que modo a escolha de diferentes *datums* e métodos de modelação de peças iria influenciar os resultados. Para tal, recorreu-se a um caso de estudo simples.

Na terceira fase, recorrendo a um novo caso de estudo, comparou-se as tolerâncias obtidas com a funcionalidade automática e as tolerâncias obtidas via uma síntese de tolerâncias. Esta comparação foi seguida de uma análise com recurso ao *TolAnalyst*.

Do trabalho realizado, e tendo por base os ensinamentos retirados das fases anteriores, resultou uma metodologia que visa garantir a correta utilização destas funcionalidades. Foi possível ainda concluir que estas funcionalidades carecem sempre de uma cotação e análise funcional, pois o *SolidWorks* não contempla esta possibilidade. O *software* dispõe de funcionalidades interessantes que permitem auxiliar o projetista, tendo um papel complementar na atribuição de cotas e tolerâncias.

Palavras-chave: *SolidWorks*, Toleranciamento, Análise de tolerâncias, Cotação, *DimXpert*, *TolAnalyst*, Cadeia de cotas, Projeto de sistemas mecânicos, Desenho assistido por computador

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to analyze and understand the way how dimension tolerances are handled by SolidWorks, in order to contribute with documentation for the subject.

This work was developed in order to suppress the lack of adequate documentation about the usage of the dimensioning and tolerancing tools, available in SolidWorks. The lack of this documentation, combined with the ever-growing usage of CAD softwares to design might lead to catastrophic results, especially moneywise. That being said, it's important to prevent such thing from happening.

The first step was to establish what tools were at our disposal. After establishing the tools, it was necessary to understand the settings behind such tools, followed by a quick demonstration.

The second step consisted in finding out how did the datum choices and modelling methods influenced the results. This was achieved by means of a simple case study.

The third step, was to compare the tolerancing obtained by the automatic tool and the tolerancing obtained by means of a tolerance synthesis, followed by an analysis using TolAnalyst. To do so, it was used another case study.

This thesis resulted in developments regarding the documentation needed for a correct usage of the DimXpert tools. In order to compile all the information obtained during this dissertation, a methodology was developed, using flowcharts. This methodology aims to provide the user with important knowledge, to make good use of the tools available. Despite being helpful tools, they will still need to be combined with a functional analysis. SolidWorks helps the user by providing him useful tools to assist with the dimensioning and tolerancing of parts and mechanical systems.

Keywords: SolidWorks, Tolerancing, Tolerance Analysis, Dimensioning, DimXpert, TolAnalyst, Chain dimensioning, Design of mechanical systems, Computer assisted design

ÍNDICE

Lista de Figuras	xiii
Siglas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objetivos	1
1.2 Organização da dissertação	2
2 Sobre o Toleranciamento Dimensional	5
2.1 Introdução	5
2.2 Toleranciamento dimensional	6
2.2.1 Modelos de análise de tolerâncias	7
3 Funcionalidades de cotação do software <i>Solidworks</i>	9
3.1 Introdução	9
3.2 Barra de ferramentas <i>Model Based Definition</i>	9
3.3 Parametrização do <i>SolidWorks</i> para efeitos de Toleranciamento	11
3.4 Cotação e toleranciamento automáticos	16
3.5 <i>TolAnalyst</i>	19
3.5.1 Generalidades	19
3.5.2 Ilustração do funcionamento	20
3.5.3 Conclusões	21
4 Análise da funcionalidade de cotação automática	25
4.1 Introdução	25
4.2 Influência da modelação dos componentes nos resultados obtidos pelo <i>DimXpert</i>	26
4.2.1 Com modelações diferentes	26
4.2.2 Assemblagem dos componentes	26
4.2.3 Análise de resultados	28
4.3 Influência da escolha das referências nos resultados obtidos pelo <i>DimXpert</i>	31
4.3.1 Escolha dos <i>datums</i>	31

5 Resultados da cotagem automática relativamente à análise funcional de um conjunto	35
5.1 Introdução	35
5.2 Cotagem automática dos componentes	36
5.3 Análise funcional do conjunto mecânico	40
5.4 Alterações à cotagem automática dos componentes	42
5.5 Análise de tolerâncias com recurso ao <i>TolAnalyst</i>	43
5.5.1 Análise da folga A	44
5.5.2 Análise da folga B	49
5.5.3 Conclusões da análise do <i>TolAnalyst</i>	52
6 Contributo para o processo de toleranciamento dimensional no <i>SolidWorks</i>	53
6.1 Introdução	53
6.2 Fluxograma Principal	53
6.2.1 Primeira etapa - Análise funcional	54
6.2.2 Segunda etapa - Cotagem automática	55
6.2.3 Terceira etapa - Alterações <i>DimXpert</i>	56
6.2.4 Quarta etapa - Análise de tolerâncias	57
7 Conclusão e trabalhos futuros	59
Bibliografia	61

LISTA DE FIGURAS

1.1	Informação versus custos de alterações durante o desenvolvimento do produto [3]	2
2.1	Análise e síntese de tolerâncias - adaptado de [6]	5
2.2	Importância do toleranciamento na ligação entre o projeto e a produção - adaptado de [6]	6
2.3	Impacto qualitativo da tolerância no custo de produção de um componente[3]	6
2.4	Distribuição normal das medidas de uma cota num lote de peças	8
3.1	Barra de ferramentas <i>Model Based Definition</i> do <i>DimXpert</i>	10
3.2	Exemplo de componente dimensionado e toleranciado utilizando o modo automático do <i>DimXpert</i>	10
3.3	Menu de configurações gerais do <i>DimXpert</i>	12
3.4	Menu de configurações para o toleranciamento dimensional	13
3.5	Menu de configurações para a cotagem do tipo <i>location dimension</i>	13
3.6	Menu de configurações para a cotagem e toleranciamento automático dimensional	14
3.7	Menu de configurações para o toleranciamento geométrico	14
3.8	Menu de configurações para os chanfros	15
3.9	Menu de configurações de apresentação de resultados	15
3.10	Componente em análise [10]	16
3.11	Menu de seleção da ferramenta <i>DimXpert</i>	17
3.12	Menu de introdução das características a toleranciar	17
3.13	Componente totalmente toleranciado	18
3.14	Conjunto mecânico em análise [10]	20
3.15	Menu de ativação do TolAnalyst	21
3.16	Abertura da ferramenta TolAnalyst	21
3.17	Seleção da folga a analisar	22
3.18	Ordem de montagem do conjunto	23
3.19	Estabelecimento das restrições de movimento	23
3.20	Resultados da análise	24
3.21	Contribuições das tolerâncias de cada um dos componentes	24

4.1	Montagem simples - baseada em [13]	25
4.2	Métodos de modelação do componente 1	26
4.3	Métodos de modelação do componente 2	27
4.4	Relação de concentricidade entre os eixos dos dois componentes	27
4.5	Relação de coincidência entre as faces dos componentes	28
4.6	Escolha dos <i>datums</i> para a montagem	29
4.7	Cotagem e toleranciamento automático considerando geometria prismática	29
4.8	Cotagem e toleranciamento automático considerando geometria de revolução	30
4.9	<i>Features</i> consideradas pela ferramenta <i>DimXpert</i>	30
4.10	Eixo do veio como referência principal	31
4.11	Eixo do furo como referência principal	32
4.12	Eixo do veio como referência principal (prismático)	32
4.13	Eixo do furo como referência principal (prismático)	33
5.1	Montagem simples em análise	35
5.2	Ferramenta de auto dimensionamento na barra de ferramentas MBD	36
5.3	Barra lateral do <i>Auto Dimension Scheme</i>	36
5.4	Primeiro bloco de opções para o componente 1	37
5.5	Segundo bloco de opções para a cavilha	37
5.6	Representação gráfica da escolha de <i>datums</i> para o componente 1	37
5.7	Terceiro bloco de opções para o componente 1	38
5.8	Auto cotagem do componente 1	38
5.9	Segundo bloco de opções para o componente 2	39
5.10	Representação gráfica da escolha de <i>datums</i> para o componente 2	39
5.11	Auto dimensionamento do componente 2	39
5.12	Cadeias mínimas de cotas	40
5.13	Cadeia de cotas funcionais para o componente 1	41
5.14	Cadeia de cotas funcionais para o componente 2	41
5.15	Cotagem e toleranciamento do componente 1 após análise funcional	43
5.16	Cotagem e toleranciamento do componente 2 após análise funcional	43
5.17	Abertura da ferramenta <i>TolAnalyst</i>	45
5.18	Primeiro bloco de opções de análise da folga A	45
5.19	Segundo bloco de opções de análise da folga A	45
5.20	Condições de montagem para a folga A	46
5.21	Representação gráfica da escolha das condições de montagem para a folga A	46
5.22	Parâmetros de análise para a folga A	47
5.23	Janela de resultados	47
5.24	Representação gráfica da seleção MAX para a folga A	47
5.25	Representação gráfica da seleção MIN para a folga A	48
5.26	Primeiro bloco de opções de análise da folga B	49
5.27	Condições de montagem para a folga B	50

5.28	Representação gráfica da escolha das condições de montagem para a folga B	50
5.29	Janela de resultados para a folga B	51
5.30	Representação gráfica da seleção MAX para a folga B	51
5.31	Representação gráfica da seleção MIN para a folga B	51
5.32	Alteração do valor da tolerância para 20H6	52
5.33	Resultados obtidos com a alteração para 20H6	52
6.1	Fluxograma Principal	53
6.2	Fluxograma referente à Análise Funcional	54
6.3	Fluxograma referente à cotagem automática	55
6.4	Fluxograma referente às alterações da cotagem do <i>DimXpert</i>	56
6.5	Fluxograma referente à análise de tolerâncias com recurso ao <i>TolAnalyst</i>	58

SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia assistida por computador)
DFM/DFA	<i>Design for Manufacturing / Design for Assembly</i> (Projeto para fabrico e montagem)
RSS	<i>Root Sum Square</i> (Raiz da soma dos quadrados)

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Objetivos

Nos dias que correm, os produtos são cada vez mais complexos e de difícil execução. Existe um foco em reduzir os tempos de desenvolvimento e produção dos mesmos, afetando inevitavelmente a fase de projeto. A procura pelo aumento das margens de lucro e conseqüente redução de custos inerentes a erros de produção, obriga a uma estreita cooperação entre os responsáveis pelo projeto e os responsáveis pelo fabrico [1]. Daqui vem a preocupação em adotar o método de *Design for Manufacturing / Design for Assembly* (Projeto para fabrico e montagem) (DFM/DFA), um método que tem como fundamento a angariação de informações dos diferentes setores envolvidos no desenvolvimento do produto, em particular nos setores do fabrico e da montagem, aplicando toda essa informação na fase de projeto [2]. Este método permite ainda que quaisquer alterações tenham um custo reduzido, visto serem realizadas na fase inicial do projeto, tal como ilustra a figura 1.1. Durante a fase de projeto, onde são estabelecidas as tolerâncias geométricas e dimensionais, é imperativo que os desenhos de engenharia sejam explícitos, sem ambigüidades e de fácil compreensão para os responsáveis pelo fabrico. É também de extrema importância que seja tida em conta a aptidão (*capability*) do processo, isto é, se o processo é capaz de realizar um determinado produto cumprindo a tolerância estabelecida [3].

De modo a auxiliar os projetistas na atribuição de tolerâncias aos conjuntos mecânicos e sua respetiva análise, têm sido desenvolvidas soluções no âmbito do CAD. No entanto, muitas destas soluções são dispendiosas, acarretando custos não só de software, mas também de formação dos utilizadores [4].

No que diz respeito aos *softwares* de CAD mais acessíveis, destaca-se o *SolidWorks*. Trata-se de um software que muitos alunos e futuros engenheiros têm acesso, no âmbito da modelação 3D no Ensino Superior. Este *software* possui um módulo designado de

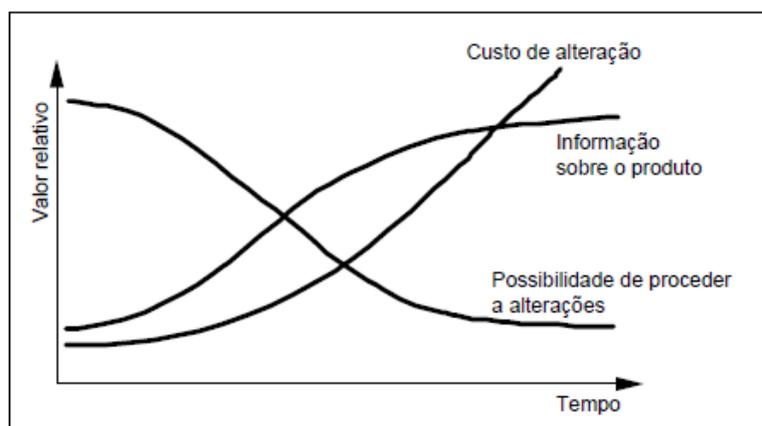


Figura 1.1: Informação versus custos de alterações durante o desenvolvimento do produto [3]

TolAnalyst, que tal como o nome sugere, tem como funcionalidade a análise cumulativa de tolerâncias, num sistema mecânico. É um módulo que, ainda que lançado em 2006, é pouco utilizado, muito devido ao facto de não se encontrar documentação que indique a sua correta aplicação.

Tendo em consideração que atualmente os desenhos de engenharia são modelados em *softwares* de CAD, o objetivo desta dissertação é perceber como são tratadas as tolerâncias dimensionais no *SolidWorks*, uma vez que se trata de uma referência no ensino da Engenharia Mecânica. A pertinência deste trabalho provém da existência de funcionalidades próprias do *SolidWorks* que geram tolerâncias de modo automático [5]. Este facto levanta questões quanto à sua utilidade e quanto ao rigor com que essa geração é feita. Como tal, o objetivo principal é perceber o que é feito pelo *software* e fazer uma análise crítica, acompanhando-a de eventuais procedimentos necessários para o utilizador. A pertinência deste trabalho deve-se, também, ao facto de não se conhecer outros neste sentido.

1.2 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, que se encontram subdivididos em diversos tópicos de modo a abordar todos os temas necessários para a realização da mesma.

No primeiro capítulo fez-se a introdução da dissertação, dos seus objetivos e a sua organização.

No segundo capítulo apresentam-se conceitos chave do toleranciamento dimensional, introduzindo os métodos de análise e síntese de tolerâncias.

O capítulo 3 debruça-se sobre os funcionalidades do *software SolidWorks*. Este terceiro capítulo divide-se em dois subcapítulos, referentes às duas funcionalidades do *DimXpert*

em análise por esta dissertação: o *AutoDimensionScheme* e o *TolAnalyst*. Por sua vez, estes são ainda subdivididos de modo a ilustrar os seus procedimentos de utilização e as conclusões tiradas desses procedimentos.

No capítulo 4, de modo a compreender de que modo são atribuídas as tolerâncias com recurso à cotação automática, é apresentado um caso de estudo. Este capítulo divide-se em dois subcapítulos, que abordam a influência da escolha dos processos de modelação e das referências, na alocação das tolerâncias feita pelo *DimXpert*.

No capítulo 5, é apresentado um novo caso de estudo, desta vez com o intuito de compreender o modo como a funcionalidade de análise de tolerâncias, *TolAnalyst*, funciona. Neste capítulo descreve-se quais os passos a tomar aquando o uso desta funcionalidade, passo a passo, terminando com as conclusões retiradas sobre o seu uso.

No capítulo seis, e com base em todos os capítulos anteriores, é exposto um contributo para o processo de toleranciamento dimensional com recurso ao *SolidWorks*. O fluxo principal desta metodologia divide-se num em quatro etapas, expostas em cada um dos subcapítulos.

No sétimo e último capítulo, expõem-se as conclusões obtidas da dissertação, assim como possíveis trabalhos futuros.

SOBRE O TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL

2.1 Introdução

Esta dissertação irá incidir no módulo de cotação e toleranciamento do *SolidWorks*. Este módulo possui uma funcionalidade automática que realiza uma alocação de tolerâncias, tendo em conta a parametrização deste recurso 3.3. Após a alocação destas tolerâncias, é possível realizar uma análise das mesmas com recurso ao *TolAnalyst*. Esta análise de tolerâncias tem como característica a obtenção da tolerância do conjunto a partir das tolerâncias dos componentes. Na designada síntese de tolerâncias é realizado o processo inverso à análise: parte da tolerância do conjunto para obter a tolerância dos componentes. Na figura 2.1 é possível observar a comparação entre a análise e a síntese de tolerâncias [3].

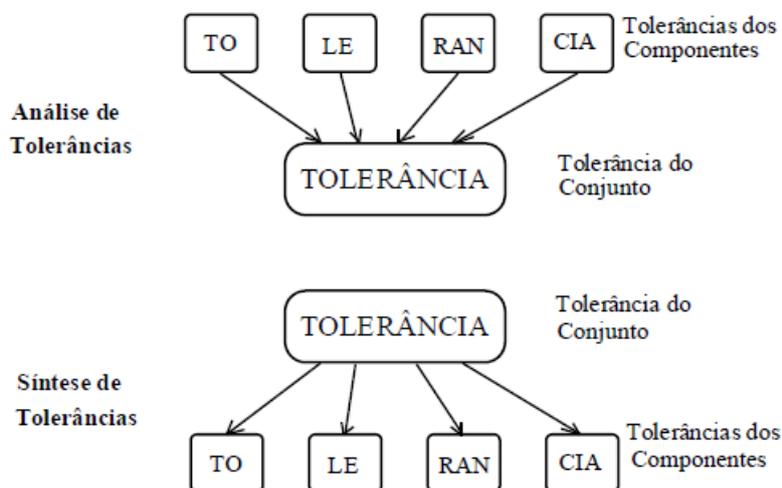


Figura 2.1: Análise e síntese de tolerâncias - adaptado de [6]

Nesta dissertação, apenas iremos abordar a temática do toleranciamento dimensional. De modo a melhor compreender o funcionamento destas funcionalidades de toleranciamento, é necessário introduzir alguns conceitos chave sobre o mesmo.

2.2 Toleranciamento dimensional

O toleranciamento dimensional é uma variável de projeto que possui uma importância significativa na seleção dos processos de fabrico, na montagem, no custo de produção e na qualidade funcional do produto [7]. A figura 2.2 ilustra a importância do toleranciamento na ligação entre o projeto e a produção. Se por um lado o aperto das tolerâncias conduzirá a componentes com uma funcionalidade melhorada, por outro, este mesmo aperto traduz-se num aumento significativo dos custos de produção (figura 2.3). A necessidade da intermutabilidade dos componentes combinada com a procura pela redução de custos de produção, leva os projetistas a um estudo criterioso do toleranciamento.

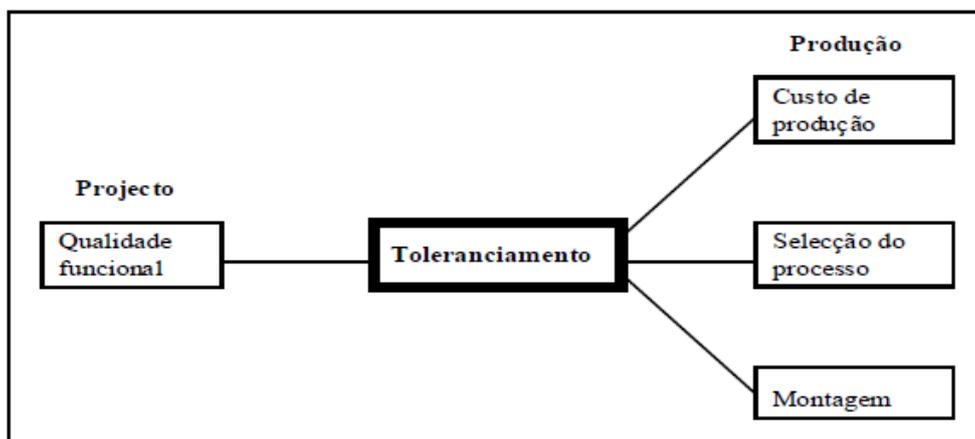


Figura 2.2: Importância do toleranciamento na ligação entre o projeto e a produção - adaptado de [6]

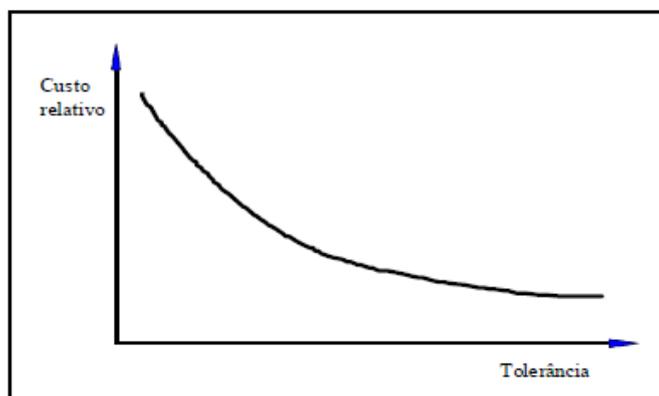


Figura 2.3: Impacto qualitativo da tolerância no custo de produção de um componente[3]

2.2.1 Modelos de análise de tolerâncias

A análise de tolerâncias tem como principal foco ultrapassar as questões de intermutabilidade e variação natural dos processos de fabrico e de montagem [3]. Existem vários modelos para realizar análise de tolerâncias, que devem ser cuidadosamente utilizados. No âmbito desta dissertação, iremos apenas abordar dois modelos: Modelo da Intermutabilidade Total e o Modelo Estatístico.

2.2.1.1 Modelo da intermutabilidade total

Este modelo consiste na atribuição da tolerância do conjunto através da soma linear das tolerâncias dos componentes que o compõem (eq. 2.1), em que T_{conj} representa a tolerância total do conjunto; t_i representa a tolerância individual de cada um dos componentes; e n é o número de cotas a toleranciar da cadeia mínima de cotas. De entre todos os modelos de análise de tolerâncias, este é o mais simples. A sua simplicidade permite garantir a intermutabilidade de todos os componentes, independentemente de qual a cadeia de cotas e a distribuição de tolerâncias escolhida [8].

$$T_{conj} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.1)$$

Este método de análise tem como principal desvantagem o valor elevado da tolerância do conjunto que se irá obter. Uma síntese baseada neste método, dará origem a um aperto excessivo de tolerâncias individuais dos componentes, tanto mais acentuado quanto maior a cadeia de cotas. Este modelo cobre totalmente o campo de aplicação em igual probabilidade de ocorrência, não sendo sensível ao modo como os desvios reais são distribuídos. De modo a considerar a distribuição de medições, foi desenvolvido um novo modelo, o Modelo Estatístico [3].

