



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Análise e Seleção de Materiais para Moldes de Vidro
de Mesa***

Dário Filipe Salgueiro Pereira

Leiria, Setembro de 2014



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Análise e Seleção de Materiais para Moldes de Vidro
de Mesa***

Dário Filipe Salgueiro Pereira

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação da Doutora Maria Leopoldina Alves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação do Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2014

Aos meus pais,

“Não me venham com conclusões! A única conclusão é morrer.”

Fernando Pessoa

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

À doutora Maria Leopoldina Alves minha orientadora científica e ao doutor Joel Vasco meu co-orientador científico pelos valiosos conhecimentos, disponibilidade e dedicação que sempre disponibilizaram para me ajudar.

Ao engenheiro Henrique Miranda meu orientador na Crisal, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

À doutora Irene Ferreira pela ajuda no tratamento de dados das temperaturas dos materiais.

À equipa de afinadores de produção da Crisal pelo apoio prestado na medição de temperaturas dos moldes e pelas explicações de funcionamento das máquinas de moldação.

Ao Carlos Espinha por todo o apoio prestado relativamente aos processos de fabrico de vidro e aos colaboradores da sala de desenho da Crisal por todo o apoio prestado sempre que foi solicitado.

Ao Sr. Carlos Guedes e ao controlo de qualidade da oficina de moldes da Crisal por todo o apoio prestado relativamente ao controlo dimensional dos moldes.

Ao departamento de qualidade da Crisal pelo ajuda no controlo de defeitos e controlo dimensional das peças de vidro.

Ao engenheiro Raúl Polanco pela explicação do processo de fusão do vidro da Crisal.

Aos engenheiros Granja e Albano da ThyssenKrupp, pela colaboração e disponibilidade na realização dos ensaios de dureza dos moldes.

Ao Engenheiro Carlos dias por toda a colaboração na realização dos ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios DMA.

Ao Nuno Pires pela disponibilidade na realização do exame de endoscopia ao molde.

Ao engenheiro Pinto Soares pelas dicas e inspiração para realização deste projeto.

Aos meus pais, Álvaro Pereira e Celeste Salgueiro Pereira pelo incansável apoio dado ao longo destes anos e por me terem permitido o acesso ao ensino superior.

À Micaela por todo o apoio, incentivo e paciência por estes dois anos de estudo e para a concretização deste projeto.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O principal objetivo deste projeto visou a análise dos materiais utilizados na produção de moldes de fabricação de vidro de mesa da empresa Crisal, Cristalaria Automática SA, com o propósito de identificar propostas de melhoria no desempenho dos mesmos, conducentes a uma melhoria da qualidade das peças finais de vidro. Para tal, foi realizado um estudo das características exigidas pelo processo de fabrico prensado em moldes de abrir, escolhido pela organização (Crisal), e que foi de entendimento ser a tipologia mais indicada para a intervenção.

Neste estudo verificou-se que a execução de moldes no material AISI 314 – H525, para encomendas de enormes quantidades ou encomendas onde a máxima qualidade das peças de vidro seja imprescindível para os clientes, é uma vantagem competitiva para a empresa. O material AISI 630 – V174, poderá ser uma vantagem, apenas para encomendas de grandes quantidades, uma vez que as peças de vidro não apresentam tanta qualidade como as produzidas em moldes no material AISI 314 – H525. Para séries inferiores, a alternativa é continuar a produzir moldes com o material utilizado atualmente, AISI 431 – N350, mesmo que a opção seja adquirir esse material noutra fornecedor.

A análise incidiu em 16 materiais diferentes, sempre tendo como foco a melhoria da qualidade das peças finais de vidro e o incremento da capacidade do material dos moldes resistir ao desgaste ao longo da sua vida útil através da redução da necessidade de reparação da ferramenta moldante existente ou da execução de novas.

Após a seleção desses materiais mediante o método AHP, foram solicitadas a vários fornecedores amostras dos 4 materiais com maior pontuação obtida por esse método. Com essas amostras, realizaram-se ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios de análise mecânica dinâmica (DMA). Através desses ensaios conclui-se que o material que apresenta maior resistência à flexão e à tração é o AISI 630 – V174.

Posteriormente foram produzidos 4 moldes da haste A68 num fornecedor exterior, utilizando cada um dos diferentes materiais selecionados, com vista à realização dos ensaios industriais. Foram realizados três ensaios industriais para execução da haste, tantos quantos permitidos pelo plano anual de encomendas da organização. Durante os ensaios industriais registaram-se as temperaturas em diferentes zonas dos moldes e em diferentes posições da máquina de moldação, bem como a reação dos moldes a ciclos e cadências normais de fabrico, nomeadamente o seu comportamento mecânico, térmico e o desgaste dos moldes.

Através destes ensaios verificou-se que existe uma zona da máquina de moldação que apresenta maiores temperaturas que as outras duas e uma zona do molde que apresenta temperaturas mais elevadas em toda a fase do ciclo produtivo.

Foram também realizados ensaios de dureza Rockwell antes e após cada ensaio industrial, onde se verificou que o material que consegue manter os valores de dureza mais constantes, ao longo dos vários ensaios industriais a que foi sujeito, é o AISI 431 –VAL4. O material AISI 314 – H525 apresentou valores de dureza desprezáveis, com valores inferiores a 20 HRC.

Foi ainda analisada a qualidade final das peças de vidro através de controlo de defeitos e de pesagem tendo as peças produzidas pelo material AISI 314 – H525 apresentado a melhor qualidade final.

Adicionalmente foi analisado a cavidade de um molde de iniciar produzido no material utilizado atualmente pela Crisal, o AISI 431 – N350, onde se observaram vários defeitos que originam defeitos nas peças finais de vidro.

Palavras-chave: vidro, aço, molde, prensado, haste, cálice

Abstract

The main objective of this project aimed at analyzing the materials used in the production of molds for tableware glass manufacturing of the company Crisal, Cristalaria Automática, SA, with the purpose of identify proposals for improvement in their performance, leading to an improved quality of final glass parts. For this, a study of the characteristics required by the pressed manufacture in open molds, chosen by the organization (Crisal), that was understood as the most suitable type for step in, was made.

In this study, it was found that the execution of molds in material AISI 314 - H525, to huge bulk orders or orders where the best quality of glass parts is essential for customers, is a competitive advantage for the company. Material AISI 630 - V174 may be an advantage only for big bulk orders, since the glass parts don't present as much as quality as the glass parts produced with molds in AISI 314 - H525. For lower orders, the alternative is to continue producing molds with the material currently used, AISI 431 - N350, even if the option is to purchase this material to another supplier.

The analysis focused 16 different materials, always focusing the improvement of quality of final glass parts and the increase of the mold's material capacity to resist wear along their lifetime, by reducing the maintenance operations in the existing molds or the production of new molds.

After the selection of these materials, by the AHP method, some samples of the four materials with the best score obtained by this method were requested to several suppliers. With these samples, three point bending flexural tests and dynamic mechanical analysis (DMA) were performed. Through these tests, it was concluded that the material with more resistance to bending and tensile strength was the AISI 630 - V174.

Subsequently, four stem molds A68 were produced in an external supplier, using each of the different materials selected, for industrial testing. Three industrial tests for stem

production were made, as many as allowed by the organization's annual plan of orders. During the industrial testing, the temperatures in different areas of the molds and in different positions of the molding machine were recorded, as well as the reaction of the molds to cycles and normal cadences of production, including their mechanical and thermal behavior and the wear of the molds.

By these tests, it was found that there is a molding machine zone that has higher temperatures than the other two, and a mold zone which has higher temperatures in the entire phase of the production process.

Hardness Rockwell tests were also made, before and after each industrial test, where it was found that the material that can maintain more constant hardness values throughout the various industrial tests undergone was the AISI 431 -VAL4. The AISI 314 - H525 showed negligible hardness values, with values less than 20 HRC.

The final quality of glass parts was also analyzed through the control of defects and weighing, with the parts produced by the AISI 314 - H525 presenting the best final quality.

In addition, the cavity of a mold produced by the material currently used by Crisal, AISI 431 - N350, was analyzed, where several defects which cause defects in the final glass parts were observed.

Key-Words: glass, steel, mold, pressed, stem, stemware

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Vista aérea da Crisal..... | 7 |
| Figura 2: Solidificação de materiais cristalinos e amorfos, adaptado de [1]..... | 9 |
| Figura 3: Formação de vidro, a) vidro cristalino, b) vidro amorfo, c) quebra da rede do vidro com adição de óxidos modificadores como o NaO ₂ , adaptado de [1]..... | 10 |
| Figura 4: Função relativa dos óxidos constituintes do vidro..... | 11 |
| Figura 5: Curva de viscosidade do vidro em função da temperatura de fusão, adaptado de [7]..... | 13 |
| Figura 6: Constituição química do leito de fusão, em percentagem..... | 16 |
| Figura 7: Representação do forno 1 com respectivas temperaturas de serviço, adaptado de [9]..... | 17 |
| Figura 8: Representação da saída do forno 1 para cada um dos 5 canais (<i>feeders</i>) que dão acesso às 5 linhas de produção, com respectivas temperaturas, adaptado de [9].... | 18 |
| Figura 9: Representação de um canal (<i>feeder</i>) com as zonas de trabalho e respectivas temperaturas reais do vidro durante o processo de fabricação, adaptado de [9]..... | 18 |
| Figura 10: Máquina Olivotto de moldação de vidro para os processos soprado girado e soprado parado..... | 20 |
| Figura 11: Moldação do vidro no processo soprado girado e soprado parado..... | 23 |
| Figura 12: Máquina de moldação de vidro no processo prensado em moldes de abrir.... | 25 |
| Figura 13: Copos fabricados pelos vários subprocessos do processo de fabrico girado, a), b) e c) processo de fabrico soprado girado, d) e e) processo de fabrico soprado parado | 26 |
| Figura 14: Cálices fabricados pelos processos soprado girado e prensado em moldes de abrir..... | 27 |
| Figura 15: Peças de vidro fabricadas pelos vários subprocessos do processo de fabrico prensado, a), b) e c) processo de fabrico prensado em moldes de abrir, d) e e) processo de fabrico prensado em moldes de monobloco..... | 27 |
| Figura 16: peças de vidro à saída da arca de recozimento..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 17: Máquina de corta e roça..... | 29 |
| Figura 18: Conjuntos de moldes e acessórios utilizados no processo prensado, a) moldes de abrir, b) molde monobloco, c) punção, d) fundo e e) anel..... | 31 |
| Figura 19: Conjuntos de moldes e acessórios utilizados no processo soprado parado, a) molde de iniciar, b) meio molde de abrir, c) punção, d) fundo, e) quadrantes e f) anel..... | 32 |
| Figura 20: Amostras de aços a) AISI 314 – H525 (fabricante Bohler), b) AISI 431 – N350 (fabricante Bohler), c) AISI 630 – V174 (fabricante Valbruna) e d) AISI 431 – VAL4 (fabricante Valbruna)..... | 46 |
| Figura 21: Processamento das amostras através de corte com disco abrasivo | 47 |
| Figura 22: Provetes utilizados nos ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios DMA | 47 |
| Figura 23: Plano de ensaios realizados | 48 |
| Figura 24: Ensaio de flexão em 3 pontos | 50 |
| Figura 25: Máquina de ensaios de flexão em 3 pontos – Zwick Z100..... | 51 |
| Figura 26: Ensaio de flexão em 3 pontos nos vários materiais, a) AISI 314 – H525, b) AISI 431 - VAL4, c) AISI 630 – V174 e d) AISI 431 – N350..... | 52 |
| Figura 27: Máquina de ensaios DMA | 53 |
| Figura 28: Ensaios de medição de dureza Rockwell C nos vários materiais, a) AISI 314 – H525, b) AISI 431 – N350, c) AISI 431 – VAL4 e d) AISI 630 – V174..... | 55 |
| Figura 29: Meio molde de cada um dos quatro materiais em análise, a) aço AISI 314 – H525, b) aço AISI 431 – VAL4, c) aço AISI 630 – V174 e d) aço AISI 431 – N350 | 57 |
| Figura 30: Modelação 3D do molde da haste | 57 |
| Figura 31: Modelo 3D da peça de vidro a produzir, a) perspectiva direita, b) perspectiva inclinada | 58 |
| Figura 32: Vistas da peça de vidro (haste) produzida, a) vista 2D – <i>software autocad</i> e b) vista 3D – <i>softare solidworks</i> | 59 |
| Figura 33: Desenho 2D, da máquina Antas com as zonas onde foram medidas as temperaturas dos moldes, Zona A – após moldação, Zona B – Após consolidação e Zona C – Após libertação da peça..... | 61 |
| Figura 34: Zonas da Máquina onde foram medidas as temperaturas dos moldes, a) Zona A – após moldação, b) Zona B – após consolidação, c) Zona C – após libertação da peça e d) peça final (cálice) constituída por bojo e haste..... | 62 |
| Figura 35: Representação das zonas do molde onde foram realizadas as medições de temperatura | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Equipamento utilizado nas medições das temperaturas dos vários moldes (Pirômetro digital Handy IV)..... | 64 |
| Figura 37: Pesagem de uma peça final de vidro com a haste produzida no material AISI 314 – H525..... | 67 |
| Figura 38: Curva características dos materiais no ensaio de resistência à flexão em 3 pontos..... | 71 |
| Figura 39: Curva características dos materiais no ensaio DMA à temperatura ambiente. 72 | |
| Figura 40: Curva características dos materiais no ensaio DMA à temperatura de 380°C 72 | |
| Figura 41: Variação dos valores registados nos quatro ensaios de Dureza Rockwell C para os vários materiais | 76 |
| Figura 42: Temperaturas medidas em cada zona do molde nas diferentes zonas da máquina no primeiro ensaio industrial | 79 |
| Figura 43: Temperaturas medidas em cada zona do molde nas diferentes zonas da máquina no segundo ensaio industrial..... | 79 |
| Figura 44: Temperaturas medidas em cada zona do molde nas diferentes zonas da máquina no terceiro ensaio industrial..... | 80 |
| Figura 45: Temperaturas dos materiais medidas nas zonas X, Y e Z do molde nos vários ensaios industriais realizados, a) primeiro ensaio, b) segundo ensaio, c) terceiro ensaio e d) todos os ensaios | 81 |
| Figura 46: Temperaturas dos materiais medidas nas zonas A, B e C das máquinas nos vários ensaios industriais realizados, a) primeiro ensaio, b) segundo ensaio, c) terceiro ensaio e d) todos os ensaios..... | 82 |
| Figura 47: Temperaturas dos materiais medidas durante os ensaios industriais realizados a) primeiro ensaio, b) segundo ensaio, c) terceiro ensaio e d) todos os ensaios | 84 |
| Figura 48: Temperaturas dos materiais medidas nas zonas X, Y e Z dos moldes durante os ensaios industriais realizados a) primeiro ensaio, b) segundo ensaio, c) terceiro ensaio e d) todos os ensaios..... | 85 |
| Figura 49: Temperaturas dos materiais, medidas nas zonas A, B e C da máquina – a) primeiro ensaio industrial, b) segundo ensaio industrial, c) terceiro ensaio industrial e d) todos os ensaios industriais..... | 86 |
| Figura 50: Temperaturas individuais dos materiais nas várias zonas dos moldes e da máquina | 87 |
| Figura 51: Temperaturas individuais dos materiais nas várias zonas da máquina | 88 |
| Figura 52: Temperaturas individuais dos materiais nas várias zonas do molde..... | 89 |

| | |
|--|----|
| Figura 53: Modelação 3D da haste (simulação da peça final após os vários ensaios industriais)..... | 90 |
| Figura 54: Diferença de geometria da peça final de vidro na fase inicial e após o terceiro ensaio industrial – molde em aço AISI 314 – H525 (simulação 3D) | 90 |
| Figura 55: Comparação de defeitos do pé da haste ao nível do acamado da gota, a) e b) peças com bom acabamento, c) e d) peças com pequenos defeitos | 93 |
| Figura 56: Comparação de defeitos da haste ao nível de linhas de juntas e estalados, a) peça com bom mau acabamento, b) peça com mau acabamento..... | 93 |
| Figura 57: Representação dos quadrantes e dos sectores no molde de iniciar, (simulação 3D) | 96 |
| Figura 58: Imagens de defeitos no interior de um molde no material AISI 431 – N350, a) oxidação e fraturas, b) oxidação, c) oxidação e d) fraturas | 97 |
| Figura 59: Imagens de defeitos na cavidade de um molde no material AISI 431 – N350, a) picados, b) picados e fissuras, c) picados e fissuras e d) fissuras | 98 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Materiais analisados e pré-selecionados..... | 38 |
| Tabela 2: AHP aplicado às características dos materiais..... | 42 |
| Tabela 3: Pontuação das características dos materiais em função das prioridades definidas..... | 43 |
| Tabela 4: Pontuação final dos vários materiais analisados..... | 44 |
| Tabela 5: Composição química dos quatro materiais mais pontuados através da aplicação do AHP..... | 45 |
| Tabela 6: Designação e características dos quatro materiais selecionados..... | 45 |
| Tabela 7: Características da peça de vidro analisada..... | 59 |
| Tabela 8: Valores máximos registados dos vários materiais nos ensaios de flexão em 3 pontos..... | 70 |
| Tabela 9: Valores máximos de força aplicada no domínio elástico, dos vários materiais nos ensaios de flexão em 3 pontos..... | 70 |
| Tabela 10: Módulo de elasticidade dos materiais nos ensaios nos ensaios DMA à temperatura ambiente e a 380°C..... | 73 |
| Tabela 11: Valores médios de dureza HRC e desvio padrão antes do primeiro ensaio industrial..... | 74 |
| Tabela 12: Valores médios de dureza HRC e desvio padrão depois do primeiro ensaio industrial..... | 74 |
| Tabela 13: Valores médios de dureza Rockwell C e desvio padrão dos materiais, após o segundo ensaio industrial..... | 75 |
| Tabela 14: Valores médios de dureza Rockwell C e desvio padrão dos vários materiais, após o terceiro ensaio industrial..... | 75 |
| Tabela 15: Temperaturas, em graus Celsius, medidas em cada zona do molde e em cada zona da máquina no primeiro ensaio industrial..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Tabela 16: Temperaturas, em graus Celsius, medidas em cada zona do molde e em cada zona da máquina no segundo ensaio industrial | 78 |
| Tabela 17: Temperaturas em graus Celsius medidas em cada zona do molde e em cada zona da máquina no terceiro ensaio industrial | 78 |
| Tabela 18: Classificação da qualidade das amostras de acordo com os defeitos analisados | 92 |
| Tabela 19: Resultados dos pesos das amostras após o segundo ensaio industrial | 94 |
| Tabela 20: Resultados dos pesos das amostras após o terceiro fabrico | 94 |
| Tabela 21: Peso médio e desvio padrão de todas as peças mostras analisadas | 95 |
| Tabela 22: Defeitos registados num molde de iniciar do processo soprado girado | 96 |

Lista de Siglas

| Sigla | Significado |
|--------------|---|
| AHP | <i>Analytical Hierarquical process</i> |
| AISI | <i>American Iron and Steel Institute</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| DMA | Análise mecânica dinamica |
| EUA | Estados Unidos da América |
| IPN | Instituto Pedro Nunes |
| NP | Norma Portuguesa |
| PSL | <i>Pressured Sensitive Label</i> |
| Tf | Temperatura de fusão |
| Tg | Temperature de transição vítrea |

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

| | |
|--|-------------|
| DEDICATÓRIA | I |
| AGRADECIMENTOS | III |
| RESUMO | V |
| ABSTRACT | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| ÍNDICE DE TABELAS | XIII |
| LISTA DE SIGLAS | XV |
| ÍNDICE | XVII |
| 1.INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 ENQUADRAMENTO..... | 1 |
| 1.2 MOTIVAÇÃO..... | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO..... | 4 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 5 |
| 2.1 ENQUADRAMENTO DA CRISAL NA EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DO VIDRO..... | 5 |
| 2.2 ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS VIDROS..... | 7 |
| 2.2.1 DEFINIÇÃO DE VIDRO..... | 8 |
| 2.2.2 TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTRICA..... | 8 |
| 2.2.3 ESTRUTURAS DOS VIDROS..... | 9 |
| 2.2.3.1 VIDROS CONSTITUÍDOS POR ÓXIDOS..... | 9 |
| 2.2.3.2 ÓXIDOS MODIFICADORES DE VIDROS..... | 10 |
| 2.2.3.3 ÓXIDOS INTERMÉDIOS..... | 11 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.4 | COMPOSIÇÃO DOS VIDROS | 11 |
| 2.2.5 | VISCOSIDADE DOS VIDROS | 12 |
| 2.3 | PROCESSO DE FABRICO DE VIDRO DE MESA | 14 |
| 2.3.1 | COMPOSIÇÃO..... | 14 |
| 2.3.2 | FUSÃO | 16 |
| 2.3.3 | MOLDAÇÃO..... | 19 |
| 2.3.3.1 | PROCESSO SOPRADO GIRADO..... | 21 |
| 2.3.3.2 | PROCESSO SOPRADO PARADO..... | 22 |
| 2.3.3.3 | PROCESSO SOPRADO PRENSADO..... | 23 |
| 2.3.3.4 | PROCESSO PRENSADO EM MOLDES DE ABRIR..... | 24 |
| 2.3.3.5 | PROCESSO PRENSADO EM MOLDES DE MONOBLOCO | 25 |
| 2.3.3.6 | EXEMPLOS DE PEÇAS DE VIDRO PRODUZIDAS | 26 |
| 2.3.4 | RECOZIMENTO..... | 27 |
| 2.3.5 | CORTE E ACABAMENTOS..... | 28 |
| 2.3.6 | CONTROLO DE QUALIDADE | 29 |
| 2.3.7 | ESCOLHA E EMBALAGEM | 29 |
| 2.3.8 | PALETIZAÇÃO..... | 30 |
| 2.3.9 | DECORAÇÃO | 30 |
| 2.4 | MATERIAIS DE MOLDES PARA VIDRO..... | 31 |
| 2.4.1 | MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO DE MOLDES DA CRISAL..... | 32 |
| 2.4.1.1 | AÇOS | 33 |
| 2.4.1.2 | BRONZE..... | 35 |
| 2.4.1.3 | FERRO FUNDIDO | 35 |
| 2.4.1.4 | GRAFITE | 36 |
| 3. | METODOLOGIA | 37 |
| 3.1 | ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MATERIAIS | 37 |
| 3.1.1 | CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS MATERIAIS | 41 |
| 3.1.2 | METODOLOGIA DE SERIAÇÃO DOS MATERIAIS..... | 41 |
| 3.2 | OBTENÇÃO DE AMOSTRAS | 45 |
| 3.2.1 | PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 PLANO DE ENSAIOS | 48 |
| 3.3.1 ENSAIOS DE FLEXÃO EM 3 PONTOS | 48 |
| 3.3.2 ENSAIOS DMA | 52 |
| 3.3.3 ENSAIOS DE DUREZA..... | 53 |
| 3.4 DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DE MOLDES..... | 55 |
| 3.4.1 DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA DO MOLDE EM ESTUDO | 56 |
| 3.4.2 DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA DE VIDRO A PRODUZIR | 58 |
| 3.5 ENSAIOS EM AMBIENTE INDUSTRIAL | 60 |
| 3.6 CONTROLO DE QUALIDADE DAS PEÇAS FINAIS DE VIDRO | 65 |
| 3.6.1 ANÁLISE DE DEFEITOS | 65 |
| 3.6.2 CONTROLO DIMENSIONAL | 67 |
| 3.7 ANÁLISE DA CAVIDADE DE UM MOLDE DE INICIAR DO PROCESSO DE FABRICO SOPRADO GIRADO | 68 |
| 4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 69 |
| 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DOS MATERIAIS..... | 69 |
| 4.1.1 ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS..... | 69 |
| 4.1.2 ENSAIOS DMA | 71 |
| 4.1.3 ENSAIOS DE DUREZA..... | 74 |
| 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS INDUSTRIAIS | 77 |
| 4.2.1 MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS..... | 77 |
| 4.2.1.1 TEMPERATURAS NA ZONA DO MOLDE | 81 |
| 4.2.1.2 TEMPERATURAS NA ZONA DA MÁQUINA DE MOLDAÇÃO | 82 |
| 4.2.1.3 TEMPERATURAS DOS MATERIAIS | 84 |
| 4.2.1.4 TEMPERATURAS DOS MATERIAIS NA ZONA DO MOLDE | 85 |
| 4.2.1.5 TEMPERATURAS DOS MATERIAIS NA ZONA DA MÁQUINA DE MOLDAÇÃO | 86 |
| 4.2.1.6 TEMPERATURAS INDIVIDUAIS DOS MATERIAIS NA ZONA DA MÁQUINA E DO MOLDE..... | 87 |
| 4.2.2 ANÁLISE DA GEOMETRIA DO MOLDE APÓS OS ENSAIOS INDUSTRIAIS..... | 89 |
| 4.3 RESULTADOS DO CONTROLO DE QUALIDADE DAS PEÇAS DE VIDRO PRODUZIDAS | 91 |
| 4.3.1 ANÁLISE DE DEFEITOS | 91 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.2 ANÁLISE DE PESOS..... | 94 |
| 4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DA CAVIDADE DE UM MOLDE DE INICIAR DO PROCESSO DE FABRICO SOPRADO GIRADO | 95 |
| 5. CONCLUSÃO | 101 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 105 |
| ANEXOS..... | 109 |

0

1.Introdução

1.1 Enquadramento

No nosso planeta existem vários tipos de materiais, uns naturais e outros de fabrico industrial tendo todos eles utilidade no nosso dia-a-dia.

