



Universidade do Porto

**FEUP** Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



**KÜPPER & SCHMIDT**  
COMPONENTES PARA AUTOMÓVEIS, LDA.

# Estudo da Previsão da Deformação em Componente Injectado em Liga de Alumínio

**Relatório realizado por :** Rui Oliveira

**Orientador:** Professor Silva Ribeiro – FEUP

**Orientador:** Eng.º João Meireles – Küpper & Schmidt, Componentes para Automóveis, Lda.

Porto, Setembro 2006

669(047.3)  
LEMM  
2006/  
OLIr

novação  
DIO

Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTERIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

669(047.3)/LEE-2006/CLZ

Univ. do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca
Nº 105261
CDU
24 02 00 10

## Índice

Objectivo .....	1
Introdução .....	2
A Empresa .....	3
Política da Qualidade .....	3
Armazenamento de matéria-prima .....	4
Fusão .....	4
Moldação e corte de gito .....	5
Rebarbagem .....	5
Maquinação .....	5
Lavagem / Controlo Final / Embalagem .....	5
Concepção e desenvolvimento da peça em estudo .....	6
Linha de apartação .....	7
Massetotes .....	7
Canal de alimentação .....	8
Extracção .....	9
Inserções .....	9
Controlo dimensional das superfícies das inserções .....	10
Controle dimensional das Peças .....	12
Análise Termográfica .....	13
Termografia de Infravermelhos .....	13
Simulação 3D .....	16
Flow-3D .....	16
Procedimento .....	17
Simulação das condições de ensaio .....	19
Enchimento .....	20
Empeno da peça dentro do molde com refrigeração .....	22
Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração .....	23
Empeno da peça ao ar com refrigeração .....	24
Empeno da peça ao ar sem refrigeração .....	25
Gráficos, cotas reais vs cotas simuladas .....	26
Análise de resultados .....	28
Conclusão .....	30

## Bibliografia

## Anexos

### Anexo A

Empeno da peça dentro do molde com refrigeração .....	1
Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração .....	2
Empeno da peça ao ar com refrigeração .....	3
Empeno da peça ao ar sem refrigeração .....	4
Gráficos, cotas reais vs cotas simuladas .....	5

### Anexo B

Fichas de Cálculos

### Anexo C

Tabela de resultados das medições

## **Agradecimentos**

Queria deixar aqui registada a minha gratidão a todas as pessoas que sempre se revelaram disponíveis para me darem toda a ajuda e apoio necessários à realização deste trabalho.

Bem hajam.

---

## **Objectivo**

O objectivo do presente trabalho foi de, validar a aplicabilidade do software Flow 3D na previsão da deformação resultante, em componentes injectados de ligas de alumínio.



## Introdução

Nos últimos anos, as indústrias de fundição têm sofrido grandes mudanças no seu perfil de fornecedor, passando de simples empresas de subcontratação a fornecedores de produtos e serviços de alta tecnologia, geralmente associados ao Departamento de Engenharia do Produto. Neste sentido e com a focalização na redução nos tempos de colocação no mercado dos produtos e a optimização do seu custeio industrial, torna-se imperativa a utilização de softwares de CAD/CAM/CAE e simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Com o presente trabalho pretendeu-se efectuar um estudo da “previsão da deformação em componentes injectados em liga de alumínio”. Para o efeito, foram utilizados diversos softwares, destacando-se de entre eles o Flow 3D. Este é um software geral de CFD, baseado no método das diferenças finitas. A experiência revela que a utilização de softwares de simulação conduz a resultados mais optimizados com a vantagem de os poder capitalizar em tempo útil na concepção dos produtos e processos. Assim, a aposta passa necessariamente pela sua utilização cada vez mais alargada, em desenvolvimentos iterativos, realimentando a previsão de resultados com os valores obtidos da experimentação fabril.

Neste relatório são apresentadas as fases mais relevantes de todo o processo e alguns dos meios envolvidos. No entanto, face às limitações de espaço impostas para a apresentação do relatório, não é possível apresentar todas as simulações efectuadas.

## A Empresa

A Küpper & Schmidt, Componentes para Automóveis Lda., está sediada na zona industrial de Oliveira de Azeméis desde 1989. Fica situada a 60Km do Aeroporto Internacional do Porto, a 50Km do porto de Leixões e a 5Km da estação de caminho de ferro. Desenvolve a sua actividade no sector da fundição injectada de alumínio, exclusivamente para o sector automóvel.

A Küpper & Schmidt pertence a um experiente grupo empresarial. Beneficiando desse “know-how”, vem implementando desde início, modernas filosofias de gestão da produção e gestão da qualidade.



Figura 1 - Küpper & Schmidt

## Política da Qualidade

A direcção da Küpper & Schmidt considera que, a implementação do sistema de qualidade e a manutenção de princípios baseados na filosofia da melhoria contínua, zero defeitos, cumprimento de prazos de entrega e satisfação do cliente, são elementos essenciais para atingir os objectivos da qualidade no produto a que a empresa se propõe.

A estrutura organizacional da empresa está assente em quatro direcções fabris: Direcção Engenharia de Produto, Direcção Técnica, Direcção de Qualidade e Direcção Comercial e Administrativa.

A empresa tem implementado um sistema de garantia da qualidade. A preocupação com o sistema de garantia da qualidade tem sido uma constante, como se pode confirmar pelas seguintes certificações: ISO 9002 em 1997 pela APCER, QS 9000 em 1998, VDA 6.1 em 1999, ISO/TS 16949 em 2001 e ISO/TS 16949 – ISO 9001: 2000 em 2003 pela TÜV (abrangendo a concepção e desenvolvimento).

A empresa é detentora de certificações de Gestão Ambiental – ISO 14001 de 2000 pela APCER, registo no EMAS em 2004 e de Higiene e Segurança – OHSAS 18001 de 2002, pela APCER.

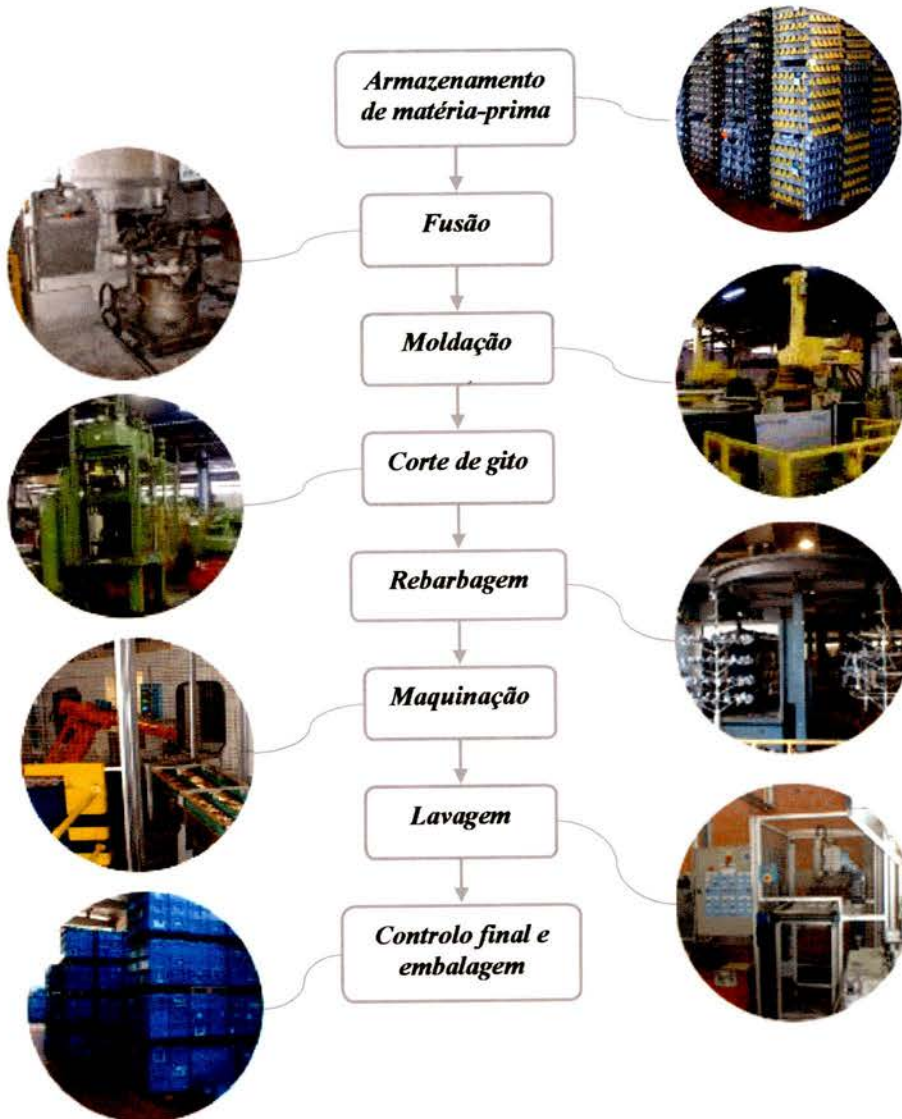


## Produção

A produção do componente fundido passa pelas seguintes fases:

### Armazenamento de matéria-prima

A matéria-prima é adquirida sob a forma de lingotes de alumínio, sendo armazenada e identificada consoante o tipo de liga.



**Figura 2 – Fluxo simplificado de produção.**

### Fusão

No processo de fusão, a carga é composta por lingotes e retornos (alumínio previamente injectado utilizado no enchimento dos sistemas de alimentação e masselotagem e também peças de não conformes). A fusão é efectuada em cinco fornos de soleira seca, da marca Striko, com carga automática, alimentados a gás natural.



## **Moldação e corte de gito**

A moldação efectua-se no interior de uma célula de fabrico que é constituída por:

- Forno eléctrico de cadinho, com controlo de temperatura do banho;
- Máquinas de injeção de alta pressão (marca Bühler) com:
  - Alimentador automático;
  - Arrefecimento e lubrificação automática do molde;
  - Extração automática da peça e arrefecimento forçado em túnel de vento ou arrefecimento controlado em tanque de água;
  - Pressas hidráulicas para corte de gito através de cortantes específicos

As células de fabrico têm associadas pressas de corte de gito. Estas, são pressas hidráulicas verticais onde é montado o cortante com o objectivo de separar os canais de alimentação e masselotes, da peça, por acção de corte.

## **Rebarbagem**

A limpeza das peças é executada conforme a especificação do cliente, por granalhagem ou por vibração.

## **Maquinação**

A maquinação das peças, se aplicável, é feita em máquinas transfer dedicada ou em centros de maquinação CNC. São basicamente operações de furação, roscagem e fresagem. Estas operações são subcontratadas a outra empresa do grupo DMM, (Desenvolvimento, Maquinação e Montagem, Lda.), sediada no mesmo espaço industrial da Küpper & Schmidt, Lda.

## **Lavagem / Controlo Final / Embalagem**

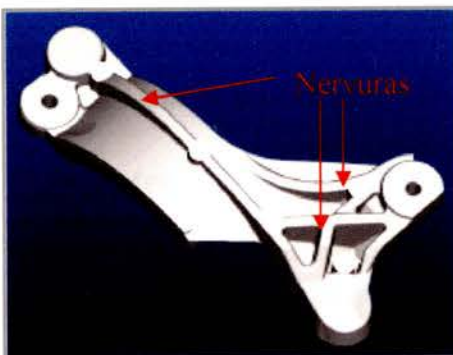
Na fase final do processo, as peças são lavadas, controladas e embaladas. Na primeira fase, as peças são colocadas em cestos no tapete rolante de alimentação do túnel de lavagem, que é constituído por duas câmaras, a de lavagem e a de secagem. O abastecimento dos postos de controlo final é automático e efectuado por tapete rolante, sendo a operação de controlo final executada de acordo com os planos de inspecção específicos para o produto em causa. Segue-se o embalamento das peças de acordo com a especificação acordada com o cliente respectivo.

## Concepção e desenvolvimento da peça em estudo

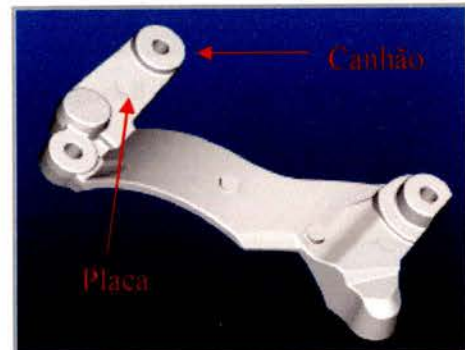
A peça que serve de base a esta simulação, é idêntica a um apoio de ar condicionado produzida pela Küpper & Schmidt. No entanto, a peça em estudo, foi fragilizada de modo a acentuar a sua potencial deformação. A peça desenvolvida pelo cliente apresenta nervuramentos no lado fixo e móvel (figura 3 e 5).

Na altura da concepção, devido às diferenças de massividade, foi necessário reforçar a peça com um nervuramento na parte central de modo a minorar a sua deformação após extracção. A peça em estudo foi fragilizada tendo-se retirado os referidos nervuramentos bem como alterado levemente a geometria base, potenciando as diferenças de massividade (figura 4 e 6).

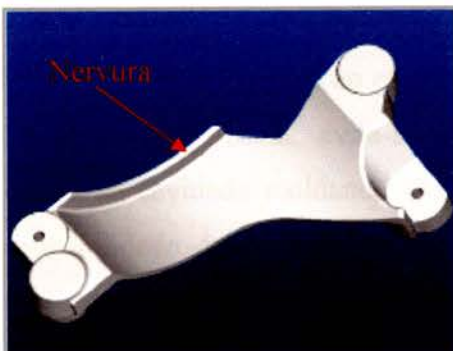
Assim, é possível verificar o acréscimo de um canhão ligado à peça por uma placa fina de 4mm, bem como os furos que servirão de apoio para a medição das deformações da peça.



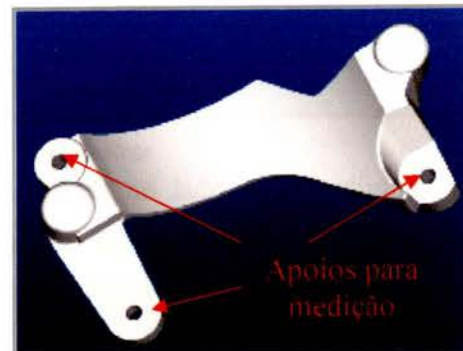
**Figura 3 - Lado móvel do apoio de ar condicionado.**



**Figura 4 - Lado móvel da peça em estudo.**



**Figura 5 - Lado fixo do apoio de ar condicionado.**



**Figura 6 - Lado fixo da peça em estudo.**



## Linha de apartação

A linha de apartação, foi definida de modo a facilitar a extracção das peças e consequentemente não introduzindo efeitos de prisão da peça no molde evitando-se assim a sua deformação e interferência ao nível dos parâmetros efectivamente em análise. As saídas têm 3° de inclinação para diminuir a prisão e consequente deformação das peças (figura 7 e 8).