2.2.1.2 Modelo estatístico

O modelo estatístico (ou RSS) consiste na realização de uma análise de tolerâncias assumindo que as dimensões dos componentes variam de acordo com uma distribuição normal (Figura 2.4). Este tipo de análise tem a particularidade de considerar que, a probabilidade das dimensões dos componentes se encontrarem dentro do limite aceitável, é muito superior à probabilidade das dimensões se encontrarem fora desse limite [9]. Este modelo é representado pela equação 2.2, em que $T_{conjunto}$ representa a tolerância do conjunto e t_i representa as diferentes tolerâncias em análise.

$$T = \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (2.2)$$

Devido à natureza deste modelo, a tolerância obtida por este é de menor valor aquando comparada com o modelo da intermutabilidade total. Esta tendência é mais acentuada

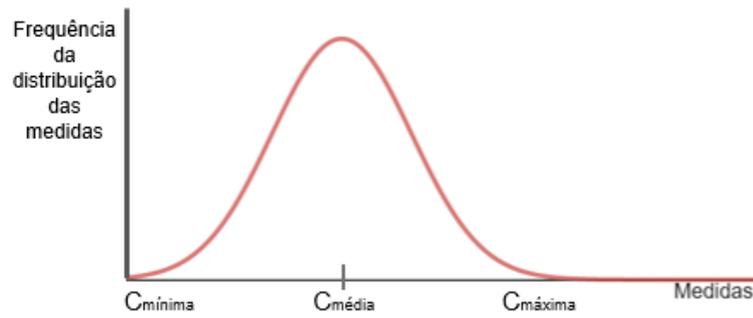


Figura 2.4: Distribuição normal das medidas de uma cota num lote de peças

quando se trata de um número elevado de componentes. Uma limitação deste modelo é o facto de considerar as variações dos processos como sendo normais. Caso se trate de uma distribuição não simétrica ou com desvios do valor médio poderá existir uma percentagem de rejeição com valores inaceitáveis [3].

FUNCIONALIDADES DE COTAGEM DO SOFTWARE *SOLIDWORKS*

3.1 Introdução

O *SolidWorks* é um software de desenho assistido por computador (CAD) e engenharia assistida por computador (CAE). De entre muitas funcionalidades, são de destacar a possibilidade de criar e desenhar componentes, conjuntos e desenhos técnicos. Possui ainda diversos módulos, sendo que para esta dissertação, o foco irá incidir nas funcionalidades de cotagem e toleranciamento.

3.2 Barra de ferramentas *Model Based Definition*

A barra de módulos *Model Based Definition* do *DimXpert* (figura 3.1) agrega todas as funcionalidades responsáveis pela cotagem e toleranciamento de componentes e conjuntos. Nesta barra é possível realizar uma cotagem e toleranciamento de modo automático (*Auto Dimension Scheme*), ou atribuir cotas e tolerâncias de forma manual com recurso às funcionalidades de *location dimension*, *size dimension*, *basic location dimension* e *pattern feature*. O *location dimension* relaciona duas características do componente, atribuindo uma cota com a respetiva tolerância (como por exemplo, a distância entre os eixos de dois furos). *Size dimension* é a funcionalidade que permite a cotagem e toleranciamento manual de uma só característica geométrica do componente (por exemplo, um único furo). O *basic location dimension* permite a atribuição de cotas teoricamente exatas, designadas por *datum dimensions* na bibliografia anglo-saxónica. A funcionalidade *pattern feature* consiste na atribuição de cotas a características geométricas repetidas, como por exemplo múltiplos furos. Nesta barra é possível ainda atribuir referências ou *datums* e tolerâncias

geométricas (*geometric tolerance*), assim como realizar uma análise de tolerâncias do conjunto, recorrendo ao *TolAnalyst*. Existe ainda uma outra funcionalidade, *show tolerance status*, que através de um código de cores indica se a característica geométrica em análise se encontra totalmente cotada e toleranciada. Quando é exibida uma cor verde, o *SolidWorks* considera que essa característica geométrica se encontra totalmente cotada e toleranciada. Caso esteja parcialmente dimensionada, a cor exibida é amarela, e caso não esteja de todo dimensionada exibe uma cor cinzenta (por defeito). Na figura 3.2 é possível observar um componente, cotado e toleranciado com recurso às funcionalidades do *DimXpert*. Algumas das características encontram-se totalmente cotadas e toleranciadas (a verde), enquanto outras se encontram a amarelo (indicando a ausência de cotas e tolerâncias). A cotagem e toleranciamento realizados pela ferramenta automática depende da parametrização inicial das funcionalidades, pelo que estes parâmetros devem sempre ser revistos antes da utilização dessa funcionalidade.

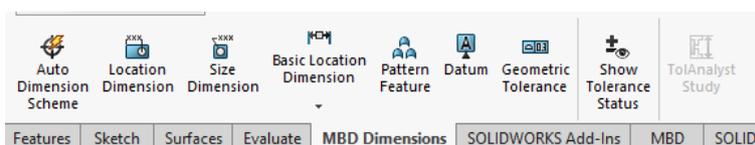


Figura 3.1: Barra de ferramentas *Model Based Definition* do *DimXpert*

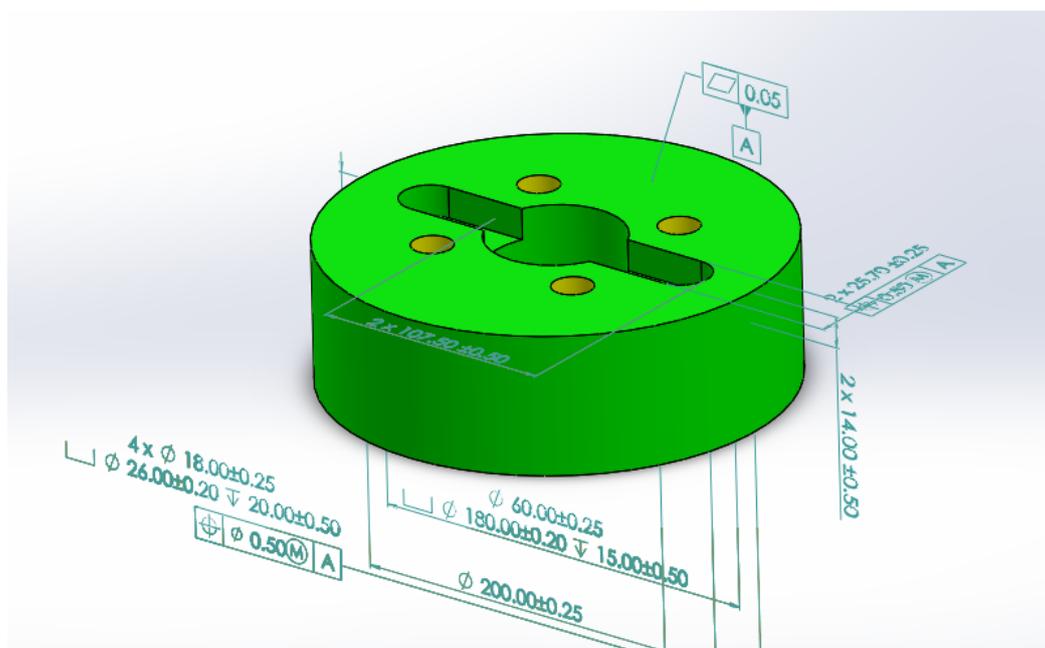


Figura 3.2: Exemplo de componente dimensionado e toleranciado utilizando o modo automático do *DimXpert*

3.3 Parametrização do *SolidWorks* para efeitos de Toleranciamento

No *DimXpert*, é possível alterar diversos parâmetros que influenciam a cotagem e toleranciamento feitos por este módulo. Para esta dissertação, decidiu-se manter inalterados os valores destas predefinições. Na figura 3.3, primeiro menu de opções, é possível escolher qual a norma de desenho pretendida para o documento, assim como o método de toleranciamento a adotar. A norma adotada foi então a ISO em conjunto com o método de *General Tolerance*, sendo que os componentes e conjuntos em análise se encontram em unidades métricas. É possível ainda especificar, com base na norma ISO 2768-1, a classe geral de tolerâncias (fina, média, baixa, muito baixa). Manteve-se a escolha de uma classe média de tolerâncias.

No que diz respeito ao toleranciamento dimensional, figura 3.4, deixou-se as predefinições do documento inalteradas (simétrico). Neste menu, é possível alterar as predefinições para as diferentes características geométricas dos componentes indicando se o toleranciamento será do tipo simétrico, bilateral ou com base na classe geral de tolerâncias. No menu seguinte, figura 3.5, é possível customizar os valores referentes às tolerâncias obtidas com a cotagem manual do tipo *location dimension*. Na figura 3.6, é possível observar o menu de cotagem referente à funcionalidade de cotagem automática e toleranciamento dimensional. Este menu permite ao utilizador escolher o modo como irão ser apresentadas as cotas quando o mesmo recorre à funcionalidade automática do *DimXpert*. Embora seja possível adotar um sistema de cotagem em série ou em paralelo, por se tratar de uma parametrização inicial, não é relevante a escolha. Esta escolha dependerá de uma análise funcional do conjunto a que pertence. As tolerâncias geométricas, figura 3.7, são também passíveis de alterações por parte do utilizador. É possível alterar o valor das tolerâncias geométricas e definir se é necessário utilizar a condição de máximo material. No que diz respeito aos chanfros, figura 3.8, existe a possibilidade de alterar os parâmetros de cotagem e toleranciamento dos mesmos. Por fim, figura 3.9, é possível alterar o modo como são apresentados os resultados das funcionalidades do *DimXpert*.

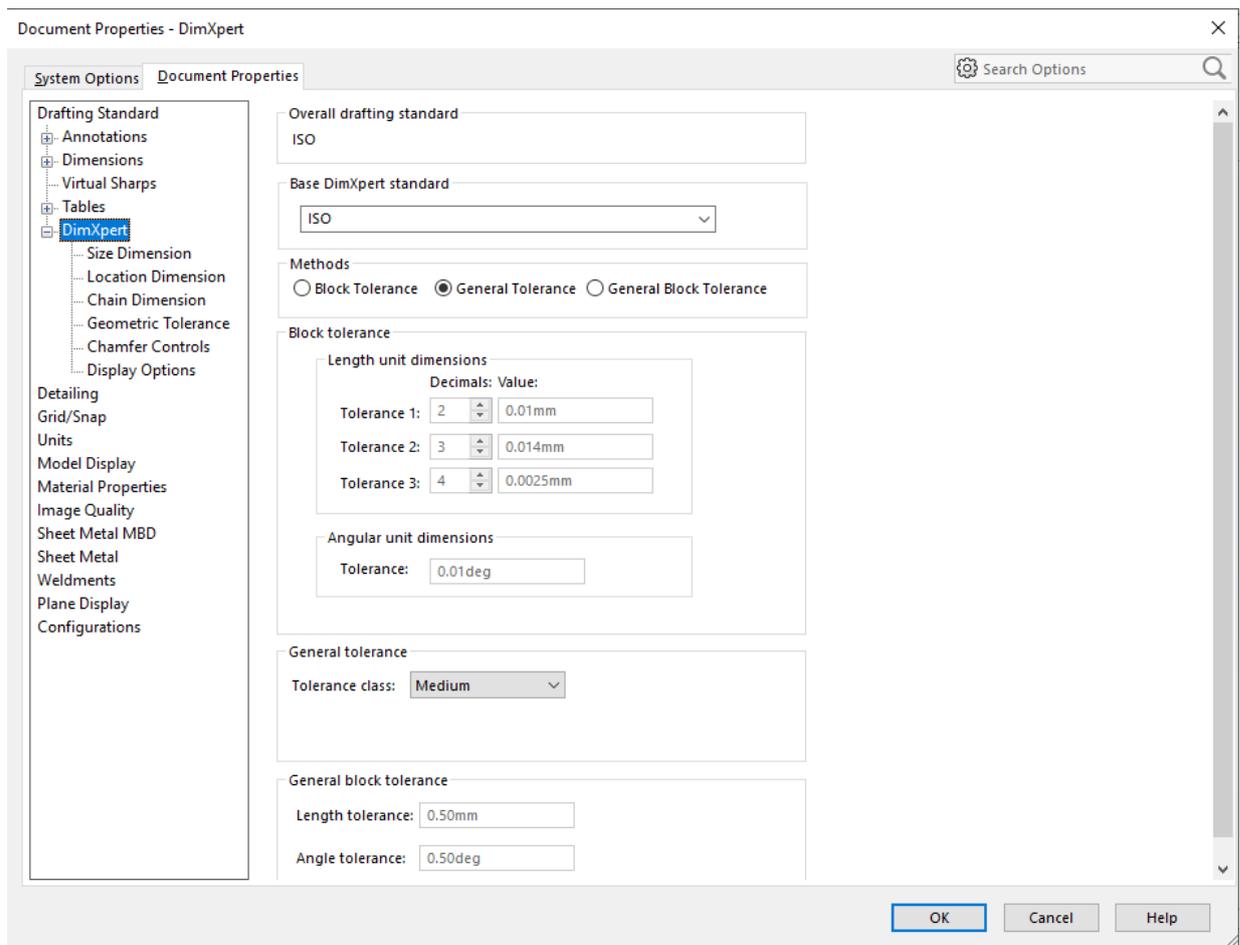


Figura 3.3: Menu de configurações gerais do *DimXpert*

3.3. PARAMETRIZAÇÃO DO SOLIDWORKS PARA EFEITOS DE TOLERANCIAMENTO

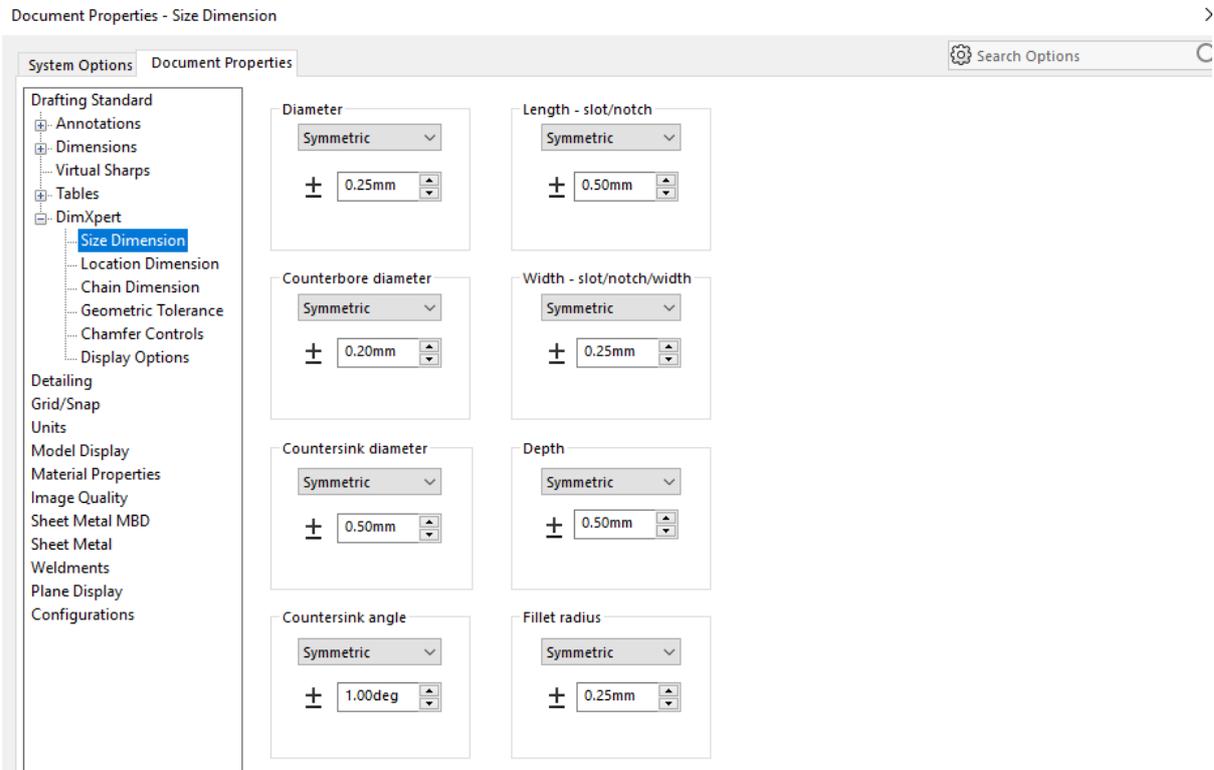


Figura 3.4: Menu de configurações para o toleranciamento dimensional

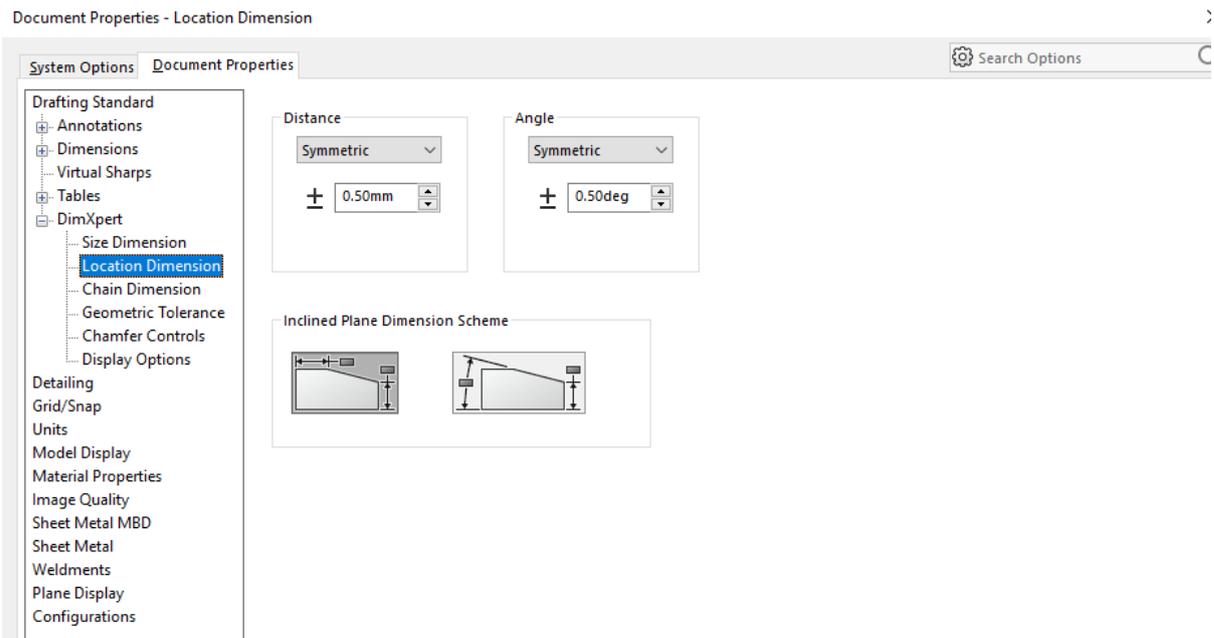


Figura 3.5: Menu de configurações para a cotagem do tipo *location dimension*

CAPÍTULO 3. FUNCIONALIDADES DE COTAGEM DO SOFTWARE *SOLIDWORKS*

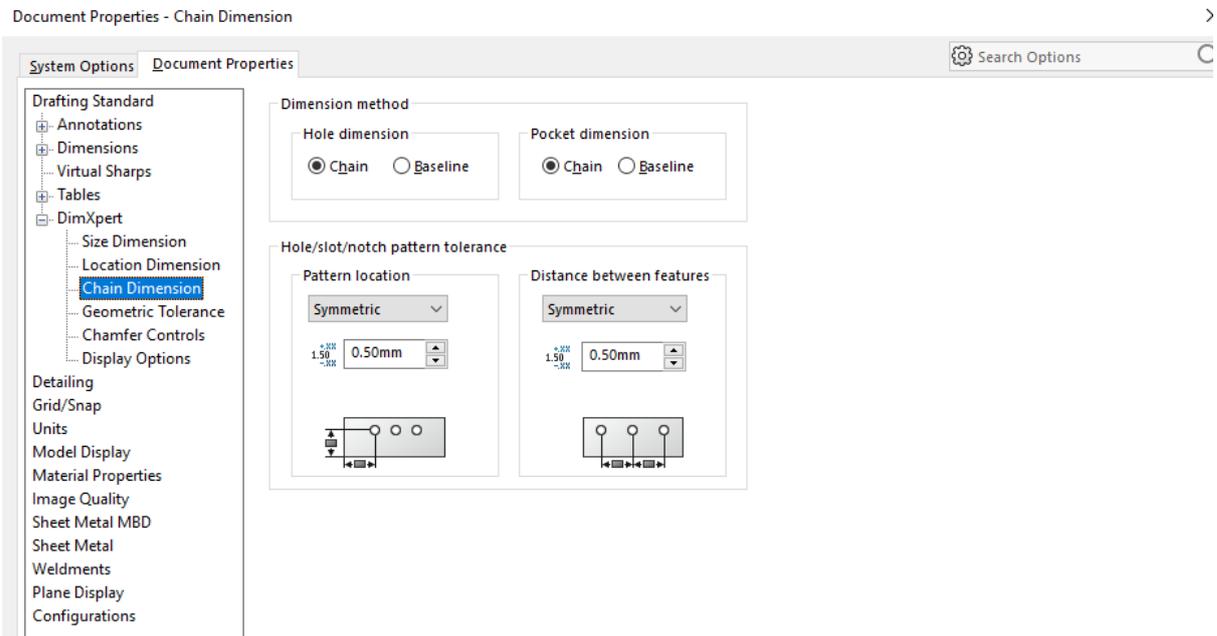


Figura 3.6: Menu de configurações para a cotação e toleranciamento automático dimensional