A maioria dos materiais de engenharia pode-se dividir em cinco classes, *materiais metálicos, materiais poliméricos, materiais cerâmicos, materiais compósitos e materiais eletrónicos*. As diferenças entre eles não existem apenas ao nível das propriedades mecânicas, elétricas e físicas, mas também ao nível da estrutura interna [1].

A constante evolução tecnológica aliada à evolução da sociedade e da economia onde nos inserimos obriga a que sejam constantemente estudados, analisados e experimentados alguns materiais que podem contribuir tanto para essa evolução como também para o desenvolvimento industrial.

A indústria do vidro é bastante antiga e tem-se desenvolvido constantemente nas últimas décadas. Devido às necessidades de consumo e às exigências que daí surgem, tais como, os prazos de entrega curtos, pequenos lotes de fabrico e diversidade de produtos obrigam a constantes evoluções no sentido de se agradar aos clientes e de existirem empresas cada vez mais competitivas. No centro desta questão está a necessidade de se fabricarem produtos diferentes e mais cativantes para os consumidores. Como tal, é necessário fabricar moldes e ferramentas moldantes também eles capazes de cumprir com esses requisitos. Essa necessidade leva a que novos materiais sejam estudados e analisados para a fabricação de moldes em detrimento dos tradicionais aços ferramenta e ferros fundidos utilizados atualmente.

1.2 Motivação

A Crisal é uma empresa que utiliza processos de fabricação de vidro de mesa muito avançados e dessa forma pretende situar-se, relativamente ao mercado e às empresas concorrentes e definir o estado em que se encontra relativamente aos moldes utilizados e respetivos materiais. Por vezes, existem alguns problemas com os materiais usados nos moldes de vidro. Esses problemas podem ter várias origens e implicações.

Atualmente a indústria de vidro de mesa, assim como outros setores industriais, tem de ultrapassar vários desafios para permanecer no mercado e produzir mais com menos recursos, mais rapidamente e com melhor qualidade. A competitividade é grande, os clientes muito exigentes e onde a melhoria contínua é crucial para garantir o sucesso de qualquer organização

Com a necessidade cada vez maior de se diversificar e de se produzirem pequenas séries de produtos, de forma a satisfazer os clientes e a manter a competitividade, é necessário que os moldes resistam às condições extremas de trabalho a que estão sujeitos e que sejam utilizados em várias produções de pequenas séries de fabrico, em vez de fazerem apenas uma ou duas produções de muitas quantidades. Estas constantes mudanças de ferramentas, independentemente das horas de trabalho a que estão sujeitas, provocam imenso desgaste nos moldes. Cada vez que a ferramenta é trocada, para se produzir um produto diferente, é necessário que o molde sofra algumas tarefas de reparação. Essas reparações podem ir do simples polimento, até ao enchimento do molde, quando durante o processo de fabrico existe demasiado desgaste e conseqüente alteração da dimensão da ferramenta. Assim, os moldes não têm uma durabilidade tão grande quanto o que se desejaria, aumentando os custos existentes com manutenção e reparação dos mesmos.

Com o presente trabalho, pretende-se obter mais informação relativamente ao desempenho dos materiais utilizados atualmente na indústria de vidro de mesa.

1.3 Objetivos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial e visou essencialmente estudar e analisar alguns materiais utilizados na fabricação de moldes para vidro com vista a propor melhorias ao nível da qualidade dos moldes e conseqüentemente das peças finais de vidro.

Os materiais dos moldes utilizados no processo de fabrico de vidro de mesa e de embalagem, normalmente são materiais metálicos, nomeadamente ligas de aço inoxidável, ferros fundidos ou bronzes. No caso concreto da fabricação de vidro de mesa, normalmente não se utilizam os bronzes uma vez que são materiais com elevado custo e utilizados normalmente em grandes séries produtivas, uma vez que o bronze é um material que resiste bastante ao desgaste. Isto, se compararmos com o custo dos outros materiais e com as quantidades fabricadas em cada série. No processo de fabrico do vidro de embalagem, costumam-se usar alguns bronzes uma vez que se trata de um processo de fabrico mais rápido e com séries de fabrico muito grandes comparativamente com o processo de fabrico de vidro de mesa.

O principal objetivo deste trabalho é identificar, seleccionar e analisar o comportamento de alguns materiais que poderão ser possíveis alternativas aos materiais utilizados atualmente nos moldes do processo de fabricação de vidro de mesa, nomeadamente no processo prensado. De destacar a sua performance não apenas quando submetidos a ciclos produtivos mas também a sua qualidade e capacidade para resistir às demais condições extremas de trabalho. Também se pretendeu analisar a qualidade final das peças de vidro obtidas a partir da utilização de moldes dos materiais seleccionados e comparar a sua qualidade com as peças de vidro produzidas com os moldes existentes atualmente. Outro objetivo é quantificar índices de desempenho dos materiais alternativos. Pretende-se adicionalmente analisar alguns defeitos que por vezes surgem nas peças de vidro e que podem ser uma consequência direta de defeitos dos moldes do processo soprado girado.

1.4 Estrutura do relatório

Este relatório está estruturado de forma a explicar em que é que consistiu o trabalho realizado, enquadrando inicialmente o leitor para a indústria de vidro, nomeadamente a indústria de vidro de mesa.

O 2º capítulo apresenta a revisão da leitura, a qual retrata o estado atual da indústria do vidro de mesa, nomeadamente o que é o vidro e qual a sua constituição, os processos de fabrico que são utilizados pela Crisal e os materiais mais utilizados nos moldes e seus acessórios.

De seguida, no capítulo 3, é apresentada a metodologia, onde se explica o processo utilizado para a selecção de materiais dos moldes e o processamento de amostras de materiais seleccionados. Existe também uma abordagem a alguns métodos de caracterização de materiais utilizados nomeadamente, aos ensaios de flexão em 3 pontos, ensaios DMA, ensaios de dureza. Depois, é retratada a geometria da peça de vidro analisada e a geometria dos moldes para moldação da mesma. São ainda descritos os ensaios industriais e o comportamento dos moldes quando submetidos a esses ensaios. Por último, também são referidos alguns tipos de defeitos existentes nas peças de vidro e o controlo de qualidade das peças de vidro produzidas com os materiais seleccionados.

O 4º capítulo, de discussão de resultados, são apresentados e analisados todos os resultados obtidos pelos métodos referidos anteriormente e a sua relação com os materiais seleccionados. Também foi feita a análise à geometria da peça de vidro obtida após várias utilizações dos moldes.

De realçar ainda que, também serão apresentados alguns defeitos existentes em algumas cavidades dos moldes de iniciar, do processo soprado girado, e a sua relação com defeitos nas peças de vidro.

No 5º capítulo, apresentam-se as conclusões do projeto bem como as vantagens e benefícios da utilização de cada um dos materiais seleccionados.

2. Revisão da literatura

2.1 Enquadramento da Crisal na evolução da indústria do vidro

Pensa-se que a primeira peça de vidro tenha sido fabricada há cerca de 5000 anos pelos antigos povos Egípcios. Entre os vidros naturais, a obsidiana foi provavelmente o mais utilizado uma vez que existia em abundância relativa. Em Portugal, a indústria do vidro iniciou-se no séc. XVIII, quando os irmãos ingleses Guilherme e João Diogo Stephens abriram em 1769 a Real Fábrica de Vidros da Marinha Grande, sendo posteriormente denominada Nacional Fábrica de Vidros e mais recentemente Fábrica-Escola Irmãos Stephens. Atualmente, em Portugal existem várias fábricas de vidro, distribuídas pela cristalaria, garrafaria, vidro medicinal e vidro plano. A maioria encontra-se na região da Marinha Grande, devido à grande abundância de areais nessa região, facilitando o acesso à matéria-prima principal do vidro, na altura em que as fábricas foram construídas [1].

Em 1944, foi constituída em Alcobaça a Atlantis com cerca de 80 funcionários, cuja atividade se centrava na produção manual de lustres. A sua produção foi mais tarde diversificada para o fabrico de artigos de mesa e decoração.

Em 1945 foi adquirida uma fábrica na Marinha Grande, para que a empresa Atlantis, em Alcobaça, aumentasse a capacidade de fusão que lhe permitisse dar resposta eficiente às solicitações dos seus clientes.

Em 1952, a família Raposo de Magalhães assumiu o controlo da empresa iniciando a exportação de artigos para os EUA e Inglaterra. Durante cerca de 20 anos, a exportação da empresa representava cerca de 50 a 75% do volume de vendas. Com a importância da

exportação e diversificação da produção, a empresa aumentou consideravelmente as suas vendas e consequentemente a capacidade produtiva. Nessa altura, com cerca de 500 funcionários, o foco era a produção única e exclusivamente de peças de fabrico manual, em vidro branco e de cor lapidado.

Em 1972, a fábrica de Alcobaça foi reconvertida para produzir apenas cristal, designado por Cristal Atlantis e em 1974 a fábrica da Marinha Grande foi reconvertida de forma a poder produzir apenas vidro automático comum para uso doméstico, comercializado sob o nome de *Onis*. Foi desta forma que nasceu a Crisal.

Em 1989, devido à pressão das entidades locais, uma vez que se tratava de uma grande unidade industrial situada no centro da cidade, a Crisal mudou as suas instalações para a zona industrial da Marinha Grande e instalou um novo forno, aumentando a sua capacidade produtiva para cerca de 50 toneladas por dia (figura 1).

Em Janeiro de 1995, a empresa foi adquirida pelo Grupo Cofina e pelo Banco BPI e em 1997, passou a designar-se apenas por Atlantis S.A., agregando as unidades produtivas de Alcobaça e da Marinha Grande.

Em 1998, foi construído mais um forno aumentando a capacidade produtiva para 100 toneladas por dia.

No final do ano 2000, deu-se a fusão entre a Atlantis e a Vista Alegre, passando a designar-se por Grupo Vista Alegre Atlantis, sendo constituído por várias empresas. A Crisal produzia o vidro automático, a Atlantis o cristal, a Neovidro o vidro manual e a Vista Alegre a porcelana.

Apesar de continuar a pertencer ao Grupo Vista Alegre Atlantis, em 27 de Abril de 2001 foi constituída a Crisal - Cristalaria Automática, S.A.

Em Janeiro de 2005, a Crisal foi adquirida pelo grupo multinacional Norte-Americano Libbey, que detém atualmente cerca de 10% do mercado mundial da produção e venda de vidro automático. Além da Crisal, também fazem parte do grupo Libbey outras empresas, nomeadamente a Libbey Inc. com fábricas em Toledo e Shreveport nos EUA, a Crisa no México, a Royal Leerdam na Holanda e a Libbey Glassware China, na China.

Atualmente, a indústria do vidro de mesa é uma indústria onde se produzem vários artigos em vidro necessários para o lar, por exemplo, copos, taças, canecas, porta velas e jarros.

A Crisal é atualmente a única fábrica do género em Portugal e tem uma capacidade para produzir cerca de 100 milhões de peças por ano.

Possui dois fornos com capacidade de fusão de 140 toneladas por dia, os quais alimentam 8 linhas de produção. Um forno alimenta 5 linhas de produção compostas por máquinas de prensado, soprado e prensado soprado. O outro forno alimenta 3 linhas de produção compostas por máquinas de prensado. Desta forma, proporciona-se uma capacidade disponível e grande variedade no processo de moldação do vidro, com vantagens para os clientes quanto à disponibilidade de artigos, design e competitividade dos mesmos [2].



Figura 1: Vista aérea da Crisal

2.2 Algumas características dos vidros

Os vidros têm propriedades e características únicas e especiais, que outros materiais de aplicação em engenharia não têm. A combinação de transparência e dureza à temperatura ambiente, aliada a uma resistência adequada para muitas aplicações e a excelente resistência à corrosão na maioria dos ambientes normais, tornam os vidros materiais indispensáveis para muitas aplicações de engenharia, como por exemplo na construção civil, nas janelas de veículos de transporte e em aplicações industriais. Na indústria elétrica, o vidro é essencial para vários tipos de lâmpadas devido às suas propriedades de isolamento e capacidade de garantir uma vedação estanque ao vácuo. Na indústria

electrónica, têm aplicação nos tubos de electrões, porque estes também requerem vedação estanque ao vácuo e no isolamento de conetores de chumbo. A elevada resistência química do vidro é muito útil para utensílios de laboratório, revestimentos resistentes à corrosão de tubos e recipientes de reação na indústria química. Se forem utilizados diferentes tipos de aditivos, é possível obter-se propriedades específicas para determinadas aplicações, como por exemplo, os vidros com óxido de boro têm uma elevada resistência ao choque térmico sendo por isso utilizados para a fabricação do pirex [1, 3].

2.2.1 Definição de vidro

O vidro é um material cerâmico feito a partir de materiais inorgânicos a elevadas temperaturas. Apesar disso, distingue-se dos outros materiais cerâmicos, pelo facto dos seus constituintes serem aquecidos até à fusão e depois arrefecidos, solidificando sem cristalização. Assim geram uma estrutura não cristalina ou amorfa. Desta forma, um vidro pode ser definido como *um produto inorgânico de fusão, arrefecido desde um estado fundido até um estado sólido* [3]. No vidro, as moléculas não estão organizadas de forma regular e repetitiva como nos cristais sólidos. As moléculas mudam de orientação de uma forma aleatória, o que lhes atribui propriedades particulares [1].

2.2.2 Temperatura de transição vítrea

A solidificação do vidro é diferente da solidificação de um sólido cristalino, como se observa na figura 2, onde estão representados o volume específico e a temperatura, para estes dois tipos de materiais. Trata-se de um líquido que na solidificação origina um sólido cristalino, como por exemplo um metal puro, e que cristaliza normalmente à temperatura de fusão (T_f), baixando significativamente o seu volume específico, como indicado na linha ABC da figura 2. Pelo contrário, um líquido que forma um vidro no arrefecimento, não cristaliza e segue um trajeto idêntico ao representado pela linha AD da figura 2. Um líquido deste tipo torna-se mais viscoso à medida que a temperatura baixa e passa de um estado plástico macio a um estado vítreo rígido e frágil, num pequeno intervalo de temperaturas, onde o declive da curva do volume específico em função da temperatura decresce. O ponto de intersecção dos dois declives desta curva define um ponto de

transformação designado temperatura de transição vítrea (T_g). Este ponto depende da estrutura, ou seja, T_g aumenta à medida que a velocidade de arrefecimento é mais elevada [1, 3].

Existem materiais que podem possuir misturas de material amorfo com material cristalino, como é o caso dos vitrocerâmicos.

A figura 2, mostra a variação do volume específico de materiais cristalinos e amorfos, onde T_g é a temperatura de transição vítrea de um material amorfo e T_f é a temperatura de fusão de um material cristalino [1, 3].

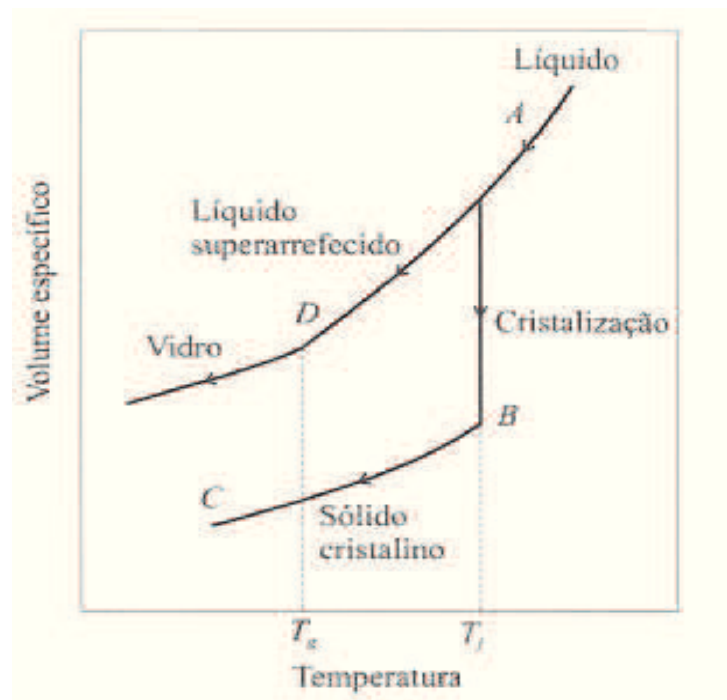


Figura 2: Solidificação de materiais cristalinos e amorfos, adaptado de [1]

2.2.3 Estruturas dos vidros

2.2.3.1 Vidros constituídos por óxidos

A maior parte dos vidros inorgânicos baseia-se no óxido de silício (SiO_2), proveniente das areias e que dá origem a uma fase vítrea. A subunidade fundamental destes vidro é o tetraedro de SiO_4^{4-} no qual um ião de Silício Si^{4+} tem ligações covalentes e iónicas com quatro iões de oxigénio. Na sílica cristalina, como por exemplo, na cristobalite, os tetraedros criados pelas ligações Si-O estão ligados vértice a vértice de um modo regular.

Na sílica vítrea simples, os tetraedros estão ligados vértice a vértice e formam uma rede desordenada ou irregular. A fabricação de um vidro de sílica requer temperaturas bastante elevadas, na ordem dos 1700°C , o que tornaria o processo de fusão demasiado dispendioso, uma vez que exigiria elevados consumos de energia, refratários especiais para os fornos, moldes resistentes a temperaturas muito elevadas e técnicas especiais de conformação. Com a introdução de óxidos é facilitada a trabalhabilidade do vidro, uma vez que estes quebram a cadeia molecular, como mostra a figura 3 [1, 3, 4].

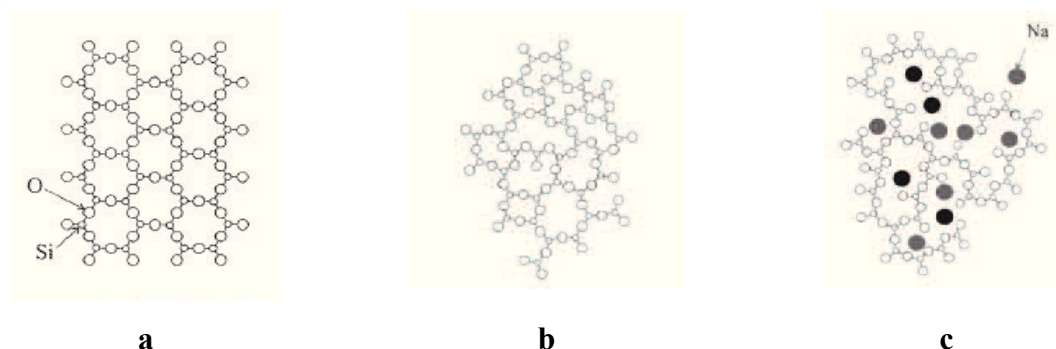


Figura 3: Formação de vidro, **a)** vidro cristalino, **b)** vidro amorfo, **c)** quebra da rede do vidro com adição de óxidos modificadores como o NaO_2 , adaptado de [1]

2.2.3.2 Óxidos modificadores de vidros

Os óxidos são adicionados ao vidro de sílica com o objetivo de se alterar algumas especificidades do vidro, conforme o interesse e aplicação de cada indústria. Os óxidos que quebram a rede do vidro são conhecidos como os modificadores de rede (figura 4). Alguns óxidos de elementos alcalinos, tais como, óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O) e ainda óxidos de elementos alcalino-terrosos, tais como óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) são adicionados ao vidro de sílica, diminuindo a sua viscosidade permitindo assim que o vidro seja mais facilmente trabalhado e enformado. Os átomos de oxigénio, provenientes destes óxidos, quebram a rede tridimensional, formando os tetraedros e ficando com um eletrão não ligado. Os iões Na^+ e K^+ provenientes do Na_2O e do K_2O , respetivamente, não entram na rede, no entanto permanecem nos interstícios da rede como iões metálicos ligados ionicamente. Ao preencherem alguns dos interstícios, estes iões vão promover a cristalização do vidro.

A substituição de óxidos alcalinos por óxido de boro na rede de sílica vítrea origina um vidro com menor expansão térmica, o vidro de borosilicato que é utilizado em equipamentos de laboratório, tubagens ou artigos para fornos [1, 3, 4].