Recorrendo ao software de modelação *Pro Engineer* é possível ver a inclinação de 3 graus tanto do lado móvel como de lado fixo.



Figura 7 - Linha de apartação.

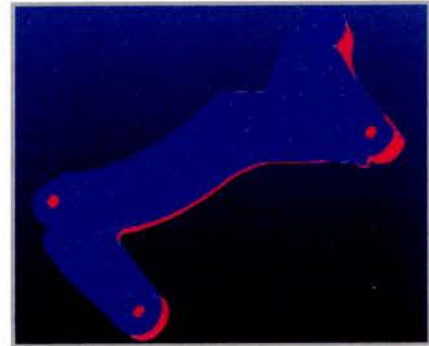


Figura 8 - Linha de apartação.

## Masselotes

Masselotes são formas bem definidas, gravadas ao longo da(s) cavidade(s) (figura 9), tendo uma dupla função: a de retenção das impurezas existentes no molde provenientes da lubrificação, e a de permitir o escoamento mais fácil do ar através das suas ligações ao exterior pelos canais de ventilação. Assim, evita-se que este fique retido na cavidade moldante. O posicionamento dos masselotes no lado móvel, diminui a probabilidade destes ficarem retidos no interior da cavidade moldante lado fixo, pois os extractores encarregar-se-ão de os empurrar mesmo que se parta a ligação com a peça.

A disposição dos masselotes ao longo da peça foi feita de modo a permitir uma boa limpeza, tal como se pode ver na figura 10. Os masselotes estão

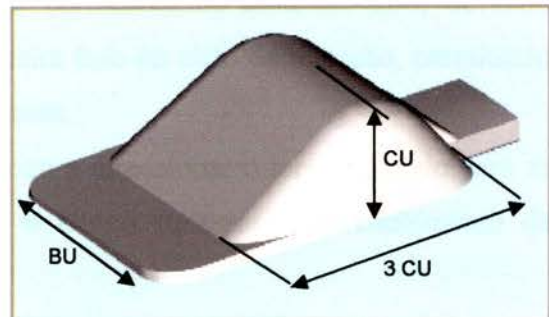


Figura 9 - Masselote

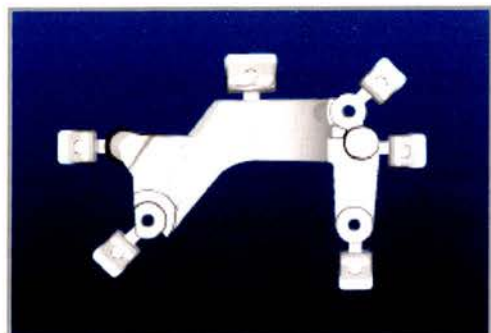


Figura 10 - Peça com os masselotes

gravados no lado móvel das inserções, mas a sua alimentação foi colocada do lado contrário como normalmente acontece nos moldes de fundição injectada.

Tal como se pode comprovar na figura 11, há um sobredimensionamento das ventilações, logo, não são esperados problemas relacionados com o aprisionamento de ar dentro da cavidade.

Secção total necessária das saídas de ar	Sv	6.93	mm <sup>2</sup>
Peso depois da secção de ataque	m A	245	g
Velocidade de saída de ar		2000	mm/s
Tempo de enchimento	tF	0,07	s
Densidade	ρ	2,7	
Secção por masselote necessária		1,39	mm <sup>2</sup>

**Figura 11- Dimensionamento dos masselotes (Os cálculos encontram-se no Anexo B ).**

## Canal de alimentação

O canal de alimentação permite que o metal fundido seja transportado até à moldação. Durante a fase de projecto, é importante estudar a geometria da peça por forma a facilitar também a sua correcta alimentação. O canal deve ter uma configuração que permita um rápido enchimento da cavidade de modo a obter uma boa sanidade da peça. É necessário ter em conta que o canal de alimentação deve estar correctamente dimensionado, devendo manter-se no estado líquido até à conclusão da terceira fase do ciclo de injeção, permitindo assim a compactação final da liga na cavidade moldante.

O canal de alimentação foi dividido em dois de modo a direccionar o metal fundido para as zonas de maior massividade, diminuindo assim o tempo necessário ao enchimento da cavidade (figura 12).



**Figura 12 - Esquema do canal de alimentação**

A figura 13 mostra alguns dos parâmetros calculados no dimensionamento do canal de alimentação.

Peso (g)	
Peça	165
Masselotes	90
Bolacha	200
Canal	235
Depois da secção de ataque	255
Total com peça	690

**Figura 13 - Dados do gito (Os cálculos encontram-se no Anexo B ).**



## Extracção

O sistema de extracção é constituído por um conjunto de pernos extractores ligados à placa extractora e que passam através do molde (lado móvel), sendo a sua extremidade elemento integrante da superfície moldante. Após a abertura do molde deslocam-se para a frente forçando a saída do conjunto fundido (gito e peça)

Os extractores devem ser posicionados de modo a não danificar ou deformar a peça durante a extracção. A força exercida pelos extractores sobre a peça, deve ser o mais uniforme possível de modo a evitar prisões ou empenos.



Figura 14 - Pontos de extracção

Com base nestes conceitos e analisado o gito em questão, optou-se pela colocação de um extractor em cada masselote, um extractor no gito e quatro extractores na peça. Os extractores têm todos o mesmo diâmetro 6 mm à excepção dos extractores colocados sobre o canal de alimentação que têm 8mm (figura 14).

## Inserções

As inserções são blocos fixados na estrutura do molde e nos quais estão gravados os negativos da forma das peças a produzir (figura 15 e 16). As inserções, utilizadas neste trabalho, foram obtidas pelo processo de SLS (*Selective Laser Sintering*) a partir do modelo CAD 3D, garantindo assim a reprodução das formas da peça de acordo com o definido no ficheiro. De referir que as técnicas de prototipagem rápida, têm uma aplicação específica muito importante na altura da elaboração do projecto das peças a obter por fundição. Com efeito, ao permitir a

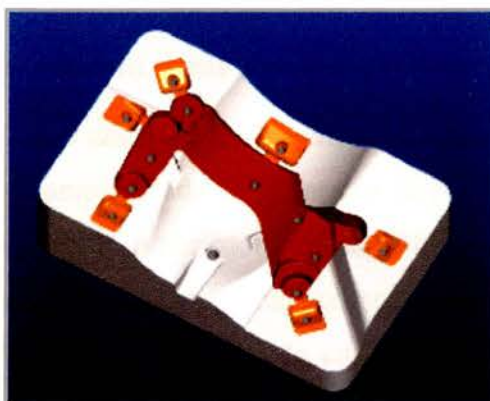


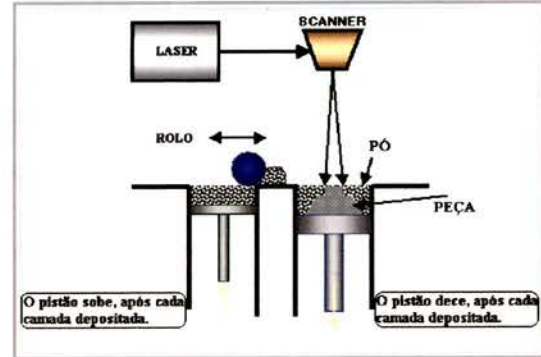
Figura 15 – Inserção lado móvel (modelo CAD).



Figura 16 – Inserção lado fixo (modelo CAD).

materialização rápida do desenho das peças (desde que em desenho 2D ou 3D), antes da execução das ferramentas de produção (moldes, cortantes) vai permitir analisar os modelos obtidos, identificar as alterações a introduzir e corrigi-las mais facilmente.

O SLS permite a construção directa de peças e o desenvolvimento de ferramentas rápidas. Neste caso específico, foram feitas duas inserções capazes de produzir protótipos ou mesmo uma pequena série de peças em alumínio. Este processo permite também, criar modelos de uma forma mais expedita quando comparado com o processo tradicional, independentemente da sua geometria ou complexidade.



**Figura 17 - Esquema de funcionamento de uma máquina de SLS.**

O protótipo é constituído por várias camadas de pós metálicos, que são agregados por acção de um feixe laser de CO<sub>2</sub>, conforme figura 17. Utiliza-se como ligante dos pós metálicos um material polimérico. Quando termina o processo de agregação das várias camadas, a peça obtida é colocada num forno para remover o ligante, obtendo-se então, uma peça com cerca de 40% de porosidade.

A última fase deste processo consiste em colocar a peça de novo no forno para que seja densificada com liga de cobre (Bronze), infiltrando-se esta na peça e preenchendo os poros existentes. A peça final obtida atinge densidades da ordem dos 98%.

As inserções produzidas, podem ser facilmente reajustadas e/ou alteradas por processos convencionais de maquinação, polimento, erosão e soldadura.

### **Controlo dimensional das superfícies das inserções**

Antes das inserções serem montadas na estrutura, foi realizado o controlo dimensional. Dada a complexidade da geometria da peça e o rigor exigido optou-se por recorrer a uma máquina de medição por coordenadas *CMM* (*Coordinate Measuring Machine*) e à digitalização 3D.

A digitalização, permite comparar directamente o modelo CAD e a peça/protótipo, permitindo também, o controlo de entidades geométricas, planos, distância entre pernos, cilindros ou furos, etc..

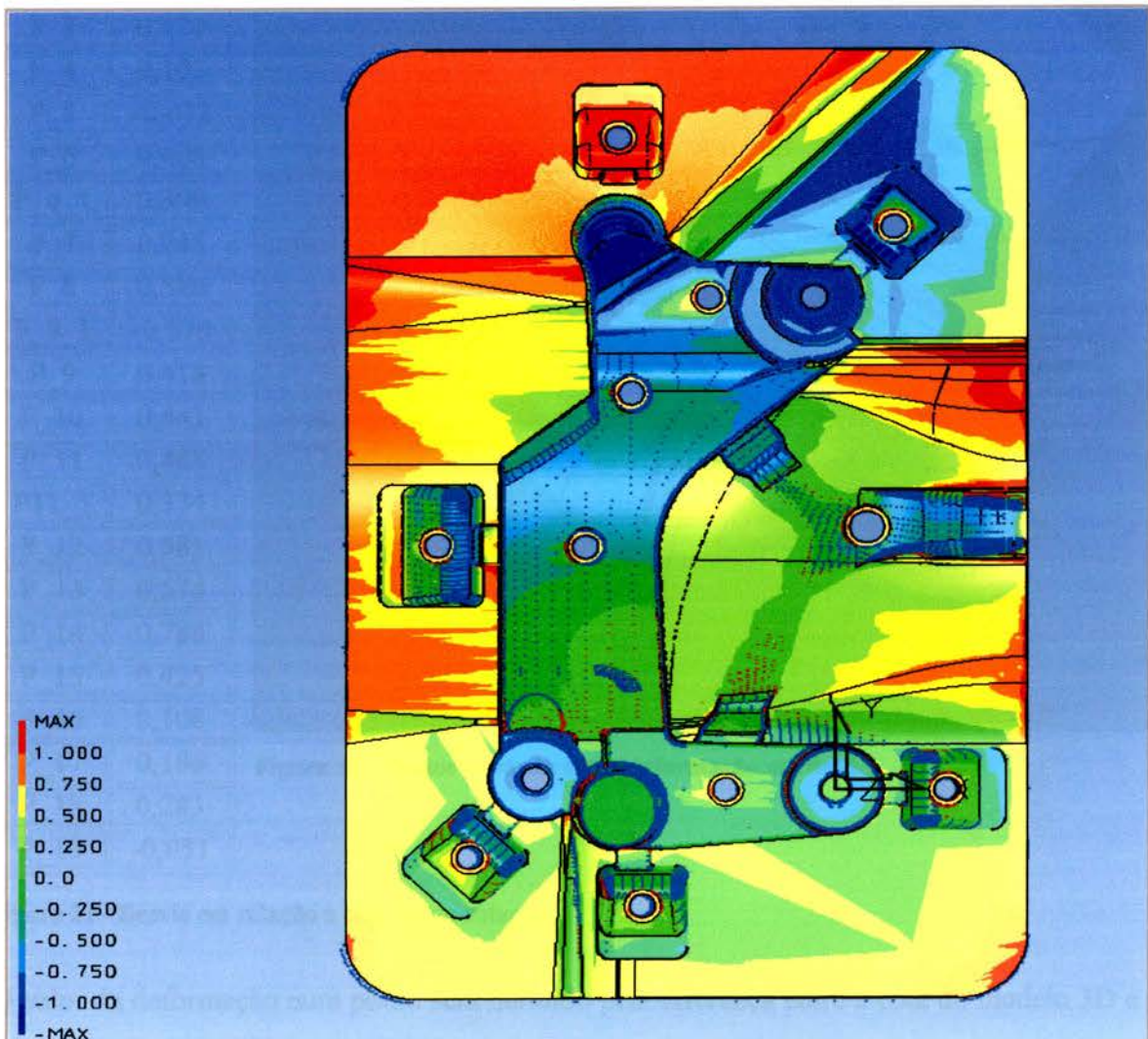


A aquisição de forma foi feita com um sistema de apalpação mecânica *Cyclone (Renishaw)* figura 18, propriedade do CINFU (Centro de Formação Profissional da Indústria da Fundição). O software utilizado para o tratamento de dados foi o *CopyCAD (Delcam, Plc.)* por proporcionar uma informação rápida clara e objectiva. A nuvem de pontos gerada pode ser exportada em, praticamente, todos os formatos, o que torna este software extremamente versátil. Os resultados são apresentados



**Figura 18 – Digitalizadora 3D Cyclone.**

de uma forma “imediata” com a apresentação de um gráfico a cores que permite ao utilizador validar as zonas analisadas conforme a figura 19.

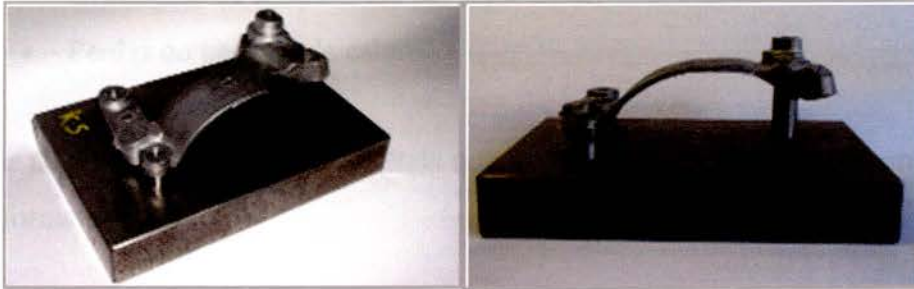


**Figura 19 – Análise de dimensional Copycad**

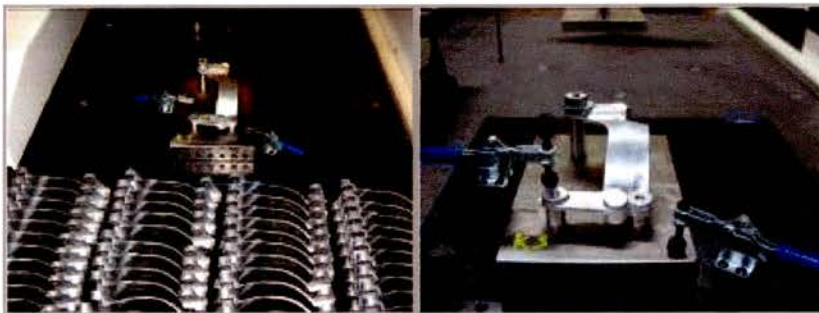




da cavidade moldante. No Anexo C é possível ver os resultados das medições por mim efectuadas.