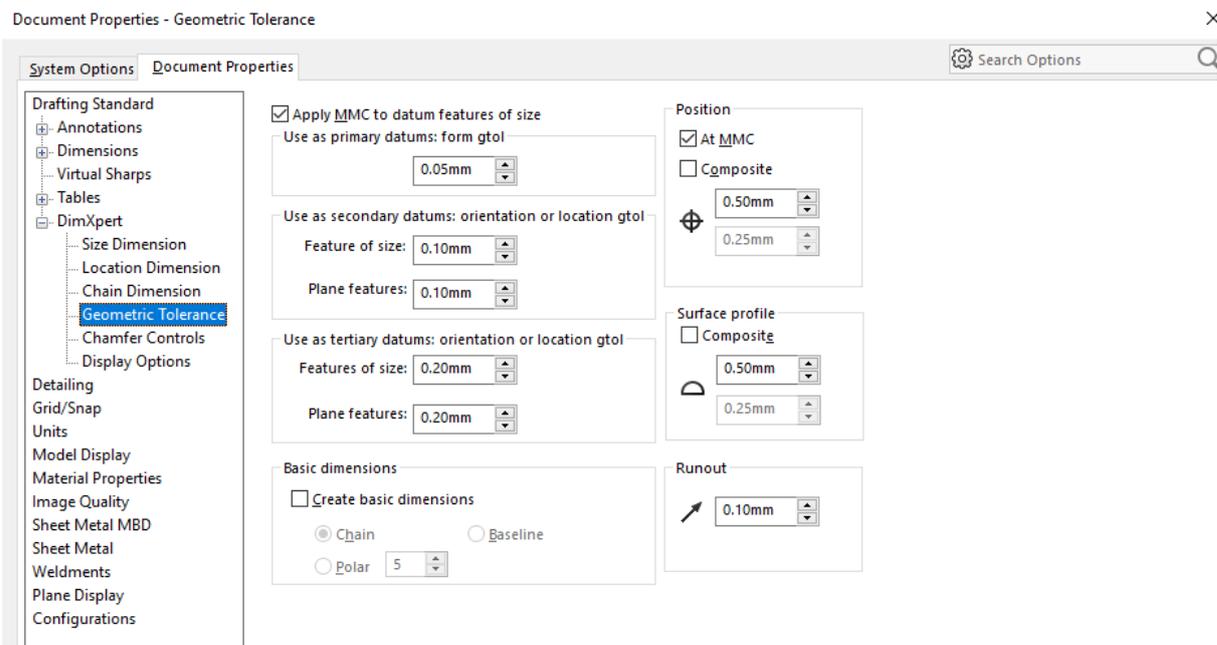


Figura 3.7: Menu de configurações para o toleranciamento geométrico

3.3. PARAMETRIZAÇÃO DO SOLIDWORKS PARA EFEITOS DE TOLERANCIAMENTO

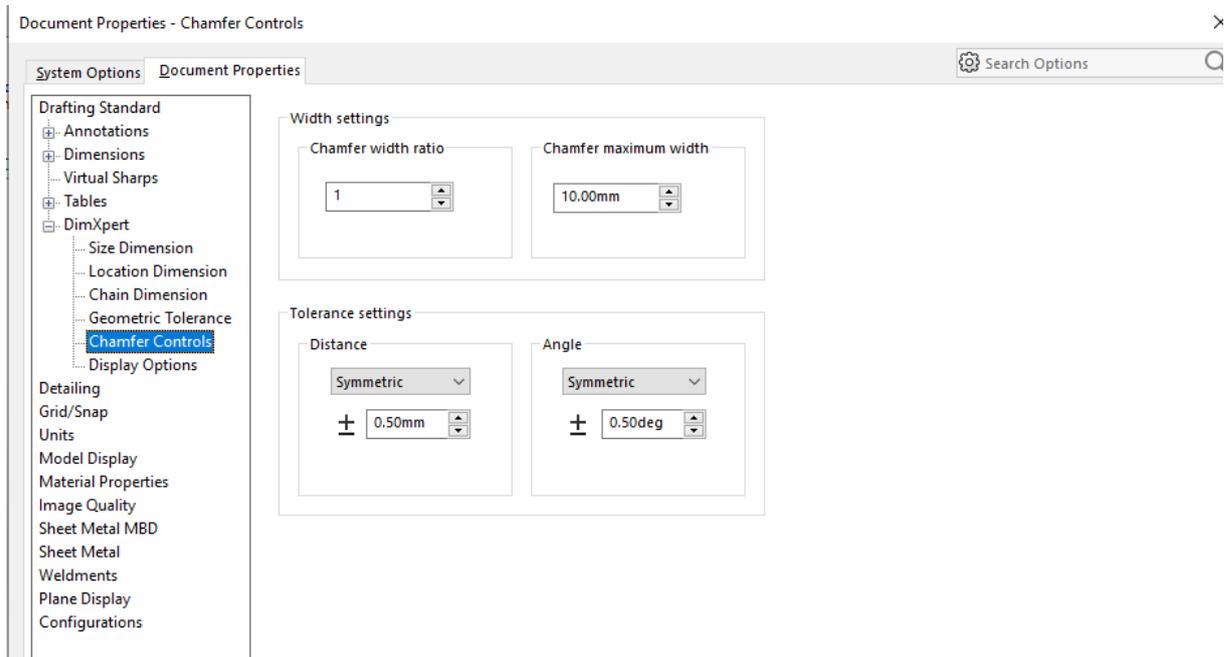


Figura 3.8: Menu de configurações para os chanfros

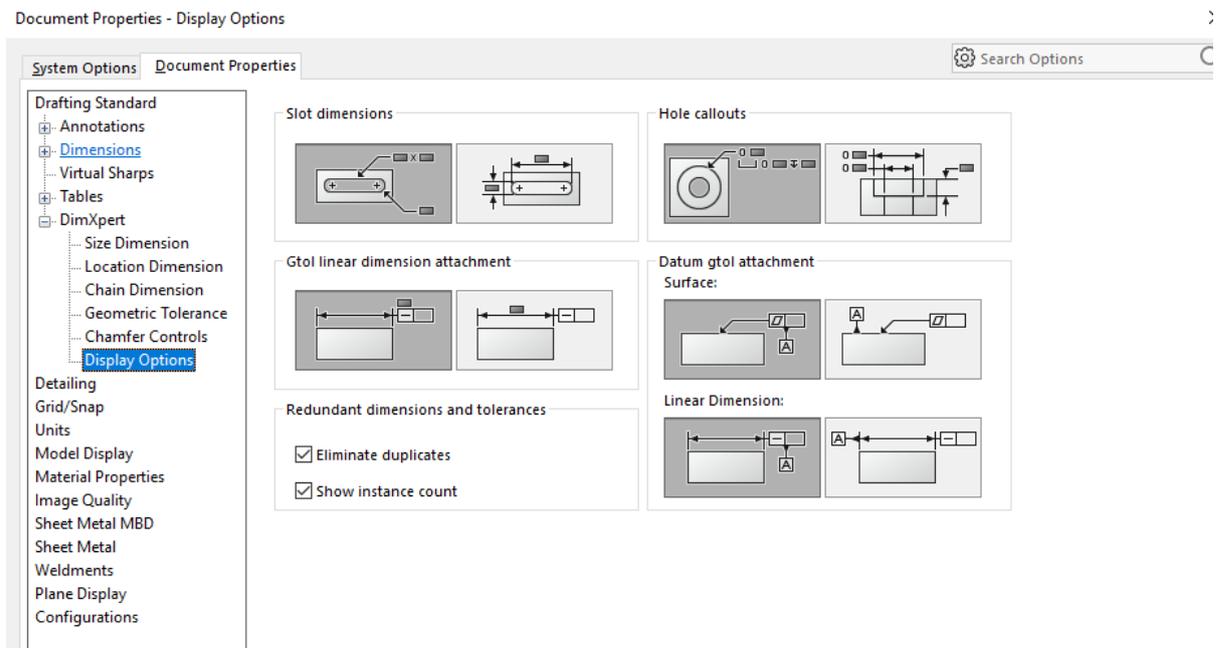


Figura 3.9: Menu de configurações de apresentação de resultados

3.4 Cotagem e toleranciamento automáticos

Esta funcionalidade do *DimXpert* permite a atribuição automática de cotas e respectivas tolerâncias a um componente. Esta atribuição automática leva em consideração os dados inseridos na parametrização inicial (3.3), pelo que o utilizador deve sempre verificar se os mesmos vão de encontro às suas necessidades. No entanto, caso seja necessário, é possível alterar os valores e os tipos de tolerâncias atribuídos após a utilização desta funcionalidade.

De modo a ilustrar o funcionamento desta ferramenta, decidiu-se utilizar como exemplo um componente (figura 3.10) de um conjunto mecânico pertencente ao tutorial do *SolidWorks*. Para os restantes componentes o procedimento a adotar é semelhante. Começou-se por selecionar a opção “Auto Dimension Scheme” na barra de ferramentas *DimXpert-Manager* (Figura 3.11). No segundo menu (Figura 3.12), para o primeiro bloco de opções, foi necessário especificar se o componente seria de revolução ou prismático, se o tipo de tolerâncias a aplicar seriam dimensionais ou geométricas e se o tipo de padrão de dimensionamento é linear ou polar. Neste caso, considerou-se que a tampa seria torneada, com tolerâncias geométricas e um padrão linear. No segundo bloco, são especificadas as referências (*datums*). Para o exemplo em análise, considerou-se como referência primária o eixo do furo central e como referência secundária a face plana. No terceiro e quarto blocos, são indicadas ao programa quais as características geométricas do componente a toleranciar. Para o caso de estudo, considerou-se todas as características. Pressionando o símbolo de certo, o software apresenta o componente com todas as tolerâncias que permitem o seu total toleranciamento (indicado pela cor verde (Figura 3.13)).

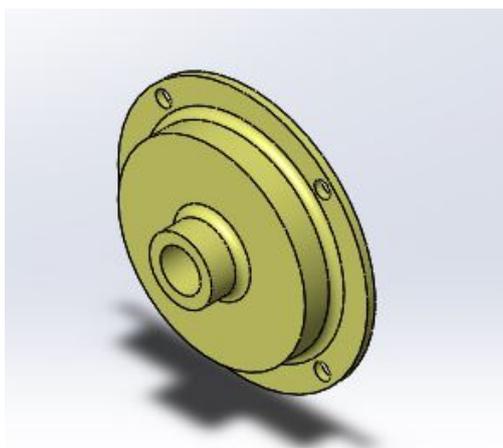


Figura 3.10: Componente em análise [10]

A ferramenta de cotagem e toleranciamento automáticos do *DimXpert* permite facilitar o trabalho do utilizador, quando necessita de atribuir tolerâncias e dimensões a componentes. No entanto, a utilização da mesma carece de alguns cuidados, especialmente na seleção de quais as características a toleranciar. A seleção de todas as características do

3.4. COTAGEM E TOLERANCIAMENTO AUTOMÁTICOS

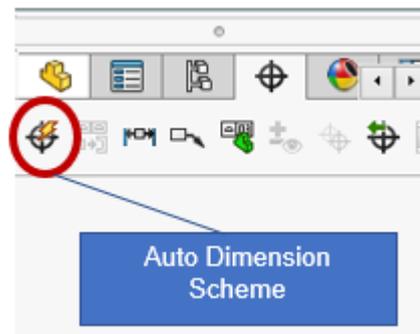


Figura 3.11: Menu de seleção da ferramenta *DimXpert*

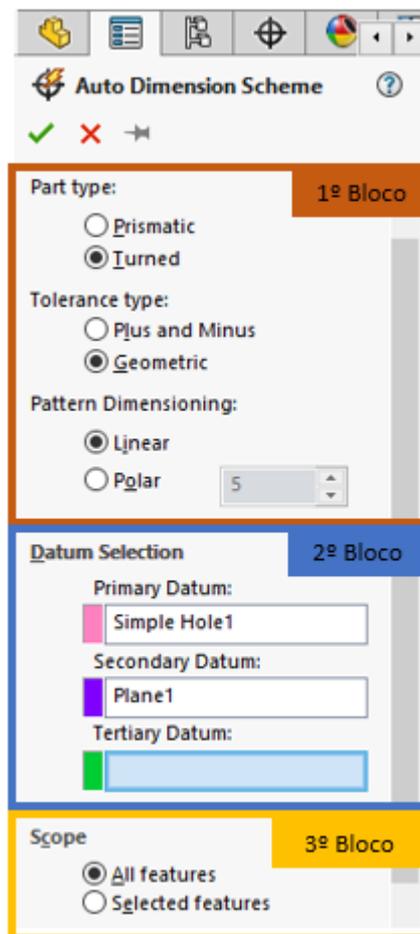


Figura 3.12: Menu de introdução das características a toleranciar

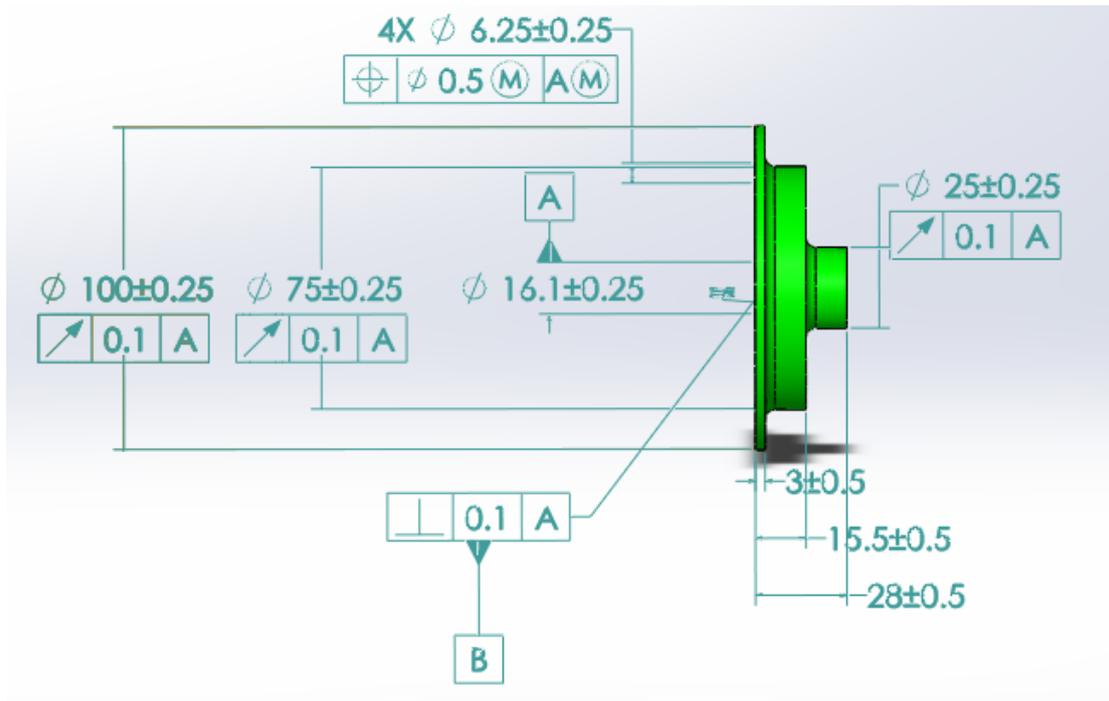


Figura 3.13: Componente totalmente toleranciado

componente irá produzir resultados mais completos, mas que ao mesmo tempo podem ser excessivos, pelo que o utilizador deve sempre observar com espírito crítico estes mesmos resultados. Um toleranciamento excessivo terá efeitos tão ou mais nefastos que um toleranciamento incompleto. Posto isto, é possível tirar algumas conclusões:

- Foram atribuídas tolerâncias de movimento a diversas superfícies do componente, sem existir qualquer informação acerca da montagem a que pertence. Como tal, o utilizador deve analisar se as tolerâncias atribuídas são necessárias ou não, tendo em conta as condições funcionais do projeto;
- Os valores obtidos pelo toleranciamento automático da ferramenta *DimXpert* são provenientes das propriedades da parametrização 3.3. O utilizador deverá sempre confirmar quais os valores a aplicar, tendo em conta os processos tecnológicos a utilizar;
- Ao utilizar o *DimXpert*, existe uma tendência para a atribuição de um excesso de tolerâncias, especialmente quando o utilizador seleciona a opção *all features*. De modo a eliminar redundâncias ou tolerâncias de interpretação ambígua, o utilizador deve selecionar apenas as *features* consideradas necessárias e suficientes;
- O *DimXpert* deverá ser encarado como uma ajuda e não como uma solução definitiva. A ferramenta tem a possibilidade de alertar o utilizador para tolerâncias ou dimensões que por lapso poderiam escapar, ou então, atribuir tolerâncias excessivas sem qualquer utilidade prática.

3.5 TolAnalyst

3.5.1 Generalidades

O *TolAnalyst* é outra funcionalidade do *DimXpert*. Trata-se de uma funcionalidade apenas disponível na versão *premium* do *SolidWorks*, sendo que tal como o seu nome indica, tem como principal característica a análise de tolerâncias. É importante referir que esta análise é estática, e como tal não contempla a existência de deformações devido à ação de forças ou da temperatura [11]. Para a sua correta utilização, é necessário a cotação e toleranciamento prévio, recorrendo às funcionalidades do *DimXpert* (3.2), visto que o *TolAnalyst* se baseia nos dados obtidos pela mesma. De um modo resumido, pode dizer-se que o que esta ferramenta faz é uma análise cumulativa de tolerâncias, isto é, permite determinar se uma montagem efetuada com componentes toleranciados individualmente irá ser bem-sucedida, ou seja se fica dentro das condições requeridas. Feita esta análise, é possível visualizar os resultados obtidos para a folga em estudo. São exibidos os valores para as combinações de tolerâncias que originam os piores casos (intermutabilidade total), assim como o valor mais provável de ser obtido via aplicação do modelo estatístico (assumindo uma distribuição normal). Este último, é representado pela sigla *Root Sum Square* (Raiz da soma dos quadrados) (RSS). Em suma, pode dizer-se que o uso desta funcionalidade consiste em 4 passos fundamentais [12]:

- Medição:

É pedido ao utilizador que crie uma medição entre duas características geométricas, previamente dimensionadas com recurso ao *DimXpert* (3.2).

- Sequência de montagem:

Este passo contempla a escolha da sequência de montagem real, que poderá diferir da sequência utilizada para modelar o conjunto.

- Restrições da montagem:

É necessário definir agora o modo como os componentes irão ser montadas e como o seu movimento irá ser constrangido. Esta definição é feita sequencialmente e a ordem escolhida poderá afetar os resultados finais.

- Resultados da análise:

Por fim, são apresentados os resultados mínimo e máximo para o pior caso possível, assim como a RSS. Além destes valores, é apresentado também o modo como as tolerâncias anteriormente definidas contribuem para os resultados obtidos (em percentagem). Com base nas contribuições, é possível o utilizador alterar os valores de cada uma das tolerâncias individualmente e calcular de novo os resultados. Permite ainda a exportação dos resultados para uma folha de cálculo.

A interface gráfica do software *SolidWorks* é bastante intuitiva, sendo que cada menu possui breves explicações do seu funcionamento.

3.5.2 Ilustração do funcionamento

De modo a ilustrar o funcionamento da ferramenta *TolAnalyst* recorreu-se ao uso de um conjunto mecânico (figura 3.14) que se encontra disponível para consulta nos tutoriais do próprio software. O raciocínio a adotar será sempre o mesmo, independentemente do conjunto a analisar.

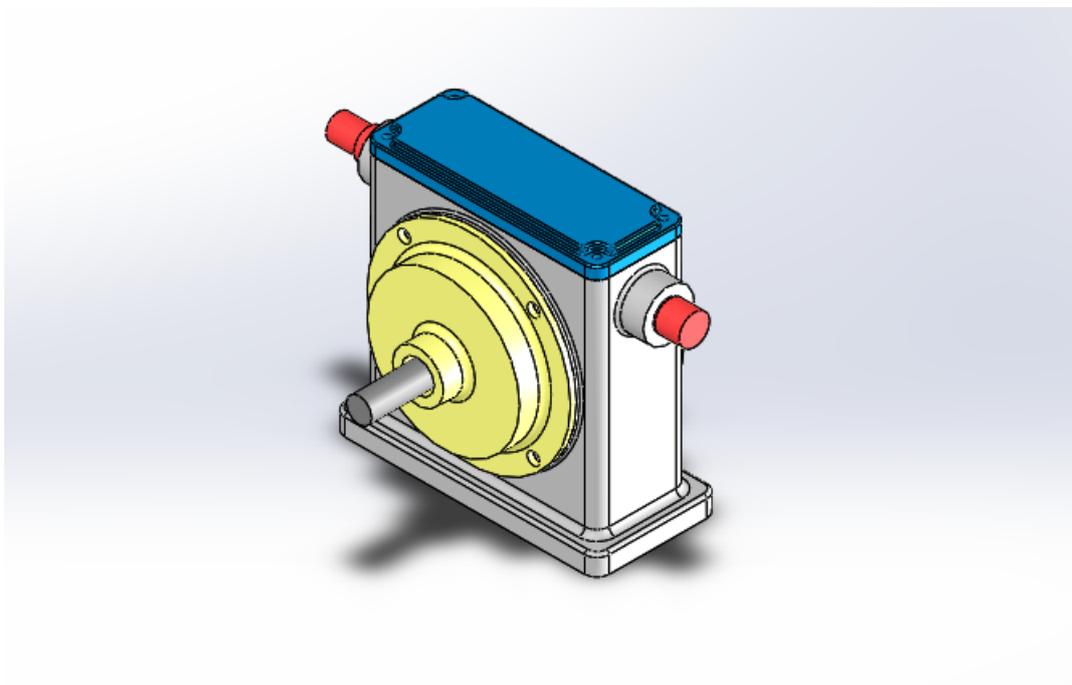


Figura 3.14: Conjunto mecânico em análise [10]

Tendo efetuado o toleranciamento para cada um dos componentes do conjunto mecânico, tal como indicado em 3.2, é agora possível efetuar uma análise de tolerâncias. Para isso, é necessário ativar o *add-in* desta ferramenta (figura 3.15). De seguida, na barra de ferramentas do *DimXpertManager* selecionou-se a opção *TolAnalystStudy* (figura 3.16). É mostrado um menu (figura 3.17), em que é pedido ao utilizador para especificar qual a distância a ser medida (e se se pretende analisar a folga máxima ou mínima). Neste caso, considerou-se a folga mínima entre o veio e tampa do conjunto. De seguida, ao pressionar a seta orientada para a direita, um novo menu é exibido em que o utilizador tem agora que inserir qual a ordem de montagem do conjunto. Considerou-se neste caso a ordem indicada na Figura 3.18. Pressionando de novo a seta, um novo menu aparece, sendo pedido ao utilizador que indique agora o modo como os componentes irão ter o seu movimento restringido (figura 3.19). É importante que o utilizador tenha conhecimento do modo como todos os componentes irão montar no conjunto, pois os resultados apresentados poderão vir a ser diferentes conforme a informação indicada. Por fim, ao pressionar a seta

de novo, são apresentados os resultados da análise (figura 3.20). Neste último menu, é possível observar os valores da folga nominal, mínima, máxima e RSS. Mais abaixo, Figura 3.21, é possível observar ainda quais as tolerâncias que mais contribuem para esta folga, sendo possível editá-los e calcular de novo a folga obtida. É ainda possível exportar os dados para uma folha de cálculo.