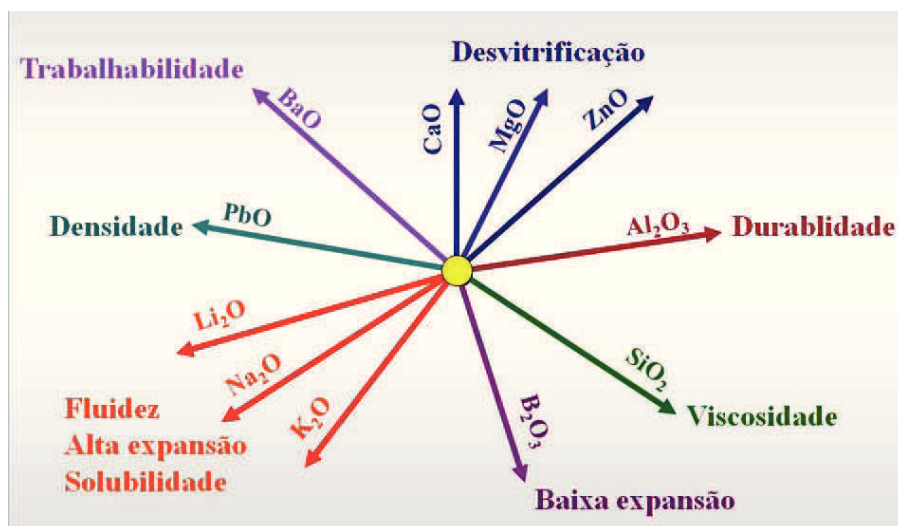


Figura 4: Função relativa dos óxidos constituintes do vidro

2.2.3.3 Óxidos intermédios

Alguns óxidos não podem formar vidro por si próprios, mas podem ligar-se a uma rede desordenada já existente. Estes óxidos são designados por óxidos intermédios. Por exemplo, o óxido de alumínio, também conhecido por alumina (Al₂O₃), pode entrar na rede de sílica como um tetraedro de AlO₄⁴⁻, substituindo alguns grupos de SiO₄⁴⁻. Os óxidos intermédios são adicionados ao vidro de sílica para se obterem propriedades específicas. Por exemplo, os vidros alumino-silicatos são capazes de resistir a temperaturas mais elevadas do que o vidro normal. O óxido de chumbo é outro óxido intermédio que também é adicionado a alguns vidros de sílica para baixar a sua temperatura de fusão e proporcionar às peças de cristal maior peso e transparência [1, 3, 4].

2.2.4 Composição dos vidros

A sílica fundida é o vidro mais importante com um único componente, tem uma transmissão espectral elevada e não está sujeita a danos provocados por radiação que

provoca o escurecimento em outros vidros. Por isso, é utilizada nas janelas dos veículos espaciais, janelas de túneis de vento e em sistemas ópticos de aparelhos espectrofotométricos. No entanto o vidro de sílica é difícil de processar e tem um custo elevado.

Os vidros são na sua maioria obtidos industrialmente por fusão e arrefecimento de materiais inorgânicos, normalmente óxidos ou substâncias que se transformam em óxidos a temperaturas relativamente elevadas.

Embora existam várias composições comerciais, os vidros mais vulgares podem dividir-se de acordo com os seus principais componentes, em três tipos principais: sódico-cálcicos, de chumbo e boro-silicatados. O vidro mais produzido é o sódico-cálcico (*soda-lime glass*) e representa 90% da produção do vidro mundial. A sua composição é principalmente de 71% a 73% de SiO_2 , 12 a 14% de Na_2O e 10 a 12% de CaO . O Na_2O e o CaO diminuem o ponto de amaciamento, passando de 1600 a 730°C facilitando assim a sua conformação. A adição de 1-4% de MgO impede a desvitrificação e 1,5% de Al_2O_3 permite aumentar a sua durabilidade. É um tipo de vidro usado para placas, contentores e para lâmpadas, onde características químicas e térmicas são irrelevantes [1, 4, 5, 6].

Na indústria vidreira, a referência aos vidros comuns é feita normalmente com base nas suas aplicações, como são os casos de vidro cristal ou para cristalaria, vidro de garrafaria branca e verde, vidro plano ou vidraça, vidro ótico e vidro farmacêutico e de laboratório.

O vidro fabricado pela Crisal é um vidro sódico-cálcico e o seu leito de fusão é constituído por várias matérias-primas: matérias-primas principais e matérias-primas secundárias [5].

- i) matérias primas principais: areia, carbonato de sódio, dolomite, calcário e feldspato.
- ii) matérias primas secundárias: sulfato de sódio, carvão, selénio, nitrato de potássio e óxido de cobalto.

2.2.5 Viscosidade dos vidros

Um vidro comporta-se como um líquido viscoso acima da sua temperatura de transição vítrea. Quando se aplica uma tensão mecânica, os grupos de silicatos escorregam uns sobre os outros permitindo uma deformação contínua do vidro. À medida que a temperatura do vidro aumenta acima da temperatura de transição vítrea, a viscosidade diminui e o

escoamento viscoso torna-se mais fácil (figura 5). A viscosidade é relacionada com a temperatura para o escoamento viscoso num vidro, através da equação 1.

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{Q/RT} \quad (1)$$

Onde η é a viscosidade do vidro, (Pa×s); η_0 , constante (Pa×s); Q , a energia molar de ativação para o escoamento viscoso; R , a constante dos gases perfeitos e T a temperatura absoluta. Podem ser definidos vários pontos de referência para comparação dos vidros, tais como:

- Ponto de trabalho: viscosidade = 10^4 Poises (10^3 Pa×s). O vidro pode ser trabalhado a esta temperatura;
- Ponto de amolecimento (*softening point*): viscosidade = 10^8 Poises (10^7 Pa×s). A esta temperatura o vidro flui a taxas elevadas devido ao seu próprio peso;
- Ponto de recozimento (*annealing point*): viscosidade = 10^{13} Poises (10^{12} Pa×s). A esta temperatura as tensões residuais podem ser aliviadas;
- Ponto de deformação (*strain point*): viscosidade = $10^{14,5}$ Poises ($10^{13,5}$ Pa×s). Abaixo desta temperatura o vidro fica rígido e o alívio de tensões ocorre apenas para uma baixa taxa de deformação. O intervalo entre o ponto de recozimento e o ponto de deformação é habitualmente considerado o intervalo de recozimento de um vidro [1, 3].

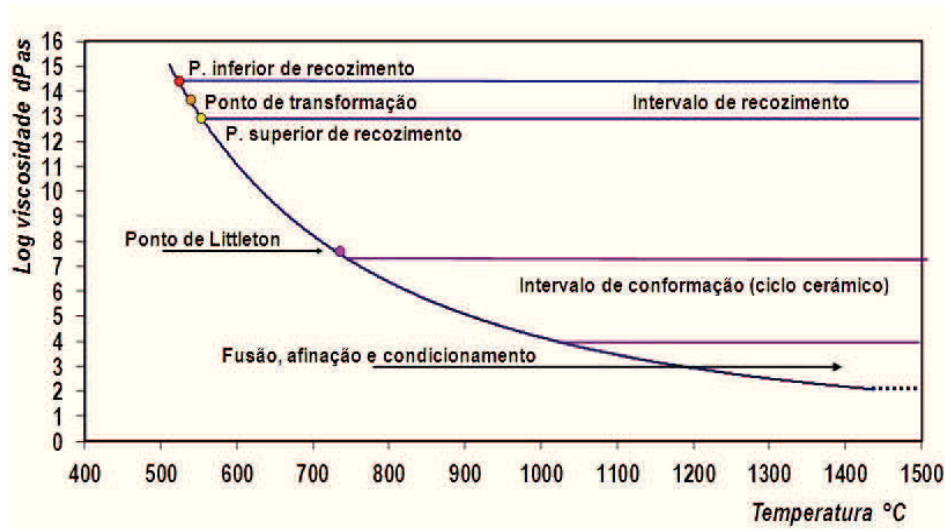


Figura 5: Curva de viscosidade do vidro em função da temperatura de fusão, adaptado de [7]

Normalmente os vidros são fundidos a uma temperatura que corresponde a uma viscosidade de aproximadamente 10^2 Poises (10 Pa·s). Durante a conformação as suas viscosidades são comparadas qualitativamente. Um vidro duro (*long glass*) tem um ponto de amolecimento elevado, enquanto que um vidro macio (*short glass*) tem um ponto de amolecimento baixo. Um *long glass* tem um grande intervalo de temperatura entre o ponto de amolecimento e o ponto de deformação. O *long glass* solidifica mais rapidamente que um *short glass* [1, 3].

2.3 Processo de fabrico de vidro de mesa

O processo de produção de vidro inicia-se primeiramente na composição, onde é feita a recepção, mistura e homogeneização das matérias-primas com a receita de vidro pretendida. De seguida durante a fusão são fundidos os vários compostos nos fornos formando um leito de vidro que vai alimentar as máquinas de prensado e de girado.

2.3.1 Composição

A composição consiste na recepção, armazenamento, dosagem e mistura das matérias-primas. Após a dosagem, as matérias-primas são colocadas num misturador até à boca de enforna dos fornos, que tem por finalidade a homogeneização da mistura a introduzir nos fornos, denominando-se de mistura vitrificável ou leito de fusão (figura 6).

Inicialmente existe a recepção das matérias-primas e a recolha de amostras para análise. A matéria-prima principal, sílica sob a forma de areia, é recepcionada diariamente, descarregada para tegões (tremonhas) e é posteriormente ensilada por meio de elevadores de alcatruzes para silos próprios. A soda, o calcário, a dolomite e o feldspato são ensiladas pneumáticamente das cisternas dos veículos pesados para os respectivos silos. A alumina, o bórax anidro, o carbonato de potássio, o carbonato de bário, o nitrato de sódio e o sulfato de sódio são recebidas em paletes e armazenadas em local próprio com posterior ensilamento manual. As restantes matérias-primas, constituintes minoritários da mistura vitrificável, são também recebidas em paletes, pré-misturadas em proporções definidas,

sendo esta mistura ensilada manualmente em silos que descarregam através de calhas vibradoras para o transportador alimentador das misturadoras.

Em paralelo, o circuito de preparação do casco é composto por um britador e tapetes transportadores para os silos diários de casco.

O funcionamento da estação de composição é iniciado com a introdução, na consola de controlo, dos dados referentes às quantidades pretendidas para cada uma das matérias-primas, isto é, pela definição da mistura vitrificável. A pesagem de cada matéria-prima é efectuada sequencialmente, em balanças, alimentadas a partir dos silos, por meio de calhas vibrantes, ou transportadores do tipo sem-fim. Após a pesagem, as matérias-primas são descarregadas através de calhas vibradas para um transportador de tela que as conduz para os misturadores, onde são misturadas por 60 s. A descarga da composição é feita para um transportador de tela que a conduz para a unidade de envio pneumático.

A mistura vitrificável é conduzida para o silo diário de composição, que está situado junto da boca de enfora do forno, através da unidade de envio pneumática. Os ciclos de envio são executados automaticamente. O tempo de cada ciclo de envio é de aproximadamente 90 s e é efectuada a uma pressão que pode variar entre 1,5 e 2,5 bar. Ao longo da tubagem de envio existem várias estações que injectam ar sob pressão para auxiliar o transporte da mistura. A operação de transporte continua até que o transportador pneumático esteja praticamente vazio. Nessa altura, é feita uma injeção de ar na tubagem, durante um tempo de 10 s, para arrastar o material que eventualmente ainda esteja retido.

O silo diário de composição, situado no final da tubagem do transportador pneumático, junto à boca de enfora do forno, compensa as eventuais anomalias de funcionamento da estação de composição automática, mantendo-se normalmente atestado. A quantidade de mistura vitrificável armazenada no silo diário de composição permite uma autonomia de operação do forno de aproximadamente 8 horas. Por outras palavras, há uma disponibilidade máxima de aproximadamente 8 horas, para resolver uma qualquer avaria no sistema de composição, sem comprometer o normal funcionamento dos fornos e das máquinas de conformação.

Por vezes também é utilizado algum casco, mas apenas algum casco produzido internamente, através de rejeições nas linhas e máquina de fabricação, caso contrário compromete-se a qualidade do vidro devido às contaminações provenientes de outros tipos de casco. O casco depois de triturado num moinho de mandíbulas é transportado por um transportador de tela até ao silo diário de casco, localizado ao lado do silo diário de

composição. A condução da mistura vitrificável desde os silos diários até ao interior dos fornos inicia-se com um misturador, tipo sem-fim, que é alimentado pelas calhas vibradas de descarga dos silos. O sem-fim alimenta uma tremonha que descarrega para uma outra calha vibrada acoplada ao enforador. Este equipamento integra uma pá que empurra o material para o interior do forno e que o distribui de acordo com um movimento de rotação com fixação em três pontos cujos tempos de funcionamento podem ser programados no respectivo autómato do sistema da enfora. A figura seguinte mostra a constituição química do vidro sódio-cálcico da Crisal [6 - 8].

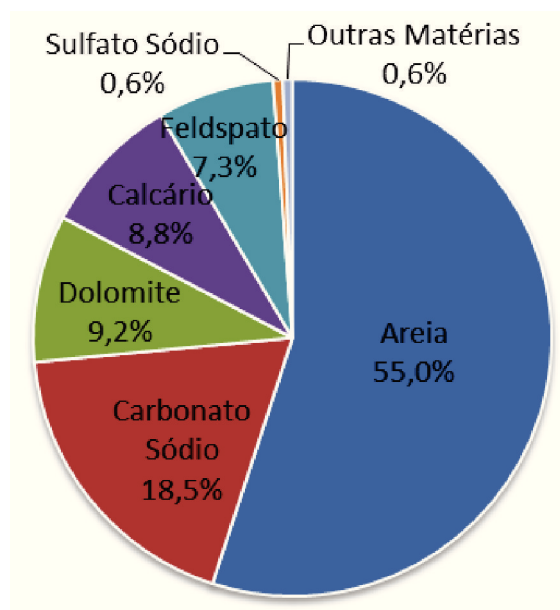


Figura 6: Constituição química do leito de fusão, em percentagem

2.3.2 Fusão

O processo de fusão ocorre nos fornos regenerativos (figura 7), que são assim designados por terem a capacidade de reaproveitar o ar quente que geram. Estes estão em funcionamento contínuo 365 dias por ano, atingindo temperaturas próximas dos 1600° e têm uma vida útil de cerca de 12 anos.

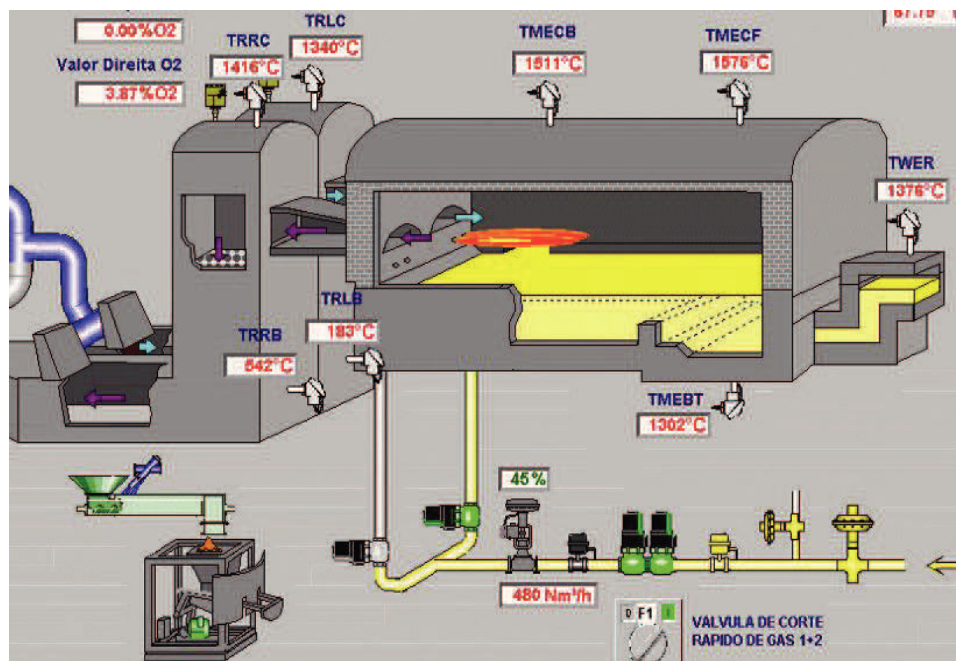


Figura 7: Representação do forno 1 com respectivas temperaturas de serviço, adaptado de [9]

Os fornos são constituídos por materiais refratários capazes de suportar temperaturas muito elevadas geradas no seu interior. Os sistemas de aquecimento utilizados são a energia elétrica e o gás natural que fundem as matérias-primas aquecendo o leito de fusão. Depois, a temperatura do vidro fundido é controlada e ajustada para que este chegue nas condições pretendidas às máquinas de moldagem. A temperatura do leito de fusão é de cerca de 1515°C, sendo que no fundo do forno a temperatura atinge os 1300°C e à saída deste 1375°C (figura 8) [6].

Todo este processo é controlado com tecnologia de ponta *Sorg* que permite uma monitorização total, em tempo real, do que se passa em qualquer parte do forno.

Na zona final da fusão, aquando da passagem do vidro fundido para as máquinas, este sai continuamente, em forma de fio, e passa através de canais (*feeders*) (figura 9) com temperaturas decrescentes de 1260°C até cerca de 1110°C para ser posteriormente cortado em porções de peso controlável chamadas gota.

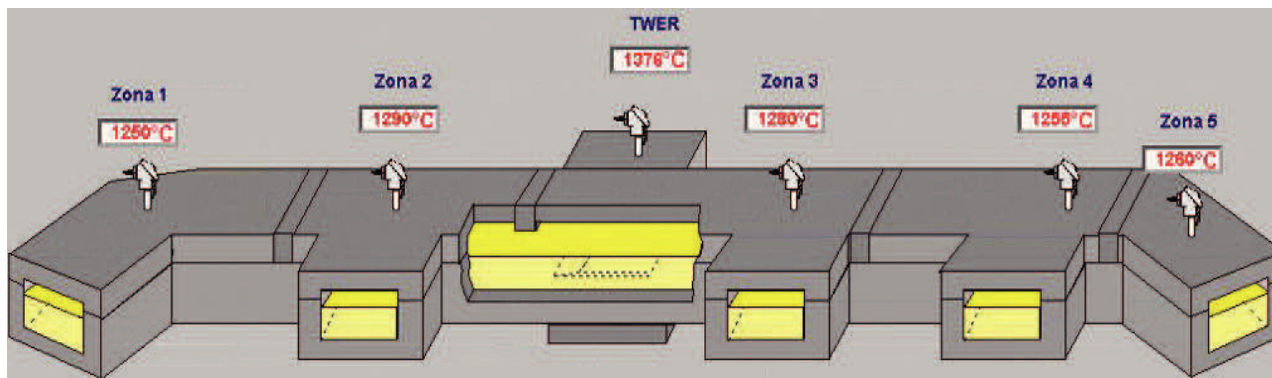


Figura 8: Representação da saída do forno 1 para cada um dos 5 canais (*feeders*) que dão acesso às 5 linhas de produção, com respectivas temperaturas, adaptado de [9]

O *feeder* tem 5 zonas de trabalho, com diferentes designações e temperaturas, conforme mostra a figura 9.

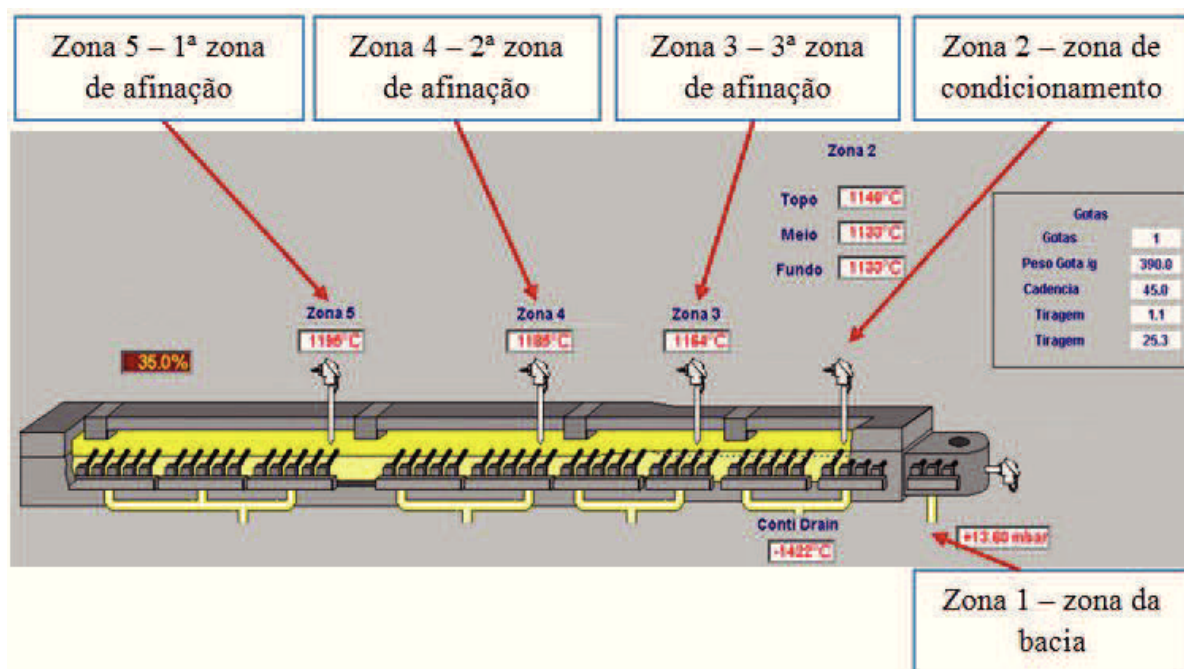


Figura 9: Representação de um canal (*feeder*) com as zonas de trabalho e respectivas temperaturas reais do vidro durante o processo de fabricação, adaptado de [9]

As zonas 5, 4 e 3 são três zonas de afinação do vidro com temperaturas variáveis de cerca 1195°C, 1185°C e 1165°C respectivamente. A zona 2 é a zona de condicionamento do vidro com temperaturas de cerca 1140° e a zona 1 é a zona da bacia onde a gota cai por gravidade para as máquinas de moldação. A gota é formada pela acção de um conjunto de tesouras que, de acordo com o peso e altura do artigo pretendido, cortam o fio de vidro.

Nesta altura a temperatura do vidro é de cerca 1110°C. Posteriormente, dá-se a queda da gota para as máquinas, terminado assim o processo de fabrico do vidro

2.3.3 Moldação

A moldação é a fase mais importante do fabrico das peças de vidro. Nesta fase, o vidro ganha a forma da peça final pretendida. Como foi referido anteriormente, a gota é formada pela ação de uma camisa, que lhe dá forma e peso, através do controlo de um mecanismo que acciona a camisa e faz com que esta prenda o vidro contra as rodelas. Posteriormente, a gota é cortada pela acção das tesouras e após o corte é conduzida através de um conjunto de calhas para cada uma das máquinas de moldação. Nesta fase a gota de vidro encontra-se a cerca de 900- 1000°C.

As máquinas de moldação são rotativas e normalmente têm doze postos de trabalho e uma ou duas secções (figura 10). Uma vez que os setores são independentes, é possibilitado o desvio da gota dos mesmos, sem que a máquina interrompa o seu funcionamento completo. Assim, agiliza-se a produção e facilita-se as intervenções de troca de ferramenta sem que o processo de produção pare completamente. Cada secção da máquina apenas recebe uma gota de vidro de cada vez. A flexibilidade das máquinas reside no facto de em poucas horas ser possível alterar a peça de vidro que se pretende produzir.