**Figura 21 - Gabarito para apoio da peça.**



**Figura 22 - Controle dimensional das peças na máquina de 3D.**

## **Análise Termográfica**

### **Termografia de Infravermelhos**

A termografia por infravermelhos é uma técnica de inspeção com provas dadas na manutenção de equipamentos. É uma técnica de inspeção não destrutiva, que tem como base a detecção da radiação infravermelha, emitida naturalmente pelos corpos e cuja intensidade é proporcional à sua temperatura. A capacidade de se visualizar a temperatura superficial através de imagens térmicas designadas por “termogramas”, sem ser necessário contacto físico, faz desta técnica uma ferramenta extremamente potente para a localização e avaliação de defeitos e “pontos quentes”.

A principal vantagens reside no facto de possibilitar a medição das temperaturas:

- Sem contacto com o objecto;
- Em corpos em movimento;
- Em materiais sujeitos a campos eléctricos ou em vácuo;
- Em ambientes hostis.

Permite ainda a visualização de:

- Longas distâncias e/ou grandes superfícies;
- Gradientes de temperatura em superfícies;
- Perdas ou geração de calor.

De destacar ainda que são sistemas portáteis que permitem o arquivo de imagem e vídeo em diferentes formatos.

Na indústria da fundição em geral e, particularmente no caso da fundição injectada, a temperatura é um dos parâmetros mais importantes. Caso esta não esteja correctamente definida e controlada uma série de factores negativos poderão ocorrer:

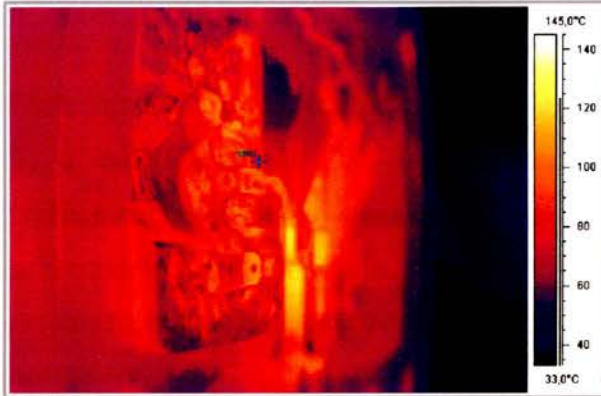
- Diminuição do tempo de vida do molde
- Poluição térmica
- Defeitos nas peças
- Maiores consumos energéticos
- Aumento do tempo do ciclo de injeção

Esta tecnologia permite que a indústria de fundição injectada progrida e conheça melhor o comportamento dos moldes, com diferentes fluidos de refrigeração e diferentes taxas de remoção de calor. Pode ser também utilizada em manutenção preventiva e controlo de fracturas de refractários nos fornos de fusão. No caso concreto deste trabalho permitiu, obter uma distribuição de temperaturas na cavidade moldante, detectar pontos quentes e frios e determinar a eficiência dos sistemas de refrigeração e respectivos caudais.

O processo de aquisição de imagem nos moldes é executado no momento de interrupção do ciclo. Com a abertura do molde é possível ter acesso à cavidade moldante e proceder à aquisição de imagens. A temperatura só deve se medida após a extracção e aplicação do desmoldante, pois assim é possível determinar a temperatura da cavidade moldante antes de se proceder a uma nova injeção. Os processos de extracção e de lubrificação foram executados manualmente o que facilitou a aquisição de imagem.



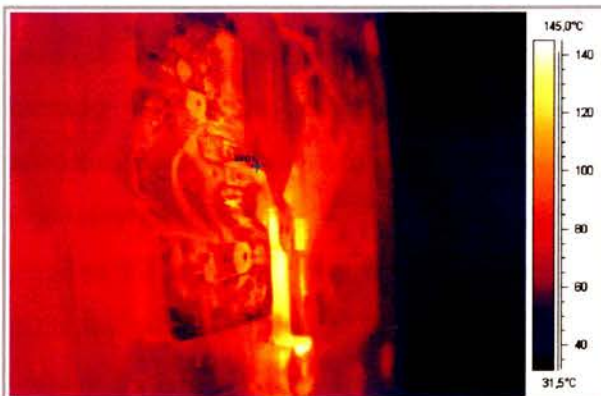
Como se pode ver nos termogramas das figuras 23 e 24, a cavidade moldante encontra-se a uma temperatura constante de aproximadamente 120 °C. O molde é mantido a esta temperatura devido ao sistema de termo-regulação. Quando este sistema é desligado, o molde aumenta de temperatura à medida que novos ciclos se vão realizando até estabilizar de novo. Na figura 25 e 26 é possível ver que a temperatura estabilizou próximo dos 140 °C.



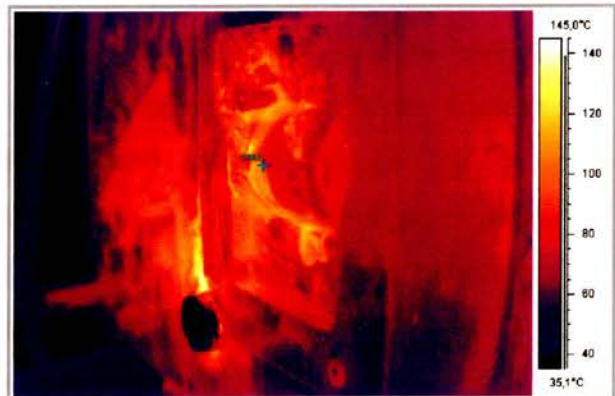
**Figura 23 – Termograma do molde, lado móvel, com termo regulação.**



**Figura 24 – Termogramas do molde, lado fixo, com termo regulação.**



**Figura 25 – Termogramas do molde, lado movel, sem termo regulação.**



**Figura 26 – Termogramas do molde, lado fixo, sem termo regulação.**

## Simulação 3D

### Flow-3D

O *FLOW-3D* é um software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) com um vasto leque de aplicações. O CFD utilizado tem ao seu dispor várias opções que permitem simular o comportamento dos fluidos.

Fazer simulações com um programa CFD é como montar uma experiência num laboratório. Se a experiência não for correctamente programada, os resultados obtidos não serão representativos, dado poderem não reflectir o que ocorre na situação real. O mesmo acontece se o modelo matemático seleccionado não for o mais adequado para simulação em causa. O projectista deve seleccionar cuidadosamente o que representar e como o representar.

É importante garantir que a modelação que está a ser executada corresponda ao modelo físico já existente, ou ao projecto que irá ser executado. Deve-se começar por um modelo simples e aumentar progressivamente a sua complexidade até atingir os objectivos pretendidos.

Das diferentes técnicas de fundição, a fundição injectada representa um dos maiores desafios para qualquer sistema de simulação. As peças produzidas têm paredes finas, o que implica um elevado número de células, de modo a que a geometria da peça possa ser completa e adequadamente definida por uma malha. Além disso, o metal entra na cavidade moldante com uma elevada pressão e a alta velocidade. A turbulência, os salpicos e os jactos de metal gerados no interior da cavidade, podem originar o aparecimento de defeitos como por exemplo: porosidade, rugosidade e mau enchimento (ocorre quando o metal chega a uma parte da peça e começa a arrefecer antes do enchimento estar concluído).

O Flow-3D dispõe de várias soluções que melhoram significativamente a precisão da simulação do enchimento do molde. Isto permite ao utilizador perceber melhor o complexo sistema de enchimento das cavidades moldantes.



## Procedimento

No sentido de elaborar o estudo da previsão da deformação da peça supracitada, foram equacionados diferentes cenários tendo em vista a maximização do empeno. Para esse efeito fizeram-se variar diversos parâmetros nomeadamente a temperatura de vazamento da liga, as condições de refrigeração do molde e o tempo de solidificação da peça no interior do molde. Estas variações nas condições de ensaio permitiram também aferir os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos através de simulação.

O primeiro parâmetro validado foi o efeito da temperatura a que a liga é injectada. Foram definidas duas temperaturas distintas, uma de 680 °C e a outra de 710 °C. Para cada uma destas temperaturas fez-se variar ainda as condições de refrigeração do molde e o tempo de solidificação.

Foram executada uma série injeções utilizando a termo-regulação, que permite manter a temperatura do molde constante (neste caso a temperatura pretendida é de 120 °C). A outra série foi injectada sem recurso a este sistema.

Tendo em atenção as dimensões e a geometria da peça em causa, foi determinado um tempo de solidificação considerado ideal de 9s. Este seria o último parâmetro que se faria variar, estabelecendo-se dois novos tempos de 6s e 12s. Contamos assim com 3 tempos distintos 6, 9 e 12s um acima e outro abaixo do valor recomendado. Os restantes parâmetros do processo foram mantidos constantes no decurso dos ensaios. Na figura 27 são apresentados, de forma esquemática, os tipos de ensaios realizados bem como a sua designação.

Temperatura de vazamento 680 ° C	Sem refrigeração			Com refrigeração		
Ensaio	I	II	III	IV	V	VI
Tempos de solidificação (s)	6	9	12	6	9	12
Temperatura de vazamento 710 ° C	Sem refrigeração			Com refrigeração		
Ensaio	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Tempos de solidificação (s)	6	9	12	6	9	12

**Figura 27 – Ensaios realizados.**

Para a execução das simulações, foi necessário definir alguns parâmetros do processo de injeção e a caracterização termofísica da liga.

As unidades de utilizadas neste conjunto de simulações não se encontram no sistema internacional (S.I.) mas sim no sistema CGS. Embora o software permita trabalhar em diversas unidades o sistema CGS tem-se revelado o mais aconselhável para este tipo de aplicações, sendo mesmo aconselhado pelo apoio técnico.

Liga – 226; [EN 1706 – AC AlSi9Cu3(Fe)]		
Temperatura de <i>solidus</i>	855	<i>K</i>
Temperatura de <i>liquidus</i>	847	<i>K</i>
Temperaturas de vazamento	953	<i>K</i>
	983	
Condutibilidade térmica	1e7	<i>erg/s/cm/K</i>
Densidade do sólido	2.45	<i>gm/cm<sup>3</sup></i>
Densidade do líquido	2.36	<i>gm/cm<sup>3</sup></i>
Calor específico	1.08e7	<i>erg/gm/K</i>
Viscosidade	0.0119	<i>poise</i>
Calor latente de fusão	3.89e9	<i>erg/gm</i>
Fracção crítica de solido	0.3	

**Figura 28 - Características termofísicas da liga 226.**

Tempo de injeção	0.083	<i>s</i>
Pressão do metal	140	<i>Bar</i>
Velocidade do pistão	3.55	<i>m/s</i>
Tempo de solidificação	6	<i>s</i>
	9	
	12	

**Figura 29 - Variáveis do processo.**

Condutibilidade térmica	2.97e5	<i>erg/s/cm/K</i>
Temperatura	473	<i>K</i>
Coef. de transferência de calor	1e8	<i>erg/s/cm<sup>2</sup>/K</i>

**Figura 30 - Características termofísicas do molde.**

## Simulação das condições de ensaio

Após a recolha de todos os dados referentes as características termofísicas do processo, foi necessário dar início a preparação do modelo tridimensional; para este ser compatível com o Flow-3D o ficheiro deve estar em formato STL. A conversão do ficheiro foi executada no Pro/Engineer visto, ter sido este o software usado na construção do modelo.

A simulação foi executada com uma malha de 1.800.200 células, não sendo esta malha totalmente homogénea. Assim, na zona correspondente à peça propriamente dita, foi usada uma malha mais fina de modo a aumentar a resolução, conseguindo assim resultados com maior definição.

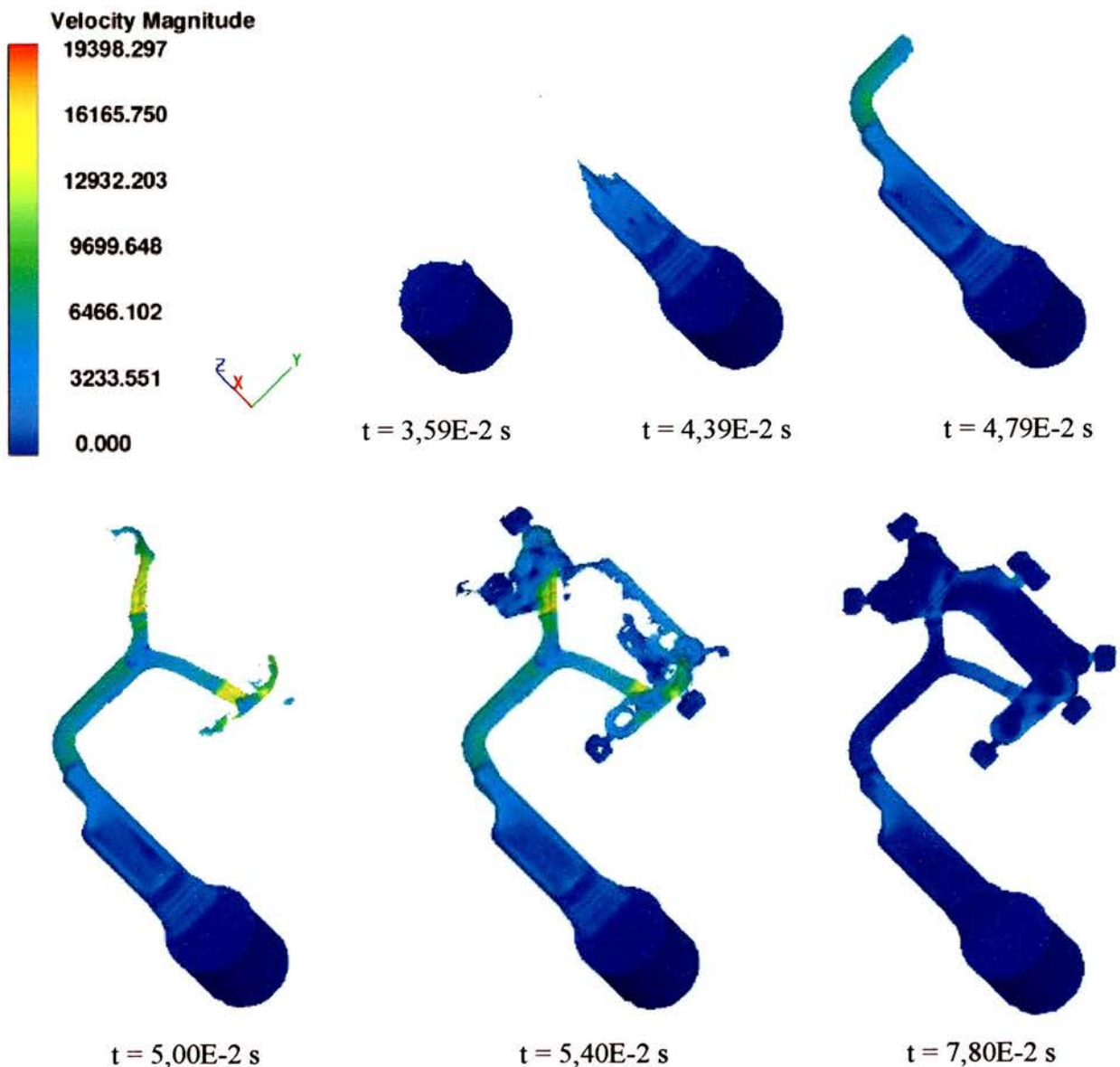




## Enchimento

Na sequência de imagens que se segue, é possível visualizar a progressão do enchimento com a variação da velocidade. Através da escala de cores consegue-se diferenciar a velocidade nas diferentes fases do enchimento da cavidade moldante.