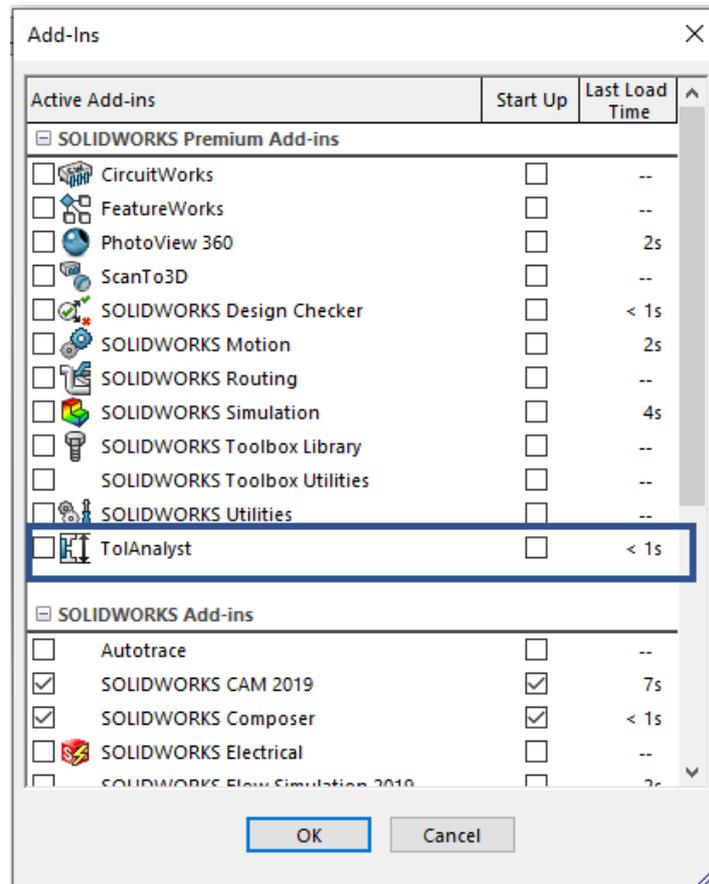


Figura 3.15: Menu de ativação do TolAnalyst



Figura 3.16: Abertura da ferramenta TolAnalyst

3.5.3 Conclusões

O módulo *TolAnalyst* é um recurso bastante interessante, pois permite analisar a existência de interferências entre componentes de uma montagem. Permite ainda alterar os valores das tolerâncias e medições, e de imediato visualizar os resultados obtidos, o que é uma mais-valia especialmente para conjuntos constituídos por um elevado número de peças. Neste capítulo não foi dada especial atenção nos resultados obtidos, pois o objetivo

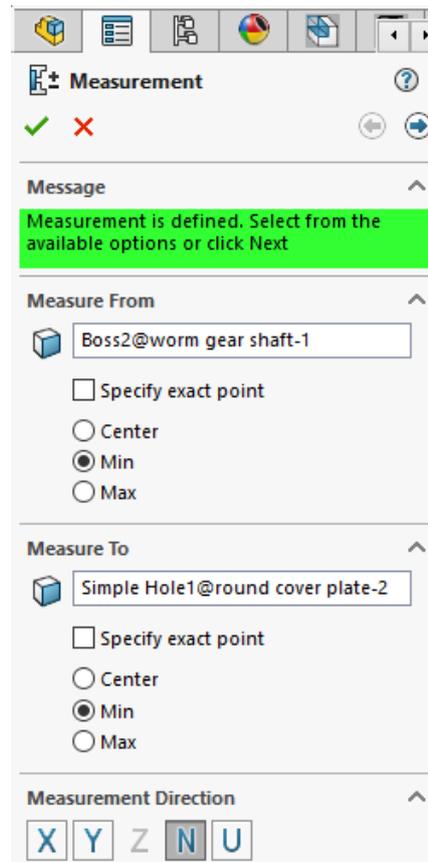


Figura 3.17: Seleção da folga a analisar

principal é apenas ilustrar o funcionamento da ferramenta. Mais à frente, são abordados em profundidade todos os pormenores da mesma. No entanto, é já possível concluir que:

- A ferramenta *TolAnalyst* baseia-se nas tolerâncias dimensionais e geométricas estabelecidas pelo *DimXpert*. De modo a obter resultados fiáveis é imperativo que cada um dos componentes constituintes do conjunto, sejam corretamente toleranciados. A ferramenta depende ainda de variáveis como a ordem de montagem e restrições de movimento. Um conhecimento aprofundado sobre o funcionamento do conjunto mecânico em estudo é essencial.
- O *TolAnalyst* é um recurso que trata os sistemas mecânicos como sistemas rígidos. Quer isto dizer que não contempla a existência de deformações causadas pela aplicação de forças, variações de temperatura ou condições de montagem.

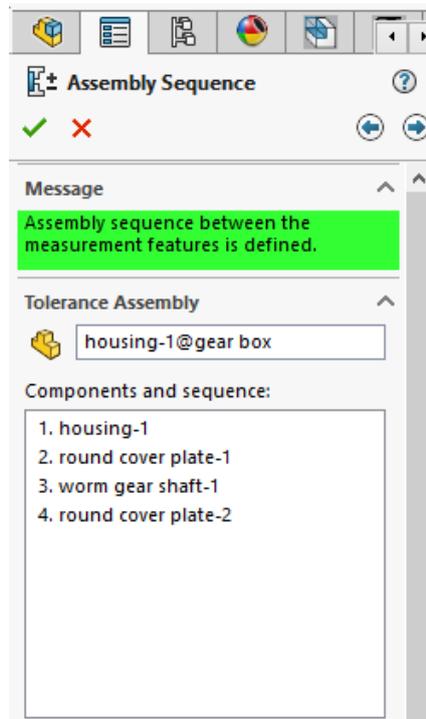


Figura 3.18: Ordem de montagem do conjunto

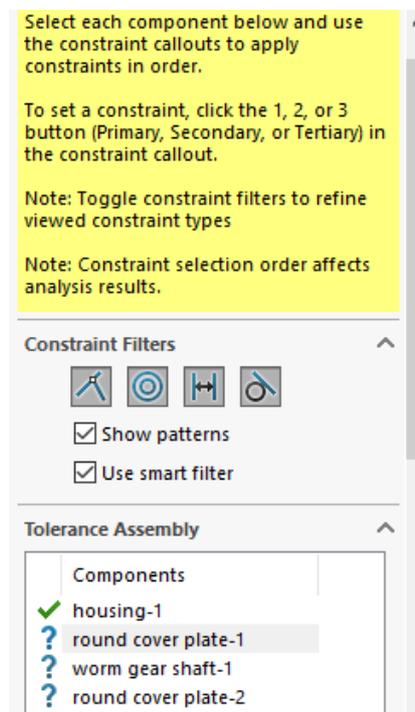


Figura 3.19: Estabelecimento das restrições de movimento

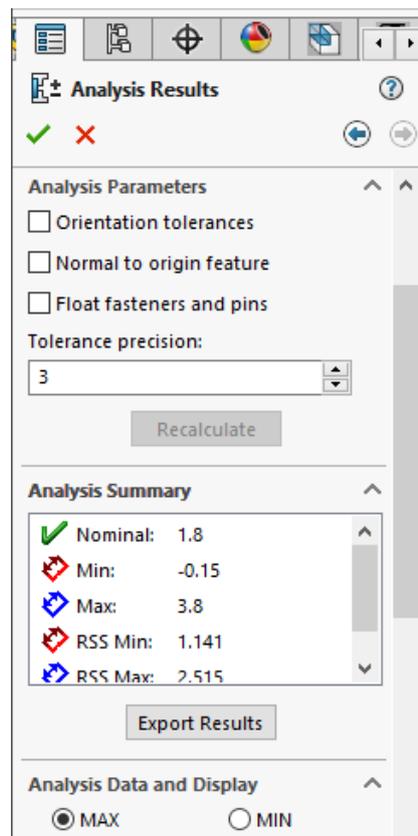


Figura 3.20: Resultados da análise

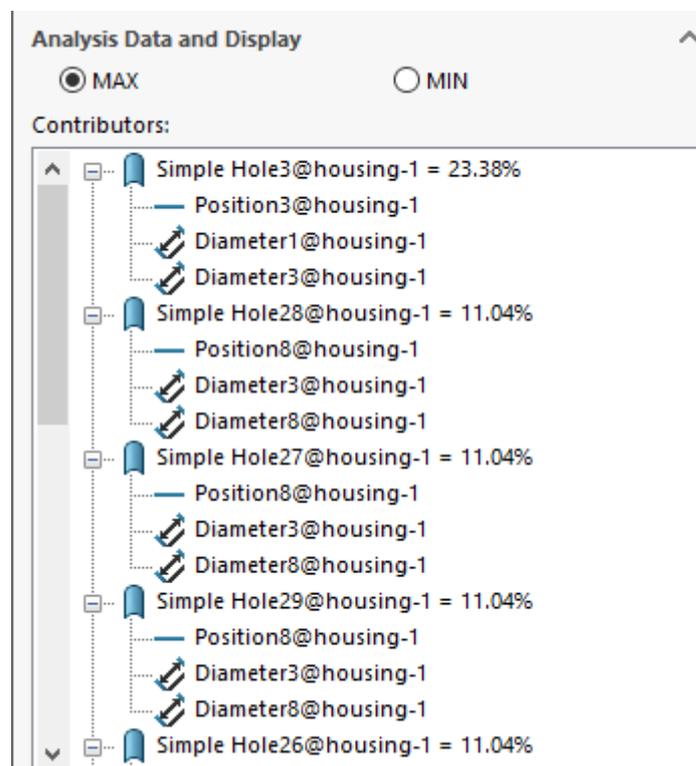


Figura 3.21: Contribuições das tolerâncias de cada um dos componentes

ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DE COTAGEM AUTOMÁTICA

4.1 Introdução

De modo a poder ilustrar e compreender melhor o raciocínio da funcionalidade de cotação automática do *DimXpert*, decidiu-se analisar um conjunto mecânico simples, constituído por dois componentes, figura 4.1 Para tal, modelaram-se ambos os componentes e criou-se um *assembly* dos mesmos.

Para que fosse possível ilustrar o modo como o *DimXpert* atua, decidiu-se averiguar a influência de dois fatores nos resultados obtidos: a modelação do componente e a escolha das referências de montagem.

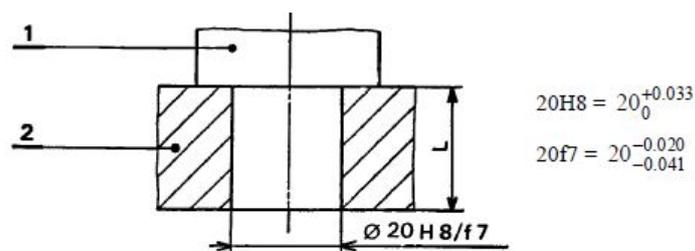
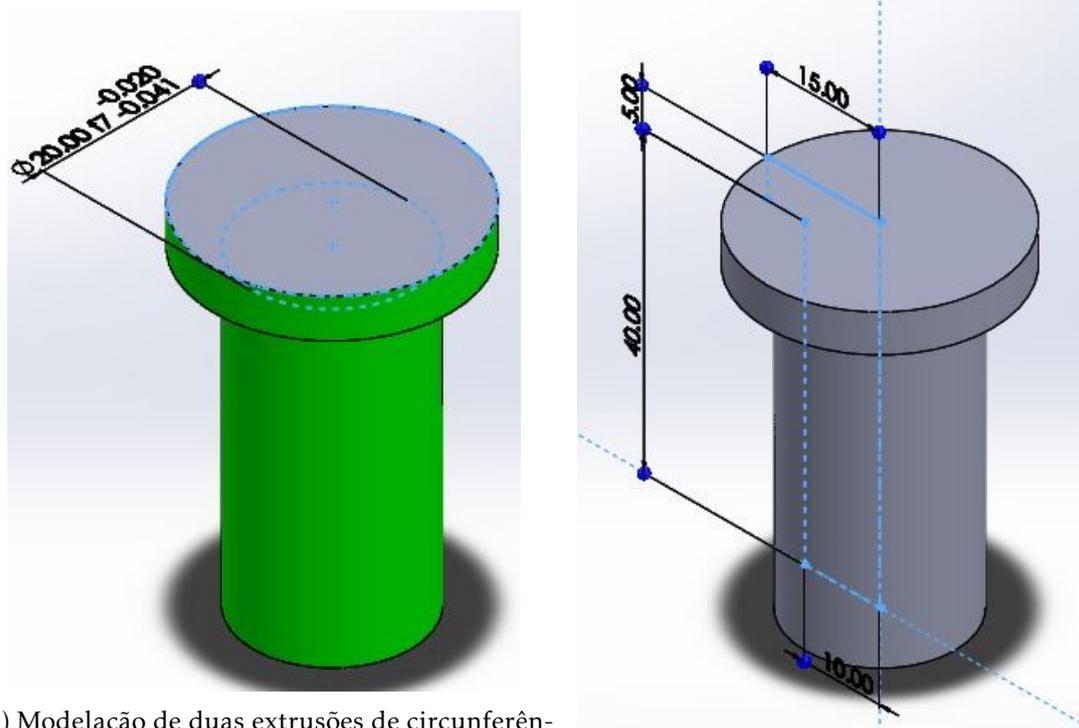


Figura 4.1: Montagem simples - baseada em [13]

4.2 Influência da modelação dos componentes nos resultados obtidos pelo *DimXpert*

4.2.1 Com modelações diferentes

O componente 1 consiste num pino simples, cujo diâmetro do mesmo é 20f7. O *SolidWorks* permite a modelação do componente de inúmeras maneiras, sendo que pretende-se comparar os resultados obtidos por duas dessas maneiras. Tratando-se de um pino simples, decidiu-se replicar a sua geometria de dois modos diferentes. Para o primeiro modo, recorreu-se a duas circunferências extrudidas e para o segundo modo recorreu-se ao desenho do perímetro exterior do pino seguido de uma feature de revolução. Os componentes obtidos encontram-se ilustrados na figura 4.2. Para obter o furo de dimensão 20H8 do componente dois, recorreu-se a duas abordagens diferentes. Uma delas recorrendo à tool HoleWizard, enquanto que para a outra abordagem recorreu-se a um Cut Extrude (figura 4.3). Como seria expectável, visualmente os resultados obtidos pelos diferentes métodos de modelagem são iguais.



(a) Modelação de duas extrusões de circunferências

(b) Modelação de um perímetro exterior

Figura 4.2: Métodos de modelação do componente 1

4.2.2 Assemblagem dos componentes

Para que fosse possível analisar qual a influência da modelação dos componentes no resultado obtido pelo *DimXpert* na assemblagem, recorreu-se a 4 assemblagens diferentes.

4.2. INFLUÊNCIA DA MODELAÇÃO DOS COMPONENTES NOS RESULTADOS OBTIDOS PELO DIMXPRT

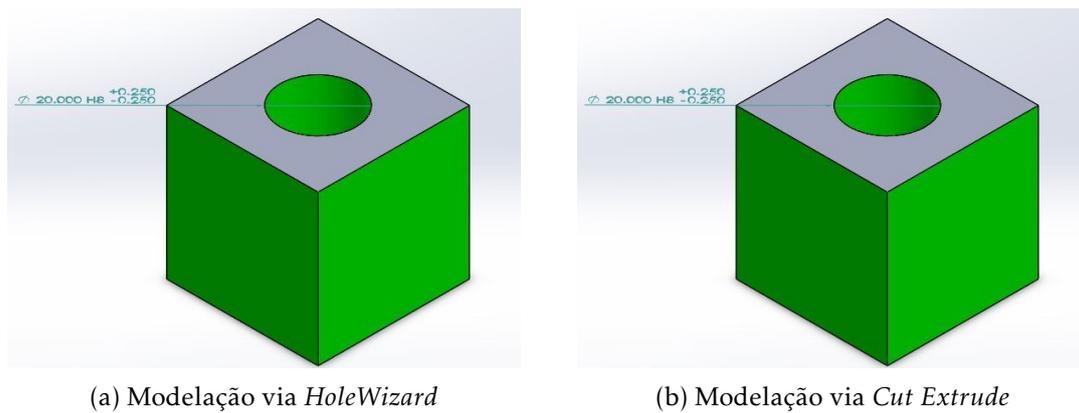


Figura 4.3: Métodos de modelação do componente 2

Estas assemblagens tiveram em vista comparar os resultados obtidos nas 4 combinações possíveis da montagem, eliminando quaisquer outras variáveis. Decidiu-se o uso dos mesmos *mates* e *datums* para todas as montagens. Assumiram-se ainda *mates* de concentricidade do eixo do componente 1 com o eixo do componente 2 (figura 4.4) e uma relação de coincidência entre as faces dos componentes, figura 4.5. Dada a simplicidade do conjunto, optou-se por restringir o movimento dos componentes. Mais uma vez, visualmente o resultado obtido foi idêntico para todas as combinações de montagem.

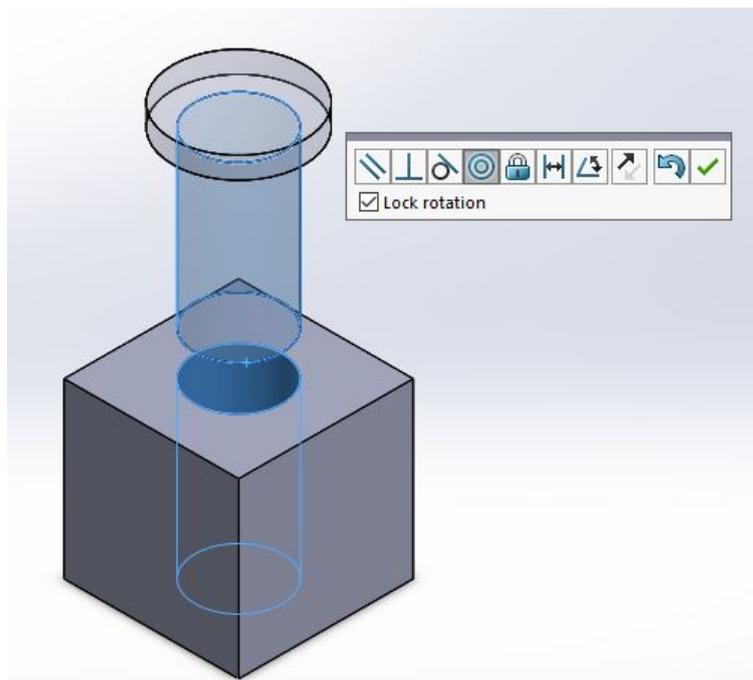


Figura 4.4: Relação de concentricidade entre os eixos dos dois componentes

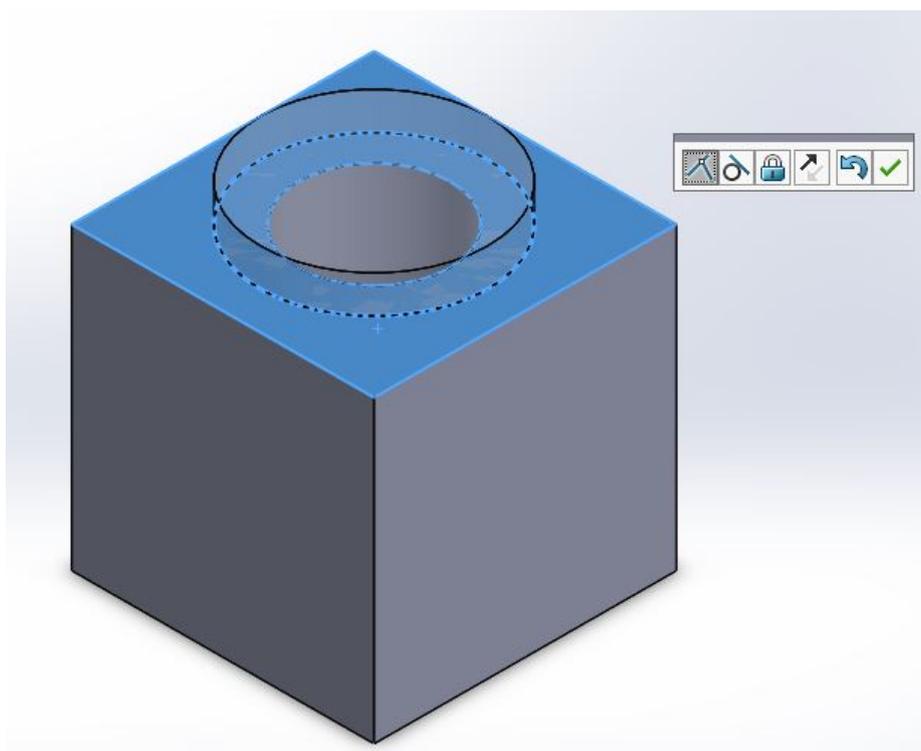


Figura 4.5: Relação de coincidência entre as faces dos componentes

4.2.3 Análise de resultados

Para cada uma das combinações de montagem possíveis, a escolha dos datums foi sempre a mesma. Como *datum* primário escolheu-se o eixo do diâmetro do veio (a rosa) e como *datum* secundário escolheu-se a face superior do bloco (a roxo), figura 4.6. Considerou-se ainda, que ambos os componentes seriam de geometria prismática contemplando tolerâncias geométricas e dimensionais, cotando e toleranciando todas as *features* dos componentes. O resultado obtido encontra-se ilustrado pela figura 4.7. Caso se tivesse selecionado uma geometria de revolução para a atribuição automática das tolerâncias, as tolerâncias geométricas de posição verificadas na figura 4.7 seriam substituídas por tolerâncias de movimento, tal como a figura 4.8 ilustra. Foi possível ainda apurar que, independentemente da configuração de montagem escolhida, a funcionalidade de auto cotagem considerou sempre as mesmas características para efetuar o toleranciamento. Essas características consistem em 8 planos (referentes a cada uma das superfícies exteriores dos componentes), 2 extrusões (*boss's* referentes às duas extrusões do pino) e um furo simples (figura 4.9). Tendo em conta estes resultados, é possível afirmar que o modo como os componentes são modelados e por sua vez assembled, não influencia de modo algum os resultados pela funcionalidade de cotagem automática.