Nesta fase, a gota de vidro fundido é transformada no produto final. De acordo com o tipo de produto, existem vários processos de dar forma ao vidro. Eles podem condicionar a qualidade da distribuição de vidro e o peso na peça final.

Na moldação, o vidro arrefece com o decorrer do tempo o que provoca um aumento da viscosidade. Existem inúmeras variáveis que devem ser controladas o melhor possível. No entanto, poderão surgir variáveis que não se conseguem controlar a 100%. Por exemplo, para a mesma peça de vidro, a forma de controlar as variáveis pode variar entre os ciclos produtivos, o que faz com que em cada produção, o seu controlo nunca seja rigorosamente o mesmo. As variáveis viscosidade do vidro, refrigeração do molde, tempo de molde de iniciar, nos casos em que existe, temperatura da gota e pressão de enchimento ou de prensagem são as principais que têm de ser controladas para que o produto seja formado no instante certo e da forma mais adequada. A massa de vidro deve estar líquida o suficiente para ser conformada, caso contrário o vidro fica rígido e impede a distribuição e extensão

do mesmo pelo molde. Esta última situação provocaria problemas na distribuição da massa de vidro pela peça final.

Na fase de moldação existem vários tipos de processos que podem ser utilizados. Os processos de fabrico que a Crisal utiliza são o prensado e o soprado. Em cada um deles existem subprocessos, nomeadamente o soprado parado, o soprado girado, o prensado em moldes de abrir e o prensado em moldes monobloco. Existe ainda um subprocesso que consiste na junção do processo soprado girado com o processo prensado em moldes de abrir. Este processo é normalmente utilizado na fabricação de cálices.

A diferença entre processos, reside no tipo de tecnologia utilizada para dar a forma à peça final, bem como no tipo de peça que se pretende produzir. No final da moldação, todas as peças de vidro passam pela arca de recozimento encontrando-se à saída do molde a cerca de 715°C.



Figura 10: Máquina Olivotto de moldação de vidro para os processos soprado girado e soprado parado

2.3.3.1 Processo soprado girado

O processo de fabrico soprado girado é um processo utilizado pelas máquinas LE, Olivotto (figura 10) e Antas, situadas nas linhas produtivas 1.1, 1.2 e 1.4., respectivamente. No processo soprado girado as máquinas trabalham em contínuo sendo cada uma constituída por 12 postos de trabalho independentes e todos têm a mesma ferramenta moldante, nomeadamente os moldes de iniciar e moldes finais, punções, boquilhas e fundos.

As afinações dos moldes podem ser diferentes em cada um dos postos, de acordo com as necessidades e estado da ferramenta e da máquina em cada um desses postos.

Neste processo de fabrico, inicialmente a gota entra no molde de iniciar onde é feito o esboço ou a pré-forma da peça de vidro. Depois, o molde de iniciar sobe e o punção desce. A gota fica pendurada, desce por gravidade e o molde final agarra o esboço, abraçando-o e fecha-se. De seguida dá-se a suflação por ar comprimido com pressão regulável de acordo com as características de cada peça de vidro. A suflação é feita em dois ciclos, o primeiro e o segundo sopro. O primeiro sopro tem como função moldar a peça de vidro, encostando-o às paredes do molde enquanto o segundo sopro dá a consistência final à peça de vidro. A pressão de ar utilizada no segundo sopro é sempre igual ou superior à que foi utilizada no primeiro sopro.

Neste processo, o vidro gira dentro do molde final sempre à mesma velocidade, sendo esta regulável de acordo com as características de cada peça de vidro a ser produzida.

De referir que neste processo, a velocidade de rotação da boquilha antes do fecho do molde final, também é regulável na máquina e vai influenciar a presença de defeitos na peça de vidro. Uma maior velocidade evita o defeito de riscados nas peças de vidro, mas aumenta o desnível de gelo (base da peça). Enquanto uma velocidade menor aumenta o defeito de riscado e diminui o desnível de gelo.

No final da moldação, as peças de vidro saem da máquina e entram no tapete rolante que as vai conduzir até às arcas de recozimento onde serão retiradas as tensões acumuladas.

No processo girado todas as peças de vidro têm excesso de vidro na boquilha precisamente para poderem ser retiradas das máquinas através de pinças e poderem ser colocadas no tapete rolante.

As peças de vidro ao entrarem no tapete de arrefecimento, é-lhes permitido que a sua base (gelo do copo) arrefeça e que fiquem consolidadas para não gerar defeitos, por exemplo, desníveis e deformações exteriores.

O arrefecimento da ferramenta, nomeadamente molde de iniciar, fundo, boquilha e punção é feita a ar, excepto o molde final que é arrefecido com água e sabão para melhorar o seu desempenho. A água e o sabão vão retirar atrito entre o molde e o vidro.

O acetileno é utilizado neste processo para lubrificar o molde de iniciar.

Os moldes de iniciar são construídos em aço AISI 431 – N350 e os moldes finais são em ferro fundido. Os moldes finais levam um revestimento interior de uma pequena espessura e posteriormente são colocados numa mufla a cerca de 380°C para que esse revestimento adira ao molde e ganhe consistência.

Neste processo, as peças de vidro podem ter ângulos negativos, o que não é possível obter no processo prensado e também é possível obterem-se peças com espessuras menores do que no processo prensado.

2.3.3.2 Processo soprado parado

Este processo é muito semelhante ao processo soprado girado, com a particularidade que neste processo o vidro não gira no interior do molde (figura 11). Também existe uma diferença relativa aos materiais dos moldes uma vez que tanto os de iniciar como os finais são todos em aço AISI 431 – N350. É um processo muito utilizado para peças de vidro com gravações e com forma exterior irregular, o que não será praticamente possível fazer no processo soprado girado. Com este processo, as peças finais de vidro ficam com uma pequena linha de junta.

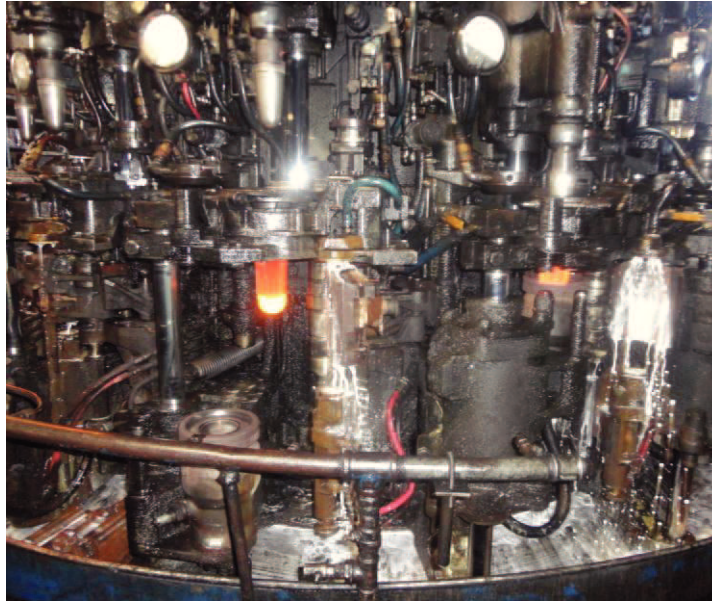


Figura 11: Moldação do vidro no processo soprado girado e soprado parado

2.3.3.3 Processo soprado prensado

Este processo junta o processo soprado girado e o prensado. Na linha produtiva 1.4, numa máquina Olivotto é feito o bojo da peça de vidro, através do processo soprado girado. Imediatamente de seguida, com a peça de vidro bastante quente, esta é transportada através de tapetes rolantes para a linha produtiva 1.3 e numa máquina Antas é feita a haste através do processo prensado em molde de abrir. A colagem da haste ao bojo é feita nesta máquina e com o bojo a temperaturas muito elevadas. A máquina tem um mecanismo que agarra o bojo no interior de um molde igual ao que foi utilizado na máquina da linha produtiva 1.4 e depois inverte a posição desse molde, ou seja vira-o 180°. Imediatamente de seguida, é centrado superiormente o molde onde vai ser moldada a haste e com este aberto a gota de vidro cai no seu interior. De forma a melhorar o processo de moldação, nesta máquina existe um sistema que permite libertar calor sobre haste para que este mantenha a temperatura ideal de moldação e para queimar as rebarbas do seu pé. Esse sistema pode influenciar a temperatura dos moldes em determinada zona destes, estando colocado na parte exterior da máquina uma vez que existem algumas limitações de acesso e de colocação desse sistema noutra zona da máquina. De referir, que esta máquina tem alguns sistemas de arrefecimento e de aquecimento dos moldes e das peças de vidro que estão no

seu interior construídos internamente. Só assim se consegue controlar as inúmeras variáveis e especificidades deste processo de fabrico.

A força de prensagem varia de acordo com as dimensões da haste que se pretende produzir. Tanto na fase de descida da prensa como na fase de subida existem sempre duas velocidades de prensagem. Por exemplo, para determinada peça de vidro, a primeira velocidade de descida da prensa pode ser 300 mm/s para 25 mm e a segunda velocidade de descida pode ser 50 mm/s para 17 mm. Ou seja, isto quer dizer que a prensa desceu 42 mm e que nos 25 mm iniciais desceu a uma velocidade muito superior à que desceu nos 17 mm finais. Na fase de subida da prensa, esta sobe de forma inversa. Na primeira velocidade, sobe mais devagar, por exemplo a 300 mm/s para 10 mm e na segunda velocidade sobe mais rápido, por exemplo a 1000 mm/s para 35 mm.

As características dos processos são as mesmas do processo soprado girado, explicado anteriormente, e do processo prensado em moldes de abrir, explicado em seguida.

2.3.3.4 Processo prensado em moldes de abrir

O processo de fabrico prensado em moldes de abrir é utilizado nas linhas de produção 2.1, 2.4 e 2.5, em prensas com tecnologia Americana e Italiana, mas que foram montadas e reformuladas pela Crisal de acordo com as suas necessidades. Neste processo, a gota, após a sua queda por gravidade, é conduzida por calhas até ao interior do molde entrando apenas uma de cada vez em cada um dos moldes. De salientar que nesta fase, os moldes já estão na máquina em pleno funcionamento. As máquinas de prensagem normalmente têm 12 postos, podendo esse número variar em função do diâmetro da peça de vidro a moldar (figura 12). Funcionam por indexagem, ou seja, roda um posto de cada vez e sucessivamente. Depois é feita a prensagem através de um punção que está centrado por um anel para garantir a homogeneidade da espessura do vidro. A velocidade, tempo e força de prensagens são controladas e reguláveis de acordo com as características de cada peça de vidro. Após a prensagem dá-se o processo de arrefecimento ainda em máquina com ar comprimido nos 3 postos seguintes à prensagem e com o molde totalmente fechado. Posteriormente é utilizado ar ventilado para que não exista um reaquecimento do vidro conseguindo-se manter desta forma a consolidação da peça. O ar ventilado arrefece a peça de vidro e o ar comprimido arrefece o molde. Seguidamente dá-se a abertura do molde e

faz-se a extração da peça através de um mecanismo de vácuo ou de pinças, dependendo do tipo de peça. Nesta altura as peças de vidro têm cerca de 700°C. A extração é feita para o tapete de queimo, no qual se conseguem tirar algumas irregularidades nas peças de vidro, nomeadamente juntas e rebarbas cortantes, como são os exemplos do bordo e do aro, dando-lhes melhor acabamento. As peças de vidro são queimadas e ficam com as arestas boleadas de forma a não ficarem cortantes. Numa das zonas do tapete de queimo também é dado brilho às peças, uma vez que estas saem da máquina de moldação um pouco baças e o queimo dá-lhes cristalinidade através da chama. De seguida as peças, que já se encontram a cerca de 500°C vão para a arca de recozimento para retirar as tensões no vidro e obter-se a peça final consolidada.

Neste processo, as peças de vidro ficam com costuras ou linhas de junta.

Na moldação em máquina, os moldes são suportados e encaixados em contramoldes. Os contra moldes são normalmente fabricados em aço de construção, enquanto os moldes os punções e os fundos são no material AISI 431 – N350.

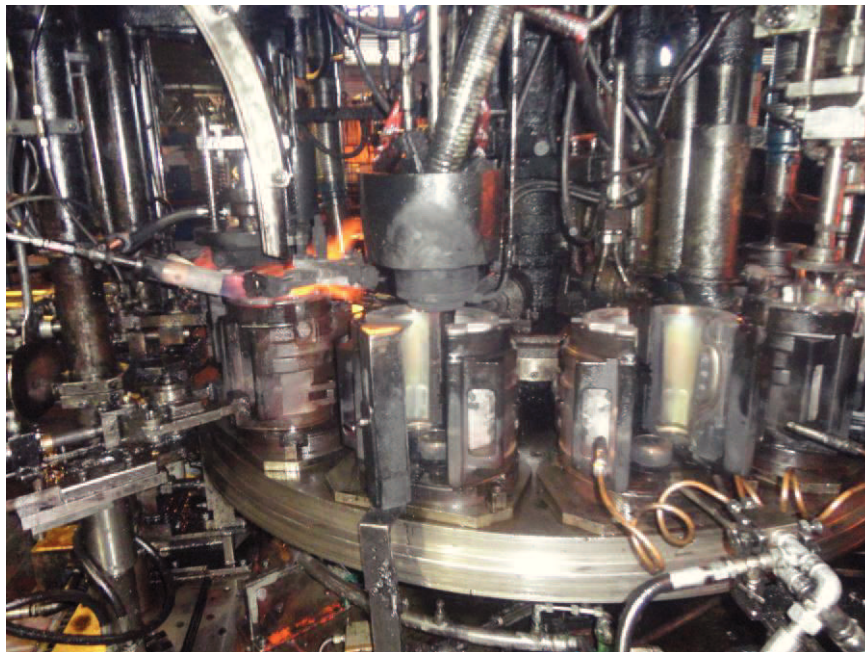


Figura 12: Máquina de moldação de vidro no processo prensado em moldes de abrir

2.3.3.5 Processo prensado em moldes de monobloco

Este processo é utilizado nas mesmas linhas produtivas que o processo prensado em moldes de abrir. A diferença que existe entre os processos é que neste caso os moldes são

constituídos apenas por uma peça. Desta forma, os moldes não abrem e a extracção da peça é feita através de pinças ou vácuo pela parte superior do molde. O vácuo por vezes pode deformar o interior da peça de vidro.

2.3.3.6 Exemplos de peças de vidro produzidas

Nos vários processos de fabrico explicados anteriormente, não se conseguem produzir de forma indiferente qualquer tipo de peça de vidro em cada um dos processos. Em cada um deles existem especificidades que limitam a fabricação de peças de vidro, seja pela espessura máxima admitida, pela dimensão da peça, ou pelo facto de esta ter gravações, pegas ou hastes.

Nas figuras 13, 14 e 15 podem-se observar alguns exemplos de peças de vidro fabricados nos vários processos.



Figura 13: Copos fabricados pelos vários subprocessos do processo de fabrico girado, **a)**, **b)** e **c)** processo de fabrico soprado girado, **d)** e **e)** processo de fabrico soprado parado



Figura 14: Cálices fabricados pelos processos soprado girado e prensado em moldes de abrir



Figura 15: Peças de vidro fabricadas pelos vários subprocessos do processo de fabrico prensado, a), b) e c) processo de fabrico prensado em moldes de abrir, d) e e) processo de fabrico prensado em moldes de monobloco

2.3.4 Recozimento

Posteriormente à moldação, as peças de vidro são direccionadas para uma arca de recozimento onde se aliviam as tensões internas resultantes do arrefecimento (estabilização molecular) das peças que as fragiliza após a saída da moldação. À entrada da arca de recozimento, as peças de vidro têm uma temperatura de cerca 500°C. O processo de recozimento consiste num aquecimento a cerca de 550°C e arrefecimento gradual e controlado até aos 515°C, permitindo a homogeneização da estrutura do vidro. O aquecimento e arrefecimento gradual equilibram as tensões internas que tornam as peças

de vidro frágeis e fáceis quebrar ao choque. A espessura e o volume das peças de vidro condiciona a forma como este tratamento é efetuado. Na arca de recozimento é utilizado gás natural e energia eléctrica (figura 16).



Figura 16: peças de vidro à saída da arca de recozimento

2.3.5 Corte e acabamentos

Após o recozimento, ocorre o corte e acabamento adicionais. Aqui corta-se a queixeira do copo e uniformiza-se o corte com a roça, voltando-se a aquecer o bordo do copo, através do queimo para bolear a zona que sofreu corte (bordo) e tirar a sua agressividade (figura 17).

Depois do recozimento, as peças de vidro são transportadas por tapetes rolantes para as máquinas de acabamento. De referir que apenas as peças de vidro produzidas pelos processos soprado girado, soprado parado e soprado mais prensado é que necessitam de um corte e acabamento final. Estas peças têm uma altura superior à que se pretende uma vez que com estes processos de fabrico não é possível que as peças fiquem com um acabamento superficial perfeito. Neste caso, as peças de vidro sofrem um corte, através de máquinas de corte a frio. Este processo é feito primeiro com um traço no nível de corte com um diamante, sendo depois cortado com tochas de hidrogénio e oxigénio. Após este corte as peças de vidro passam por discos para uniformizar o acabamento do bordo. Em seguida, as peças são novamente aquecidas até cerca de 700°C para que seja boleado o bordo para não ficar cortante. Só assim é possível que se utilizem estas peças de vidro sem

que a boca dos utilizadores não seja cortada. Para os casos das peças de vidro fabricadas pelos processos de prensado estas não necessitam de corte e acabamento porque o processo tem especificidades que permitem controlar as suas dimensões.

Durante o processo de acabamento é aplicado às peças de vidro um tratamento a frio que consiste num novo revestimento, para as tornar mais resistentes à ocorrência de riscos durante o manuseamento da zona fria, mais propriamente no processo de embalagem e decoração. Este tratamento perde o seu efeito após a lavagem das peças.



Figura 17: Máquina de corta e roça

2.3.6 Controlo de qualidade

O controlo de qualidade é feito através de amostragem. São retiradas algumas peças e analisada a sua estabilidade, resistência ao choque térmico, resistência ao impacto e ao risco. Também é realizado controlo dimensional e de pesagem às amostras. Além disso todas as peças de vidro são inspeccionadas e escolhidas uma a uma no processo de escolha e embalagem uma vez que atualmente ainda não se conseguiu obter um sistema automático de escolha e embalagem totalmente adaptado à indústria de vidro de mesa..

2.3.7 Escolha e embalagem

Após o acabamento das peças de vidro, todas elas são escolhidas manualmente e caso estejam conforme são embaladas. A tecnologia existente atualmente não viabiliza a

utilização de equipamento de inspeção na indústria do vidro de mesa em detrimento da inspeção feita manualmente peça a peça, ao contrário do que acontece na indústria de embalagem. Devido às características das peças de vidro e sobretudo à sua cristalinidade, o mais pequeno defeito é imediatamente notado, o que conduz à sua rejeição. Durante o processo de escolha são verificados vários defeitos, sendo os principais os pés de galo, picados, bolhas de ar, acamado da gota, planaridade, defeitos na linha de junta e no acabamento do bordo.

2.3.8 Paletização

O último processo de fabricação de peças de vidro é a paletização. Esta é uma fase delicada do processo uma vez que a configuração da palete é condicionada pelo tipo de embalagem que o cliente pretende e vai influenciar a forma como esta é armazenada, tanto no armazém de produto acabado como no meio em que depois é transportada até ao cliente. Desta forma, fatores como a altura, condicionada pelo nível das camadas na palete, as dimensões da palete e até o peso são cruciais para a satisfação total do cliente.

Trata-se de uma questão complexa uma vez que o tipo de soluções a aplicar na paletização é muito variado o que faz com que seja possível alcançar um elevado número de combinações possíveis para paletizar.

2.3.9 Decoração

Nem todas as peças de vidro fabricadas necessitam de decoração. Esta existe de acordo com as exigências e necessidades do cliente. Assim, o processo de decoração é considerado como de suporte e é efectuado numa unidade fabril de apoio independente e que se encontra dentro das instalações da Crisal situada imediatamente a seguir à zona de embalagem.

Na Crisal, as decorações utilizadas são:

- Foscagem - despolimento do vidro, perdendo transparência;
- *Pressured Sensitive Label* (PSL) - Implementação e aplicação de superfície de cor nas peças de vidro sobre pressão, garantindo aderência uniforme;
- Serigrafia - impressão de ecrãs com tintas cerâmicas;

2.4 Materiais de moldes para vidro

Relativamente aos materiais dos moldes utilizados na indústria de vidro, podem variar consoante o tipo de indústria e de artigos produzidos. Normalmente, na indústria de vidro de embalagem os moldes são feitos de bronze e de ferro fundido. Na indústria do vidro de mesa, os moldes e acessórios são geralmente de ferro fundido ou de aço inoxidável, enquanto que os porta moldes são feitos de ferro fundido.

Convém, no entanto, referir que os moldes para produção de peças de vidro da Crisal, dependentemente do processo de produção em que são feitas, podem ser de abrir ou monobloco (figura 18), de iniciar e finais (figura 19). Existe também uma série de acessórios que têm de ser utilizados para auxiliar e facilitar a moldação do vidro nos moldes. Os acessórios mais comuns são punções, anéis, quadrantes, aros, entre outros (figuras 18 e 19).