Com esta simulação pretendeu-se verificar, a evolução do enchimento na cavidade moldante sendo possível visualizar, caso existam, pontos críticos e assimetrias no enchimento que ponham em risco a sanidade da peça e a sua qualidade final. Como se pode verificar, pela figura 31, a peça enche completamente de uma maneira uniforme.

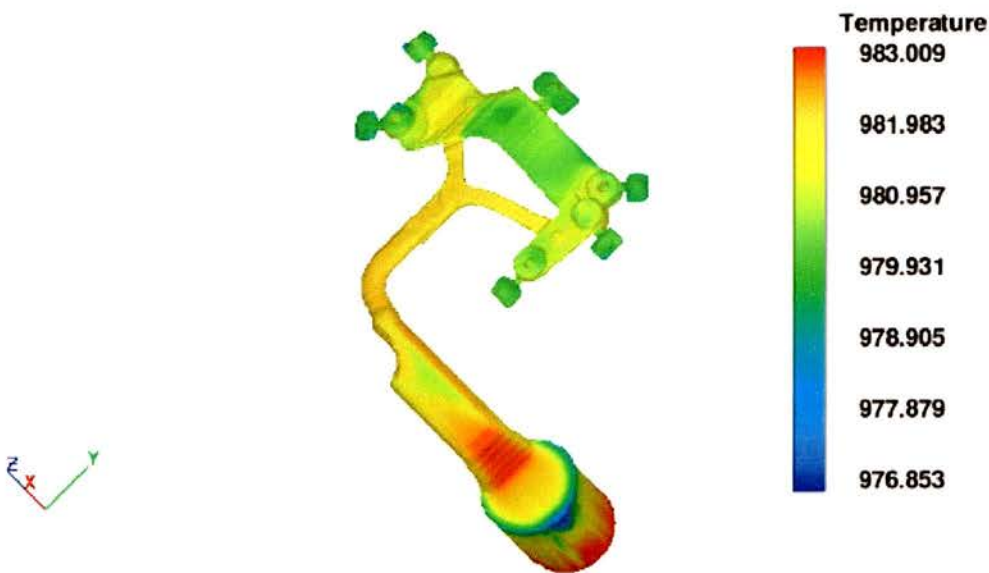


**Figura 31 - Simulação de enchimento variável velocidade (cm/s).**



A escala de cores foi definida automaticamente pelo software. Embora este permita vários ajustes, nomeadamente a determinação dos limites superiores e inferiores e as cores da escala, verificou-se que quando se fixa os referidos limites se obtêm na maior parte dos casos uma imagem monocromática não sendo perceptíveis as zonas onde ocorreram as deformações. Por este motivo optou-se por permitir que o software gerasse automaticamente a escala cromática.

Na figura 32 é possível visualizar o gradiente de temperatura após o enchimento. Como se pode verificar a zona com maior massividade (bolacha e o canal de alimentação) encontra-se mais quente. Como é sabido o canal de alimentação deve ser a última parte a solidificar para que a terceira fase do ciclo de enchimento possa fazer efeito.



**Figura 32 – Simulação de enchimento variável temperatura (K).**

## Empeno da peça dentro do molde com refrigeração

A sequência de imagens apresenta a previsão do empeno da peça no interior da cavidade moldante com refrigeração a 680 °C para os diferentes tempos de ciclo. Através da escala de cores é possível diferenciar a variação das cotas. Após observar estes resultados é possível ter uma ideia da magnitude da deformação que ocorrer no interior do molde, embora sejam valores baixos quando comparados com o empeno ao ar. A deformação no interior do molde é menor para tempos mais curtos. No Anexo A é possível ver a mesma simulação para a temperatura de 710 °C.

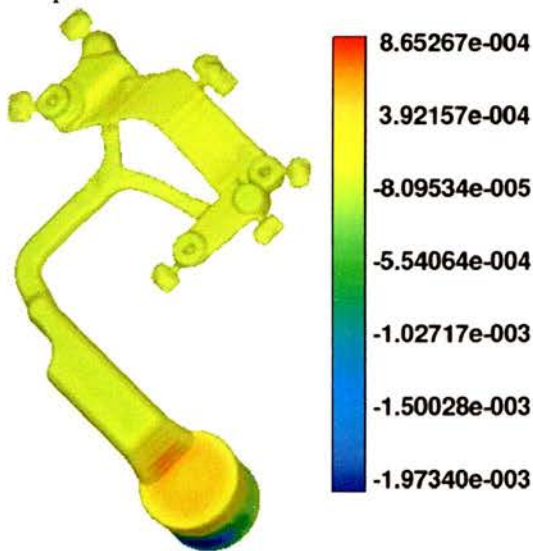


Figura 33 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 680 °C para 6s (cm).

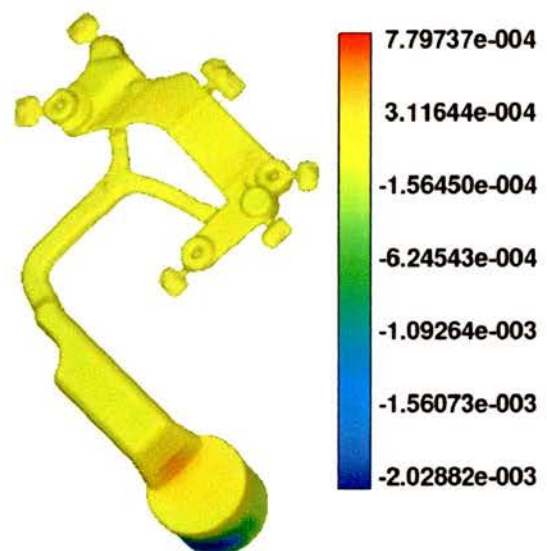


Figura 34 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 680 °C para 9s (cm).

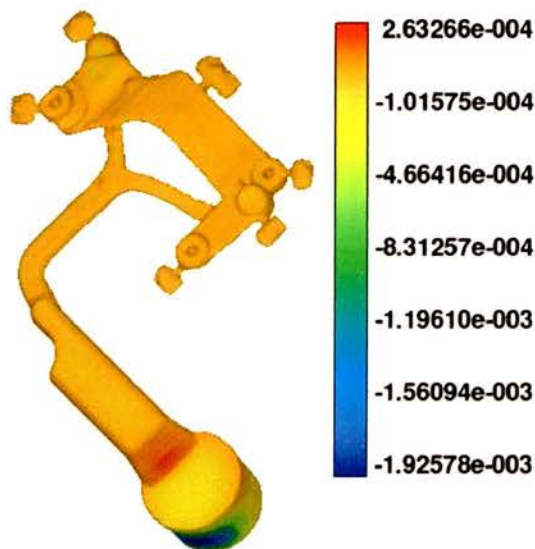


Figura 35 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 680 °C para 12s (cm).

## Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração

Tal como no conjunto de imagens anterior vê-se o empeno da peça no interior da cavidade moldante sem refrigeração a 680 °C para os diferentes tempos de ciclo. Através da escala de cores é possível diferenciar a variação das cotas. Observou-se uma deformação menor que no caso anterior onde foi usada termo-regulação. No entanto, é perceptível que o empeno não é uniforme como se pode ver pela diferença de cor patente ao longo da peça (o que não aconteceu, no caso anterior, com a termo-regulação ligada). As restantes simulações encontram-se em no Anexo A.

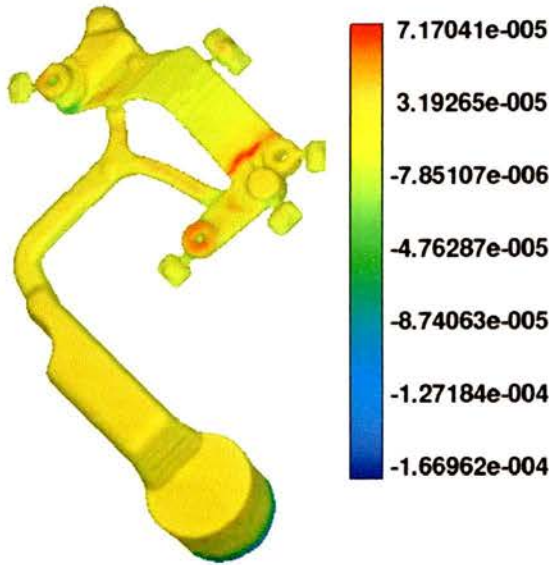


Figura 36 - Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração a 680 °C para 6s (cm).

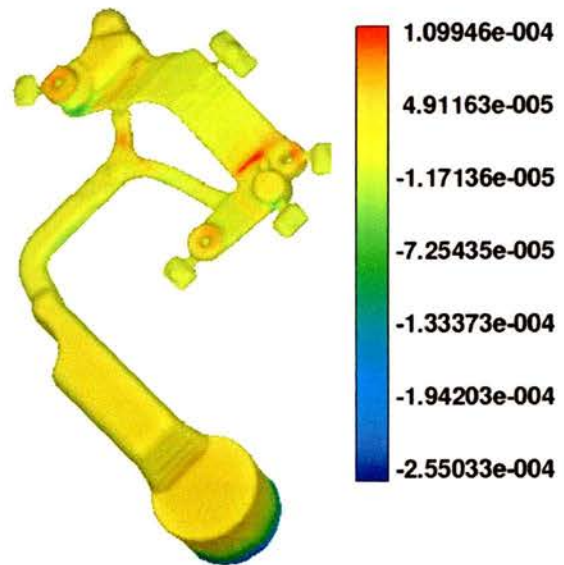


Figura 37 - Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração a 680 °C para 9s (cm).

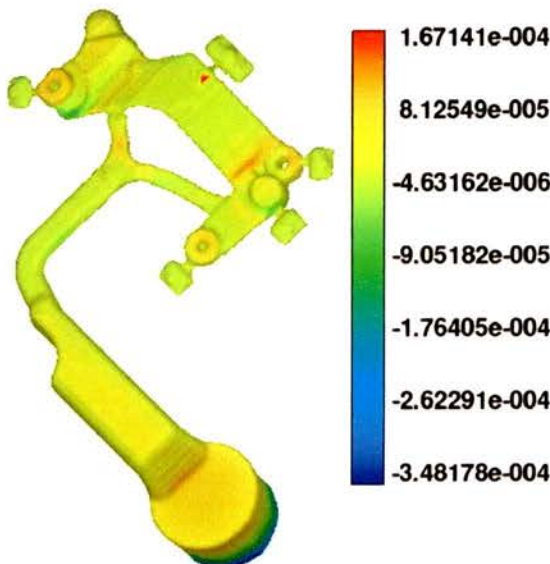


Figura 38 - Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração a 680 °C para 12s (cm).



## Empeno da peça ao ar com refrigeração

Através deste conjunto de imagens consegue-se ver o empeno da peça quando arrefece ao ar, com refrigeração a 680 °C e para os diferentes tempos de ciclo. Através da escala de cores é possível diferenciar a variação das cotas. Estas imagens pretendem simular o empeno da peça depois de retirada do molde (as simulações para a temperatura de 710 °C encontram-se no Anexo A). Torna-se evidente que a peça sofreu alterações consideráveis, basta para isso ver a diferentes tonalidades apresentadas para os diferentes tempos. É extremamente difícil quantificar e comparar os resultados obtidos através destas imagens. Por essa razão, foram criados gráficos com os valores de empeno de modo a facilitar uma melhor compreensão.

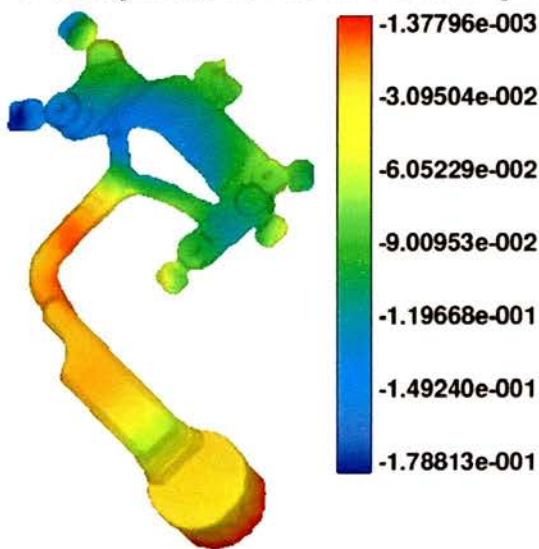


Figura 39 - Empeno da peça ao ar com refrigeração para 680 °C para 6s (cm).

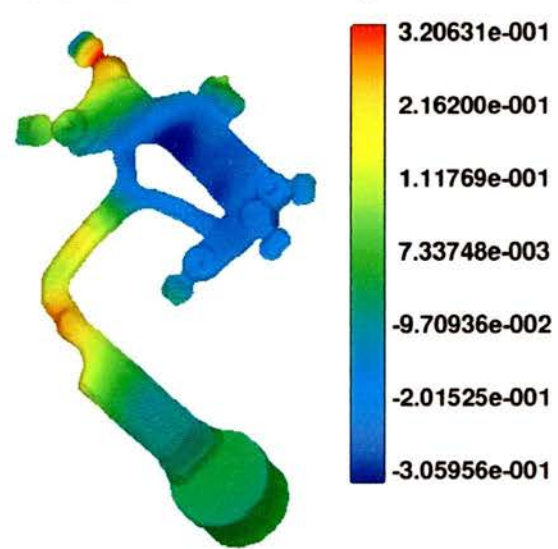


Figura 40 - Empeno da peça ao ar com refrigeração para 680 °C para 9s (cm).