4.2. INFLUÊNCIA DA MODELAÇÃO DOS COMPONENTES NOS RESULTADOS
OBTIDOS PELO DIMXPRT

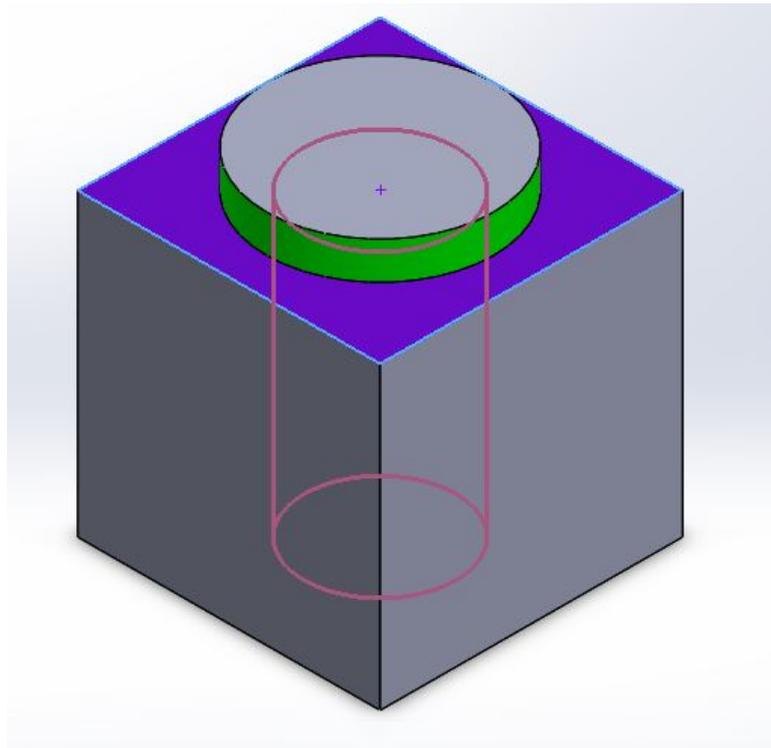


Figura 4.6: Escolha dos *datums* para a montagem

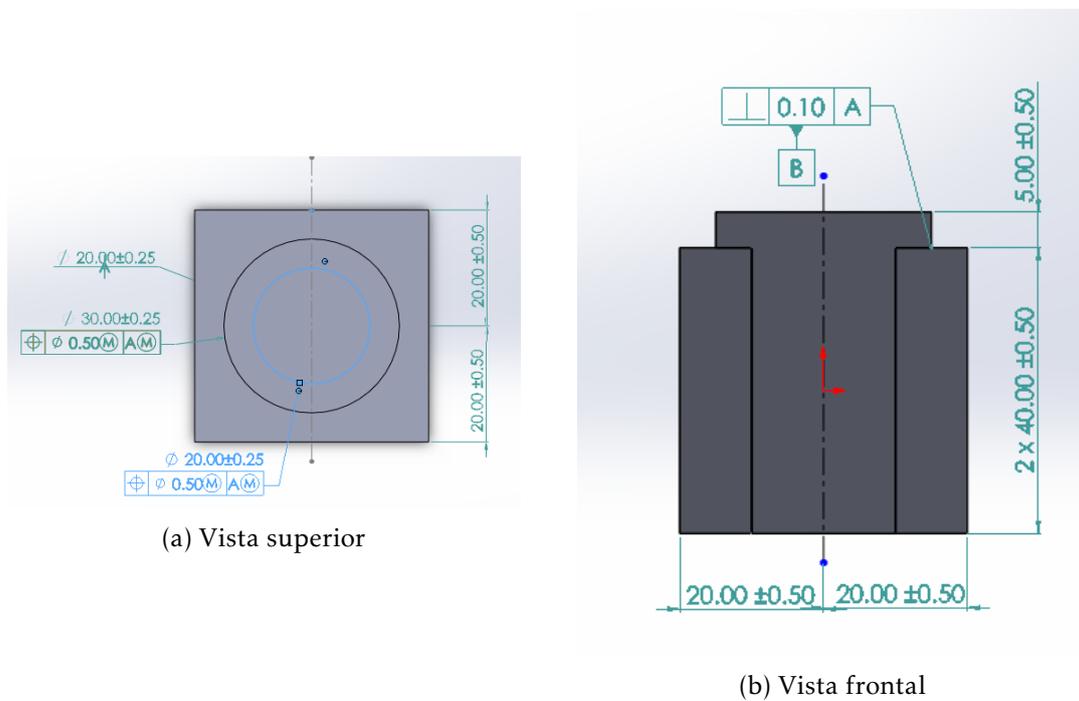


Figura 4.7: Cotagem e toleranciamento automático considerando geometria prismática

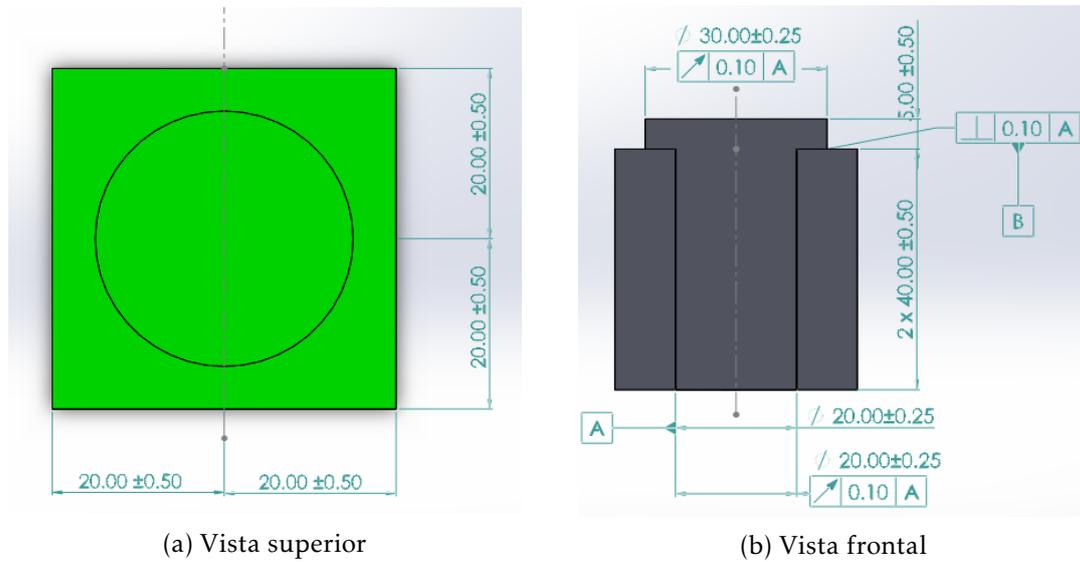


Figura 4.8: Cotagem e toleranciamento automático considerando geometria de revolução

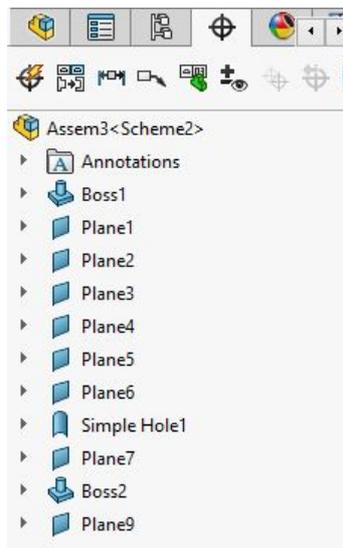


Figura 4.9: Features consideradas pela ferramenta DimXpert

4.3 Influência da escolha das referências nos resultados obtidos pelo *DimXpert*

Tendo concluído que a modelação dos componentes não tem influência nos resultados obtidos pela funcionalidade de cotação automática do *DimXpert*, decidiu-se analisar qual a influência da escolha das referências (*datums*). Utilizou-se os mesmos parâmetros estabelecidos em 4.2. Decidiu-se para esta análise, apenas variar o *datum* principal, mantendo o secundário como sendo a face superior do calibre.

4.3.1 Escolha dos *datums*

Dadas as especificações de projeto, verificou-se que o utilizador pode escolher como *datum* principal o eixo do veio ou o eixo do furo. Considerando o eixo do veio como sendo a referência principal, é possível observar que é aplicada uma tolerância de movimento ao eixo do furo (4.10)

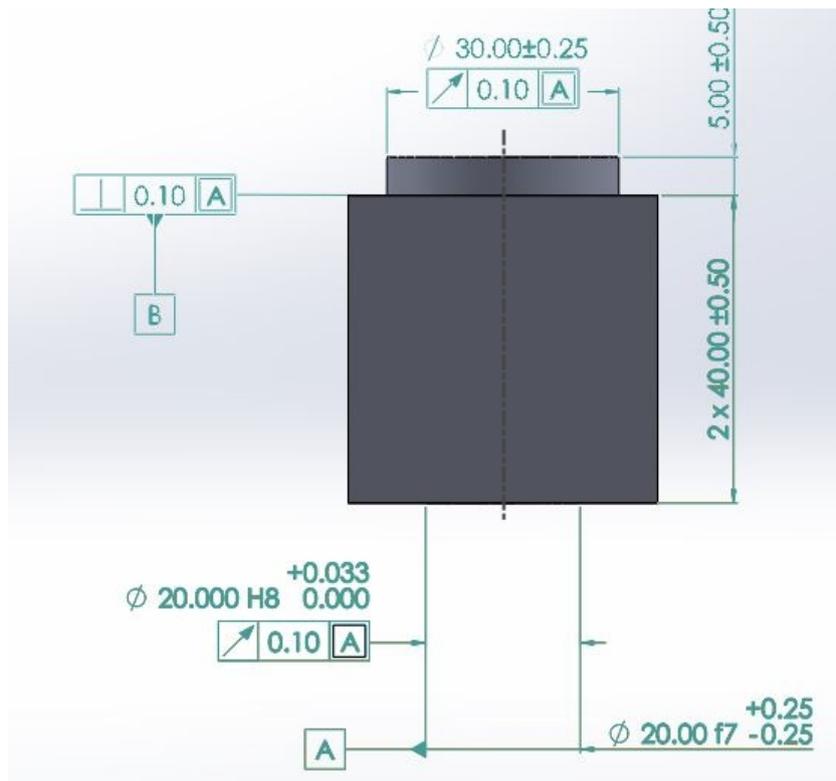


Figura 4.10: Eixo do veio como referência principal

Por sua vez, ao considerar como referência principal o eixo do furo, verifica-se o inverso. Passa então a ser atribuída uma tolerância de movimento ao eixo do veio, figura 4.11.

Por oposição, ao considerar a montagem como sendo totalmente prismática, os resultados obtidos são semelhantes mas com tolerâncias de posição ao invés de movimento (à

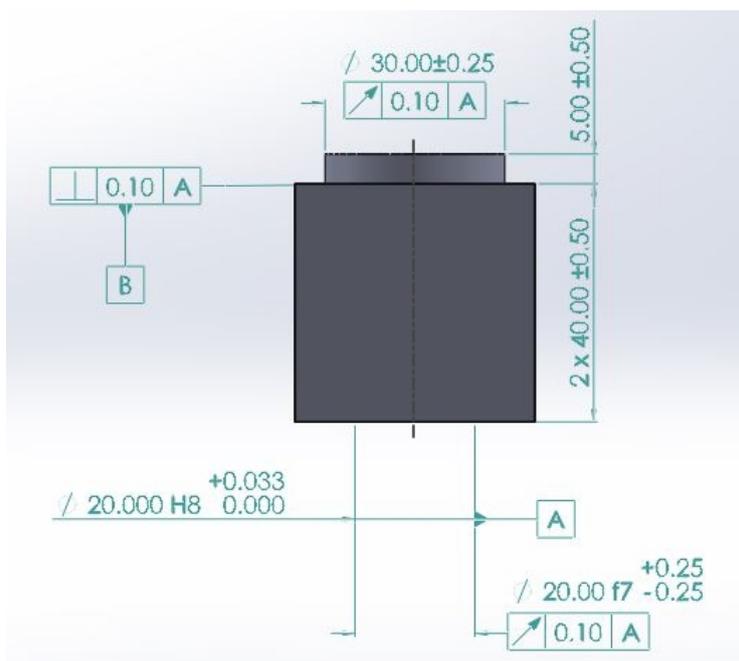


Figura 4.11: Eixo do furo como referência principal

semelhança do que se verificou anteriormente em 4.2. Estes resultados estão ilustrados pelas figuras 4.12 e 4.13.

Para o caso de estudo em questão, não existe indicação de quais as referências a usar. Cabe então ao utilizador definir quais as referências apropriadas. Ao variar o *datum* escolhido, o *DimXpert* apresenta os resultados em função da referência. Embora à primeira vista estes resultados possam ser satisfatórios, é necessário espírito crítico na sua interpretação, de tal modo que os mesmos possam ir de encontro ao pretendido inicialmente.

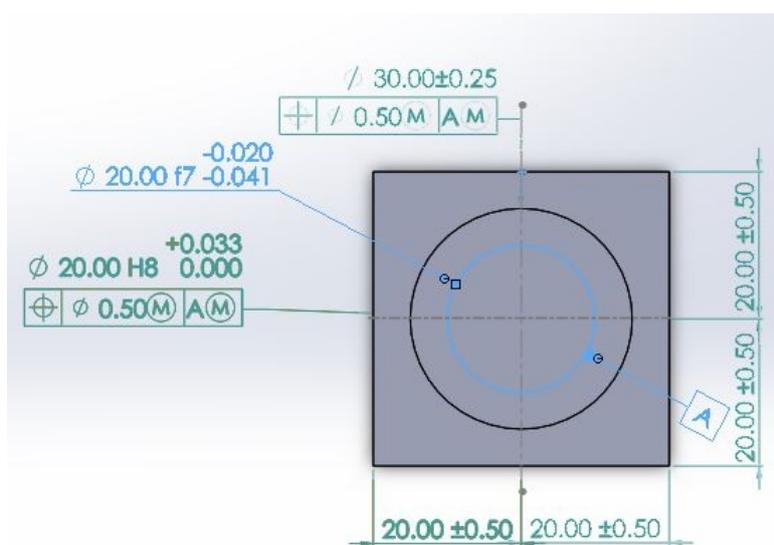


Figura 4.12: Eixo do veio como referência principal (prismático)

4.3. INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DAS REFERÊNCIAS NOS RESULTADOS
OBTIDOS PELO DIMXPRT

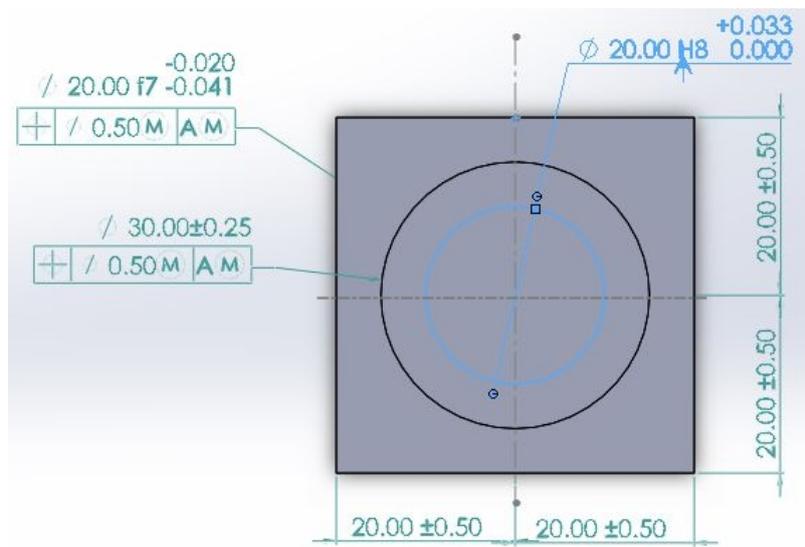


Figura 4.13: Eixo do furo como referência principal (prismático)

RESULTADOS DA COTAGEM AUTOMÁTICA RELATIVAMENTE À ANÁLISE FUNCIONAL DE UM CONJUNTO

5.1 Introdução

De modo a poder ilustrar e compreender melhor o raciocínio do *DimXpert* e do *TolAnalyst*, decidiu-se analisar um conjunto mecânico simples, constituído por dois componentes (figura 5.1). Ambos os componentes são de geometria prismática, e é estabelecido que F_A está compreendida entre 0.02mm e 0.07mm e que F_B está compreendido entre 0.1mm a 0.5mm.

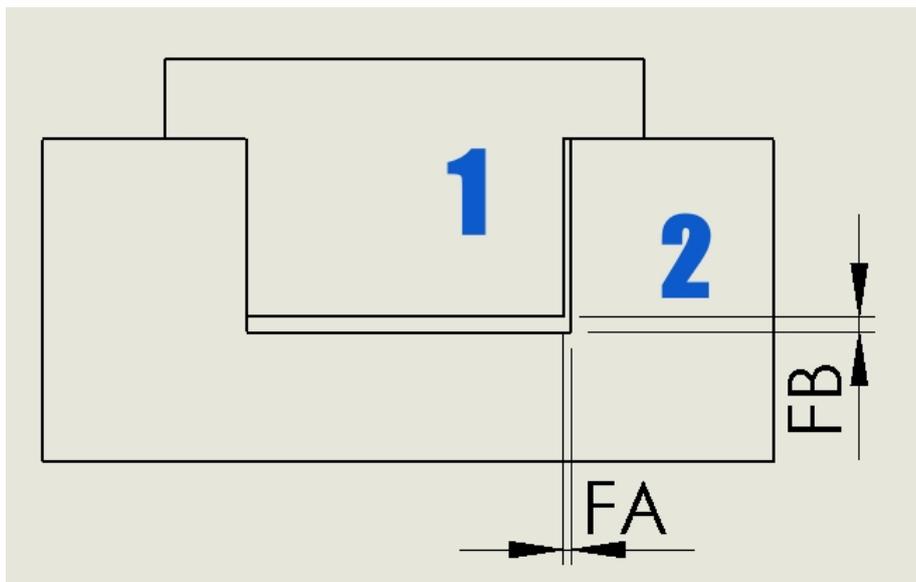


Figura 5.1: Montagem simples em análise

5.2 Cotagem automática dos componentes

O primeiro passo, é iniciar a ferramenta de auto dimensionamento, que se encontra na barra de ferramentas MBD, figura 5.2.

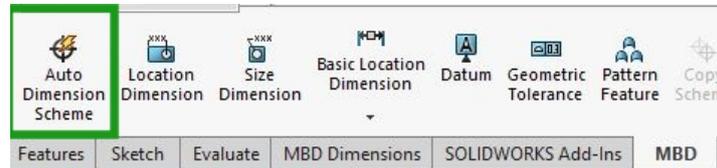


Figura 5.2: Ferramenta de auto dimensionamento na barra de ferramentas MBD

De seguida, verifica-se o aparecimento de uma barra lateral, figura 5.3. Esta barra contém 3 blocos de opções, sendo que o primeiro é referente às definições de toleranciamento, o segundo é referente à escolha dos *datums* e o terceiro bloco permite escolher quais as características geométricas a toleranciar.

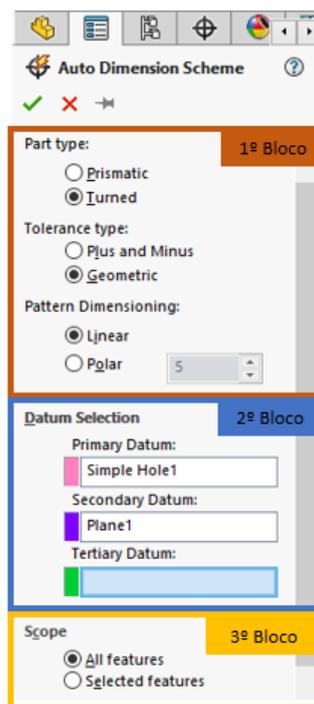


Figura 5.3: Barra lateral do *Auto Dimension Scheme*

Para a cavilha, no primeiro bloco, seleciona-se as opções *prismatic* (pois trata-se de um componente de geometria prismática). No que diz respeito ao tipo de toleranciamento, seleciona-se a opção *Plus and Minus* visto que apenas se quer atribuir tolerâncias dimensionais ao conjunto. Por sua vez, seleciona-se a opção *Linear*, visto que não se trata de um componente cilíndrica. Estas seleções estão representadas na figura 5.4

No segundo bloco, é necessário definir as referências ou *datums*. Para tal, é necessário analisar a montagem e verificar quais as superfícies mais relevantes para garantir a mesma. Como é necessário garantir a existência de uma folga entre as faces laterais

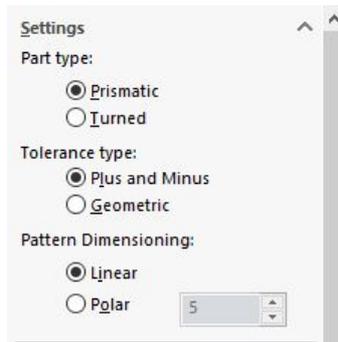


Figura 5.4: Primeiro bloco de opções para o componente 1

dos componentes, seleciona-se como *datum* principal a face esquerda do componente 1. Seguindo este mesmo raciocínio, é necessário acautelar a existência de uma outra folga, desta vez entre a superfície inferior dos componentes. Posto isto, seleciona-se a face inferior do topo do componente 1 como *datum* secundário. Na figura 5.5 é visível a seleção dos *datums* para o componente, enquanto na figura 5.6 estão representadas graficamente as escolhas efetuadas.

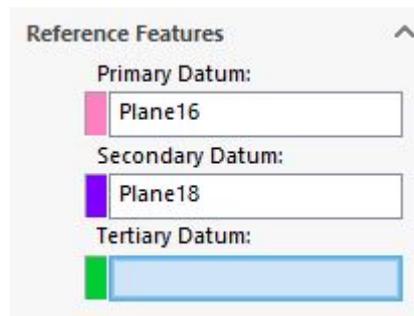
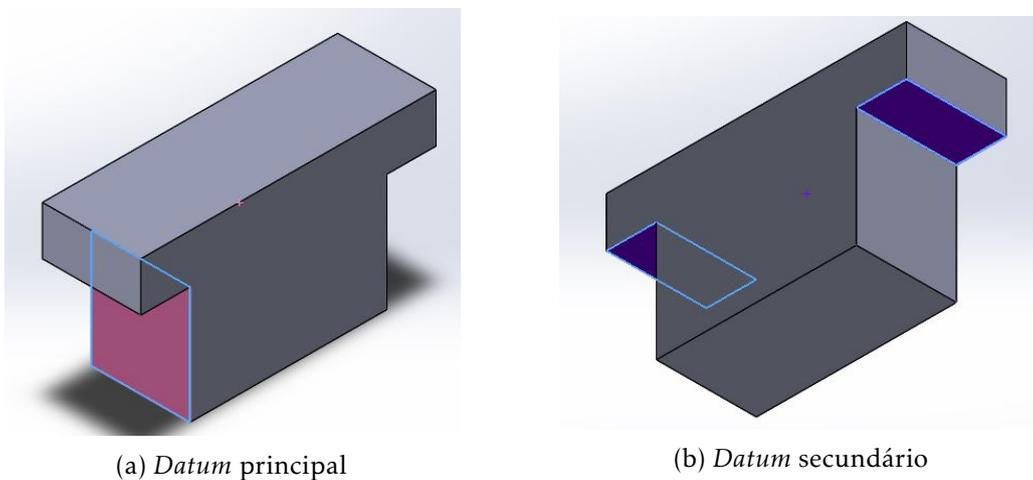


Figura 5.5: Segundo bloco de opções para a cavilha

Por fim, no terceiro bloco, seleciona-se quais as *features* a serem dimensionadas com

Figura 5.6: Representação gráfica da escolha de *datums* para o componente 1

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DA COTAGEM AUTOMÁTICA RELATIVAMENTE À ANÁLISE FUNCIONAL DE UM CONJUNTO

recurso a esta ferramenta. Neste caso, selecionou-se todas as *features* disponíveis, de modo a garantir um dimensionamento completo (figura 5.7).

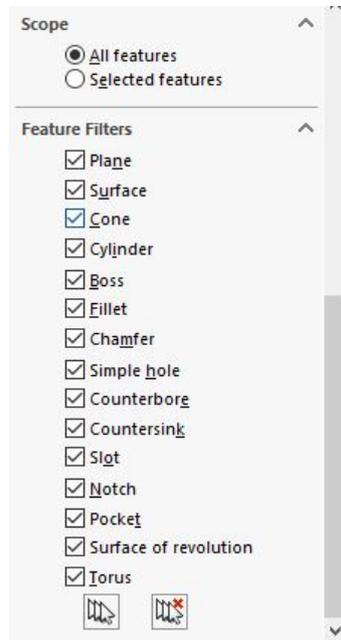


Figura 5.7: Terceiro bloco de opções para o componente 1

Tendo definido todos os parâmetros, ao pressionar a seta verde de confirmação, obteve-se a cotação representada na figura 5.8. Os valores apresentados para as tolerâncias são fruto das parametrizações, como vimos em 3.3.