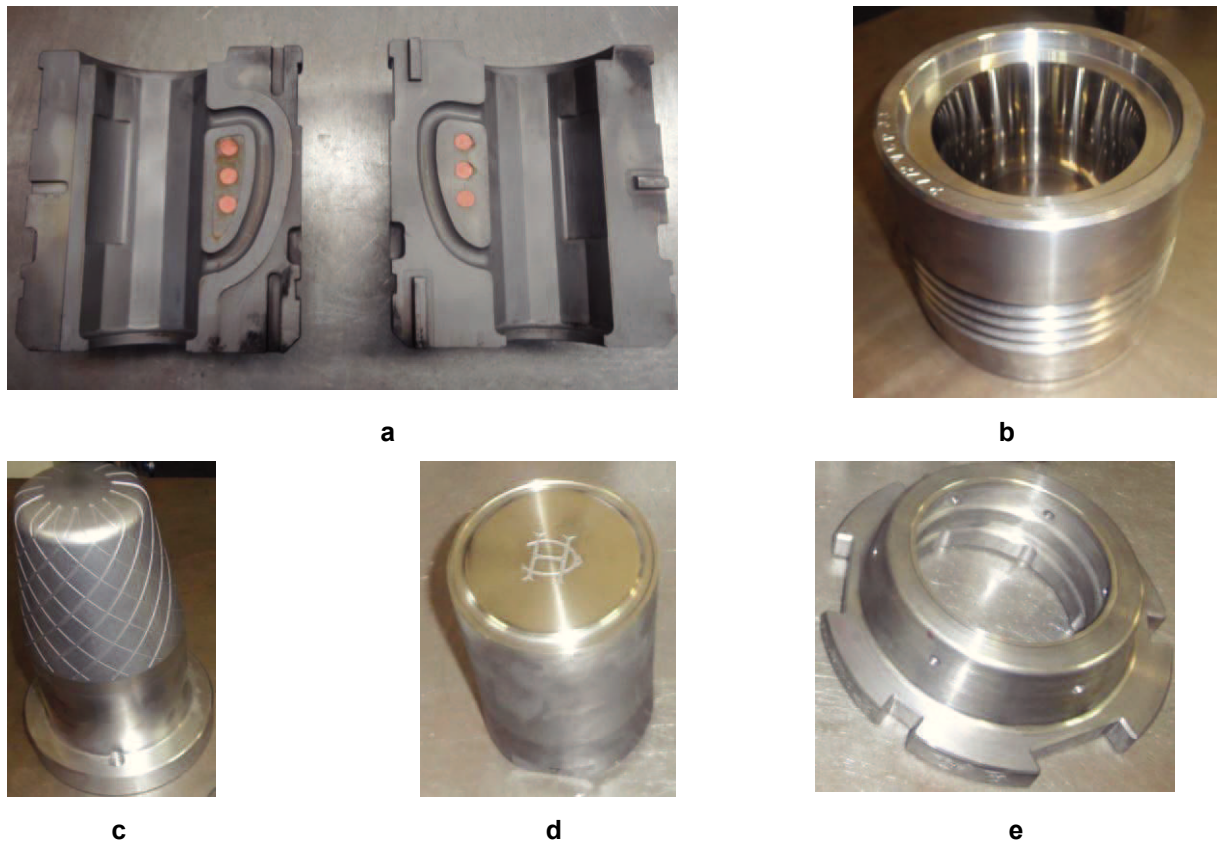


Figura 18: Conjuntos de moldes e acessórios utilizados no processo prensado, **a)** moldes de abrir, **b)** molde monobloco, **c)** punção, **d)** fundo e **e)** anel

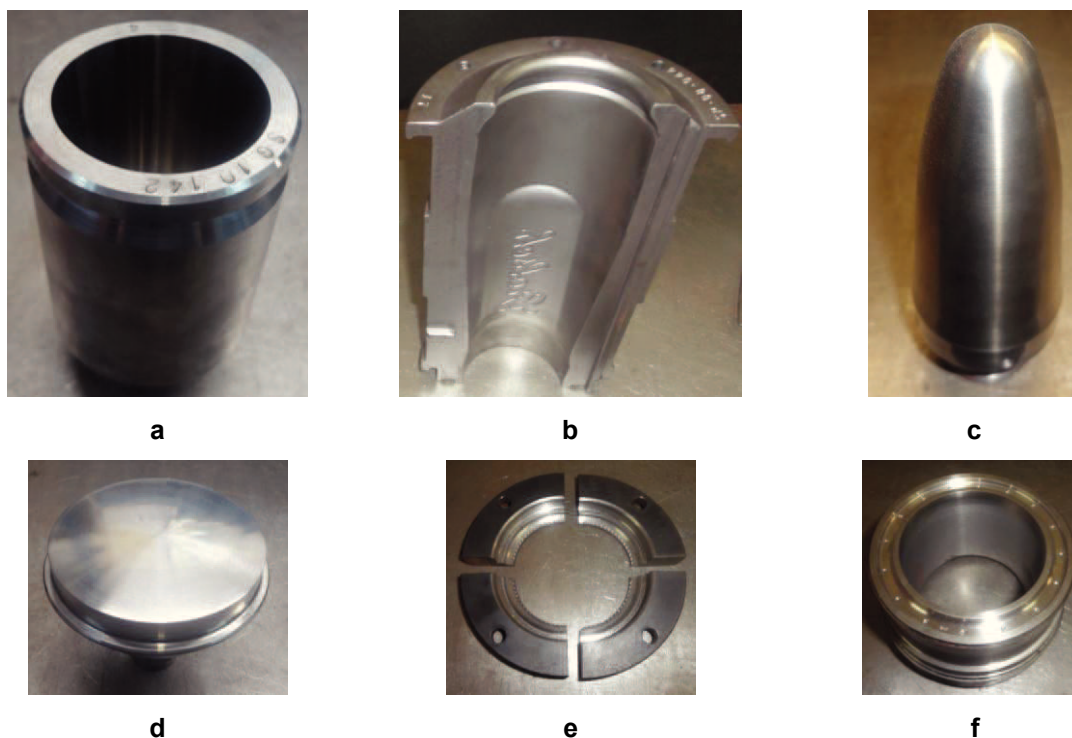


Figura 19: Conjuntos de moldes e acessórios utilizados no processo soprado parado, **a)** molde de iniciar, **b)** meio molde de abrir, **c)** punção, **d)** fundo, **e)** quadrantes e **f)** anel

2.4.1 Materiais usados na construção de moldes da Crisal

Relativamente aos materiais usados nos moldes da Crisal, estes podem variar dependendo do tipo de peça de vidro a fabricar e processo de fabrico utilizado.

Os moldes da Crisal são na sua maioria de aço inoxidável, existindo apenas alguns em ferro fundido. Também houve tentativas de utilização de bronze e grafite mas sem o sucesso pretendido devido a limitações inerente a cada um dos materiais e também aos processos de fabrico das peças de vidro. Atualmente o material mais utilizado nos moldes da Crisal é o aço inoxidável com a designação AISI 431 (*American Iron and Steel Institute*) e a designação do fabricante é o N350.

Relativamente aos acessórios utilizados pela Crisal, estes podem ser de diferentes materiais, sendo a sua maioria também em aço AISI 431 – N350.

Ao nível das boquilhas, já se introduziu o tratamento de têmpera, no entanto, e como referido anteriormente, dificultou bastante a sua reparação. Assim algumas deixaram de ser em aço temperado e passaram a ser de ferro fundido.

Os fundos de menores dimensões deixaram de ser em ferro fundido e passaram a ser feitos em aço AISI 431 – N350. Os fundos de maiores dimensões continuam a ser produzidos em ferro fundido porque esse material dissipa melhor o calor que o aço.

Os punções são fabricados em aço AISI 431 – N 350. Existe atualmente também a hipótese de serem fabricados em ferro com revestimento a *colmonoy* projetado. Ficariam mais resistentes e de reparação mais fácil, mas bastantes mais dispendiosos. Atualmente, quando é necessário repara os punções, executa-se primeiro o polimento ou o enchimento necessário, no entanto estes deixam marcas no vidro (olhos no vidro). Por essa razão, em muitas situações é vantajoso produzirem-se punções novos até porque o prazo de entrega por parte dos fornecedores é bastante reduzido e os custos finais comparativamente com os custos de reparação e com as qualidades das peças de vidro é menor.

2.4.1.1 Aços

Como referido anteriormente, atualmente a Crisal utiliza moldes em aço com a designação AISI 431 ao qual vamos acrescentar a nomenclatura do fornecedor para melhor o identificar ao longo do projeto, isto é, AISI 431 – N350.

Os aços especiais são aços de muita liga submetidos a vários tratamentos térmicos para obtenção de propriedades físicas especiais. Podem ser refratários, inoxidáveis, resistentes aos ácidos, amagnéticos, para peças de turbinas, para ímanes entre outros. O aço AISI 431 – N350 trata-se de um aço especial, refratário e inoxidável, pré-tratado com revenido, e que depois de maquinado sofre outro tratamento de revenido para aliviar as tensões geradas na maquinação. É um aço que não é temperado, embora saibamos que a têmpera aumenta a dureza e conseqüentemente a capacidade dos moldes não sofrerem muito desgaste. O aumento de dureza obtido através do tratamento de têmpera poderá dificultar, e em alguns casos impossibilitar, o processamento de peças de vidro, a reparação e o polimento dos moldes. Um aço é uma liga de ferro-carbono, com ou sem outros elementos de liga e com o teor em carbono variável entre 0,03 e 2,1%, excepto casos excepcionais [10].

Na composição química dos aços existem muitos elementos ligados ao ferro e ao carbono. Alguns deles são indesejáveis e são retirados o máximo que é possível durante a fusão e subsequente produção do aço. Entre eles encontra-se o fósforo que torna o aço quebradiço

no estado frio enquanto o enxofre o torna quebradiço no estado quente. Também o cobre tem influência nefasta na qualidade dos aços.

O aço pode conter também elementos gasosos tais como o azoto, o oxigénio e o hidrogénio.

Enquanto o oxigénio pode ser removido em grande quantidade pela desoxidação por meio de elementos tais como o carbono, o alumínio, o manganês, o cálcio e outros, o azoto e o hidrogénio não permitem a sua remoção por meios puramente químicos. Se se pretender aços com teores especialmente pequenos destes elementos, será necessário realizar um tratamento em vázio [11].

Existem dois elementos, o silício e o manganês que se encontram em todas as qualidades de aço normalmente em pequenas quantidades. Nos aços de liga os elementos de liga são especialmente adicionados para dar aos aços as propriedades pretendidas [Anexo I].

Os aços utilizados na fabricação dos moldes da Crisal devem obedecer a algumas exigências que se julgam as mais adequadas de forma a desempenharem o melhor possível a sua função. A resistência à corrosão, a maquinabilidade e a dureza são algumas características dos moldes que devem ser tidas em conta. O Anexo I ajuda a perceber quais os elementos de liga que poderão melhorar essas e outras características dos aços [10]. Assim, é essencial que os aços utilizados nos processos de fabrico da Crisal contenham vários elementos em alguma abundância e equilíbrio, como por exemplo, crómio, níquel, silício e tungsténio.

O crómio é um dos elementos mais importante nos aços. Aumenta a sua dureza e a resistência à corrosão e oxidação [12]. Como os processos de fabrico da Crisal são extremamente agressivos para os moldes, é necessário que o aço tenha bastante quantidade de crómio para aumentar a resistência à corrosão. Um aço com percentagem de crómio acima dos 18% sofre corrosão a uma taxa muito mais baixa que um aço carbono comum. A adição de mais crómio e níquel amplia a característica de anti-corrosão. No entanto, esses fatores originam que os aços tenham um custo maior. Nos aços que contêm formadores de carbonetos, tais como o titânio, o nióbio e o tântalo, o carbono não se precipita nos contornos de grão durante o arrefecimento porque antes que isso pudesse ocorrer, os carbonetos de titânio, nióbio e tântalo já se precipitaram a temperaturas mais elevadas. Esses carbonetos são inofensivos relativamente aos aspetos de corrosão porque não interferem no conteúdo de crómio do aço e não provocam acção galvânica nos contornos do grão [13].

2.4.1.2 Bronze

As ligas de bronze alumínio são bastantes utilizadas nos moldes para vidro de embalagem. Na fabricação de vidro de mesa são menos utilizadas, sendo que atualmente a Crisal não as utiliza. O bronze alumínio é uma liga metálica com elevado custo de aquisição quando comparado com aços inoxidáveis ou ferros fundidos. Além disso é um material que tem um ciclo térmico completamente diferente dos aços, uma vez que aquece e arrefece muito rapidamente e dessa forma não mantém a temperatura ideal de trabalho o que provoca defeitos de conformação na peça final [10]. Por ter um ciclo térmico com amplitude desadequada aos processos de fabrico de vidro da Crisal e como necessita de grandes cadências produtivas e de fornos com bastante capacidade de fusão, não é viável a utilização do bronze atualmente nos processos da Crisal.

2.4.1.3 Ferro fundido

O ferro fundido é um material muito utilizado nos moldes para a indústria de vidro de embalagem e de mesa. No que à Crisal diz respeito, também é bastante utilizado nos moldes, no entanto existem bastantes restrições no seu uso. Ao contrário da indústria de vidro de embalagem, onde o interior (cavidade) do molde trabalha diretamente com o vidro, no processo de vidro de mesa os moldes têm de levar uma pasta grafitada no seu interior para dar uma textura diferente à peça final e dessa forma melhorar o seu aspeto. No processo de fabrico girado, o vidro está a girar no interior do molde e dessa forma, caso o interior do molde não tenha essa pasta, o exterior da forma final da peça vai assumir os poros que o ferro fundido têm e consequentemente ficar com um aspeto desagradável. Como na indústria de vidro de embalagem o vidro está parado dentro dos moldes e como as garrafas de cerveja, não têm um acabamento exterior tão perfeito como um copo de imperial, por exemplo, o ferro fundido é muito utilizado num tipo de indústria e menos noutra.

2.4.1.4 Grafite

Os moldes em grafite permitem que as peças finais tenham um excelente acabamento, no entanto são muito caros, frágeis e desgastam-se facilmente. Além disso, no processo da Crisal seria necessário utilizar água desmineralizada, uma vez que a água que é usada nas máquinas atualmente tem bastante sabão para que os moldes dêem ao vidro melhor acabamento. Uma vantagem da utilização de moldes em grafite, é que o vidro não fica com defeitos de riscado. No entanto, existe outra grande desvantagem que é a maquinação da grafite, devido às suas características e propriedades, condicionando bastante a fabricação de moldes neste tipo de material.

3. Metodologia

3.1 Análise comparativa entre materiais

De entre os vários materiais associadas à produção de moldes para vidro de mesa foi feita a análise tendo em vista a sua possível utilização com o mínimo de desempenho necessário.

A Tabela 1 apresenta os materiais selecionados para análise segundo a designação da *American Iron and Steel Institute (AISI)*, seguindo-se a designação de cada um dos fabricantes. A razão pela qual foi escolhida esta forma para identificar os vários materiais é porque a Crisal pertence ao grupo empresarial dos EUA Libbey e porque a designação do fornecedor facilita a identificação de cada um dos materiais.

Apesar de alguns materiais terem a mesma designação AISI, a sua composição química e as suas características mecânicas podem ser diferentes, dependendo do fabricante.

De referir que alguns destes materiais foram sugeridos pelo fornecedor ThyssenKrupp, (casos do aço AISI 630 [14] e do aço AISI (referência não disponível) – 1.2999). Outros aços foram sugeridos pelo fabricante Bohler (casos dos AISI 630, AISI 431 e AISI 314) [15]. Quanto aos aços AISI 446 e 630 também são referenciados por alguns autores [11, 16]. De salientar que tantos os materiais referidos anteriormente, como outros ainda, foram igualmente sugeridos e aprovados pelo departamento técnico e de projeto da Crisal, depois de estabelecidos contactos com fornecedores e de esclarecidas algumas questões relacionadas com os materiais [17 – 21].

Além das características dos materiais, existem fatores importantes para a sua utilização. Um dos fatores igualmente estudado e muito importante é o custo de cada um dos materiais. O custo poderá ser determinante na escolha do material uma vez que poderá encarecer a peça final de vidro e tornar inviável a sua comercialização. Relativamente aos outros critérios ainda que não seja possível obter dados concretos para todos eles, é

razoável estabelecer qualitativamente uma ponderação que possibilite tirar conclusões quanto à sua importância.

Tabela 1: Materiais analisados e pré-selecionados

| |
|--|
| Aço Böhler AISI 431 - N350 |
| Aço Böhler AISI 630 - N700 |
| Aço Böhler AISI 314 - H525 |
| Aço F. Ramada AISI 630 - 630 |
| Aço F. Ramada AISI 446 - 446 |
| Aço Valbruna AISI 630 - V174 |
| Aço Valbruna AISI 431 - VAL4 |
| Aço Thyssen AISI 630 - 17-4PH |
| Aço Intoco AISI 630 - 17-4PH |
| Aço Special Steel AISI 630 - 17-4PH |
| Aço Schmolz+Bickenbach - 1.2999 * |
| Aço Prazi AISI 420 - 1.2085 |
| Aço Bollinghaus AISI 630 - 17-4PH |
| Bronze * |
| Ferro Fundido GGG40 |
| Grafite IC 12 |
| * - Informação Norma AISI não disponível |

De forma a melhor se compreenderem as características analisadas na seleção do material mais adequado, é necessário estabelecer a forma como esses critérios foram definidos, tendo em conta as características de cada um dos materiais.

- A. Custo do material: O custo do material é um critério de análise muito importante na escolha do material mais adequado ao fabrico de moldes da Crisal. Permite não só quantificar o custo por quilograma de cada um dos materiais, mas também o custo para ter esse material acessível. Os custos atribuídos aos materiais são custos finais amavelmente fornecidos pelos fornecedores.
- B. Dureza: A dureza é um critério que poderá permitir analisar a resistência do material à deformação plástica, ou seja, a capacidade de este trabalhar nas

condições normais do processo sem sofrer deformação plástica e conseqüentemente sem comprometer o seu desempenho durante a sua utilização. Também seria extremamente importante analisar a dureza do material nas temperaturas de serviço, no entanto, não foi possível devido à inacessibilidade de equipamento.

- C. Coeficiente de expansão térmica: É um critério que poderá indicar a capacidade do material expandir termicamente e dessa forma, quando sujeito a temperaturas de trabalho não corresponder às solicitações pretendidas e provocar diminuição da dimensão inicial pretendida para a peça final de vidro [Anexo II]. O coeficiente de expansão térmica depende da temperatura a que o material está sujeito e em condições normais, aumenta à medida que a temperatura também aumenta [22].
- D. Condutibilidade térmica: Com este critério pretende-se analisar a capacidade do material conduzir e manter a temperatura a que está sujeito durante a sua utilização no processo. Será muito importante que este consiga manter as condições de temperatura necessárias durante a sua utilização, para que não surjam defeitos nas peças finais de vidro. Ao contrário do coeficiente de expansão térmica, a condutibilidade térmica diminui à medida que a temperatura aumenta [22].
- E. Módulo de elasticidade: O módulo de elasticidade permite estabelecer uma comparação relativamente ao alongamento do material à temperatura ambiente. Assim poderá ser possível estabelecer uma ligação relativamente à capacidade de um material não se deformar plasticamente e não ocorrer fratura. Desta forma será possível analisar a capacidade do material não provocar defeitos na peça de vidro durante os períodos em que está sujeito às variadas condições de trabalho na máquina de moldação [Anexo III].
- F. Resistência à corrosão: A resistência à corrosão é um critério muito importante e que define a capacidade de determinado material estar mais ou menos apto para resistir à constante corrosão. O processo de produção prensado é um processo que coloca à prova a capacidade dos materiais resistirem à corrosão uma vez que existem temperaturas elevadas, choques térmicos de grande amplitude, taxas de arrefecimento a ar, água e a ar e água elevadas e bastante necessidade de utilização de produtos químicos e óleos lubrificantes durante o processo produtivo.
- G. Resistência ao choque: Este critério pretende mostrar a robustez que poderá existir nos moldes produzidos nos diferentes tipos de materiais. Mesmo que estes não sofram uma elevada força de prensagem, poderão estar sujeitos a reparações e às

dificuldades inerentes ao processo de produção de vidro como são os casos da sua constante mudança na máquina, transporte da oficina de moldes para a máquina e vice-versa e à queda de ferramentas.

- H. Resistência à abrasão: Permite analisar a resistência do material em resistir ao desgaste constante provocado pelo vidro. Este critério foi analisado tendo em conta a experiência de trabalho e alguns ensaios realizados com alguns materiais no passado.
- I. Acabamento superficial do molde: O acabamento superficial da peça final de vidro tem influência direta do acabamento superficial do molde, pelo que poderão existir determinados materiais com índice de rugosidade elevada o que vai influenciar o acabamento final das peças de vidro. No entanto, também terá de existir alguma rugosidade no material para que se reflita no acabamento do molde e consequentemente permita à gota de vidro fazer o seu escoamento normal dentre deste.
- J. Maquinabilidade/ Reparabilidade: Este critério pretende estabelecer a facilidade que poderá existir em executar moldes em determinado tipo de material. Poderão existir materiais que não são viáveis de maquinar uma vez que isso implicaria a aquisição de moldes nesses materiais em mercados completamente inacessíveis (custos muito elevados). Também poderão existir materiais cuja maquinaria para produção de moldes poderá obrigar a grandes alterações do método de trabalho e a aquisições de novas ferramentas por parte dos fornecedores habituais.
- K. Acessibilidade do material: Por acessibilidade entenda-se a disponibilidade de determinado material ao nível comercial. Todos os materiais referidos existem, no entanto alguns estão mais disponíveis no mercado do que outros. Alguns deles, apenas ficam disponíveis mediante produção propositada, pelo que será necessário encomendar em média ou grande escala.
- L. Tipo de Perfil: O tipo de perfil é um fator eliminatório na escolha do material, uma vez que, normalmente existem dois tipos de perfis de possível fornecimento. Perfil quadrado e perfil circular. O perfil quadrado não se adequa aos interesses da Crisal nem dos seus fornecedores uma vez que o desperdício de material para fabricação de moldes e acessórios seria bastante elevado o que aumenta bastante o custo dos moldes. O perfil obrigatoriamente necessário é o perfil circular.

Também seria interessante analisar o módulo de elasticidade à temperatura de serviço do molde, ou seja, cerca de 600°C – 700°C. Desta forma poderia ser possível analisar o comportamento do material ao nível do domínio elástico e plástico. Mas não foi possível fazer essa análise por falta de informação relativamente aos módulos de elasticidade dos materiais nessas temperaturas e por falta de meios para se fazer essa análise. Convém realçar que as temperaturas de trabalhos são elevadas, cerca de 600°C – 700°C e que o material estará sujeito a um constante choque térmico, uma vez que a temperatura da gota quando entra no molde é de cerca de 1000°C.

3.1.1 Critérios de seleção dos materiais

Os critérios que presidem a esta selecção são incomparavelmente o custo do material e a resistência á corrosão. Contudo, existem outros critérios, também com elevada importância, tais como o acabamento superficial e a maquinabilidade/ reparabilidade. No entanto, em produções de grande escala, pode-se estabelecer um compromisso entre o custo do material e custo final de cada peça de vidro e dessa forma-se tornar-se viável a utilização de um material com melhor performance mesmo sendo mais caro, uma vez que a diluição do custo do material em cada peça de vidro poderá ser viável.

A aplicação de materiais no processo pode ser condicionada à utilização destes ao longo do tempo, ou seja, aplicar um tipo de material no fabrico dos moldes dependentemente da utilização destes ao longo do tempo e da dimensão de cada encomenda de peças de vidro.

O método de selecção ou seriação dos materiais deverá então compreender não apenas a relevância das características de cada material na aplicação em causa mas também a importância relativa entre características do mesmo material.

3.1.2 Metodologia de seriação dos materiais

A técnica de seriação *Analytical Hierarchy Process* (AHP) é uma ferramenta importante para uma selecção deste tipo uma vez que permite definir prioridades dentro de uma organização ou processo, hierarquizando-as relativamente umas às outras. [23]. A técnica pode ser aqui introduzida se for considerado que é necessário definir quais os parâmetros

mais relevantes para determinada aplicação, relacionando-os e estabelecendo a importância relativa entre cada par de parâmetros, classificada de 1 (Pouco Importante) a 3 (Muito Importante), tal como se descreve na tabela 2 [24].