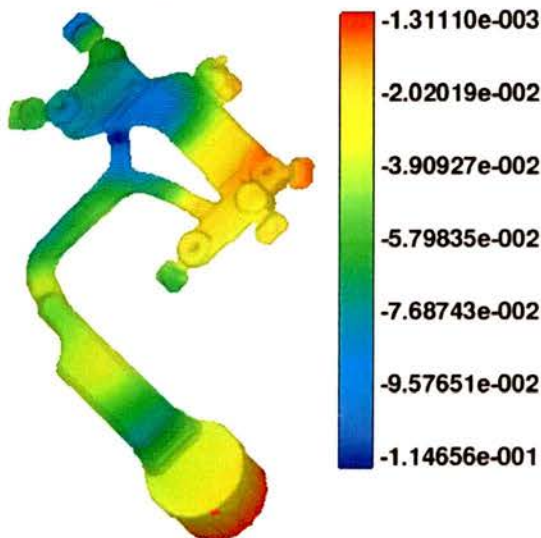
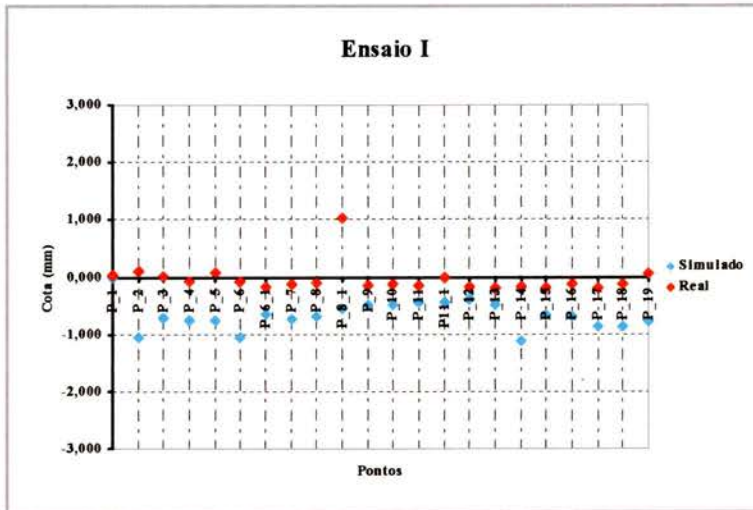


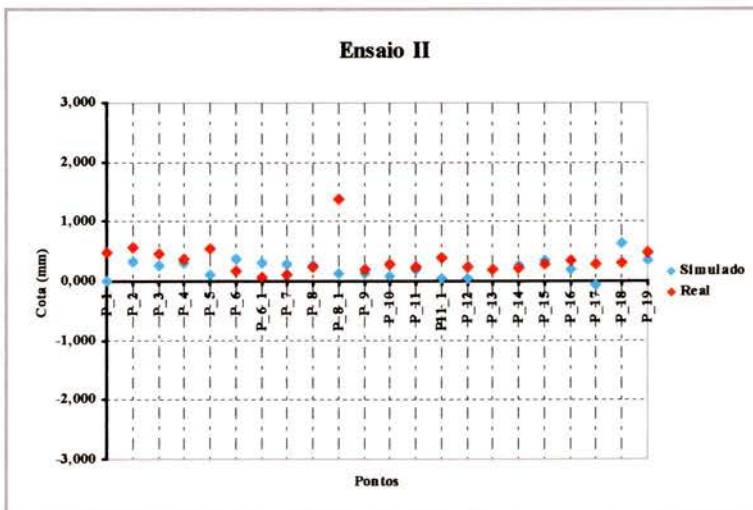
Figura 41 - Empeno da peça ao ar com refrigeração para 680 °C para 12s (cm).

## Gráficos, cotas reais vs cotas simuladas

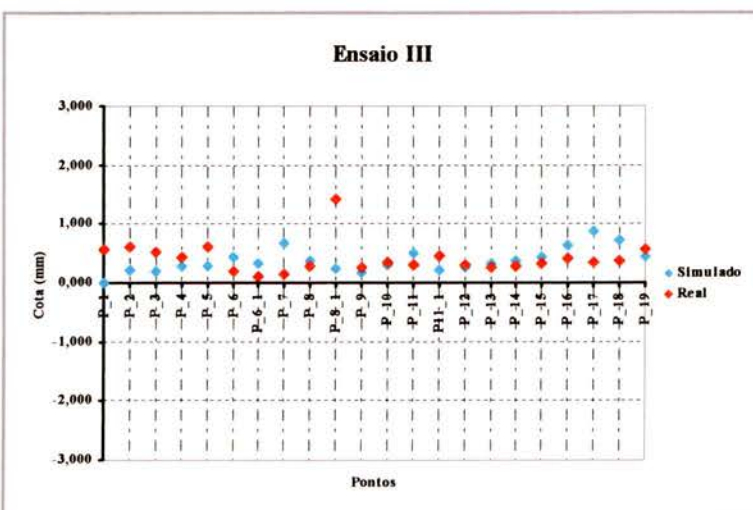
Tal como foi referido anteriormente é necessário não só estabelecer uma relação entre os valores obtidos nas sucessivas simulações, mas também determinar uma relação entre os valores obtidos experimentalmente (peças injectadas em condições idênticas às que foram simuladas). Para facilitar a análise recorreu-se à representação gráfica.



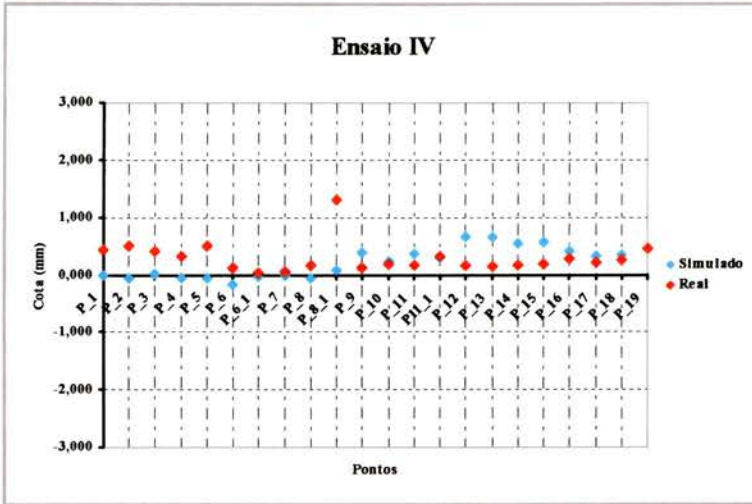
**Figura 45 – Ensaio I Cotas reais vs Cotas simuladas**



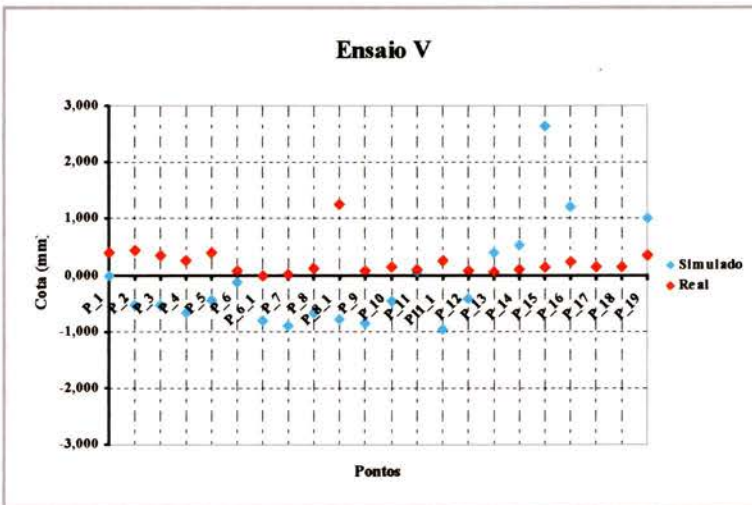
**Figura 46 - Ensaio II Cotas reais vs Cotas simuladas**



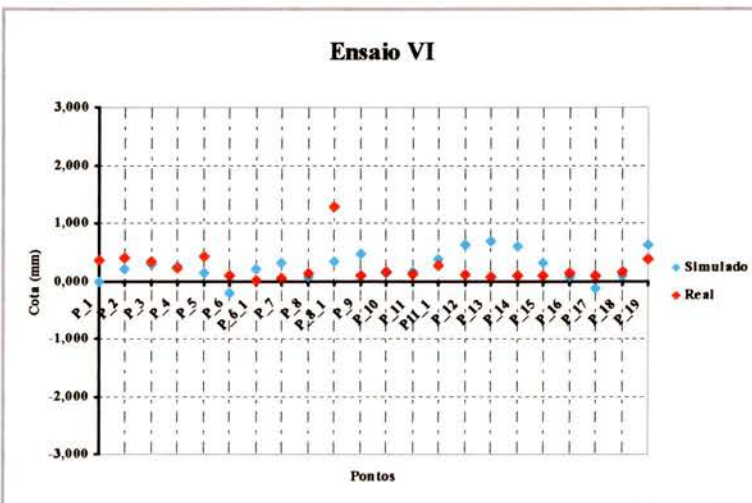
**Figura 47 - Ensaio III Cotas reais vs Cotas simuladas**



**Figura 48 - Ensaio IV Cotas reais vs Cotas simuladas**



**Figura 49 - Ensaio V Cotas reais vs Cotas simuladas**



**Figura 50 - Ensaio IV Cotas reais vs Cotas simuladas**



## Analise de resultados

Para uma mais fácil análise dos resultados, foram criados gráficos que relacionam cotas reais vs cotas simuladas e gráficos que apresentam a variação real ou simulada das cotas nas séries para condições de ensaio iguais (temperatura e termo-regulação), variando apenas o tempo de solidificação.

Ao analisar os gráficos cotas reais vs cotas simuladas, foi fácil constatar que os valores simulados e reais, não são todos coincidentes (imagens 45 a 50 e Anexo A imagens 63 a 68). No entanto é possível verificar que existe um paralelismo entre estes, havendo pontos praticamente coincidentes. Este facto indicia que é possível fazer pequenos ajustes nos parâmetros das simulações no sentido de aproximar os resultados.

Como se pode verificar nos gráficos correspondentes à variação real das cotas (imagens 73 a 76 Anexo A), existe um padrão de desvios bem definido. Verifica-se que não ocorrem diferenças significativas no valores das cotas quando se varia o tempo de solidificação (6, 9 e 12 s) excepto quando a termo-regulação se encontra desligada ocorrendo aí um desvio nas cotas para o tempo mais curto 6 s (ensaio I e VII). Esta situação verifica-se nas duas temperaturas em estudo (imagens 73 e 75 Anexo A).

Pela análise das imagens 69 e 70 (Anexo A) correspondentes à variação simulada das cotas, pode verificar-se que há oscilações significativas nos valores de empeno das peças sendo mais evidente nos ensaios I e V (temperatura de 680 °C), bem como nos ensaios simulados á temperatura de 710 °C (imagens 71 e 72), verificando-se também a existência de uma discrepância entre os valores de empeno, sendo mais evidente no ensaio XI. Das comparações entre séries correspondentes à variação simulada das cotas, a imagem 71 é o que apresenta uma maior consistência com valores de empeno mais próximos para os diferentes tempos de solidificação.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente verifica-se que o valor do empeno medido nas peças não varia em cada série quando se usa refrigeração independentemente da temperatura de vazamento (680 °C e 710 °C) e do tempo de permanência da peça no interior do molde (6s, 9s e 12s). Quando o molde não é refrigerado o tempo de permanência no

interior do molde influencia de uma maneira notória o valor do empeno para o tempo de 6s nas duas temperaturas em estudo.

Podemos assim verificar a partir desta análise que os resultados obtidos por simulação dependem de um número considerável de parâmetros. Uma das maiores dificuldades no momento de execução da simulação é estabelecer condições fronteira, isto é, determinar qual é de facto o coeficiente de transferência de calor que ocorre naquela zona específica. Por outro lado, deve-se ter em conta que o software não simula a extracção da peça. Embora os extractores sejam concebidos para não deformar a peça, existe sempre uma interferência no lado móvel do molde dado que contém contra saídas para fixar o gito.

Para melhorar a precisão dos resultados pode-se aumentar o número de elementos da malha diminuindo assim o tamanho de cada célula. Outro processo é passar de uma precisão simples para uma precisão dupla evitando assim o truncamento, ou seja, o arredondamento de resultados. Contudo é necessário ponderar muito bem sobre as opções a tomar porque a simulação vai ficando cada vez maior e mais pesada podendo o computador não ter capacidade de a processar e, conseqüentemente, aumentar o tempo de processamento sem garantia de melhoria óbvia e proporcional na qualidade dos resultados.

A possibilidade de determinar as partes críticas dos fundidos (maiores desvios dimensionais) bem como aproximar o valor dos desvios é, indubitavelmente, uma mais-valia permitindo grande economia em tempo e custos.



## Conclusão

Com a realização deste trabalho comprovou-se a efectividade dos meios informáticos de concepção e simulação aplicados à área da fundição injectada como ferramentas valiosas na potencialização da rentabilização do tempo e custos inerentes aos processos de concepção e desenvolvimento dos produtos.

Como se pode constatar ao longo deste relatório a utilização de tecnologia como a medição por coordenadas CMM (*Coordinate Measuring Machine*), a digitalização 3D, a simulação 3D CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e a análise termográfica vem possibilitar maior conhecimento sobre todo o processo de fundição injectada, permitindo a utilização dos resultados como *input* de posteriores simulações. Assim será possível reduzir progressivamente o carácter aleatório e constatado na análise dos primeiros resultados.

O Flow 3D demonstra ser um software com elevado potencial na simulação de componentes injectados em liga de alumínio. A utilização deste software ao longo deste trabalho permitiu-me encontrar uma estratégia de melhoria progressiva dos resultados das simulações. Através da utilização sucessiva de modelos progressivamente mais complexos é possível serem atingidos níveis de refinamento da simulação que permitam encarar estas simulações como ferramentas fidedignas de preparação do processo de desenvolvimento de moldes para fundição injectada de alumínio.

A elevada versatilidade, multiplicidade de opções e combinações de parâmetros que é possível explorar nesta nova versão do Flow 3D (Versão 9.0), deixa-me com a consciência que seria possível evoluir e refinar os resultados obtidos, pelo que se encontram abertos os caminhos para o desenvolvimento de novos projectos que prossigam os objectivos desenvolvidos neste trabalho.

Com o aumento das exigências do mercado mundial de fundição injectada e o aumento dos requisitos estruturais das peças, a utilização e domínio das tecnologias descritas torna-se um factor primordial na competitividade das empresas.



# Anexo A

## Anexo A

### Empeno da peça dentro do molde com refrigeração

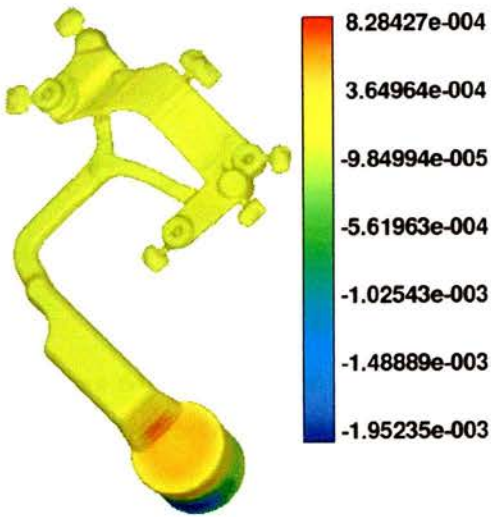


Figura 51 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 710 °C para 6s (cm).