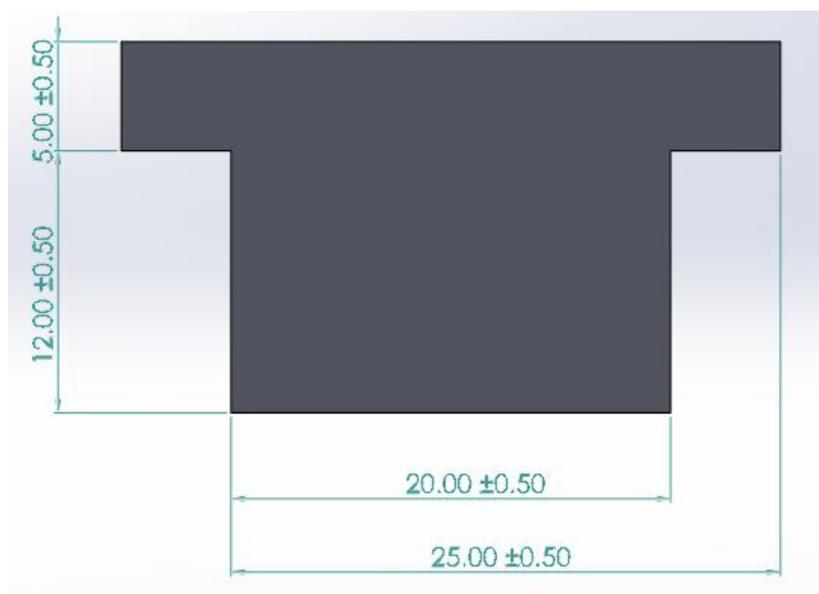


Figura 5.8: Auto cotação do componente 1

Para o segundo componente, o procedimento é análogo ao utilizado para o componente 1 (5.2). Neste caso, alterou-se apenas um parâmetro, a escolha dos *datums* (figura

5.9). Como *datum* principal deste componente, selecionou-se a face lateral esquerda e considerou-se a superfície no topo do componente como sendo o *datum* secundário. Na figura 5.10 é possível visualizar as escolhas efetuadas.

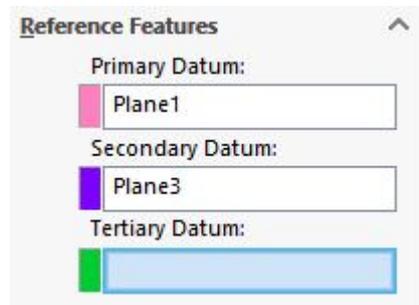
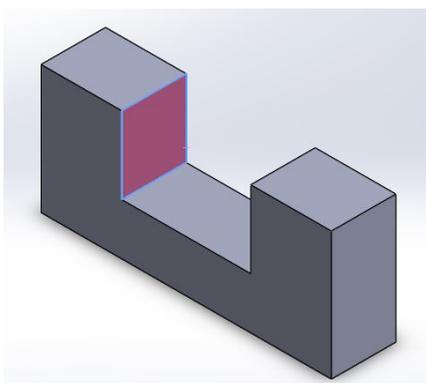
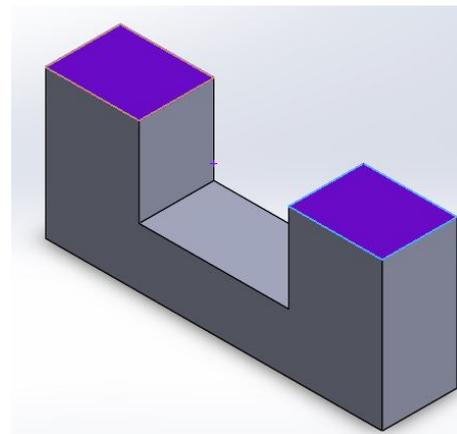


Figura 5.9: Segundo bloco de opções para o componente 2



(a) *Datum* principal



(b) *Datum* secundário

Figura 5.10: Representação gráfica da escolha de *datums* para o componente 2

Após a escolha dos *datums*, pressionou-se mais uma vez a seta de confirmação, tendo obtido os resultados ilustrados pela figura 5.11.

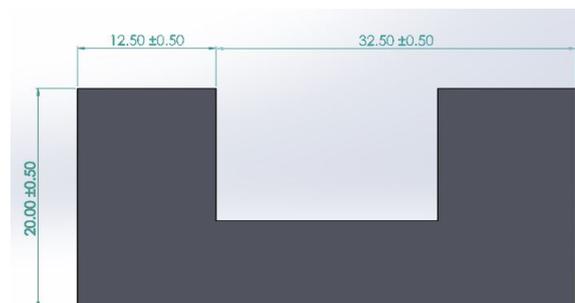


Figura 5.11: Auto dimensionamento do componente 2

5.3 Análise funcional do conjunto mecânico

Para concluir este processo, e tendo os valores das folgas F_A e F_B em mente, é necessário então analisar com espírito crítico quais as cotas e tolerâncias necessárias de modo a cumprir os requisitos funcionais da montagem. A funcionalidade de cotagem e toleranciamento automático, permite ter uma ideia de tudo o que é possível cotar e toleranciar. No entanto, os seus resultados não devem ser encarado como finais, pois apenas as cotas funcionais carecem de toleranciamento. Como tal, é necessário proceder a uma análise funcional da montagem. Em primeiro lugar, foi necessário estabelecer quais as cadeias mínimas de cotas (representadas pela figura 5.12) de onde derivam as cotas funcionais para cada componente. Estas cotas podem ser observadas nas figuras 5.13 e 5.14. A relação funcional para a cadeia A é dada pela equação 5.1 e a relação funcional para a cadeia B é dada pela equação 5.2

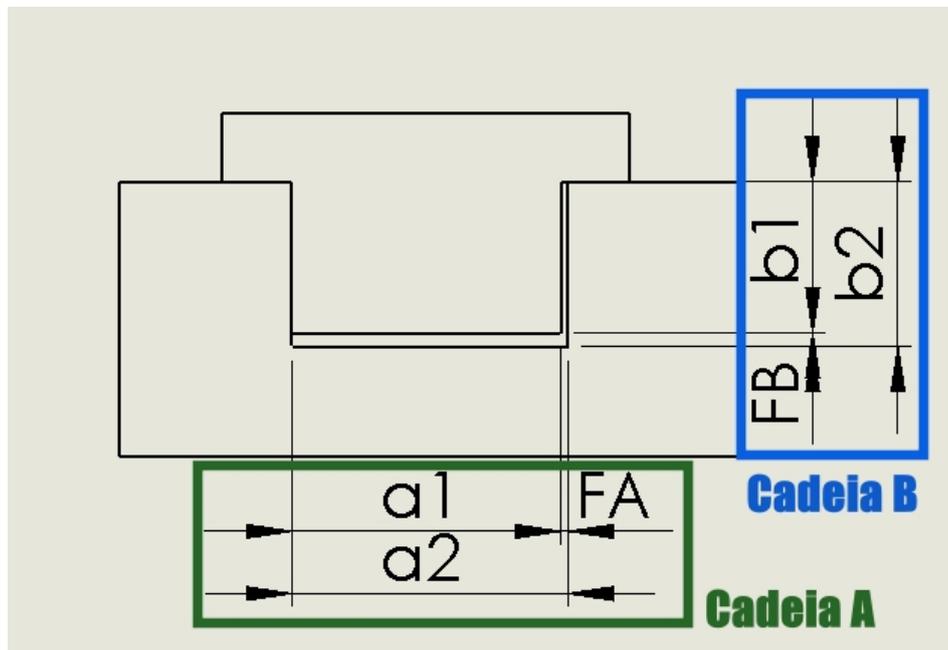


Figura 5.12: Cadeias mínimas de cotas

$$-a_1 + a_2 - F_A = 0 \Leftrightarrow F_A = a_2 - a_1 \quad (5.1)$$

$$b_2 - b_1 - F_B = 0 \Leftrightarrow F_B = b_2 - b_1 \quad (5.2)$$

Após estabelecer quais as relações funcionais, o passo seguinte é proceder-se a uma síntese de tolerâncias. A síntese de tolerâncias consiste na repartição do valor das tolerâncias de F_A e F_B pelas cotas de cada cadeia. Após assumir-se intermutabilidade total para a cadeia A, considerou-se que a_1 é veio e a_2 é furo. O método da precisão constante [3] permite obter uma relação entre as tolerâncias dos componentes 1 e 2 (eq. 5.3). Com esta relação e com a igualdade da equação 5.4, é possível estabelecer que $T_{a_1} = 0.633 T_{a_2}$. Tendo

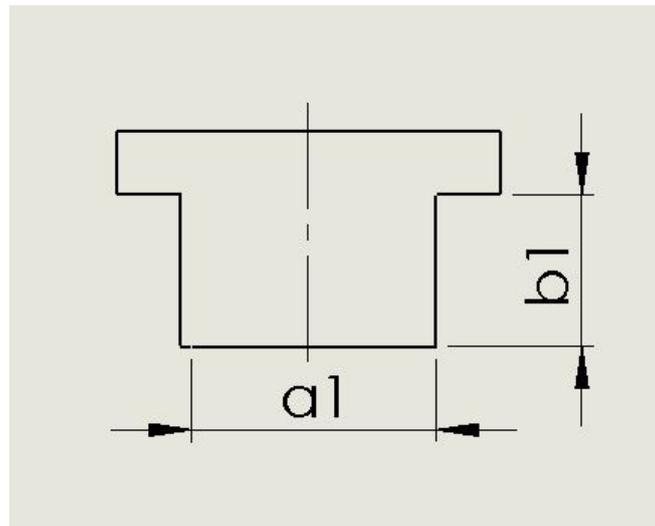


Figura 5.13: Cadeia de cotas funcionais para o componente 1

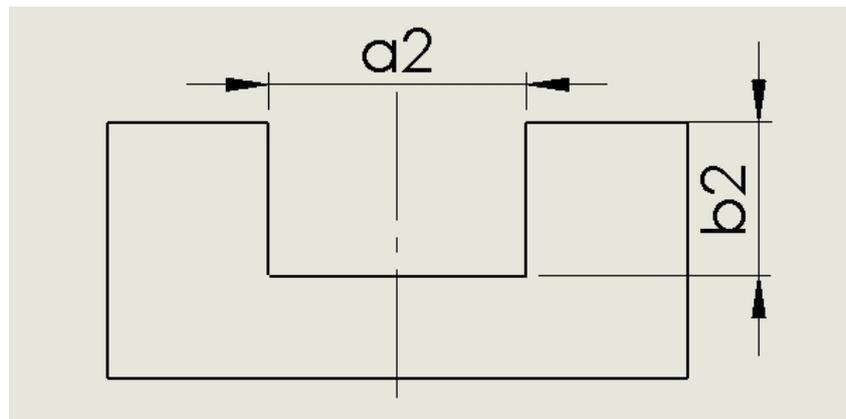


Figura 5.14: Cadeia de cotas funcionais para o componente 2

em conta esta relação, obtém-se que o desvio superior de a_2 é de 0.031mm (equação 5.5). Visto tratar-se de um furo, o desvio inferior é nulo, obtendo-se então

$$a_2 = 20_{-0}^{+0.031} \text{ mm}$$

$$\frac{Tola_1}{Tola_2} = \frac{0.45\sqrt[3]{20} + 0.001 \times 20}{1.58 \times 0.45\sqrt[3]{20} + 0.001 \times 20} = 0.633 \text{ mm} \quad (5.3)$$

$$TF_A = Ta_1 + Ta_2 = 0.05 \text{ mm} \quad (5.4)$$

$$0.05 = 0.633Ta_2 + Ta_2 \Leftrightarrow Ta_2 = 0.031 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Após calcular os desvios máximo e mínimo para a_1 (equações 5.6,5.7,5.8,5.9) obteve-se

$$a_1 = 20_{-0.039}^{-0.020} \text{ mm}$$

$$FA_{max} = a2_{max} - a1_{min} \Leftrightarrow a1_{min} = 20.031 - 0.07 = 19.961mm \quad (5.6)$$

$$FA_{min} = a2_{min} + a1_{max} \Leftrightarrow a1_{max} = 20.000 - 0.02 = 19.980mm \quad (5.7)$$

$$d_s = a1_{max} - CN = 19.980 - 20.000 = -0.020mm \quad (5.8)$$

$$d_i = a1_{min} - CN = 19.961 - 20.000 = -0.039mm \quad (5.9)$$

Por outro lado, para a cadeia B considerou-se que é possível obter tanto b_1 como b_2 utilizando o mesmo processo. Isto implica que tanto T_{b_1} e T_{b_2} possuem o mesmo valor, neste caso de 0.2mm. Não é possível dizer se se podem considerar furos ou veios. Posto isto, admitiu-se um desvio inferior nulo para b_2 , originando um desvio superior de +0.2 mm. Para b_1 atribuiu-se um desvio superior de -0.1mm e um desvio inferior de -0.3 mm. Tem-se então que,

$$b_1 = 12_{-0.3}^{-0.1}mm$$

$$b_2 = 12_{-0}^{+0.2}mm$$

5.4 Alterações à cotagem automática dos componentes

Após a utilização da funcionalidade de auto cotagem e toleranciamento do *DimXpert* (5.2) e da posterior análise funcional do conjunto (5.3), foi necessário proceder a algumas alterações aos resultados apresentados. Aquando a análise funcional, são definidas as cotas funcionais, cotas essas que são as únicas que carecem de toleranciamento. Ao utilizar a cotagem automática, os valores das tolerâncias são definidos pela parametrização do *DimXpert*. A alocação de tolerâncias de modo automático carece então de uma verificação das tolerâncias atribuídas, e caso necessário, uma refinação das cotas apresentadas. Com base na cotagem automática, representada anteriormente pelas figuras 5.8 e 5.11, procedeu-se à alteração dessas cotas e tolerâncias tendo obtido a cotagem apresentada nas figuras 5.15 e 5.16. A alteração destas cotas e tolerâncias foi realizada de modo manual, fazendo uso das funcionalidades de cotagem manual, *location dimension* e *size dimension* (anteriormente visados na secção 3.2).

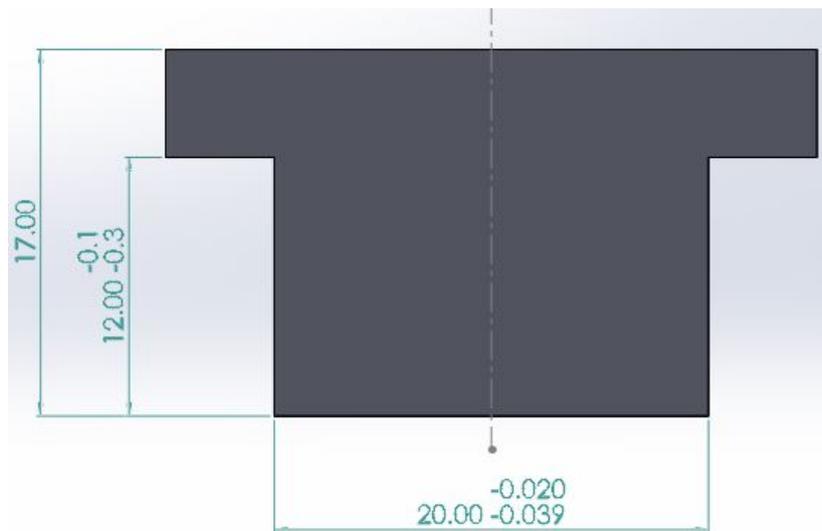


Figura 5.15: Cotagem e toleranciamento do componente 1 após análise funcional

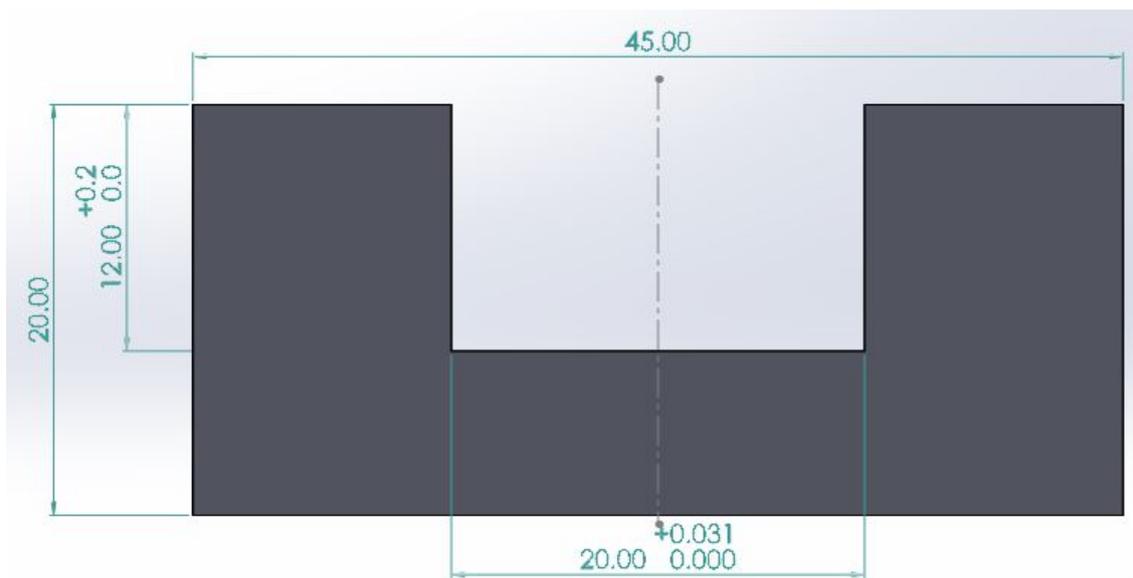


Figura 5.16: Cotagem e toleranciamento do componente 2 após análise funcional

5.5 Análise de tolerâncias com recurso ao *TolAnalyst*

Com os componentes que compõem a montagem devidamente cotados e toleranciados, seguiu-se uma análise das tolerâncias do conjunto. A ferramenta *TolAnalyst* permite realizar uma medição entre duas *features* de componentes previamente dimensionados com recurso ao *DimXpert*. Neste caso, pretende-se analisar 2 folgas, pelo que será necessária a realização de dois estudos: Um para a folga A e outro para a folga B. Previamente a realizar estas análises, é necessário confirmar se os mates entre os componentes são os adequados para garantir a veracidade dos resultados. Também o Add-In *TolAnalyst* deverá estar ativo, tal como vimos na secção 3.5.

5.5.1 Análise da folga A

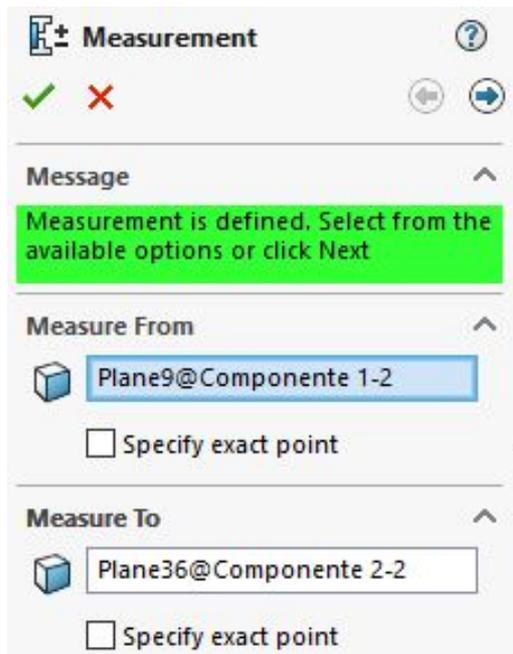
Para a análise da folga A, iniciou-se com a abertura da ferramenta *TolAnalyst*, figura 5.17. De seguida, foi necessário indicar alguns parâmetros, sendo o primeiro a seleção das superfícies relevantes para a medição desta folga. Ao selecionar a face direita de ambos os componentes, foi apresentada uma cota com a dimensão de 0mm (visto ambos os componentes possuírem a mesma cota nominal), tal como é possível observar na figura 5.18. Pressiona-se de seguida a seta azul, de modo a prosseguir para o menu seguinte, o de seleção da ordem de montagem do conjunto. Neste caso, considerou-se que o componente 2 se encontra fixo e que é o componente 1 que irá montar no primeiro (figura 5.19). Prosseguindo para o menu seguinte, foi necessário estabelecer quais as condições de montagem e qual a sua ordem. As seleções efetuadas neste passo são da maior importância, e irão ter um impacto significativo nos resultados obtidos pela análise. Como a folga a analisar se encontra entre as faces direitas dos componentes, considerou-se que a principal condição de montagem será o encosto das duas superfícies esquerdas dos componentes (figura 5.20). A condição secundária, considerada foi o encosto entre a face superior da cavilha e a face superior do bloco. Na figura 5.21 é possível observar graficamente a escolha de ambas as condições (a preto). No último menu, são apresentados os parâmetros de análise, assim como os resultados e as cotas que os influenciam. No que diz respeito aos parâmetros de análise, por se tratar de uma montagem toleranciada apenas dimensionalmente, deixou-se por selecionar todas as opções no primeiro bloco de opções (figura 5.22). É possível observar na figura 5.23, que o valor nominal desta folga é de 0mm e que os valores MIN e MAX possuem sinal negativo. Visto que a folga mínima terá de ser sempre inferior à folga máxima, este sinal negativo é meramente indicativo do sentido em que esta medição está a ser realizada (neste caso da superfície do furo para a superfície da cavilha), e não é referente à existência ou não de interferências na montagem. As figuras 5.24 e 5.25 permitem visualizar de que modo esta medição é efetuada. Os valores apresentados para o MAX e MIN provêm de uma análise de intermutabilidade (*Worst-Case*), e são coerentes com as condições funcionais impostas inicialmente no capítulo 5.3. A folga encontra-se entre 0.02mm e 0.07mm, pelo que não é expectável a existência de problemas aquando a montagem deste conjunto, no que diz respeito à Folga A. Os valores obtidos pelo modelo estatístico possuem também sinal negativo, o que mais uma vez é apenas referente ao sentido da medição. O valor do RSS é obtido através da diferença dos valores absolutos do RSS Min com o RSS Max (equação 5.10). Este valor é proveniente da fórmula de cálculo do RSS, que se encontra na equação 5.11

$$RSS_{Min} - RSS_{Max} = 0.063 - 0.027 = 0.036mm \quad (5.10)$$

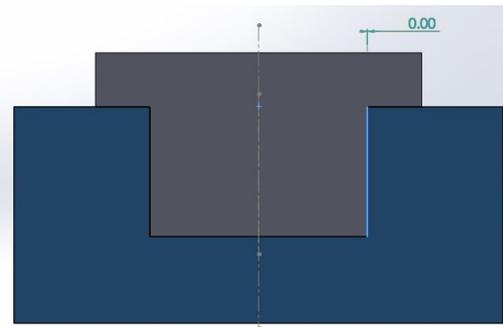
$$RSS = \sqrt{0.031^2 + 0.019^2} = 0.036mm \quad (5.11)$$



Figura 5.17: Abertura da ferramenta *TolAnalyst*



(a) Seleção dos *datums* para a folga A



(b) Representação gráfica da escolha dos *datums*

Figura 5.18: Primeiro bloco de opções de análise da folga A

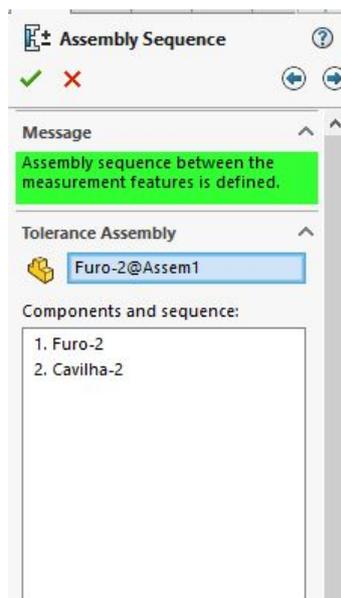


Figura 5.19: Segundo bloco de opções de análise da folga A

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DA COTAGEM AUTOMÁTICA RELATIVAMENTE À ANÁLISE FUNCIONAL DE UM CONJUNTO