Tabela 2: AHP aplicado às características dos materiais

| | Custo | Dureza | Coefficiente de Expansão Térmica 20 - 400 °C | Condutibilidade Térmica 20 °C | Módulo Elasticidade 20 °C | Resistência à Corrosão | Resistência ao Choque | Resistência à Abrasão | Acabamento Superficial do Molde | Maquinabilidade/Reparabilidade | Acessibilidade | Tipo de Perfil | |
|--|-------|--------|--|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | |
| | | A 1 | A 2 | A 2 | A 2 | F 1 | A 1 | A 2 | I 2 | J 1 | k 1 | L 1 | A |
| | | | B 1 | B 1 | B 1 | F 1 | B 1 | H 1 | I 1 | J 1 | K 2 | L 2 | B |
| | | | | D 1 | E 1 | F 1 | C 1 | H 1 | I 2 | J 1 | K 2 | L 2 | C |
| | | | | | D 1 | E 1 | D 1 | D 1 | I 1 | J 2 | K 2 | L 2 | D |
| | | | | | | F 1 | E 1 | E 1 | I 2 | J 1 | K 2 | L 2 | E |
| | | | | | | | F 1 | F 2 | I 1 | F 2 | F 1 | L 2 | F |
| | | | | | | | | H 1 | I 1 | G 1 | G 1 | L 3 | G |
| | | | | | | | | | I 1 | H 1 | H 1 | L 2 | H |
| | | | | | | | | | | I 1 | I 2 | I 1 | I |
| | | | | | | | | | | | J 1 | L 1 | J |
| | | | | | | | | | | | | K 1 | K |
| | | | | | | | | | | | | | L |

| | |
|---|-------------------|
| 1 | Pouco Importante |
| 2 | Média Importância |
| 3 | Muito Importante |

A hierarquização de características é realizada comparando cada par de características e estabelecendo dentro desse par, qual a característica mais relevante para a aplicação. A ponderação da importância relativa entre duas características auxilia o estabelecimento da hierarquia pretendida. Somando as quantidades de características prioritárias definidas na tabela 2 e afetando-as da respectiva ponderação, obtém-se um quadro de classificação da importância destas características para a aplicação em estudo (tabela 3).

Tabela 3: Pontuação das características dos materiais em função das prioridades definidas

| Características em análise | | Soma | Ponderação |
|-----------------------------------|--|-------------|-------------------|
| L | Tipo de Perfil | 17 | 19,10 |
| I | Acabamento Superficial do Molde | 15 | 16,85 |
| K | Acessibilidade | 10 | 11,24 |
| F | Resistência à Corrosão | 10 | 11,24 |
| A | Custo | 10 | 11,24 |
| J | Maquinabilidade | 7 | 7,87 |
| H | Resistência à Abrasão | 5 | 5,62 |
| B | Dureza | 4 | 4,49 |
| D | Condutibilidade Térmica 20 °C | 4 | 4,49 |
| E | Módulo Elasticidade 20 °C | 4 | 4,49 |
| G | Resistência ao Choque | 2 | 2,25 |
| C | Coefficiente de Expansão Térmica 20 - 400 °C | 1 | 1,12 |
| | | 89 | 100 |

A maior ou menor aptidão dos materiais nas diversas características deve também ser ponderada de acordo com as respectivas capacidades [25]. Desta forma, foi escolhida a seguinte escala:

- 0 (zero): O processo não possui desempenho relevante
- 1 (um): O processo possui um fraco desempenho
- 3 (três): O processo possui um desempenho médio
- 9 (nove): O processo possui um excelente desempenho

Os valores atribuídos por esta escala serão multiplicados pelos factores de ponderação associados à aplicação atribuídas aos materiais e será a soma destes produtos que determinará a classificação do material mais indicado para a fabricação de moldes (tabela 4).

Tabela 4: Pontuação final dos vários materiais analisados

| | Custo | Dureza | Coefficiente de Expansão Térmica 20 - 400 °C | Condutibilidade Térmica 20 °C | Módulo Elasticidade 20 °C | Resistência à Corrosão | Resistência ao Choque | Resistência à Abrasão | Acabamento Superficial do Molde | Maquinabilidade/Reparabilidade | Acessibilidade | Tipo de Perfil | Pontuação |
|-------------------------------------|-------|--------|--|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|------------|
| Ponderação | 11,24 | 4,49 | 1,12 | 4,49 | 4,49 | 11,24 | 2,25 | 5,62 | 16,85 | 7,87 | 11,24 | 19,10 | |
| Aço Böehler AISI 431 - N350 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | 570 |
| Aço Böehler AISI 630 - N700 | 0 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 3 | 3 | 1 | 9 | 460 |
| Aço Böehler AISI 314 - H525 | 0 | 3 | 9 | 9 | 3 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 3 | 9 | 475 |
| Aço F. Ramada AISI 630 - 630 | 0 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 9 | 3 | 9 | 0 | 9 | 469 |
| Aço F. Ramada AISI 446 - 446 | 1 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 1 | 9 | 457 |
| Aço Valbruna AISI 630 - V174 | 3 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 3 | 9 | 3 | 9 | 563 |
| Aço Valbruna AISI 431 - VAL4 | 9 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 522 |
| Aço Thyssen AISI 630 - 17-4PH | 0 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 3 | 3 | 0 | 9 | 448 |
| Aço Intoco AISI 630 - 17-4PH | 3 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 3 | 3 | 3 | 0 | 344 |
| Aço Special Steel AISI 630 - 17-4PH | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 3 | 3 | 0 | 9 | 462 |
| Aço Schmolz+Bickenbach - 1.2999 * | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 9 | 9 | 3 | 9 | 1 | 9 | 433 |
| Aço Prazi AISI 420 - 1.2085 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 256 |
| Aço Bollinghaus AISI 630 - 17-4PH | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 234 |
| Bronze * | 0 | 3 | 1 | 1 | 3 | 9 | 9 | 9 | 3 | 1 | 3 | 9 | 469 |
| Ferro Fundido GGG40 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 444 |
| Grafite IC 12 | 0 | 3 | 3 | 9 | 1 | 3 | 0 | 3 | 9 | 0 | 3 | 9 | 470 |

* - Informação Norma AISI não disponível

Os materiais com maior pontuação foram quatro aços inoxidáveis (tabela 5). Esses aços apesar de terem várias designações de acordo com as respectivas normas a que podem estar sujeitos, serão ao longo deste projeto designados pela norma AISI e pelo nome utilizado pelo fabricante. Na tabela 6 estão descritas algumas características desses materiais e a sua designação segundo algumas normas.

Tabela 5: Composição química dos quatro materiais mais pontuados através da aplicação do AHP

| Materiais Selecionados | Composição Química | | | | | | | | | | | Pontuação |
|------------------------------|--------------------|------------|----------|----------|--------|-------|--------|--------|---------------|--------------|-------|-----------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | | | | | | | |
| Aço Böhler AISI 314 - H525 | 0,08% | 1,70% | 1,20% | 24,80% | 19,80% | | | | | | | 475 |
| Aço Valbruna AISI 431 - VAL4 | 0,15 - 0,2% | 15,5 - 17% | 1,5 - 2% | 16,50% | 1,70% | | | | | | | 522 |
| Aço Valbruna AISI 630 - V174 | 0,07% | 0,70% | 0,60% | 15 - 17% | 3 - 5% | 1,50% | 3 - 5% | 0,04% | 0,015 - 0,03% | 0,15 - 0,45% | | 563 |
| Aço Böhler AISI 431 - N350 | 0,15% | 0,27% | 0,13% | 16,91% | 1,62% | 0,40% | 0,16% | 0,021% | 0,013% | 0,074% | 0,07% | 570 |

Tabela 6: Designação e características dos quatro materiais selecionados

| Materiais Selecionados | Designação dos aços - Normas | | | | | Classificação dos aços | | Outras características | | | | |
|------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|------|----------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------|------------------|--------------------|
| | EURONORMA | AFNOR | DIN | AISI | WERK Nº. | Constituição Estrutural | Tipo de Aplicação | Dureza [HB] | Forjamento [°C] | Têmpera [°C] | Recozimento [°C] | Endurecimento [°C] |
| Aço Böhler AISI 314 - H525 | X15 CrNiSi 25 20 | Z10 CNS 25-20 | X15 CrNiSi 25 20 | 314 | 1.4841 | Austenítico | Especial - inoxidável | 250 | 1150 - 800 | 1050 - 1100 | 1050 - 1100 | Não aplicável |
| Aço Valbruna AISI 431 - VAL4 | X17 CrNi 17 2 | Z15 CN 16-02 | X20 CrNi 17 2 | 431 | 1.4057 | Martensítico | Especial - inoxidável | 290 | 950 - 1180 | 650 - 700 | 650 - 750 | 980 - 1180 |
| Aço Valbruna AISI 630 - V174 | X5 CrNiCuNb 16-4 | Z 6 CNU 17-04 | X5 CrNiCuNb 17-4-4 | 630 | 1.4547 | Endurecido por precipitação | Especial - inoxidável | 360 | 1050 - 1200 | 1000-1050 | Não aplicável | 1050 |
| Aço Böhler AISI 431 - N350 | X17 CrNi 16-2 | Z15 CN 16-02 | X20 CrNi 17 02 | 431 | 1.4057 | Martensítico | Especial - inoxidável | 295 | 1100 - 800 | 750 - 800 | 680 - 800 | 950 - 1050 |

3.2 Obtenção de amostras

Através dos resultados obtidos com a aplicação do método AHP houve a necessidade de se pedirem várias amostras aos fornecedores destes materiais com o intuito de se cortarem pequenos provetes para a realização de ensaios mecânicos. Os ensaios mecânicos necessários e possíveis de realizar, de forma a tirar algumas conclusões relativamente ao desempenho do material foram os ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios DMA. Assim, foram solicitadas amostras à empresa Bohler dos aços AISI 314 – H525 e AISI 431 – N350, e à empresa Valbruna dos aços AISI 431 – VAL4 e AISI 630 – V174 (figura 20) [Anexos IV – VII].



Figura 20: Amostras de aços **a)** AISI 314 – H525 (fabricante Bohler), **b)** AISI 431 – N350 (fabricante Bohler), **c)** AISI 630 – V174 (fabricante Valbruna) e **d)** AISI 431 – VAL4 (fabricante Valbruna)

Após a obtenção das amostras, estas foram devidamente processadas com o fim de se obterem provetes necessários e adequados para a realização dos ensaios referidos anteriormente. Importa referir que as amostras foram processadas por uma empresa especializada em corte de materiais para ensaios laboratoriais.

Além destas amostras, também foi possível obter mais algumas de materiais menos pontuados através da aplicação do método AHP. No entanto, por se tratar de materiais que apenas são produzidos em perfis quadrados não se prosseguiu com o seu processamento uma vez que o tipo de perfil é um fator eliminatório devido à sua viabilidade de aplicação.

3.2.1 Processamento de amostras

O processamento das amostras foi efectuado através do método de corte com abrasivo (figura 21), uma vez que era extremamente importante que as características mecânicas, químicas e estruturais dos provetes não fossem alteradas. Caso o processamento das amostras fosse realizado através de corte por arranque de aparas, como acontece por exemplo na fresagem, as características dos materiais sofriam pequenas alterações que podiam influenciar os resultados obtidos posteriormente nos ensaios de flexão em 3 pontos e DMA.

Com o processamento das amostras foi possível obter o número de provetes, de cada um dos materiais, necessários para a realização dos ensaios de acordo com as normas. O corte utilizado no processamento das amostras foi o corte através de um disco abrasivo de 180

mm de diâmetro, 1 mm de espessura e com tamanho do grão de $60 \mu\text{m}/\text{mm}^2$. A velocidade de rotação da máquina foi de 2840 r.p.m.

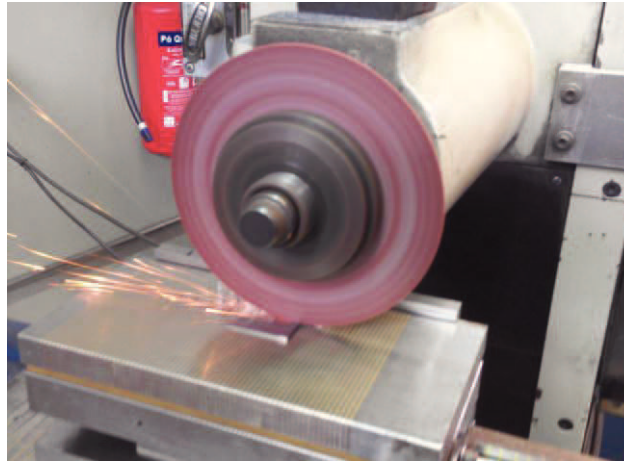


Figura 21: Processamento das amostras através de corte com disco abrasivo

Após o processamento das amostras, obtiveram-se vários provetes de cada um dos materiais e com as dimensões necessários para a realização dos ensaios pretendidos (figura 22). Assim, para a realização de ensaios de flexão em 3 pontos os provetes tinham a dimensão de 60 mm de comprimento, 10 mm de largura e 2 mm de espessura. Para os ensaios DMA os provetes tinham as dimensões de 48 mm de comprimento, 5 mm de largura e 2 mm de espessura.

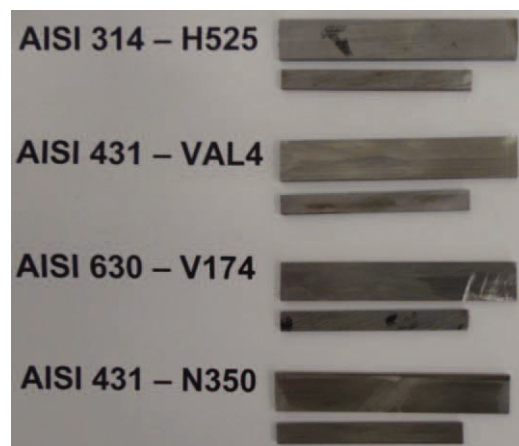


Figura 22: Provetes utilizados nos ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios DMA

3.3 Plano de ensaios

Os ensaios realizados, tanto aos provetes (amostras) dos vários materiais analisados, como aos moldes que foram posteriormente construídos e às peças de vidro obtidas após a utilização desses moldes em ensaios industriais, estão esquematizados num plano como se observa na figura 23.

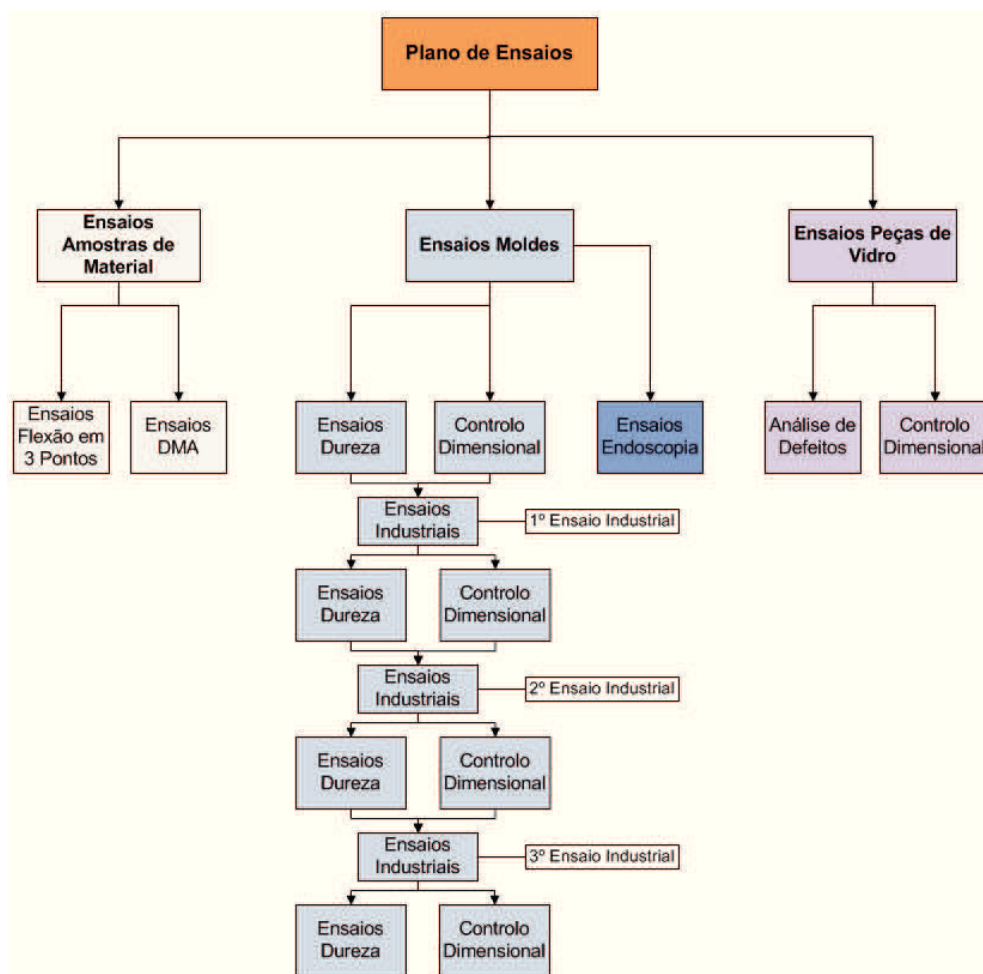


Figura 23: Plano de ensaios realizados

3.3.1 Ensaio de flexão em 3 pontos

Os primeiros ensaios a serem realizados aos provetes, após o processamento das amostras, foram os ensaios de flexão em 3 pontos.

Relativamente à avaliação da resistência à flexão em materiais metálicos, esta pode ser um fator importante na seleção de materiais para aplicações em engenharia, concretamente neste projeto. A resistência à flexão é dada pela equação 2:

$$\sigma = M.Y/I \text{ [N.mm}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

onde Y é a distância da linha neutra ao ponto mais afastado (igual a $-h/2$ em [mm]), M é o momento máximo de flexão e I , o momento de inércia da secção transversal, em relação ao seu eixo. O momento máximo de flexão é determinado através da equação 3.

$$M = F_{\text{máx}}.L/4 \quad (3)$$

Na equação 3, F é a força máxima aplicada em [N.mm] e L , a distância do provete entre os apoios em [mm]. Os provetes utilizados têm secção retangular, logo I é dado pela expressão da equação 4:

$$I = b.h^3/12 \quad (4)$$

onde b é a largura do provete em [mm] e h a sua altura, em [mm].

A equação 5 foi utilizada para o cálculo da tensão máxima de resistência à flexão ($\sigma_{\text{max flexão}}$).

$$\sigma_{\text{max flexão}} = (F.L/4).(h/2)/(b.h^3)/(12) \quad (5)$$

Isto quer dizer que a equação 5 apresenta o mesmo resultado que a equação 2.

O cálculo do módulo de elasticidade à flexão ($E_{\text{flexão}}$) pode ser efectuado através da seguinte expressão:

$$E_{\text{flexão}} = F.L^3/((48.f).(b.h^3)/12) \quad (6)$$

Onde f é o deslocamento máximo do provete durante o ensaio de flexão em três pontos [26].

Na figura 24 pode-se observar esquematicamente o carregamento de flexão em três pontos efetuado com provetes de materiais metálicos.

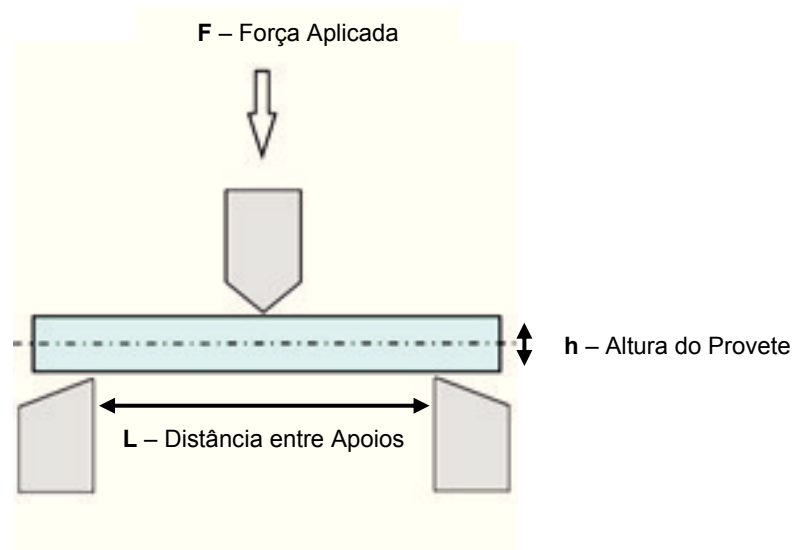


Figura 24: Ensaio de flexão em 3 pontos

Com base nos resultados de caracterização mecânica (módulo de elasticidade e resistência mecânica à flexão em três pontos), pretendeu-se avaliar a influência da força de prensagem nas propriedades mecânicas dos materiais e acima de tudo comparar os resultados do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão em três pontos com os resultados do módulo de elasticidade obtidos no ensaio DMA à temperatura ambiente.

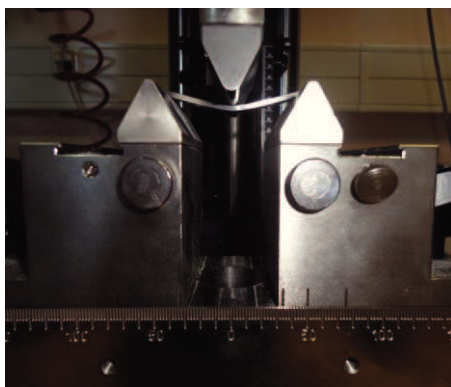
Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados numa máquina Zwick Z 100 (figura 25) à temperatura ambiente (24°C) em controlo de deslocamento com a velocidade do carregamento em todos os ensaios de 2 mm/ min e uma força de pré-carga de 5 N. A distância entre os blocos da máquina foi de 50 mm e foram registados os valores de deslocamento dos provetes em função da força aplicada.



Figura 25: Máquina de ensaios de flexão em 3 pontos – Zwick Z100

A máquina possui uma consola de controlo acoplada a um computador e permite, através de um programa específico, controlar vários parâmetros, nomeadamente a força ou carga aplicada, a velocidade e o deslocamento. Também é possível visualizar a evolução de carga e ainda tratar e armazenar os dados obtidos.

Os ensaios de flexão em 3 pontos foram realizados segundo a norma ASTM E855 – 90. De acordo com a norma, os provetes utilizados tinham as seguintes dimensões: aproximadamente 60 mm de comprimento, 10 mm de largura e 2 mm de espessura. A figura 26 mostra os ensaios realizados nos vários materiais.



a



b



c



d

Figura 26: Ensaio de flexão em 3 pontos nos vários materiais, **a)** AISI 314 – H525, **b)** AISI 431 - VAL4, **c)** AISI 630 – V174 e **d)** AISI 431 – N350

3.3.2 Ensaio DMA

A Análise Mecânica Dinâmica (DMA) é uma técnica de grande precisão para medir as propriedades viscoelásticas dos materiais. Com este ensaio mecânico pode-se obter a variação de rigidez do material. É um ensaio que consiste na aplicação de uma deformação sinusoidal a uma amostra e na medição da força resultante transmitida por essa última com a ajuda de um Analisador Mecânico Dinâmico. Um Analisador Mecânico Dinâmico é um instrumento que permite a realização de análises automatizadas aplicando uma excitação dinâmica controlada em frequência e amplitude a uma amostra, dentro das condições definidas pelo utilizador. Com este ensaio é possível estabelecer uma relação entre a estrutura molecular do material e suas propriedades mecânicas e controlar das características principais dos provetes [27].