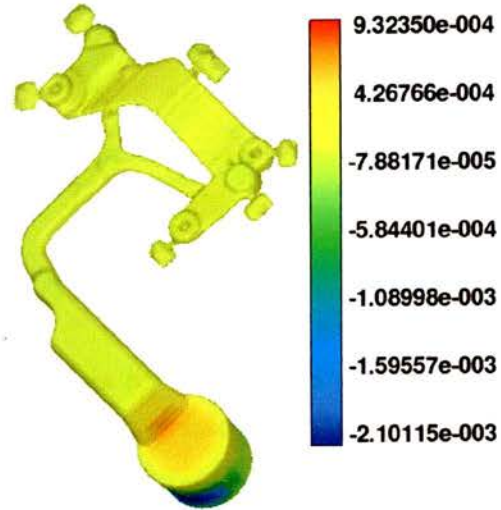


Figura 52 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 710 °C para 9s (cm).

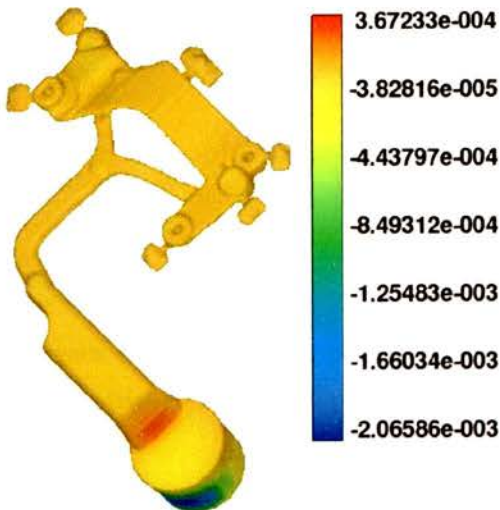


Figura 53 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 710 °C para 6s (cm).

## Empeno da peça dentro do molde sem refrigeração

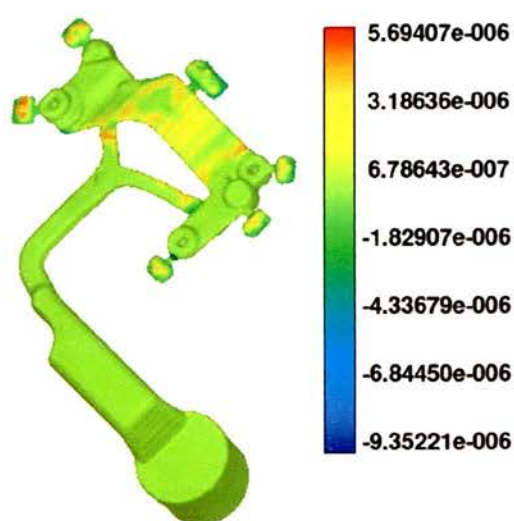


Figura 54 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 710 °C para 6s (cm).

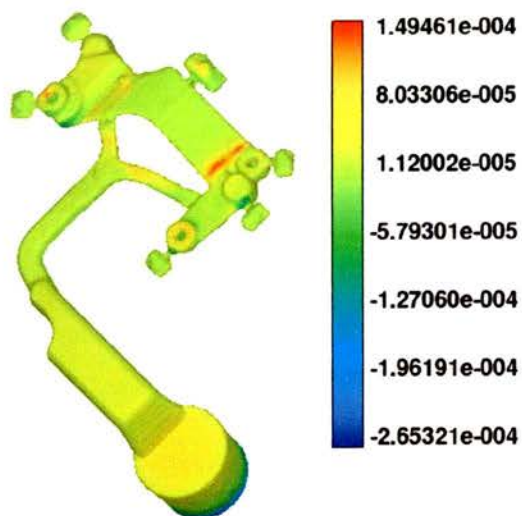


Figura 55 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 710 °C para 9s (cm).

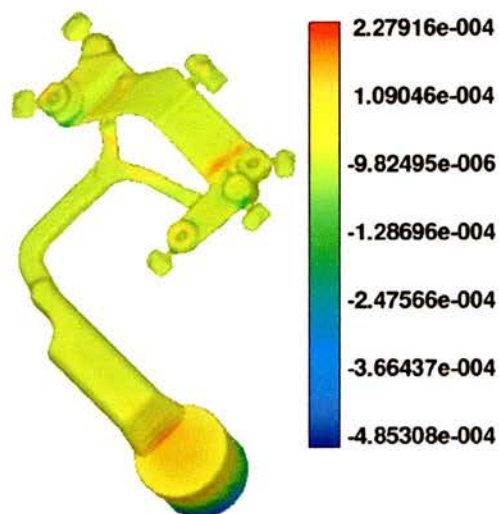


Figura 56 - Empeno da peça dentro do molde com refrigeração a 710 °C para 6s (cm).



## Empeno da peça ao ar com refrigeração

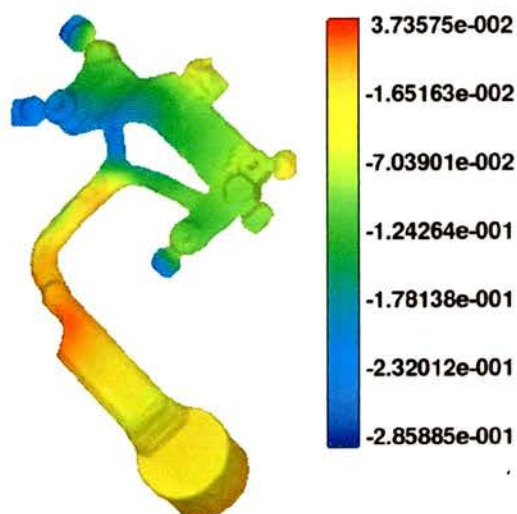


Figura 57 - Empeno da peça ao ar com refrigeração para 710 °C para 6s (cm).

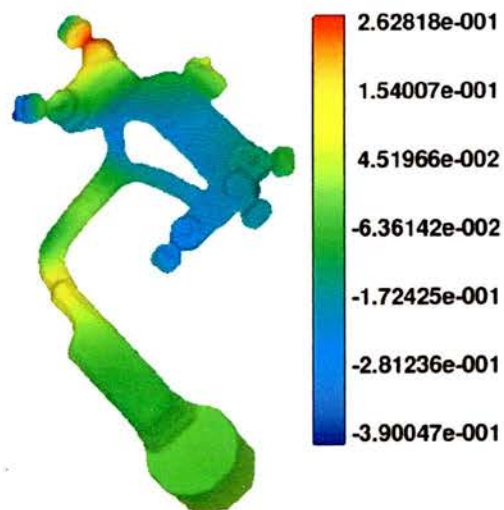


Figura 58 - Empeno da peça ao ar com refrigeração para 710 °C para 9s (cm).

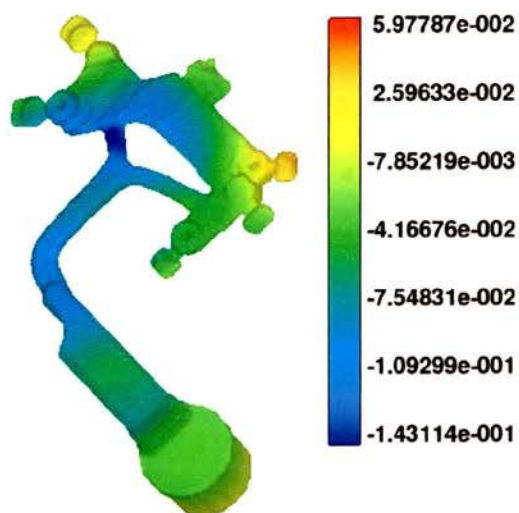


Figura 59 - Empeno da peça ao ar com refrigeração para 710 °C para 12s (cm).

## Empeno da peça ao ar sem refrigeração

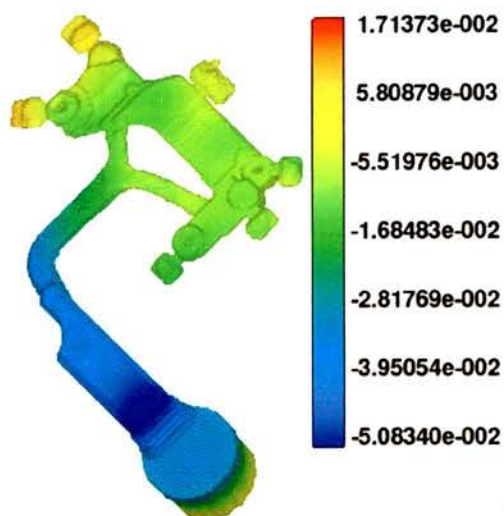


Figura 60 - Empeno da peça ao ar sem refrigeração a 680 °C para 6s (cm).

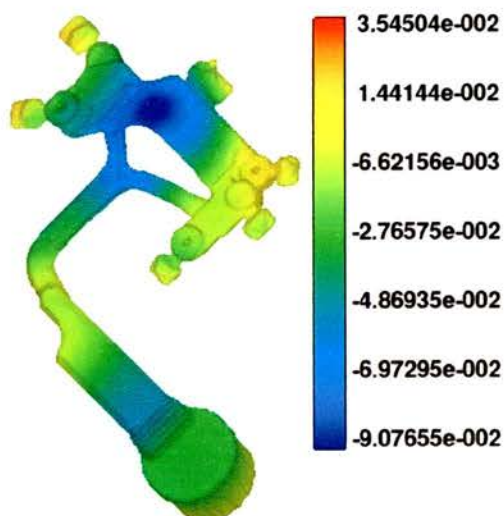


Figura 61 - Empeno da peça ao ar sem refrigeração a 680 °C para 9s (cm).

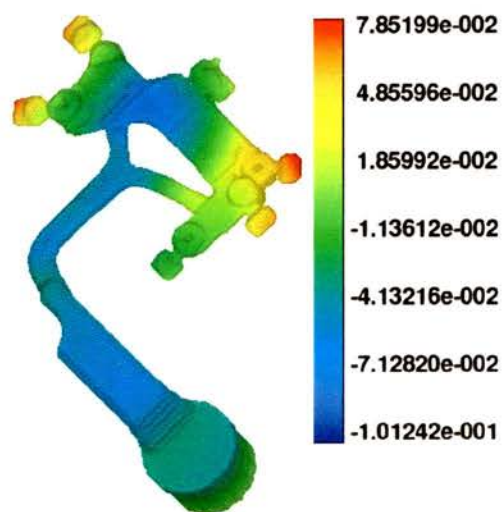
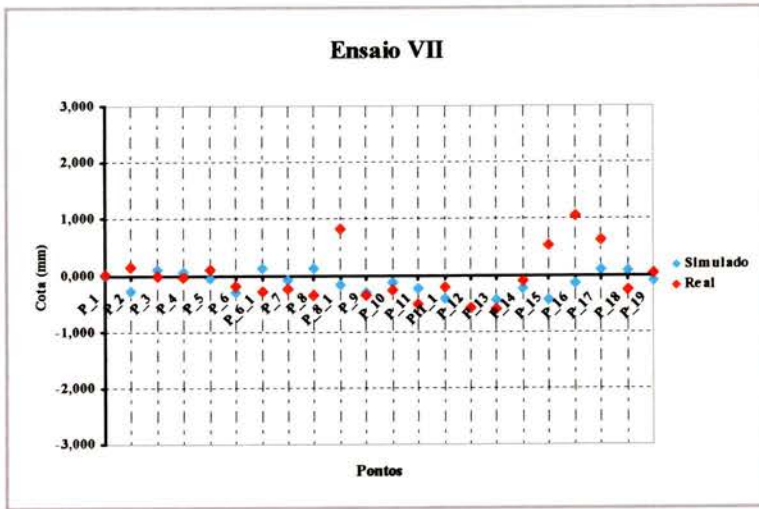
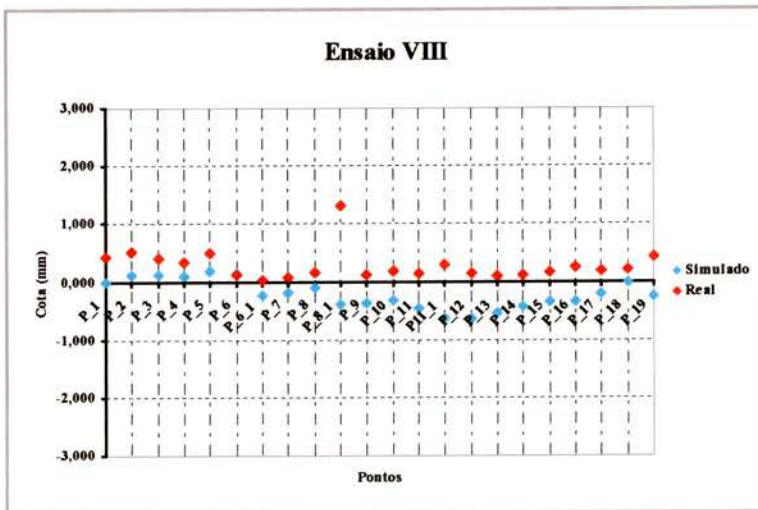


Figura 62 - Empeno da peça ao ar sem refrigeração a 680 °C para 12s (cm).