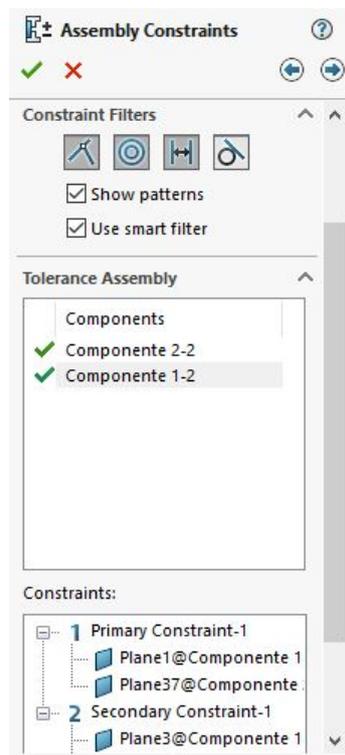


Figura 5.20: Condições de montagem para a folga A

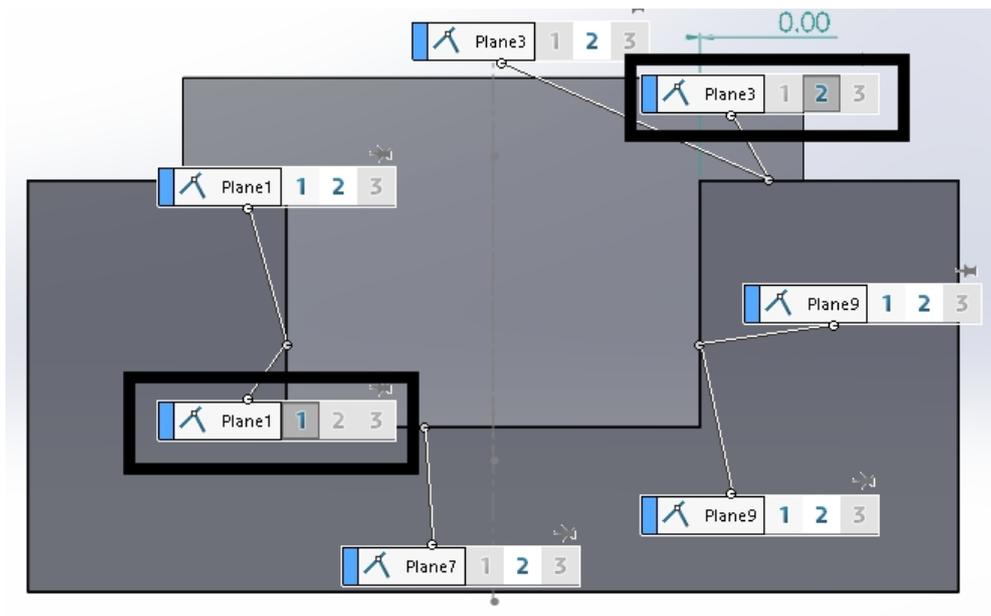


Figura 5.21: Representação gráfica da escolha das condições de montagem para a folga A

5.5. ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS COM RECURSO AO TOLANALYST

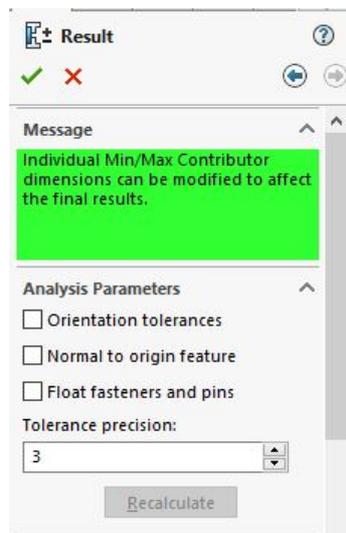


Figura 5.22: Parâmetros de análise para a folga A

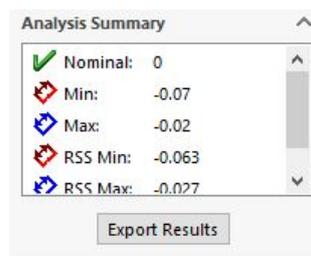


Figura 5.23: Janela de resultados

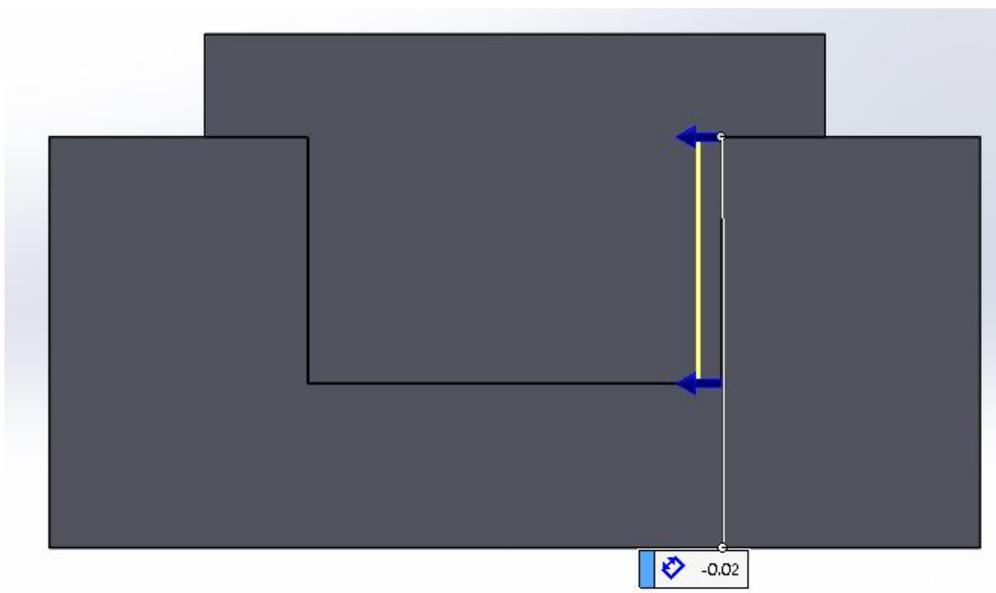


Figura 5.24: Representação gráfica da seleção MAX para a folga A

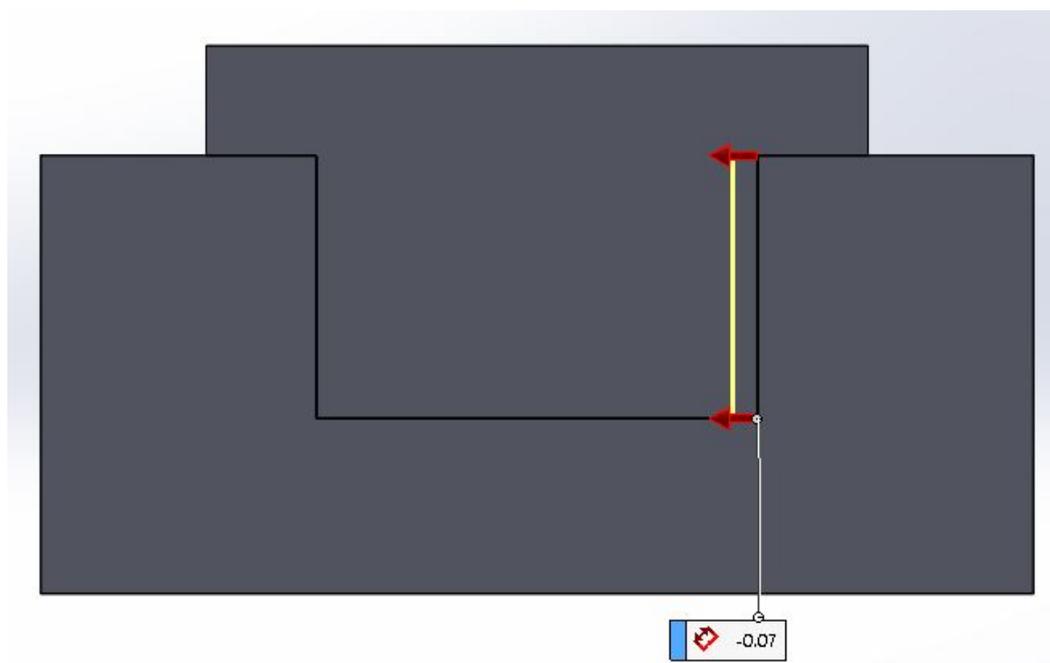
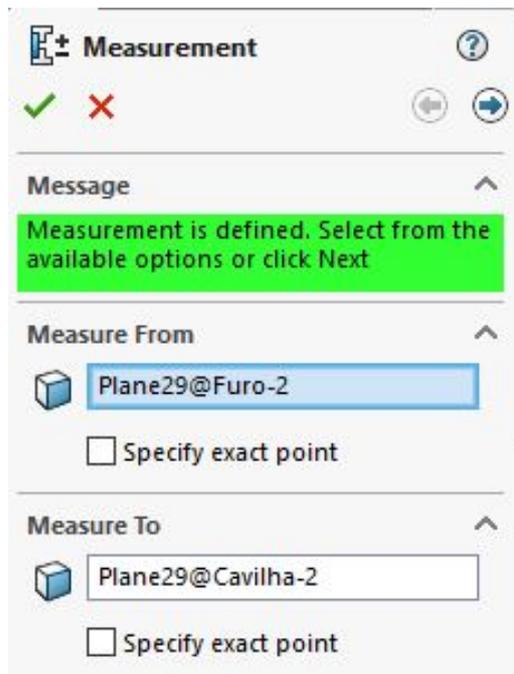


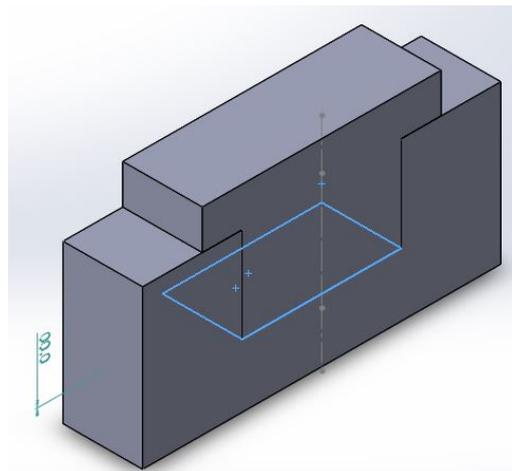
Figura 5.25: Representação gráfica da seleção MIN para a folga A

5.5.2 Análise da folga B

Para a análise da folga B, à semelhança do realizado na secção anterior (5.5.1, começou-se por seleccionar quais as superfícies relevantes para a medição. Neste caso, seleccionou-se a superfície inferior de ambos os componentes (figura 5.26). Analogamente ao realizado para a folga A, considerou-se de novo o componente 2 como sendo a peça base, e o componente 1 como sendo a peça que irá ser montada. Para a escolha das condições mais relevantes para a montagem, seleccionou-se em primeiro lugar o encosto das superfícies laterais esquerdas de ambos os componentes e em segundo lugar o encosto das superfícies superiores de ambos os componentes (figuras 5.27 e 5.28). Mais uma vez, à semelhança do que aconteceu para a folga A, são apresentados resultados negativos para o mínimo e o máximo, fruto apenas do sentido da medição (figuras 5.29 5.30 e 5.31). As condições funcionais iniciais impunham que a folga B teria de estar compreendida entre 0.1mm e 0.5mm, sendo que estas condições iniciais foram cumpridas.



(a) Seleção dos *datums* para a folga B



(b) Representação gráfica da escolha dos *datums* para a folga B

Figura 5.26: Primeiro bloco de opções de análise da folga B

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DA COTAGEM AUTOMÁTICA RELATIVAMENTE À ANÁLISE FUNCIONAL DE UM CONJUNTO

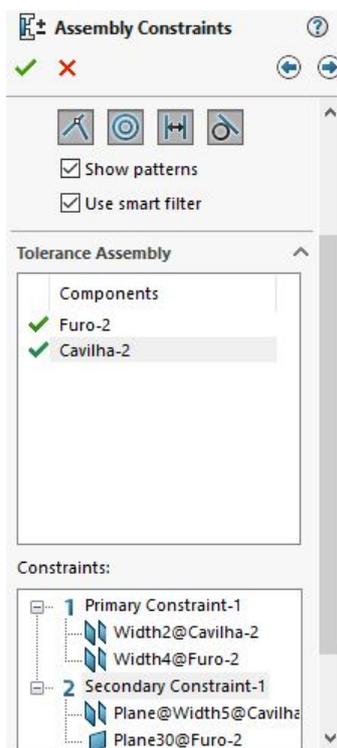


Figura 5.27: Condições de montagem para a folga B

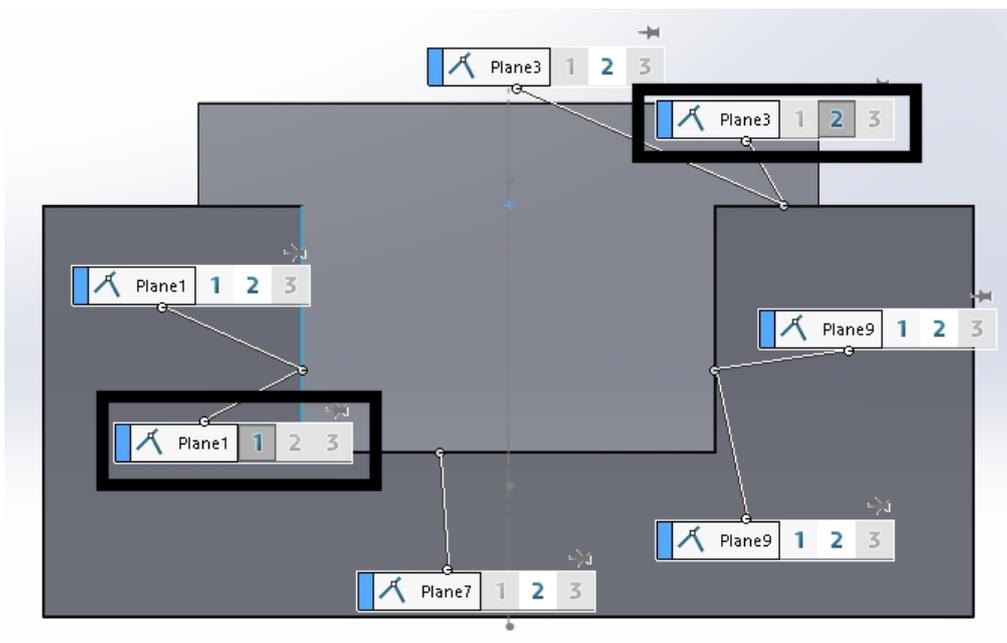


Figura 5.28: Representação gráfica da escolha das condições de montagem para a folga B

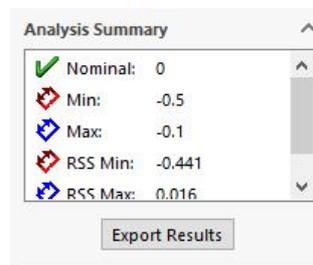


Figura 5.29: Janela de resultados para a folga B

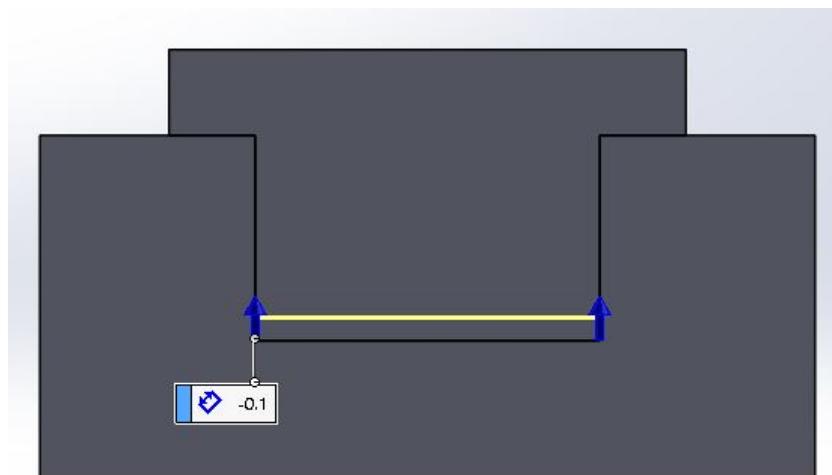


Figura 5.30: Representação gráfica da seleção MAX para a folga B

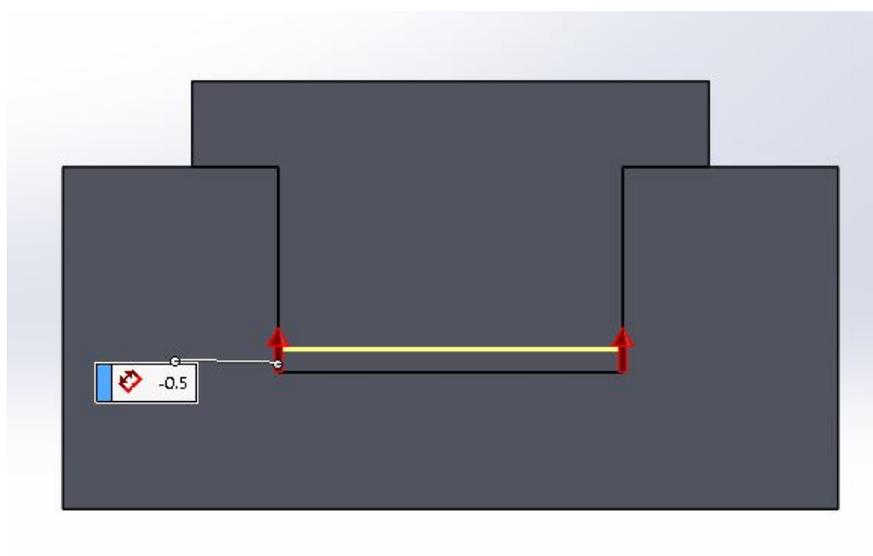


Figura 5.31: Representação gráfica da seleção MIN para a folga B

5.5.3 Conclusões da análise do *TolAnalyst*

Ambas as análises de tolerância para as folgas A e B, com recurso ao *TolAnalyst*, produziram resultados que foram de encontro às condições iniciais de funcionamento. No entanto, era expectável que assim fosse visto ter sido realizada uma análise funcional do conjunto à priori, tendo atribuído as tolerâncias com base numa síntese das tolerâncias do conjunto. Caso tal não se verificasse, ou se por algum motivo as condições funcionais da montagem se alterassem, a ferramenta permite alterar os valores das tolerâncias e de imediato visualizar os seus efeitos. Assumindo que por algum motivo a tolerância da cota a_2 teria de ser apertada e normalizada, neste caso para um H6. Podemos editar o valor desta tolerância dentro do estudo do *TolAnalyst*, como é possível observar na figura 5.32. Esta alteração provocou uma alteração no valor máximo e mínimo da folga A (figura 5.33). A folga A está agora compreendida entre 0.02mm e 0.05mm, o que não cumpre os requisitos funcionais do componente. A possibilidade de alterar as tolerâncias dentro do estudo do *TolAnalyst* e de imediato ver os efeitos que tem na folga em análise é de grande utilidade. Ao invés de ter que editar cada componente em separado, recorrendo de novo ao *DimXpert*, esta funcionalidade do *TolAnalyst* permite poupar bastante tempo e facilita muito o trabalho do utilizador especialmente quando se tratam de montagens complexas.

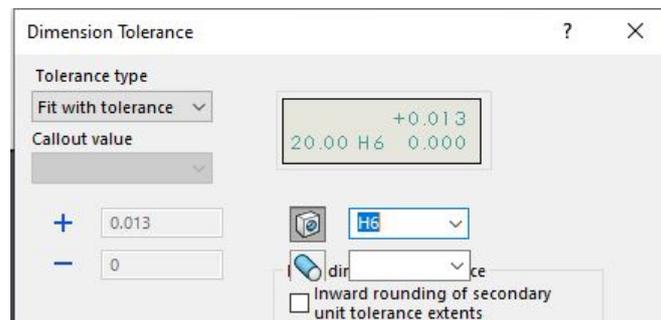


Figura 5.32: Alteração do valor da tolerância para 20H6

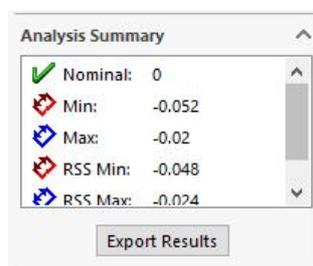


Figura 5.33: Resultados obtidos com a alteração para 20H6

CONTRIBUTO PARA O PROCESSO DE TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL NO *SOLIDWORKS*

6.1 Introdução

Como dito anteriormente, um correto toleranciamento pode trazer às empresas poupanças relevantes, quer a nível de tempo quer a nível monetário. Com base no trabalho realizado, desenvolveu-se uma metodologia com o objetivo de acompanhar e guiar o utilizador na atribuição e análise de tolerâncias dimensionais com recurso ao *SolidWorks*.

6.2 Fluxograma Principal

O fluxo principal da metodologia adotada, possui 4 etapas. Numa primeira etapa aborda-se a análise funcional do conjunto com recurso às funcionalidades do *DimXpert*. Na segunda etapa, é feita uma cotagem automática de cada um dos componentes. Na terceira etapa procede-se à alteração da cotagem e toleranciamento efetuado pelo *DimXpert*, de modo a refletir a análise anterior. E por fim, na quarta e última etapa, é realizada uma análise de tolerâncias com recurso à ferramenta *TolAnalyst*. Este fluxograma encontra-se na figura 6.1.

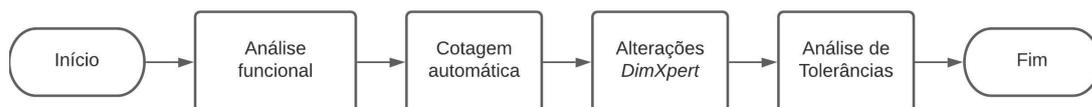


Figura 6.1: Fluxograma Principal

6.2.1 Primeira etapa - Análise funcional

A análise funcional é uma etapa que pode não ser feita no software *SolidWorks*, mas cujos os resultados irão ser fundamentais para a utilização do mesmo. Esta análise carece de informações por parte do projetista, assim como um conhecimento da *capability* dos processos. Através dos desenhos de conjunto, é necessário verificar se existem ou não condições funcionais explícitas. Em caso afirmativo, deve definir-se a cadeia mínima de cotas, terminando com uma síntese de tolerâncias. Caso não existam condições funcionais explícitas, deve verificar-se se existem informações acerca das tolerâncias dos componentes. Não existindo estas informações, deve obter-se mais informações junto do cliente, de modo a prosseguir com a análise funcional. Após conhecidas as tolerâncias dos componentes, é necessário proceder a uma alocação dessas tolerâncias, seguida de uma análise de tolerâncias. Esta análise de tolerâncias pode ser realizada com recurso ao *SolidWorks*, nomeadamente com o *TolAnalyst*. Se os resultados obtidos por esta análise forem satisfatórios, dá-se por terminada a análise funcional. Se por outro lado, os resultados obtidos não forem satisfatórios, é necessário reunir de novo com o cliente de modo a obter mais informações. Esta etapa encontra-se representada em fluxograma na figura 6.2.