Foram realizados dois tipos de ensaios de DMA: ensaios com provetes à temperatura ambiente e ensaios com provetes à temperatura de 380°C. A razão pela qual se quis fazer ensaios com temperaturas elevadas foi para tentar simular e obter resultados mais precisos dos materiais, uma vez que os moldes quando estão em ciclos produtivos de peças de vidro são submetidos a temperatura muito elevadas, normalmente acima dos 600°C.

Os ensaios DMA foram realizados numa máquina Triton, Tritec 2000, como se pode observar na figura 27.

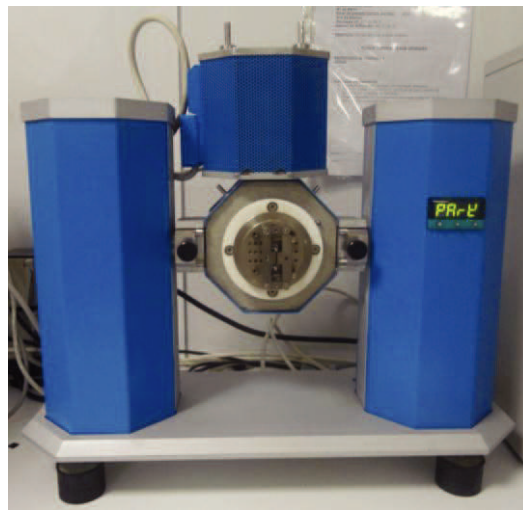


Figura 27: Máquina de ensaios DMA

De referir que na máquina onde foram realizados os ensaios DMA apenas é possível realizar ensaios a temperaturas máximas de 380°C.

As dimensões dos provetes utilizados nos ensaios foram as seguintes: 48 mm de comprimento, 5 mm de largura e 2 mm de espessura.

3.3.3 Ensaios de dureza

Uma característica que é importante controlar no desempenho dos moldes para a produção de vidro de mesa é a dureza dos seus materiais. Assim foram também realizados ensaios de dureza aos materiais dos moldes. Foram realizados ensaios de dureza de todos os moldes antes do primeiro ensaio industrial e após cada um dos três ensaios industriais efectuados.

No entanto, convém referir que apenas foi possível medir a dureza com os moldes à temperatura ambiente.

Em termos teóricos, o ideal seria medir a dureza com os moldes à temperatura de serviço, mas para isso seria necessário que a Crisal ou os laboratórios ao dispor possuíssem equipamento devidamente especializado e com capacidade para medir durezas de materiais com temperaturas na ordem dos 500°C. Os vários laboratórios contactados em Portugal não têm capacidade para fazer esse tipo de medições a essas temperaturas. Por outro lado, também seria importante medir a dureza dos moldes exactamente na zona de trabalho, na cavidade do molde, ou seja, onde entra a gota e conseqüentemente se forma a peça de vidro, no entanto também não foi possível, uma vez que essa situação iria danificar os moldes ao deixar marcas na zona moldante. Como a cavidade dos moldes não está sujeita a nenhum tratamento que lhe confira melhoria das propriedades mecânicas e conseqüentemente dureza, esta será a mesma tanto na cavidade como nas zonas exteriores mais próximas.

Assim, recorreu-se à empresa Thyssen, na Marinha Grande, para se medir a dureza dos materiais dos moldes à temperatura ambiente e segundo a norma NP 141. De referir que esta norma exige a medição da dureza da mesma forma que a norma ASTM E18.

A medição da dureza foi efetuada numa máquina Wolpert com leitura digital, como mostra a figura 28. A escala utilizada foi a Rockwell-C (HRC), sendo esta norma recomendada para ensaios em materiais duros, com dureza superior a 20 Rockwell, como por exemplo aços temperados. Foi utilizado um penetrador cónico de diamante, com 120° de abertura e ponta arredondada com 0,2 mm de raio solicitado por uma carga inicial de 10 kg e por uma carga adicional de 140 kg. Logo, a carga final foi de 150 kg [28, 29].

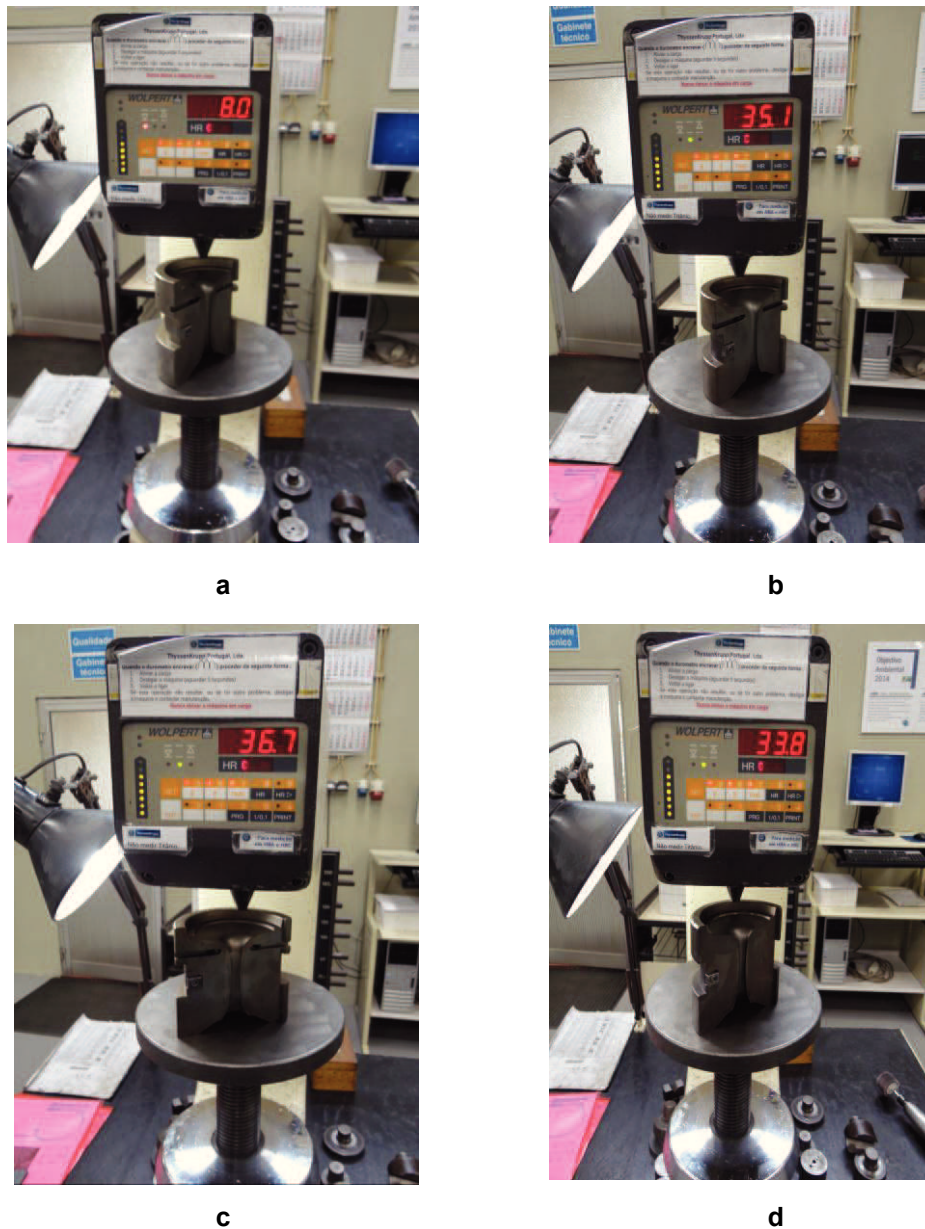


Figura 28: Ensaios de medição de dureza Rockwell C nos vários materiais, a) AISI 314 – H525, b) AISI 431 – N350, c) AISI 431 – VAL4 e d) AISI 630 – V174

3.4 Desenvolvimento e produção de moldes

Após os resultados obtidos no método AHP, bem como nos ensaios de flexão em três pontos e nos ensaios DMA, foi possível produzir moldes nos vários materiais, nomeadamente em aço AISI 314 – H525, AISI 630 – V174 e AISI 431 – VAL4. Estes moldes foram produzidos com vista à realização de ensaios industriais juntamente com os

moldes já existentes no material utilizado habitualmente pela Crisal, o aço AISI 431 – N350.

3.4.1 Descrição da geometria do molde em estudo

O molde em estudo foi o molde da haste A68. Atualmente este molde é fabricado em aço especial inoxidável refratário segundo a norma AISI 431, do fabricante Bohler. Este molde tem algumas características particulares. Como se verifica nas figuras 29 e 30, é um molde com uma cavidade com grande variação de espessura uma vez que se trata de uma haste de um cálice. A parte inferior da haste, o pé do cálice, tem o diâmetro bastante superior à zona média da haste pelo que é necessário que a força e velocidade de prensagem, bem como a temperatura do vidro estejam perfeitas para que este circule muito bem dentro do molde e preencha todos os espaços da cavidade. Trata-se de um molde que não tem canais de arrefecimento internos e tem um peso aproximado de 12 Kg [Anexo VIII].

Na execução do molde também foi tido em conta o processo de fabrico no qual seria utilizado, bem como a máquina de moldação e todas as características do processo nessa máquina, nomeadamente a lubrificação e arrefecimento do molde. O molde foi utilizado no processo de fabrico prensado, na linha 1.3 numa máquina Antas.

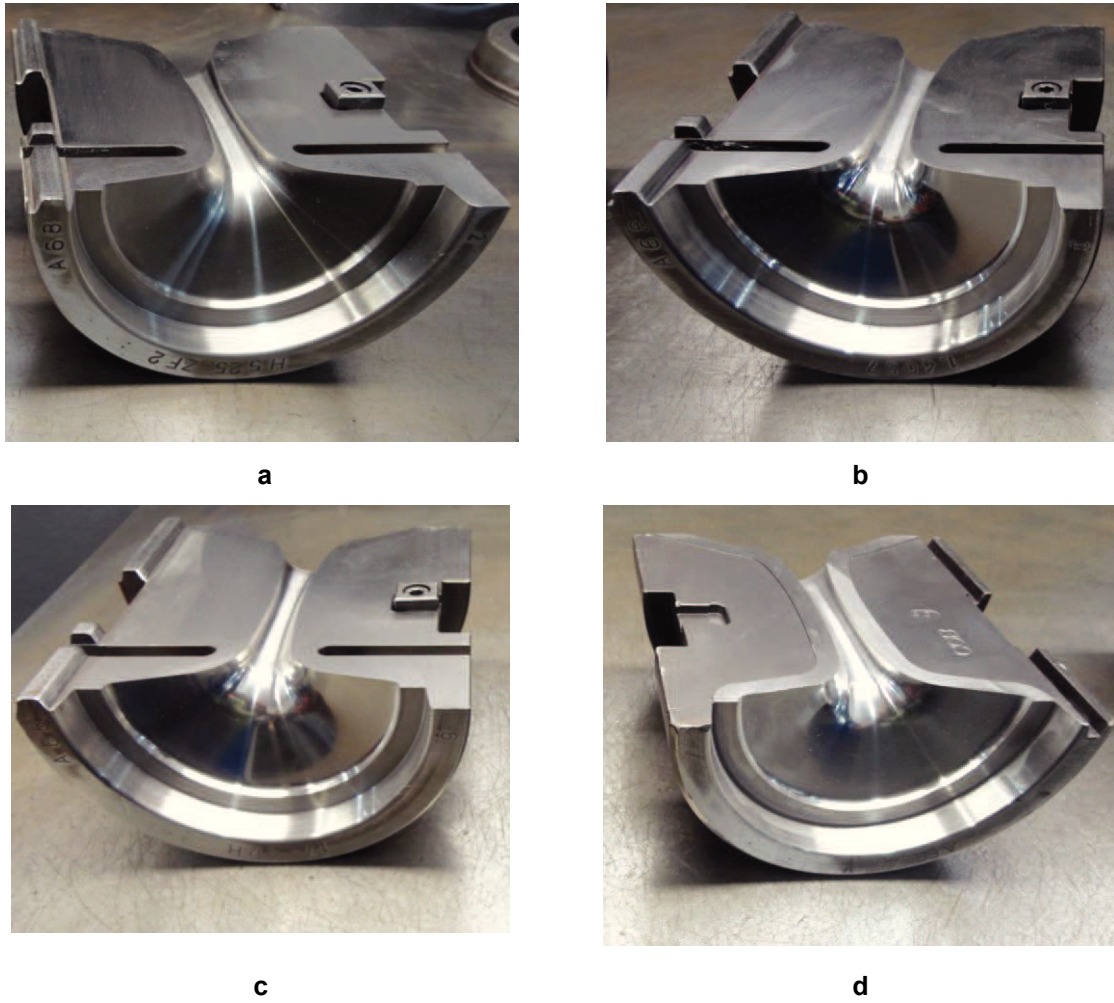


Figura 29: Meio molde de cada um dos quatro materiais em análise, **a)** aço AISI 314 – H525, **b)** aço AISI 431 – VAL4, **c)** aço AISI 630 – V174 e **d)** aço AISI 431 – N350

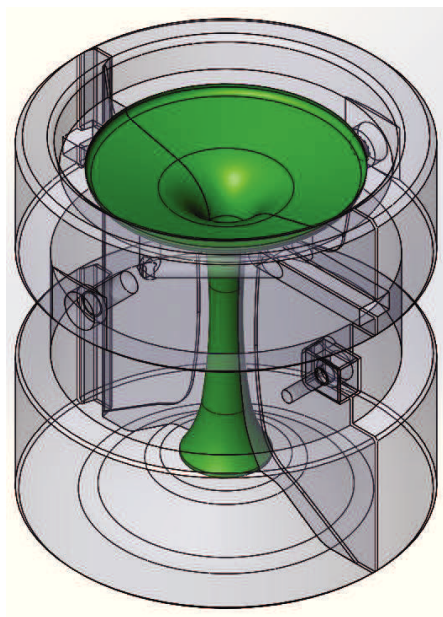


Figura 30: Modelação 3D do molde da haste

3.4.2 Descrição da geometria da peça de vidro a produzir

A peça de vidro produzida pelos moldes analisados neste projeto foi uma haste de um copo. Esta haste tem a designação interna da empresa de A68 e é a haste do copo Copacabana. A haste foi produzida ao mesmo tempo do copo, sendo a linha de produção da haste subsequente e posterior à do copo. Inicialmente, na linha de produção 1.4 foi produzido o bojo (parte de cima do copo) através do processo de fabrico soprado girado. Depois, o bojo foi retirado da máquina de moldação da linha 1.4 e transportado através de tapetes rolantes para a máquina de moldação da linha 1.3 onde foram produzidas as hastes e realizados os ensaios industriais.

De salientar que a haste é unida ao bojo com temperatura bastantes elevadas, como se de uma colagem se tratasse (figura 31).

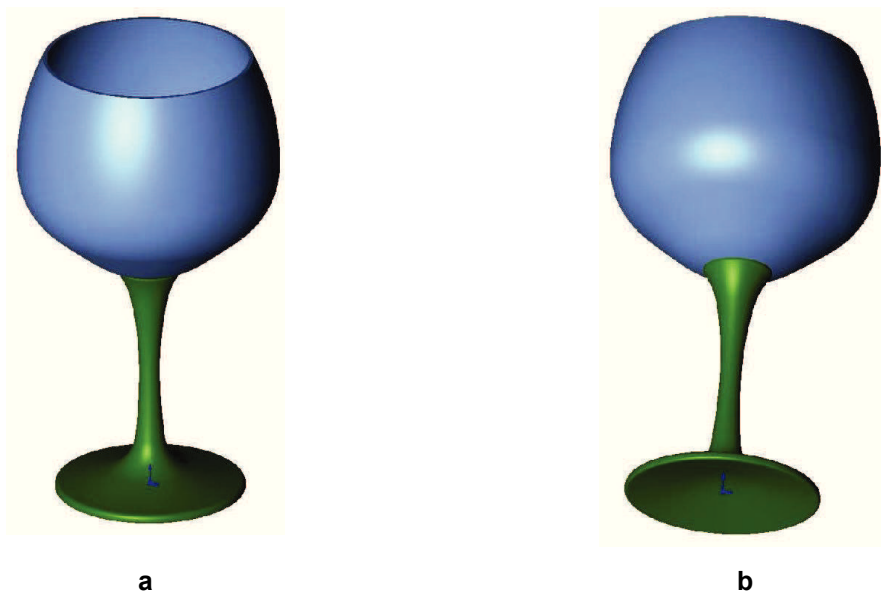


Figura 31: Modelo 3D da peça de vidro a produzir, **a)** perspetiva direita, **b)** perspetiva inclinada

Apesar da peça de vidro ser constituída por duas partes, o bojo e a haste, apenas foram produzidos moldes para produzir a haste. Na figura 32 podem-se observar as vistas 2D e 3D da haste.

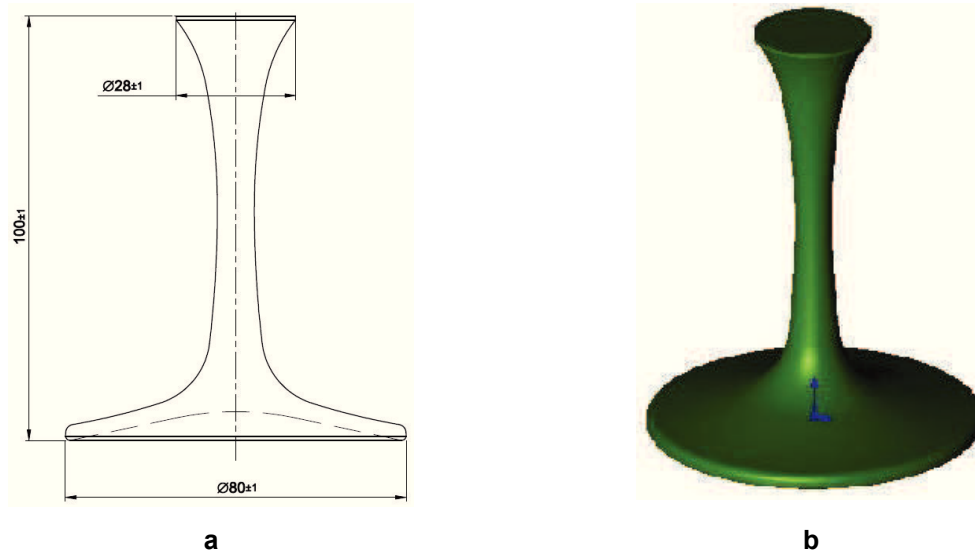


Figura 32: Vistas da peça de vidro (haste) produzida, **a)** vista 2D – *software autocad* e **b)** vista 3D – *software solidworks*

Esta haste, no seu processo de produção é unida ao bojo através do processo prensado em moldes de abrir. Assim, forma-se a peça final de vidro, designada por cálice. Na tabela 7 estão representadas algumas das características de produção do bojo e da haste do cálice Copacabana [Anexo IX].

Tabela 7: Características da peça de vidro analisada

| Linhas de produção | Nome do artigo | Peso | Tolerância | Cadência |
|--------------------|-------------------|-------|------------|-------------|
| 1.4 | Bojo 3658VCL60 | 295 g | 10 g | 47 uni/ min |
| 1.3 | Haste A68 | 81 | 10 g | 47 uni/ min |

3.5 Ensaio em ambiente industrial

Os ensaios realizados em ambiente industrial permitiram analisar o comportamento dos moldes construídos em vários materiais e determinar as diferenças entre os seus desempenhos. O objetivo dos ensaios industriais era saber como os moldes reagiam ao fabrico normal das peças de vidro, bem como a sua resistência à temperatura, à corrosão, ao desgaste provocado nas paredes interiores através do contato com o vidro e à necessidade de reparação durante e após o fabrico.

Foram realizados três ensaios em datas diferentes. Um ensaio em Março, outro em Junho e o último em Julho. Todos os ensaios foram realizados nas mesmas condições de temperatura, pressão e humidade.

Saliente-se que os ensaios apenas foram realizados quando o planeamento assim o permitia. Ou seja, apenas quando existiu a produção de uma encomenda do cliente foi possível colocar os moldes produzidos especialmente para os ensaios na máquina da linha de produção, em conjunto com os restantes moldes já existentes.

No final dos ensaios industriais (ciclos normais de produção), já com os moldes frios, foi realizado o controlo dimensional dos moldes e a comparação de dimensões entre os vários moldes antes de iniciarem os ensaios. Também foi analisada e relatada a necessidade dos vários moldes terem sido sujeitos a trabalhos de manutenção e/ ou de reparação durante os ensaios, como por exemplo, polimento e enchimento.

Na primeira fase foram realizados ensaios com os moldes novos, fabricados propositalmente para realizar os testes pretendidos. Na segunda e terceira fases foram testados os mesmos moldes da primeira fase. Nestas duas fases, pelo facto de estes moldes já terem trabalhado, poder-se-ão notar algumas diferenças no desempenho dos mesmos. Essas diferenças podem ser ao nível da dureza, bem como ao nível da resistência à temperatura e à abrasão.

Foram testados moldes em cada um dos materiais selecionados e referidos anteriormente.

Os testes foram realizados na linha de produção 1.3. Nesta linha, a máquina de produção existente é uma máquina Antas, com capacidade para doze postos de trabalho e com duas secções em cada posto. Quer dizer que a máquina tem capacidade para produzir 24 peças de vidro numa volta completa. Os moldes ensaiados foram colocados nos postos 3, 6, 12 e 14 nas secções 1 e 2 e a cadência produtiva da máquina nos três ensaios foi de 47 peças por

minuto. Apesar de serem testados dois moldes de cada um dos materiais, as medições de temperatura apenas foram realizadas num dos moldes de cada um dos materiais.

Para a medição da temperatura dividiu-se a máquina em três zonas. A zona A - zona após moldação da peça, a zona B - zona de consolidação da peça e a zona C - zona após a libertação da peça de vidro (figuras 33 e 34).

Na zona A foi onde se iniciou o processo de moldação. Antes do molde passar nesta zona, a gota de vidro acabou de entrar no molde e imediatamente a seguir deu-se a prensagem da gota através de um punção contra as paredes interiores do molde. Nesta zona existe um sistema que queima as rebarbas do pé da haste através de chama provocada por tochas e resultante do queimo de gás natural. Na zona B, a gota continua dentro do molde e a peça consolida a sua forma final. Antes da zona C a peça de vidro é extraída do molde através de um mecanismo de pinças. Na zona C o molde encontra-se sem vidro no seu interior, pelo que é admissível que esteja mais frio do que nas outras zonas. A figura 34 mostra os ensaios industriais em cada uma das três zonas da máquina de moldação e ainda a zona onde já está formado o cálice.