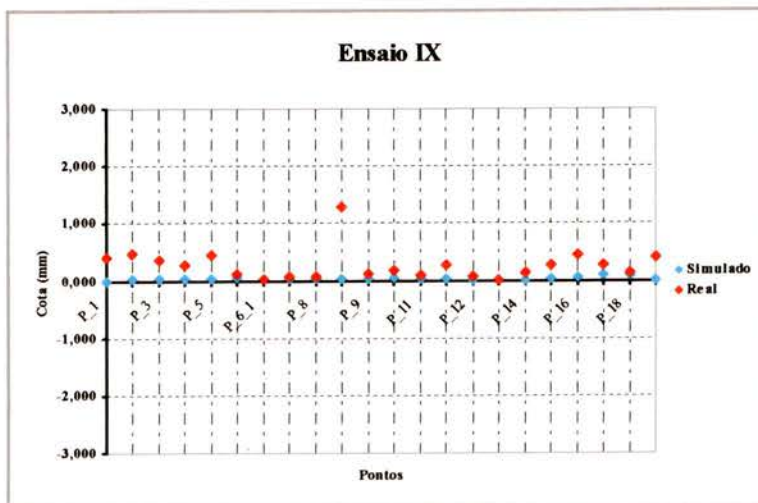
## Gráficos, cotas reais vs cotas simuladas



**Figura 63 – Ensaio VII Cotas reais vs Cotas simuladas**

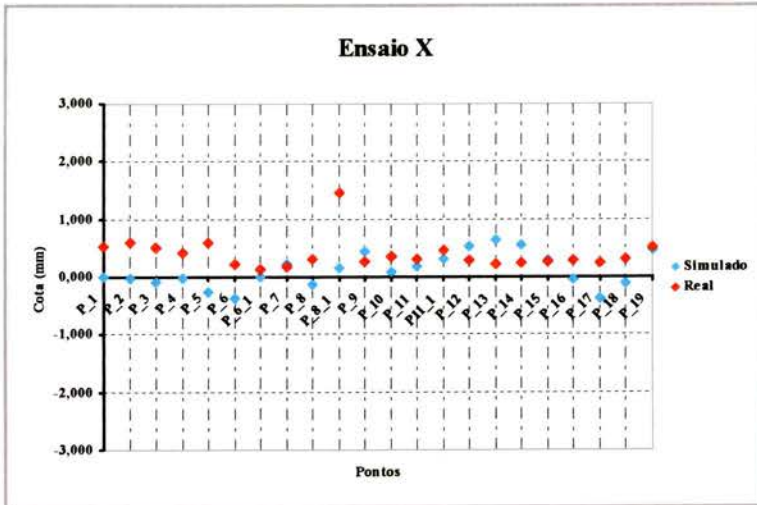


**Figura 64 - Ensaio VIII Cotas reais vs Cotas simuladas**

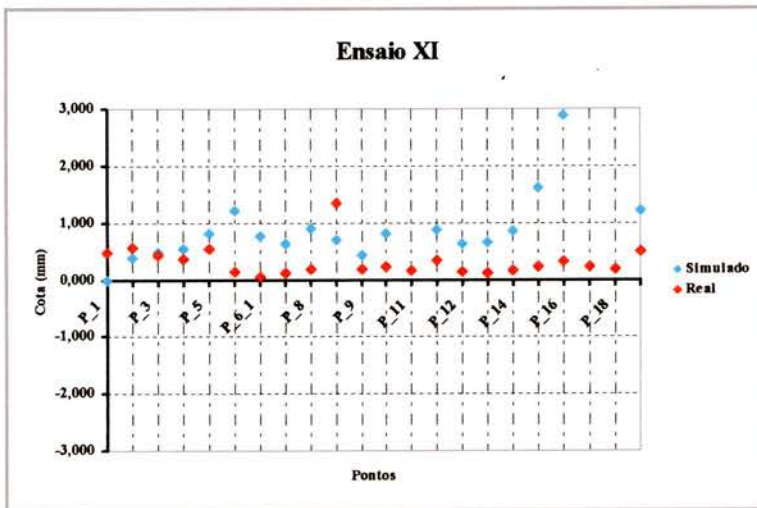


**Figura 65 - Ensaio IX Cotas reais vs Cotas simuladas**

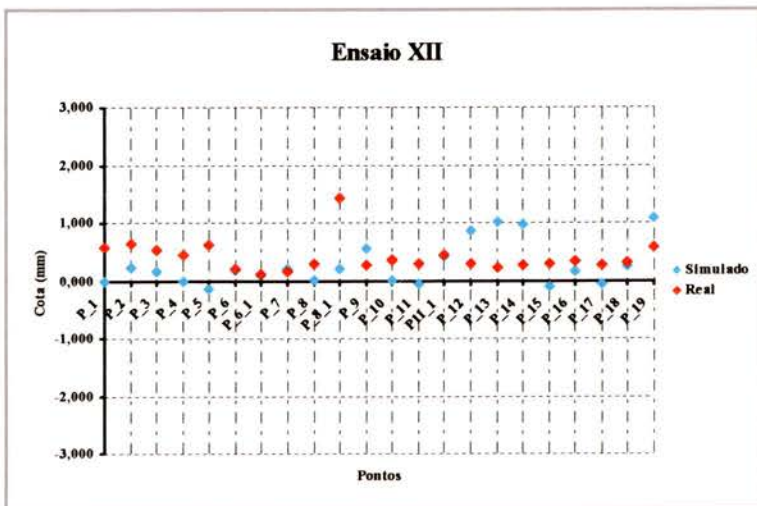




**Figura 66 - Ensaio X Cotas reais vs Cotas simuladas**



**Figura 67 - Ensaio XI Cotas reais vs Cotas simuladas**



**Figura 68 - Ensaio XII Cotas reais vs Cotas simuladas**

Gráficos correspondentes variação simulada das cotas nas séries em que as condições de ensaio são iguais (temperatura e termo-regulação), variando apenas o tempo de solidificação.

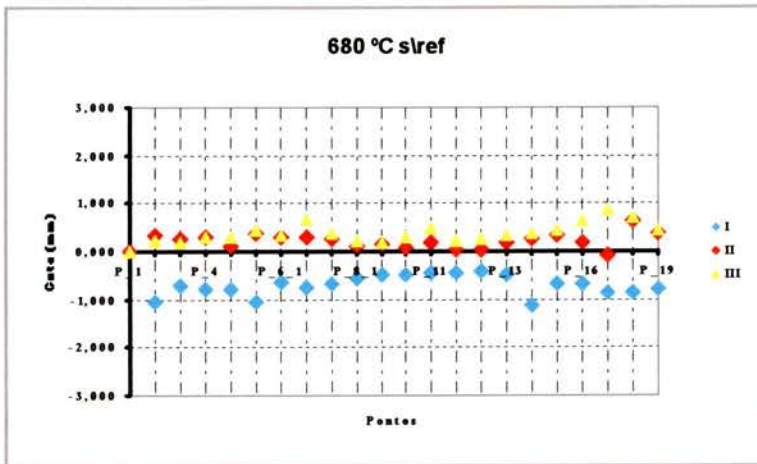


Figura 69 - Ensaio I, II, III, a 680 °C sem termo regulação.

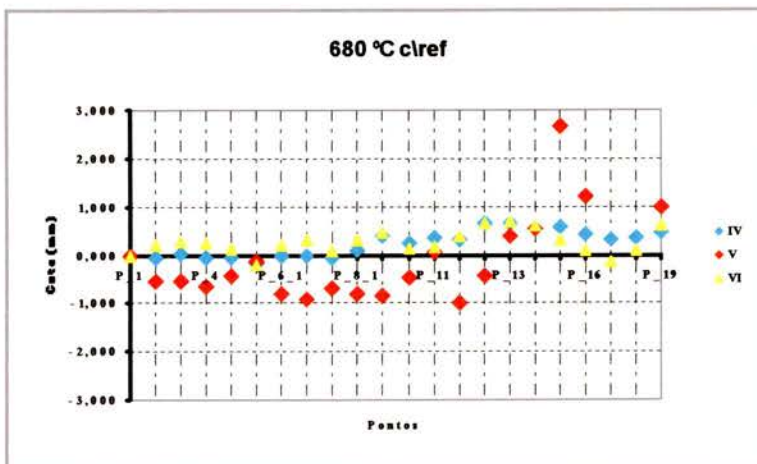


Figura 70 - Ensaio IV, V, VI, a 680 °C com termo regulação.

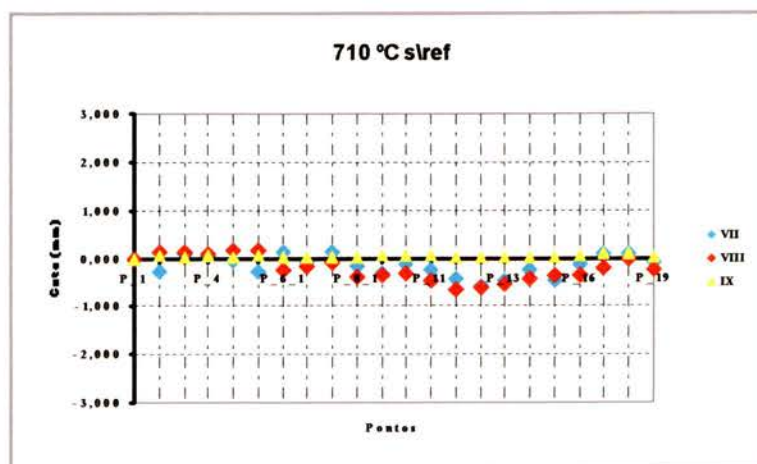
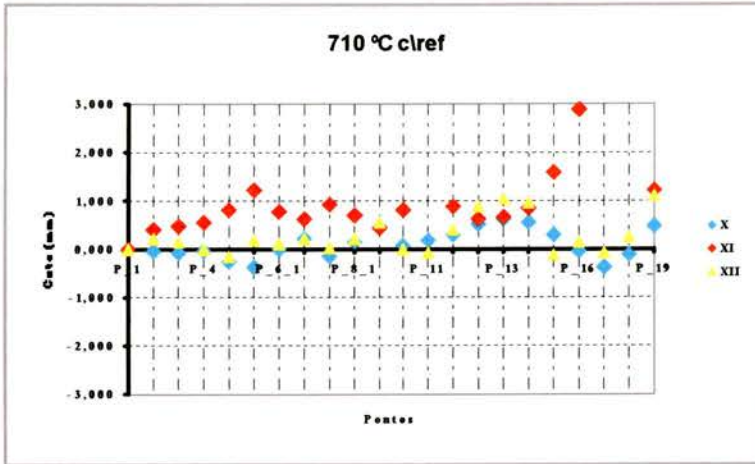
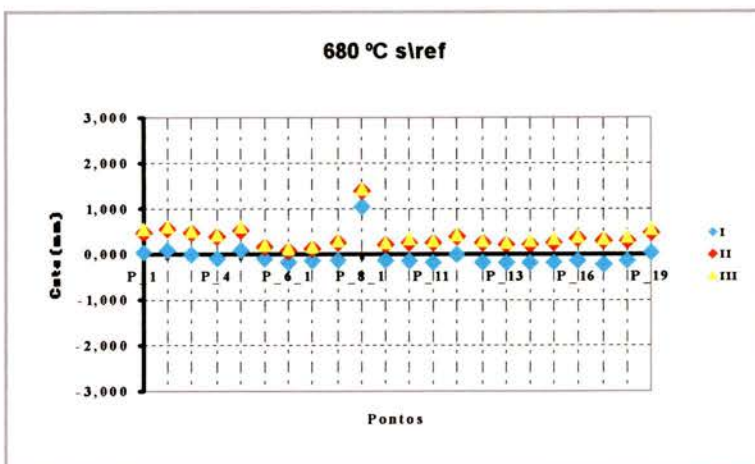


Figura 71 - Ensaio VII, VIII, IX a 710 °C sem termo regulação.

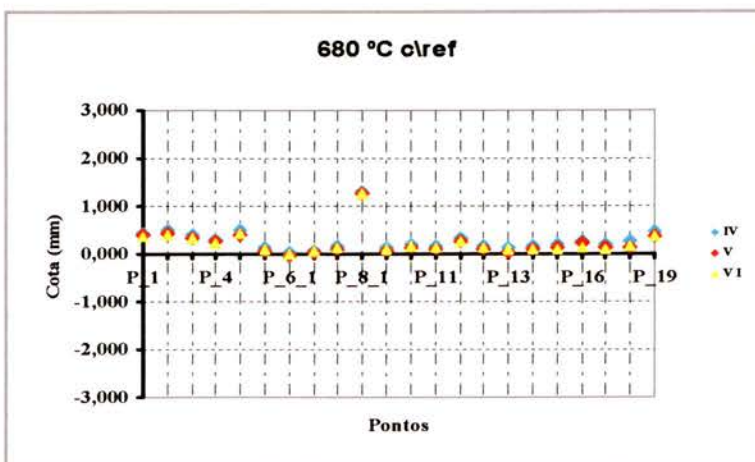


**Figura 72 - Ensaio VII, VIII, IX a 710 °C com termo regulação.**

Gráficos correspondentes variação real das cotas nas séries em que as condições de ensaio são iguais (temperatura e termo-regulação), variando apenas o tempo de solidificação.



**Figura 73 -Ensaio I, II, III, a 680 °C sem termo regulação.**



**Figura 74 - Ensaio IV, V, VI, a 680 °C com termo regulação.**



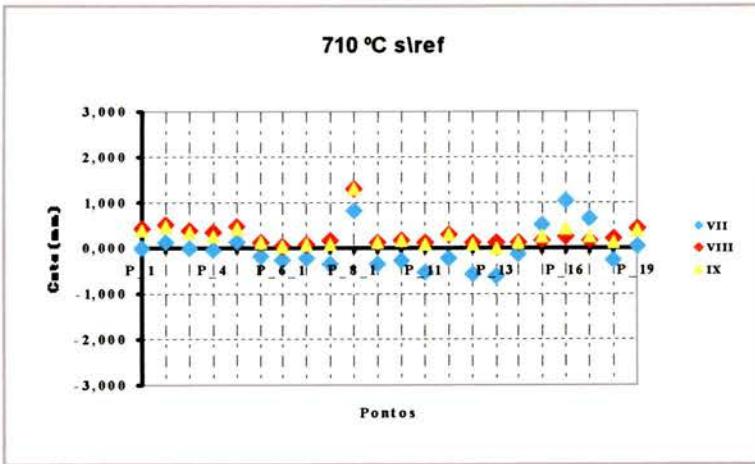


Figura 75 - Ensaio VII, VIII, IX a 710 °C sem termo regulação.

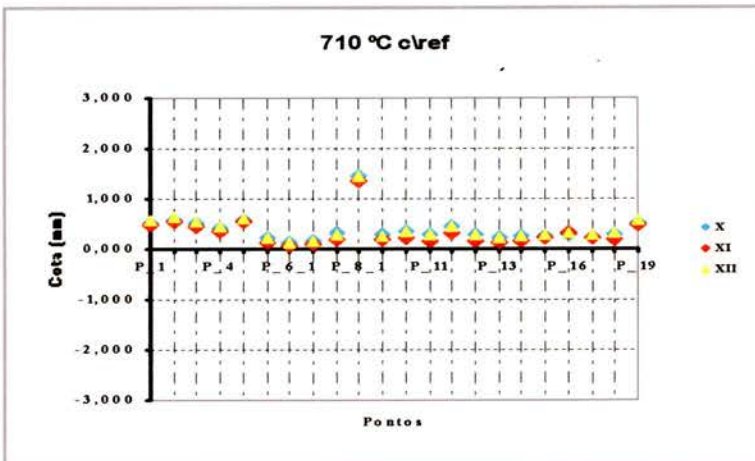


Figura 76 - Ensaio VII, VIII, IX a 710 °C com termo regulação.