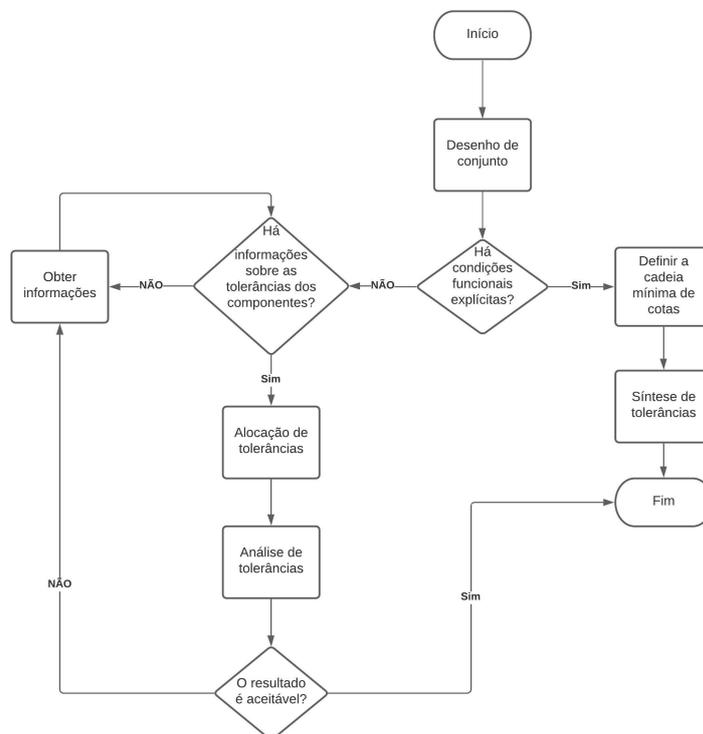


Figura 6.2: Fluxograma referente à Análise Funcional

6.2.2 Segunda etapa - Cotagem automática

A segunda etapa encontra-se representada na figura 6.3. Como é possível observar, a partir dos desenhos dos componentes, inicia-se a cotagem automática, recorrendo à funcionalidade *AutoDimensionScheme*. De modo a proceder com a cotagem, é necessário indicar alguns parâmetros. Em primeiro lugar, é necessário atribuir um tipo de geometria ao componente, isto é, se a mesma é de revolução ou prismática. De seguida, é necessário indicar o tipo de tolerâncias que o *DimXpert* deverá atribuir, sendo possível escolher entre dimensionais ou dimensionais e geométricas. A cotagem automática contempla ainda a possibilidade de atribuir um esquema de cotagem polar ou linear. No que diz respeito às referências (*datums*), o utilizador deve introduzir quais as mesmas, ordenadamente e até um máximo de três. A escolha das referências deve ser encarada como tendo a maior importância, pois como vimos anteriormente no capítulo 4.3, os resultados apresentados por esta funcionalidade estão diretamente ligados a esta escolha. Em último lugar, o utilizador precisa de indicar quais as características geométricas a toleranciar. O utilizador deve ter em mente que, ao escolher toleranciar todas as *features*, o *TolAnalyst* irá apresentar tolerâncias para todas as cotas do componente e que este toleranciamento poderá ser excessivo. Por outro lado, ao apenas selecionar algumas *features* do componente, poderá correr o risco de omitir cotas relevantes para a correta definição do componente. Como tal, é necessário ponderar quais as características a toleranciar, adotando uma postura crítica em relação ao toleranciamento obtido. Antes de avançar para o passo seguinte, o utilizador deve reorganizar o modo como são apresentadas as cotas, para que a sua leitura e interpretação seja facilitada.

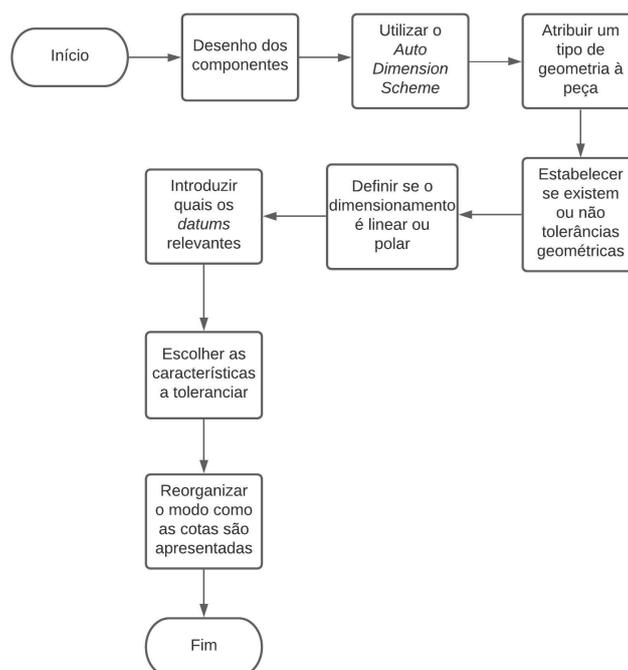


Figura 6.3: Fluxograma referente à cotagem automática

6.2.3 Terceira etapa - Alterações *DimXpert*

Para que seja possível realizar uma análise cumulativa de tolerâncias (*TolAnalyst*), é necessário que os resultados da cotação automática do *DimXpert* reflitam as conclusões retiradas da análise funcional. Caso tal não se verifique, deve proceder-se a uma alteração às tolerâncias alocadas pelo *DimXpert*. Estas alterações são de fácil execução, especialmente para componentes simples. O primeiro passo é eliminar todas as tolerâncias de cotas que não sejam funcionais, garantindo assim que não se atribuem mais tolerâncias do que as estritamente necessárias. Caso alguma das cotas funcionais se encontre em falta, o utilizador deve introduzi-las manualmente. No que diz respeito aos valores das tolerâncias, o utilizador deve garantir que os mesmos vão de encontro à análise funcional realizada previamente. Quaisquer cotas que não sejam relevantes para fabrico devem ser eliminadas, de modo a evitar erros de interpretação por parte dos responsáveis da produção. O fluxo referente a esta etapa está representado na figura 6.4

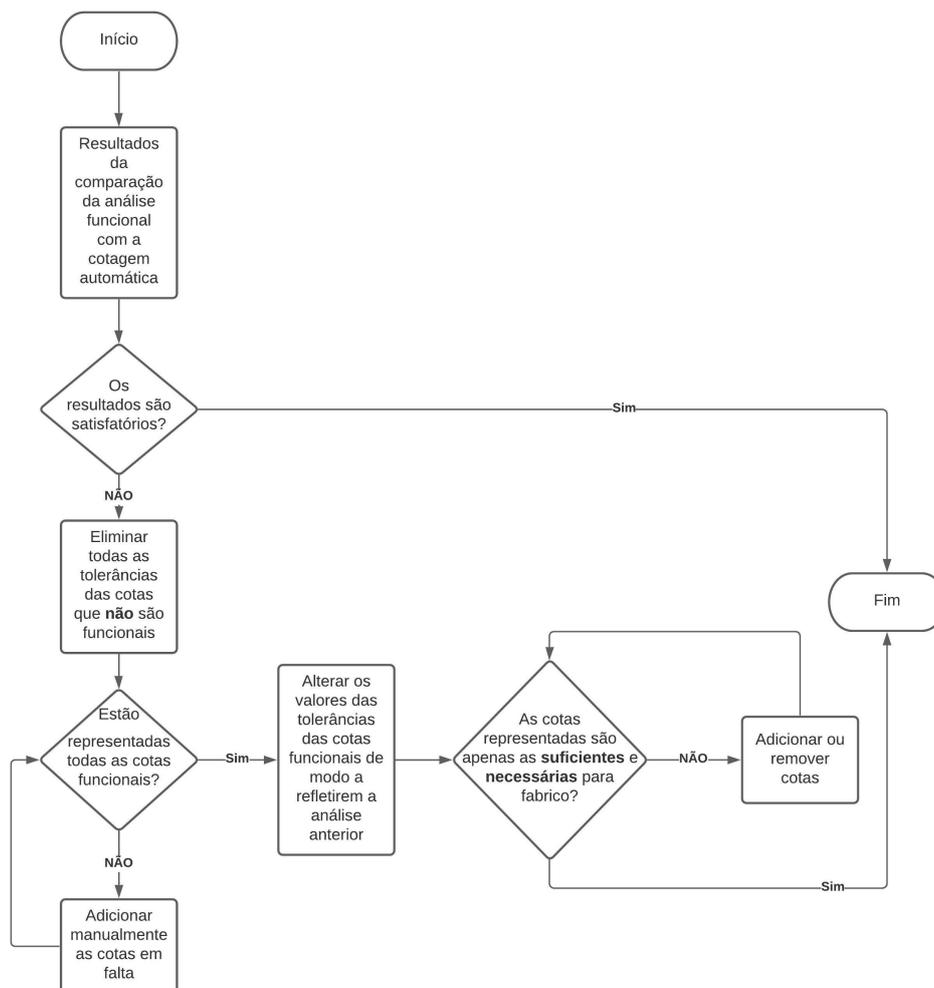


Figura 6.4: Fluxograma referente às alterações da cotação do *DimXpert*

6.2.4 Quarta etapa - Análise de tolerâncias

A quarta e última etapa está representada pela figura 6.5. Esta etapa é o culminar de todas as etapas anteriores, pois o *TolAnalyst* irá fazer uso das informações do *DimXpert* para cada componente. Antes de iniciar o *TolAnalyst*, o utilizador deve confirmar que todos os dados de toleranciamento introduzidos no *SolidWorks* vão de encontro ao obtido pela análise funcional. Só assim é possível garantir a fiabilidade dos resultados da funcionalidade de análise de tolerâncias.

Ao iniciar o *TolAnalyst*, são apresentados vários menus que requerem a escolha de diversos parâmetros. Em primeiro lugar é necessário indicar qual a folga a medir, selecionando as duas superfícies relevantes para a mesma. De seguida, o utilizador deve seleccionar qual a direção de medição. A direção da medição irá influenciar o modo como irá ser apresentado o valor da folga, isto é, aparecerá um valor negativo caso a direção da medição seja inversa à estabelecida como positiva. A sequência de montagem dos componentes deve ser indicada pelo utilizador, seguida da escolha de quais as superfícies e constrangimentos relevantes para a montagem. Deste modo, o utilizador informa o *TolAnalyst* quais as tolerâncias a ter em conta para a medição da folga em análise. Por fim, no menu de análise é possível escolher se o *TolAnalyst* deve reconhecer a existência de tolerâncias geométricas ou não. É ainda possível que a medição desta folga seja feita perpendicularmente à superfície de origem. Caso existam componentes de aperto na montagem, é possível indicar se são do tipo parafuso/porca. Aquando a apresentação dos resultados, o utilizador deve seleccionar o número de casas decimais com que pertence que os mesmos sejam apresentados.

Ao analisar a janela de resultados, o utilizador deve verificar se os mesmos respeitam as especificações do projeto, e se são passíveis de melhoramento. O *TolAnalyst* exhibe quais as tolerâncias que mais contribuem para a folga (através de percentagens), permitindo alterar os valores das mesmas diretamente na janela de resultados. O impacto destas alterações é de imediato visível na janela de resultados, havendo assim uma economia considerável de tempo, visto não ser necessário realizar de novo uma análise funcional com novos valores.

CAPÍTULO 6. CONTRIBUTO PARA O PROCESSO DE TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL NO *SOLIDWORKS*

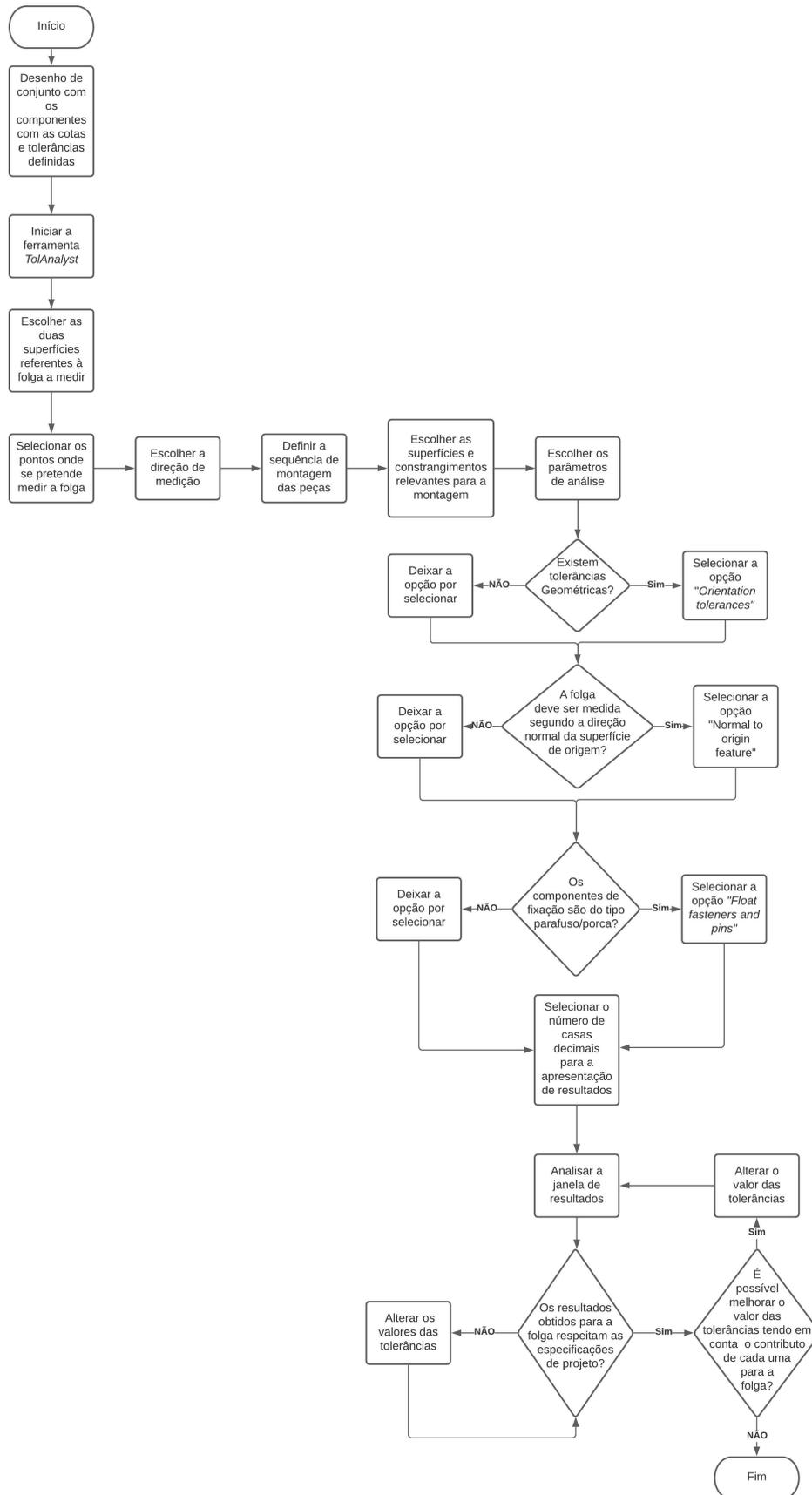


Figura 6.5: Fluxograma referente à análise de tolerâncias com recurso ao *TolAnalyst*

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação realizou-se uma abordagem crítica às funcionalidades de cotação automática e toleranciamento do *SolidWorks*. Com base nessa abordagem, fez-se uma proposta de procedimentos a adotar, expressos através de fluxogramas, que visam uma melhor utilização dessas funcionalidades. Estes procedimentos encontram-se divididos em 4 fases distintas: Uma fase inicial onde é realizada uma cotação funcional tendo em conta o funcionamento do sistema mecânico enquanto um todo; uma fase seguinte em que se procede à cotação automática dos componentes; uma terceira fase em que se procede às alterações da cotação obtida no segundo passo, de modo a refletirem as conclusões retiradas no primeiro passo; e por último, uma análise de tolerâncias com recurso ao *TolAnalyst*.

Visto que o *SolidWorks* se trata de um *software* que possui diversos recursos de modelação 3D, foi-se averiguar de que modo diferentes métodos de modelação iriam influenciar os resultados obtidos pela cotação automática. Verificou-se que não existiu qualquer alteração nos resultados, independentemente do modo como os componentes foram modelados. Foi averiguado ainda qual o impacto da escolha de elementos de referência (*datums*) na cotação obtida. A seleção de *datums* diferentes irá, inevitavelmente, alterar o toleranciamento efetuado pelo *DimXpert*. A escolha dos elementos de referência deve ser feita tendo em conta o funcionamento do sistema a que o componente em análise pertence, pois só assim é possível garantir a fiabilidade da alocação de cotas e tolerâncias obtida.

Foi ainda feita uma análise ao funcionamento dos módulos de cotação e análise de tolerâncias do *SolidWorks*, tendo sido possível tirar conclusões relevantes. A funcionalidade de cotação automática do *software* realiza uma alocação de tolerâncias com base numa parametrização inicial. Esta alocação de tolerâncias apenas leva em conta as características geométricas do componente, carecendo de uma análise funcional do sistema a

que pertence. Esta mesma, carece ainda de algum rigor, tendo tendência para uma atribuição excessiva de cotas e tolerâncias. Posto isto, foi possível concluir que a atribuição de forma automática de cotas e tolerâncias com recurso ao *DimXpert* produz resultados que não deverão ser usados sem antes realizar uma análise funcional. Sem a realização de uma análise funcional, os resultados obtidos aquando a análise de tolerâncias seriam incorretos.

No que diz respeito à funcionalidade de análise de tolerâncias *TolAnalyst*, é possível afirmar que se trata de uma funcionalidade interessante. Com base na cotagem e toleranciamento atribuído pelo *DimXpert*, esta funcionalidade realiza a medição de uma folga entre duas superfícies escolhidas pelo utilizador. Foi possível concluir que, devido a depender diretamente da cotagem e do toleranciamento indicado pelo *DimXpert*, a utilidade do *TolAnalyst* depende do rigor na sua atribuição. Apurou-se também, que o utilizador corre o risco de tirar falsas conclusões sobre a existência de folgas ou interferências ao utilizar o *TolAnalyst*. O resultado apresentado depende da conjugação do sentido do sistema de eixos selecionado com a existência de uma folga ou interferência. Uma medição com sinal negativo não é por si só indicativa da existência de interferência na montagem, pois pode ser fruto da escolha de um sentido de medição contrário ao estabelecido como positivo.

No âmbito desta dissertação, e com base nas conclusões que dela advêm, foi possível apresentar um contributo para a correta utilização de todas as ferramentas de cotagem e toleranciamento do *SolidWorks*. Esta contribuição visa guiar o utilizador na adoção de boas práticas aquando a utilização destas funcionalidades, sempre com o intuito de produzir resultados fidedignos.

Futuros trabalhos no âmbito desta dissertação podem focar-se no estudo de montagens mais complexas, nomeadamente com um maior número de componentes a toleranciar e analisar. Seria ainda interessante aprofundar a questão da análise de tolerâncias geométricas com recurso ao *TolAnalyst*, dada a relevância das mesmas num contexto de projeto, produção e qualidade. De modo a consolidar os procedimentos a adotar, seria uma mais-valia a incorporação de feedback de empresas na utilização destas funcionalidades.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Armillotta e Q. Semeraro. “Geometric tolerance specification”. Em: *Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring* (2010), pp. 3–37. DOI: [10.1007/978-1-84996-311-4_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-311-4_1).
- [2] O. Battaia, A. Dolgui, S. S. Heragu, S. M. Meerkov e M. K. Tiwari. “Design for manufacturing and assembly/disassembly: joint design of products and production systems”. Em: *International Journal of Production Research* 56.24 (2018), pp. 7181–7189. ISSN: 1366588X. DOI: [10.1080/00207543.2018.1549795](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1549795).
- [3] A. J. F. Mourão. “Dimensionamento funcional e tecnológico.” Em: *Brochura da disciplina de Toleranciamento de Sistemas Mecânicos FCT-UNL* (2004).
- [4] G. Dinev, P. Angelov e E. Chalakova. “Virtual analysis of manufacturability of vane pumps”. Em: *Applied Mechanics and Materials* 555 (2014), pp. 479–484. ISSN: 16627482.
- [5] W. I. Wan Din, T. T. Robinson, C. G. Armstrong e R. Jackson. “Using CAD parameter sensitivities for stack-up tolerance allocation”. Em: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 10.2 (2016), pp. 139–151. ISSN: 19552505. DOI: [10.1007/s12008-014-0235-2](https://doi.org/10.1007/s12008-014-0235-2).
- [6] K. W. Chase e W. H. Greenwood. “Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis.” Em: *Manuf Rev* 1.1 (1988), pp. 50–59.
- [7] Y. S. Hong e T. C. Chang. “A comprehensive review of tolerancing research”. Em: *International Journal of Production Research* 40.11 (2002), pp. 2425–2459. ISSN: 00207543. DOI: [10.1080/00207540210128242](https://doi.org/10.1080/00207540210128242).
- [8] W. J. Lee e T. C. Woo. “Tolerances: Their analysis and synthesis”. Em: *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 112.2 (1990), pp. 113–121. ISSN: 15288935. DOI: [10.1115/1.2899553](https://doi.org/10.1115/1.2899553).
- [9] S. D. Nigam e J. U. Turner. “Review of statistical approaches to tolerance analysis”. Em: *Computer-Aided Design* 27.1 (1995), pp. 6–15. ISSN: 00104485. DOI: [10.1016/0010-4485\(95\)90748-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(95)90748-5).
- [10] SOLIDWORKS. *2019 SOLIDWORKS Help - TolAnalyst Overview*. 2019. URL: https://help.solidworks.com/2019/english/solidworks/tolanalyst/c{_}TolAnalyst{_}Overview.htm (accedido em 29/01/2020).

- [11] S. Nanu, G. Belgiu e I. Silea. "Tolerance design in the PLM environment - An expert system approach". Em: *SOFA 2010 - 4th International Workshop on Soft Computing Applications, Proceedings 1* (2010), pp. 255–258. DOI: [10 . 1109 / SOFA . 2010 . 5565588](https://doi.org/10.1109/SOFA.2010.5565588).
- [12] I. Zeid. *Mastering SolidWorks : the design approach*. Second edi. Peachpit. ISBN: 9780133885941.
- [13] A. Chevalier. *Guide du dessinateur industriel: pour maîtriser la communication technique*. Hachette Technique, 2003.