# Anexo B



**KÜPPER & SCHMIDT**  
Componentes para Automóveis, LDA

## FICHA DE CÁLCULOS

Pesos

REF<sup>a</sup>

**REL**

Peso peça (s):

Peso Unitár N° Cavidade Total  
400 4 **165** [g]

N° masselotes por cavidade:

**90** [g]

N° de masselotes por cavidade

6

Peso bolacha Ø

**200** [g]

Ø	Altura
90	30

Peso canal:

**235** [g]

Peso depois da secção de ataque:

**255** [g]

Peso total : ( bolacha e canal )

**435** [g]

Peso total com peças:

**690** [g]





## CÁLCULO DA SECÇÃO DE ATAQUE

$$SA = \frac{mA}{Q \times tF \times Vma}$$

SA	Secção de ataque	mm <sup>2</sup>
mA	Peso depois da secção de ataque	g
Q	Densidade do alumínio líquido	2.5 g/cm <sup>3</sup>
tF	Tempo de enchimento	s
Vma	Velocidade de enchimento	m/s

## COEFICIENTES DE REFERÊNCIA (BÜHLER)

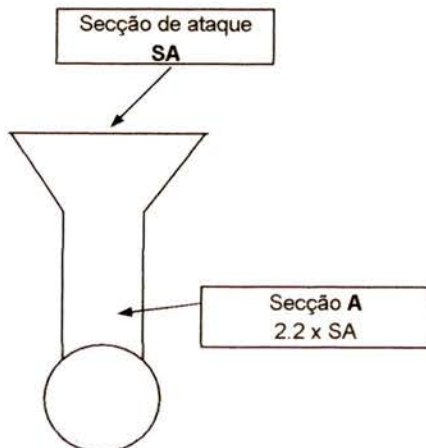
Velocidade de enchimento ( Vma )	Tempo de enchimento ( tF )		
	S ( mm )	tF ( s )	tF̄ ( s ) ( S ) Espessura da parede mais fina
<p>Forma da peça</p> <p>Vma 20 a 30 m/s</p>	1,5	0.01/0.03	0,02
	1,8	0.02/0.04	0,03
	2,0	0.02/0.06	0,04
	2,3	0.03/0.07	0,05
	2,5	0.04/0.09	0,06
<p>Vma 40 a 50 m/s</p>	3,0	0.05/0.10	0,07
	3,8	0.05/0.12	0,08
	5,0	0.06/0.20	0,12

mA    Q    tF    Vma    SA

## CÁLCULO DA SECÇÃO DE ATAQUE ( SA )

255	2,75	0,07	25	<b>53</b>
-----	------	------	----	-----------

## CÁLCULO DO CANAL



Secção SA (mm<sup>2</sup>) = **26**

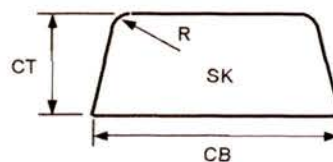
Secção A (mm<sup>2</sup>) = **53**

CB = **12**

CT = **5**

R = **2,5**

SK = **53**



Comprimento da secção de ataque (mm)

**14**

Espessura da secção de ataque (mm)

**2,00**

# Anexo C

Tabelas com valores referentes as cotas medidas nas peças injectadas e os valores simulados para cada uma das séries.

Temperatura de vazamento 680 ° C												
Ponto	Ensaio I				Ensaio II				Ensaio III			
	Real			Simulado	Real			Simulado	Real			Simulado
	Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.	
P 1	0,041	0,108	-0,018	0,000	0,490	0,553	0,422	0,000	0,563	0,693	0,502	0,000
P 2	0,091	0,123	0,036	-1,059	0,567	0,637	0,490	0,323	0,623	0,748	0,576	0,217
P 3	0,017	0,072	-0,043	-0,703	0,464	0,530	0,397	0,253	0,523	0,674	0,461	0,199
P 4	-0,075	-0,042	-0,130	-0,769	0,371	0,442	0,301	0,299	0,431	0,553	0,381	0,288
P 5	0,080	0,118	0,020	-0,769	0,540	0,612	0,465	0,099	0,612	0,749	0,552	0,288
P 6	-0,073	0,008	-0,108	-1,047	0,171	0,214	0,140	0,368	0,198	0,290	0,137	0,445
P 6 1	-0,167	-0,099	-0,202	-0,648	0,071	0,101	0,046	0,315	0,110	0,198	0,062	0,320
P 7	-0,133	-0,068	-0,173	-0,741	0,111	0,144	0,083	0,287	0,154	0,237	0,113	0,673
P 8	-0,109	0,013	-0,165	-0,694	0,249	0,307	0,189	0,269	0,285	0,447	0,182	0,379
P 8 1	1,035	1,143	0,985	-0,563	1,387	1,436	1,342	0,125	1,433	1,585	1,345	0,237
P 9	-0,146	-0,039	-0,204	-0,485	0,208	0,258	0,169	0,138	0,257	0,408	0,170	0,178
P 10	-0,125	-0,009	-0,194	-0,498	0,282	0,345	0,241	0,094	0,346	0,513	0,270	0,309
P 11	-0,154	-0,042	-0,217	-0,448	0,250	0,320	0,166	0,204	0,300	0,477	0,187	0,497
P11 1	-0,009	0,101	-0,074	-0,441	0,401	0,461	0,347	0,045	0,456	0,627	0,371	0,220
P 12	-0,159	-0,056	-0,226	-0,407	0,247	0,320	0,167	0,037	0,305	0,475	0,192	0,273
P 13	-0,187	-0,105	-0,257	-0,483	0,199	0,272	0,128	0,203	0,265	0,405	0,172	0,329
P 14	-0,175	-0,080	-0,250	-1,114	0,229	0,277	0,186	0,254	0,284	0,430	0,218	0,375
P 15	-0,184	-0,101	-0,263	-0,671	0,282	0,387	0,192	0,353	0,333	0,467	0,240	0,447
P 16	-0,126	-0,074	-0,197	-0,690	0,353	0,497	0,234	0,202	0,406	0,504	0,308	0,645
P 17	-0,198	-0,156	-0,265	-0,866	0,291	0,365	0,214	-0,058	0,360	0,453	0,258	0,870
P 18	-0,133	-0,064	-0,192	-0,868	0,308	0,374	0,244	0,645	0,376	0,505	0,309	0,719
P 19	0,048	0,104	-0,016	-0,770	0,488	0,559	0,414	0,358	0,575	0,700	0,503	0,448



Temperatura de vazamento 680 ° C												
Ponto	Ensaio IV				Ensaio V				Ensaio VI			
	Real			Simulado	Real			Simulado	Real			Simulado
	Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.	
P 1	0,434	0,500	0,364	0,000	0,388	0,510	0,318	0,000	0,388	0,417	0,318	0,000
P 2	0,503	0,655	0,363	-0,065	0,449	0,524	0,404	-0,539	0,449	0,482	0,404	0,207
P 3	0,406	0,498	0,307	0,006	0,346	0,439	0,288	-0,533	0,346	0,393	0,288	0,288
P 4	0,316	0,448	0,211	-0,061	0,251	0,294	0,216	-0,661	0,251	0,295	0,216	0,260
P 5	0,496	0,613	0,410	-0,054	0,406	0,467	0,363	-0,433	0,406	0,470	0,363	0,140
P 6	0,119	0,149	0,094	-0,172	0,081	0,198	-0,010	-0,133	0,081	0,128	-0,010	-0,218
P 6 1	0,023	0,049	-0,018	-0,029	-0,018	0,103	-0,106	-0,811	-0,018	0,033	-0,106	0,208
P 7	0,060	0,094	-0,007	-0,015	0,019	0,144	-0,067	-0,904	0,019	0,085	-0,067	0,325
P 8	0,172	0,220	0,116	-0,062	0,115	0,329	-0,045	-0,679	0,115	0,190	-0,045	0,078
P 8 1	1,314	1,360	1,256	0,078	1,257	1,476	1,098	-0,788	1,257	1,330	1,098	0,335
P 9	0,129	0,179	0,065	0,392	0,070	0,296	-0,084	-0,842	0,070	0,153	-0,084	0,482
P 10	0,200	0,278	0,119	0,228	0,137	0,434	-0,055	-0,468	0,137	0,218	-0,055	0,132
P 11	0,174	0,234	0,111	0,362	0,096	0,347	-0,105	0,065	0,096	0,192	-0,105	0,159
P11 1	0,323	0,393	0,260	0,309	0,253	0,533	0,058	-0,972	0,253	0,324	0,058	0,379
P 12	0,177	0,261	0,126	0,649	0,086	0,292	-0,093	-0,415	0,086	0,186	-0,093	0,635
P 13	0,136	0,195	0,078	0,668	0,049	0,165	-0,053	0,403	0,049	0,138	-0,053	0,686
P 14	0,163	0,254	0,091	0,537	0,095	0,355	-0,067	0,523	0,095	0,139	-0,067	0,610
P 15	0,197	0,308	0,104	0,568	0,148	0,465	0,035	2,647	0,148	0,140	0,035	0,325
P 16	0,270	0,448	0,167	0,417	0,228	0,532	0,100	1,210	0,228	0,179	0,100	0,076
P 17	0,212	0,374	0,112	0,313	0,149	0,379	0,043	4,004	0,149	0,140	0,043	-0,122
P 18	0,253	0,326	0,182	0,351	0,146	0,259	0,078	3,163	0,146	0,212	0,078	0,105
P 19	0,456	0,521	0,412	0,458	0,352	0,454	0,272	1,002	0,352	0,421	0,272	0,623

Temperatura de vazamento 710 ° C												
Ponto	Ensaio VII				Ensaio VIII				Ensaio IX			
	Real			Simulado	Real			Simulado	Real			Simulado
	Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.	
P 1	0,022	0,146	-0,039	0,000	0,439	0,489	0,372	0,000	0,400	0,432	0,369	0,000
P 2	0,151	0,340	0,051	-0,282	0,526	0,601	0,443	0,126	0,467	0,497	0,407	0,039
P 3	-0,004	0,140	-0,082	0,094	0,410	0,483	0,343	0,123	0,366	0,402	0,335	0,029
P 4	-0,031	0,099	-0,104	0,060	0,334	0,386	0,267	0,100	0,281	0,315	0,230	0,042
P 5	0,113	0,177	0,063	-0,054	0,490	0,536	0,432	0,181	0,445	0,479	0,410	0,035
P 6	-0,188	-0,134	-0,231	-0,296	0,125	0,167	0,039	0,151	0,114	0,159	0,054	0,051
P 6 1	-0,275	-0,217	-0,344	0,125	0,033	0,077	-0,052	-0,226	0,027	0,071	-0,032	0,032
P 7	-0,237	-0,173	-0,338	-0,084	0,074	0,117	-0,004	-0,181	0,069	0,100	0,012	0,037
P 8	-0,346	-0,208	-0,452	0,117	0,160	0,250	0,012	-0,098	0,069	0,185	-0,235	0,028
P 8 1	0,829	0,957	0,673	-0,164	1,308	1,395	1,153	-0,393	1,291	1,342	1,187	0,036
P 9	-0,343	-0,207	-0,553	-0,307	0,122	0,207	-0,033	-0,370	0,119	0,173	0,023	0,043
P 10	-0,266	-0,055	-0,541	-0,130	0,179	0,279	0,002	-0,324	0,178	0,217	0,128	0,049
P 11	-0,504	-0,281	-0,668	-0,248	0,145	0,243	-0,009	-0,450	0,108	0,186	-0,050	0,044
P11 1	-0,208	-0,090	-0,417	-0,426	0,297	0,397	0,133	-0,636	0,284	0,331	0,211	0,029
P 12	-0,579	-0,309	-0,743	-0,586	0,144	0,224	0,022	-0,634	0,071	0,177	-0,155	0,021
P 13	-0,600	-0,344	-0,757	-0,450	0,111	0,165	0,033	-0,542	0,016	0,132	-0,211	0,014
P 14	-0,112	0,226	-0,255	-0,246	0,127	0,196	0,024	-0,432	0,137	0,216	0,107	0,005
P 15	0,531	1,447	-0,040	-0,451	0,170	0,289	0,072	-0,344	0,272	0,745	0,113	0,027
P 16	1,043	2,295	0,143	-0,138	0,248	0,434	0,169	-0,342	0,451	1,149	0,145	0,061
P 17	0,633	1,553	-0,024	0,111	0,185	0,326	0,114	-0,212	0,280	0,807	0,090	0,110
P 18	-0,268	-0,214	-0,338	0,083	0,214	0,298	0,142	-0,017	0,142	0,186	0,067	0,090
P 19	0,038	0,134	-0,022	-0,101	0,434	0,473	0,381	-0,244	0,407	0,437	0,382	0,014



Temperatura de vazamento 710 ° C												
Ponto	Ensaio X				Ensaio XI				Ensaio XII			
	Real			Simulado	Real			Simulado	Real			Simulado
	Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.		Média	Max.	Min.	
P_1	0,525	0,667	0,444	0,000	0,479	0,507	0,451	0,000	0,587	0,659	0,523	0,000
P_2	0,597	0,731	0,503	-0,030	0,559	0,609	0,474	0,399	0,652	0,743	0,552	0,239
P_3	0,512	0,703	0,403	-0,087	0,442	0,479	0,399	0,485	0,549	0,625	0,487	0,155
P_4	0,421	0,622	0,318	-0,021	0,363	0,392	0,299	0,546	0,453	0,552	0,376	-0,017
P_5	0,594	0,863	0,479	-0,261	0,537	0,568	0,482	0,814	0,626	0,726	0,565	-0,148
P_6	0,218	0,385	0,164	-0,382	0,138	0,164	0,108	1,222	0,217	0,292	0,164	0,184
P_6_1	0,124	0,313	0,071	-0,002	0,058	0,089	0,011	0,772	0,130	0,201	0,074	0,099
P_7	0,166	0,370	0,109	0,227	0,113	0,194	0,051	0,627	0,174	0,248	0,117	0,215
P_8	0,309	0,574	0,236	-0,136	0,192	0,250	0,108	0,908	0,302	0,450	0,198	0,021
P_8_1	1,453	1,743	1,372	0,160	1,345	1,397	1,261	0,693	1,448	1,596	1,349	0,212
P_9	0,276	0,598	0,179	0,443	0,182	0,235	0,089	0,426	0,272	0,430	0,173	0,567
P_10	0,343	0,703	0,234	0,080	0,233	0,305	0,183	0,814	0,356	0,565	0,239	0,006
P_11	0,306	0,605	0,224	0,184	0,170	0,249	0,025	3,518	0,305	0,471	0,187	-0,063
P11_1	0,457	0,788	0,368	0,306	0,337	0,412	0,256	0,879	0,461	0,649	0,342	0,422
P_12	0,284	0,561	0,201	0,528	0,151	0,198	-0,020	0,639	0,293	0,412	0,199	0,875
P_13	0,223	0,464	0,139	0,632	0,113	0,187	-0,039	0,658	0,229	0,302	0,171	1,030
P_14	0,246	0,545	0,152	0,559	0,170	0,225	0,125	0,865	0,272	0,425	0,176	0,971
P_15	0,256	0,613	0,138	0,297	0,230	0,508	0,107	1,608	0,298	0,473	0,180	-0,101
P_16	0,291	0,661	0,157	-0,051	0,313	0,786	0,109	2,882	0,338	0,489	0,202	0,155
P_17	0,236	0,581	0,100	-0,379	0,225	0,580	0,070	4,078	0,279	0,373	0,160	-0,066
P_18	0,306	0,585	0,207	-0,114	0,197	0,231	0,156	3,289	0,309	0,397	0,250	0,251
P_19	0,510	0,592	0,448	0,472	0,491	0,518	0,465	1,226	0,590	0,683	0,520	1,095





FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105261