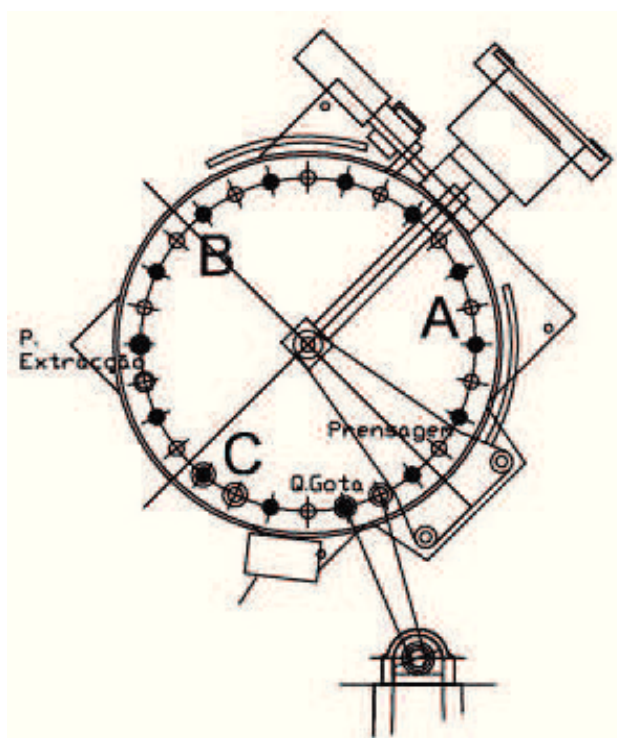


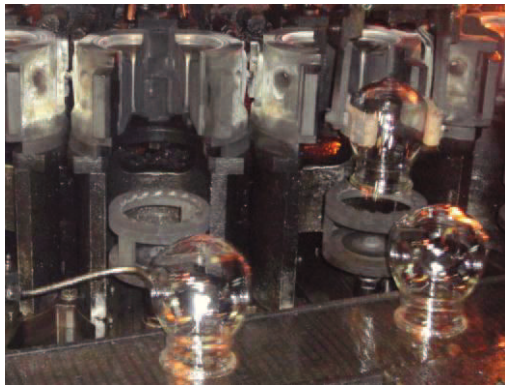
Figura 33: Desenho 2D, da máquina Antas com as zonas onde foram medidas as temperaturas dos moldes, **Zona A** – após moldação, **Zona B** – Após consolidação e **Zona C** – Após libertação da peça



a



b



c



d

Figura 34: Zonas da Máquina onde foram medidas as temperaturas dos moldes, **a)** Zona A – após moldação, **b)** Zona B – após consolidação, **c)** Zona C – após libertação da peça e **d)** peça final (cálice) constituída por bojo e haste

No que diz respeito aos moldes, estes também foram divididos em três zonas para que fossem medidas as temperaturas num ponto em cada uma das três zonas diferentes. A zona X corresponde ao primeiro quadrante do molde, a zona Y ao segundo quadrante e a zona Z corresponde ao terceiro quadrante. Na figura 35 podem-se ver as diferentes zonas do molde onde foram efetuadas as medições da temperatura.

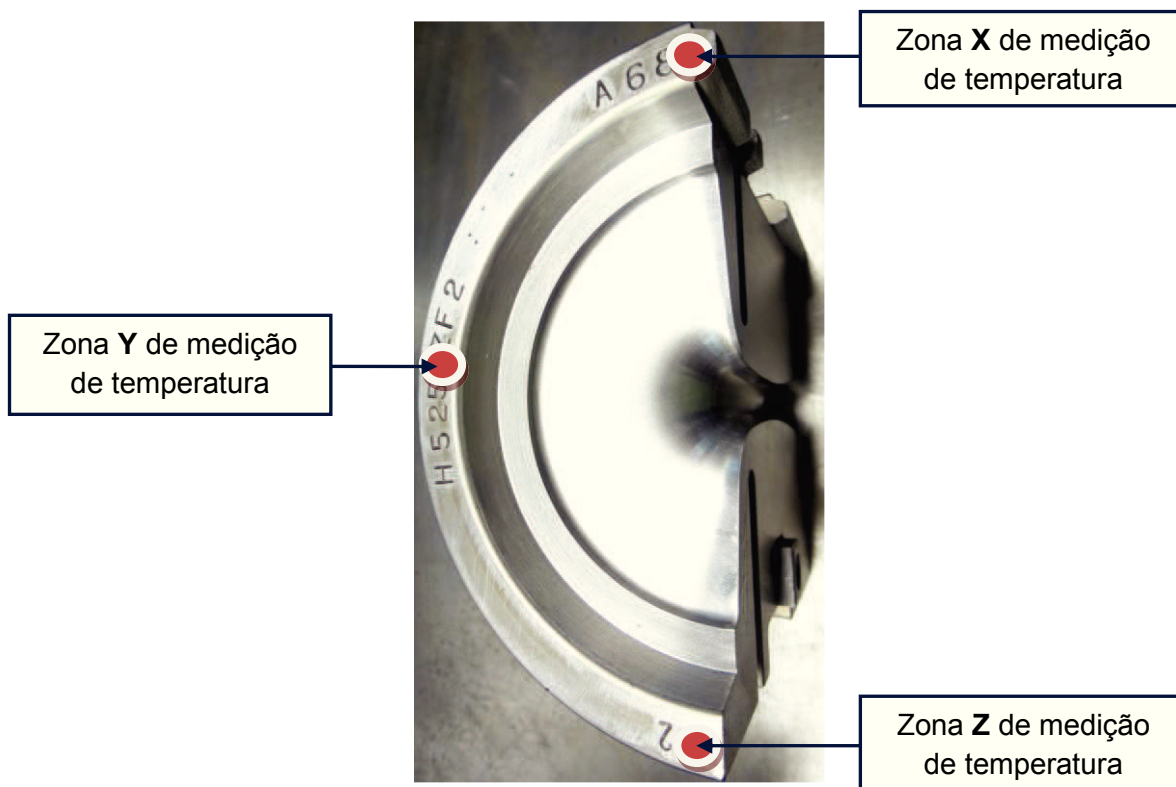


Figura 35: Representação das zonas do molde onde foram realizadas as medições de temperatura

O procedimento utilizado para medição da temperatura nas três zonas do molde e nas três zonas da máquina foi o seguinte: Em cada volta completa da máquina foi feita apenas uma medição num ponto do molde. Primeiro mediu-se a temperatura num ponto situado na zona X, na volta seguinte mediu-se a temperatura num ponto situado na zona Y e por ultimo mediu-se a temperatura num ponto situado na zona Z. Inicialmente mediram-se as temperaturas nas três zonas do molde com o material AISI 314 - H525, depois para o molde com o material AISI 431 - VAL4, seguiu-se o molde com o material AISI 630 – V174 e por ultimo o molde com o material AISI 431 - N350. Este procedimento foi realizado em quatro repetições, intercalando cada um dos moldes nas várias repetições. O equipamento utilizado para efetuar as medições de temperatura foi o pirómetro digital Handy IV (figura 36) e a temperatura foi medida em graus celsius.



Figura 36: Equipamento utilizado nas medições das temperaturas dos vários moldes (Pirômetro digital Handy IV)

Relativamente ao desempenho dos moldes durante os ensaios industriais, salienta-se que apenas no segundo ensaio alguns moldes tiveram de ser retirados da máquina e sofrer pequenas tarefas de reparação, nomeadamente um polimento superficial. Os moldes que saíram de máquina foi um do material AISI 314, outro do material AISI 630 e outro no material AISI 431 – V4. Essa situação aconteceu porque esses moldes começaram a acumular um pouco de vidro no seu interior o que deu origem a alguns defeitos nas peças que seriam produzidas posteriormente. É uma situação perfeitamente normal e que acontece em bastantes ciclos produtivos uma vez que nem sempre se consegue controlar com todo o rigor todos os parâmetros envolvidos no ciclo produtivo. Por exemplo, se existir um corte de energia, a máquina para automaticamente e após o seu arranque os moldes ainda não estão todos à temperatura desejada. Nesta situação existem peças não conformes mas quando o processo já está estabilizado nota-se que algumas peças continuam não conformes e aí verifica-se que acumularam pequenas quantidades de vidro no seu interior e que permaneceu lá solidificado. Nessa situação esses moldes têm de ser retirados da máquina e sofrer tarefas de limpeza e de polimento podendo de seguida retomar o seu normal funcionamento.

3.6 Controlo de qualidade das peças finais de vidro

No final dos ensaios industriais foram inspeccionadas e analisadas algumas amostras de peças de vidro, de acordo com os procedimentos internos do departamento de Qualidade da Crisal.

A inspeção e análise das peças de vidro incidiu em vários parâmetros, nomeadamente a análise de defeitos e o controlo dimensional, mais propriamente através do controlo dos pesos das peças. Relativamente à análise de defeitos, foram analisados quatro tipos de defeitos: linhas de junta salientes, rebarbas, picados e acamado da gota. Quanto ao controlo dimensional, foi feita uma análise às dimensões das peças e uma comparação do peso das várias amostras recolhidas após a realização das segunda e terceira produções, bem como os pesos pretendidos na fase de projeto para cada uma das peças.

3.6.1 Análise de defeitos

Cada um dos quatro defeitos pode ter influência do estado da matéria-prima, do processo de fabrico e do estado dos moldes utilizados. Convém por isso, resumir o que representa cada um destes quatro defeitos [30, 31].

- Rebarbas: São defeitos que podem ser causados pelo facto de o peso da gota ser demasiado elevado ou pela folga existente entre o anel e o punção ser demasiado grande. As rebarbas podem dar origem a outros defeitos, nomeadamente ao gripado da bucha que não é mais do que uma série de linhas verticais na zona do bordo das peças de vidro. Podem também causar fragmentos de vidro colado na cavidade do molde.
- Costuras desencontradas: As costuras ou linhas de junta existem ao longo da haste e do pé da haste. Quando estão salientes significa que o molde na sua extremidade não tem dureza suficiente para na zona de consolidação da peça impedir que o vidro entre nas duas metades do molde.
- Picados: São defeitos causados por danos na cavidade do molde. Se vários moldes apresentarem este defeito, podem estar demasiados quentes ou necessitarem de mais lubrificação. Se a temperatura da cavidade do molde estiver for superior à

temperatura que deveria estar, é muito provável que a temperatura do molde seja a causa da colagem do vidro ao molde e da danificação do molde. Assim, deve ser aumentado o caudal de ar de arrefecimento do molde e a lubrificação deste. A temperatura do molde deve ser de cerca a ideal e se necessário ajustada para ajudar a prevenir a acumulação de lubrificação e a colagem do vidro ao molde.

Existe também a hipótese de estes defeitos terem origem em impurezas na cavidade do molde e incapacidade do material do molde resistir ao choque térmico provocado pela diferença de temperaturas da sua cavidade e da gota de vidro. No primeiro caso não tem a haver directamente com a qualidade do material do molde e podem estar associado ao processo de queimo do acetileno e/ ou outro lubrificante que é introduzido e queimado no interior do molde fazendo a lubrificação deste. No segundo caso, trata-se da incapacidade do material resistir a elevados choques térmicos, cerca de 400°C. Em ambas as situações, o interior do molde começa a deteriorar-se e a fissurar apresentando zonas chochas, conforme se pode verificar na análise da cavidade do molde de iniciar (capítulo 4.4).

- **Acamado da gota:** este defeito é provocado através da diferença de temperaturas em que se encontra o molde e a gota de vidro. O vidro flui no molde por camadas, ou seja, após entrar no molde, a primeira zona da gota arrefece, depois a zona da gota que vem atrás passa por cima desta e avança mais um pouco até que arrefece, depois o processo repete-se até que a cavidade do molde fica totalmente preenchida de vidro.

Nos casos em que o interior dos moldes está muito frio ou em que o material destes tenha um coeficiente de rugosidade muito elevado este defeito pode aparecer com mais frequência.

3.6.2 Controlo dimensional

O controlo dimensional foi realizado de acordo com os requisitos do departamento de Qualidade da Crisal e do caderno de encargos com as especificações técnicas exigidas pelo cliente.

Também foi realizado o controlo do peso das peças de vidro através da análise de amostras recolhidas durante o segundo e terceiro ensaios industriais. A pesagem foi efetuada numa balança milésimal Sartorius, como mostra a figura 37.



Figura 37: Pesagem de uma peça final de vidro com a haste produzida no material AISI 314 – H525

3.7 Análise da cavidade de um molde de iniciar do processo de fabrico soprado girado

Existiu também a necessidade de se analisar um molde de iniciar utilizado no processo de fabrico soprado girado. Por as peças de vidro apresentarem alguns defeitos consecutivamente, fez-se uma análise à cavidade do molde através de um ensaio de endoscopia e que poderia também contribuir para melhor se conhecerem os defeitos existentes nos moldes, as suas causas e possíveis formas de eliminação.

4. Discussão de Resultados

4.1 Resultados dos ensaios mecânicos dos materiais

Neste capítulo serão divulgados e analisados os resultados obtidos nos vários ensaios realizados ao longo do projeto. De referir que através do método AHP, foram selecionados quatro materiais para serem analisados e ensaiados. Após a obtenção de amostras desses materiais e do seu processamento, foram realizados vários ensaios. Numa fase inicial realizaram-se ensaios de flexão em 3 pontos e DMA aos provetes. Posteriormente realizaram-se ensaios de dureza e industriais aos moldes produzidos. Foram ainda realizados ensaios de controlo de qualidade às peças finais de vidro moldadas nos moldes produzidos com os materiais selecionados.

Por último, também foram realizados ensaios de endoscopia à cavidade de um molde já utilizado no processo de fabrico soprado girado.

4.1.1 Ensaios de flexão em três pontos

Com os ensaios de flexão em 3 pontos foi possível observar que os materiais tiveram diferentes comportamentos à flexão.

Como se pode verificar na tabela 8, o material mais macio, ou seja, o que apresentou uma deformação maior para a mesma força aplicada foi o AISI 314 – H525. Quanto ao material com menor deformação, isto é, com maior resistência à flexão foi o material AISI 630 – V174. Os materiais AISI 431 – VAL4 e o AISI 431 – N350 tiveram resultados muito semelhantes.

No entanto, convém realçar, que após a realização dos vários ensaios para cada um dos materiais, o material com melhor desvio padrão, isto é, aquele que teve menor dispersão dos resultados foi o AISI 431 – N350.

Tabela 8: Valores máximos registados dos vários materiais nos ensaios de flexão em 3 pontos

| Material | Deslocamento [mm] | Desvio Padrão | Força Aplicada [N] | Momento Fletor [N.mm] | $\sigma_{\text{máx flexão}}$ [MPa] |
|-----------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| AISI 314 - H525 | 7,18 | 0,64 | 349,87 | 4373,43 | 689,02 |
| AISI 431 - VAL4 | 7,41 | 0,19 | 749,90 | 9373,77 | 1507,69 |
| AISI 630 - V174 | 7,97 | 0,37 | 966,40 | 12080,06 | 1740,78 |
| AISI 431 - N350 | 7,74 | 0,01 | 687,36 | 8592,00 | 1441,72 |

Na tabela 9, podem-se observar os valores do módulo de elasticidade obtidos para cada um dos materiais, quando a força aplicada estava no limite do domínio elástico dos materiais. Como se observa, a força aplicada, necessária para cada um dos materiais começar a entrar no domínio plástico variou bastante. O material AISI 314 – H525 foi aquele que começou a ceder mais cedo, enquanto o material AISI 630 – V174 foi o que necessitou da aplicação de uma força maior para entrar no domínio plástico.

Tabela 9: Valores máximos de força aplicada no domínio elástico, dos vários materiais nos ensaios de flexão em 3 pontos

| Material | $F_{\text{máxima}}$ (dominio elástico) [N] | $E_{\text{flexão}}$ (dominio elástico) [MPa] |
|-----------------|--|--|
| AISI 314 - H525 | 180 | 147512,54 |
| AISI 431 - VAL4 | 420 | 172279,72 |
| AISI 630 - V174 | 620 | 124156,94 |
| AISI 431 - N350 | 380 | 168795,66 |

Os valores representados na tabela 9, extrapolam o comportamento de cada um dos materiais, conforme se verifica na figura 38. Nessa figura, pode-se observar o comportamento dos materiais quando submetidos à tensão de flexão, com a sua deformação em função da força aplicada.

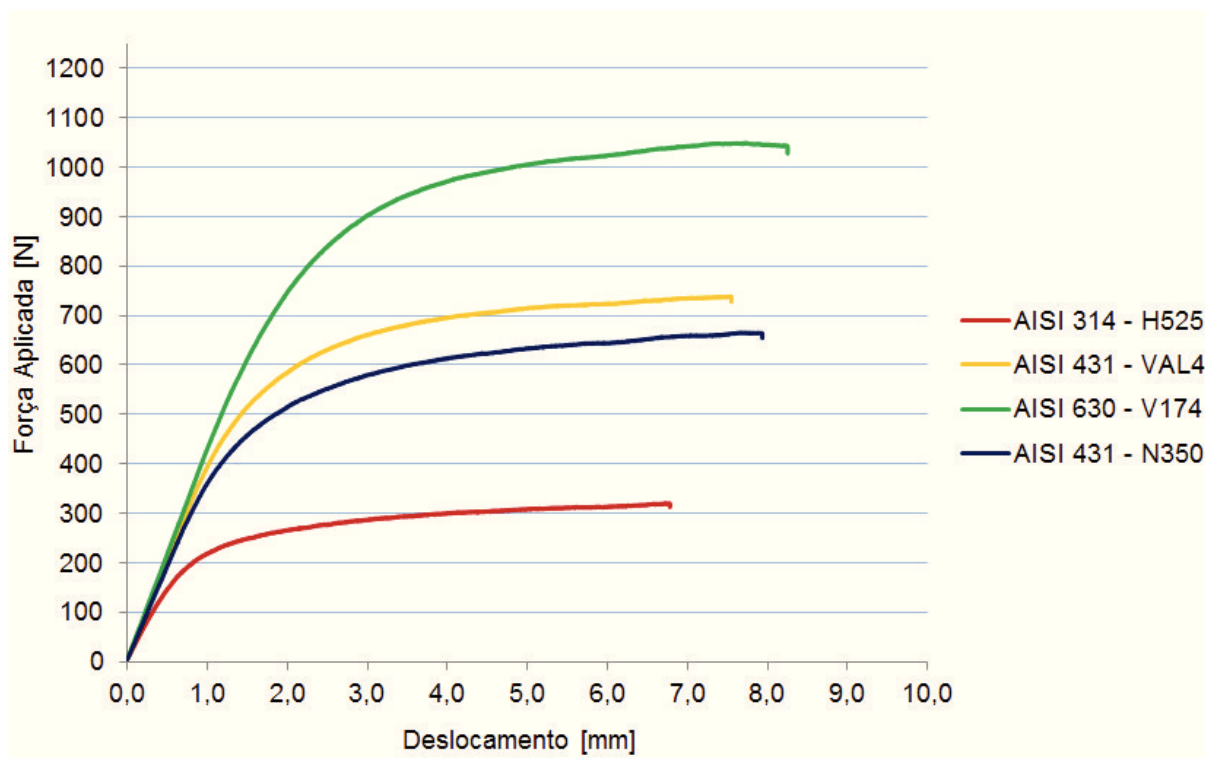


Figura 38: Curva características dos materiais no ensaio de resistência à flexão em 3 pontos

Como se verifica na figura 38, o material AISI 314 – H525 apresentou uma deformação de cerca 7 mm apenas para uma força aplicada de 300N enquanto a força aplicada no material com melhor desempenho à flexão, o AISI 630 – V174, para ter o mesmo deslocamento, foi superior a 1000 N.

É inequívoco que o material com melhor desempenho à flexão foi o AISI 630 – V174.

4.1.2 Ensaio DMA

Quanto aos ensaios DMA, foram realizados dois tipos de ensaio. Ensaio à temperatura ambiente e ensaios à temperatura de 380 °C. Os ensaios à temperatura de 380°C foram realizados com o objetivo de aproximar os materiais à temperatura de trabalho e com isso obter resultados mais fidedignos. No entanto, a máquina onde se realizaram os ensaios DMA, apenas tem capacidade para chegar aos 380°C. De salientar, que a essas temperaturas ainda não se conseguem notar alterações significativas das características e comportamento mecânico dos aços. As figuras 39 e 40 mostram o comportamento típico dos materiais analisados, quando submetidos ao ensaio DMA à temperatura ambiente (25°C) e à temperatura de 380°C, respectivamente.

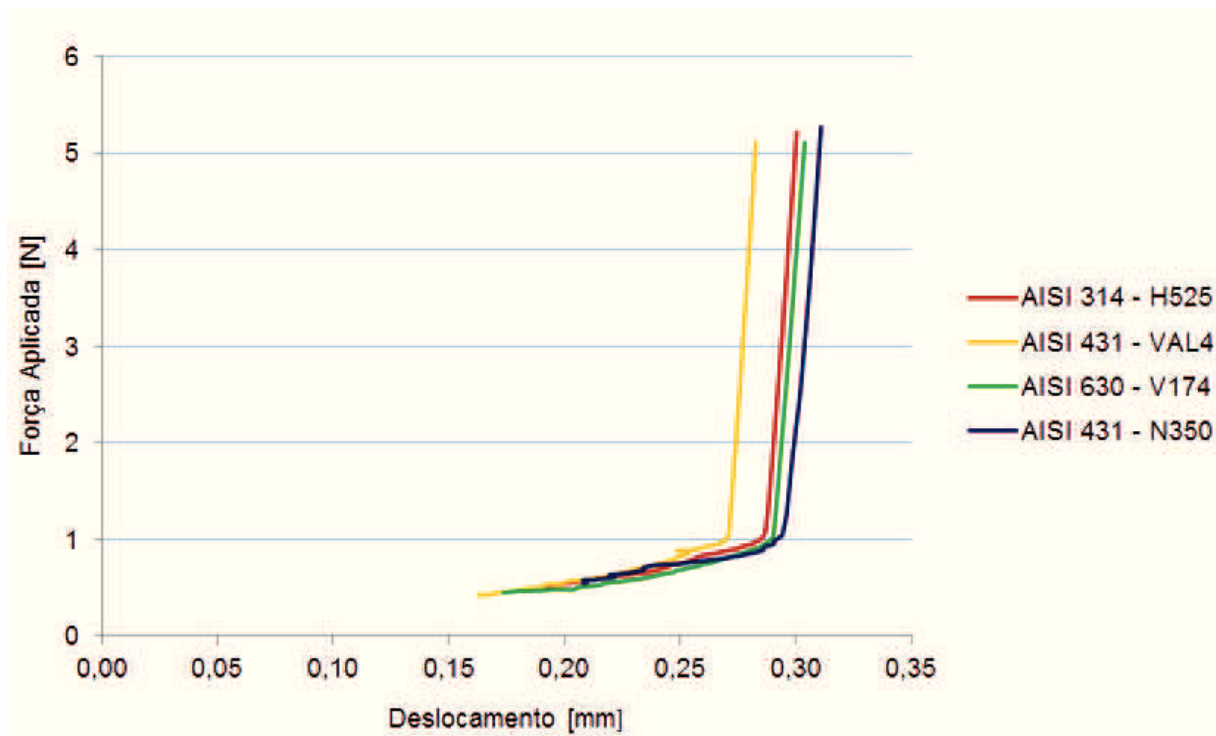


Figura 39: Curva características dos materiais no ensaio DMA à temperatura ambiente

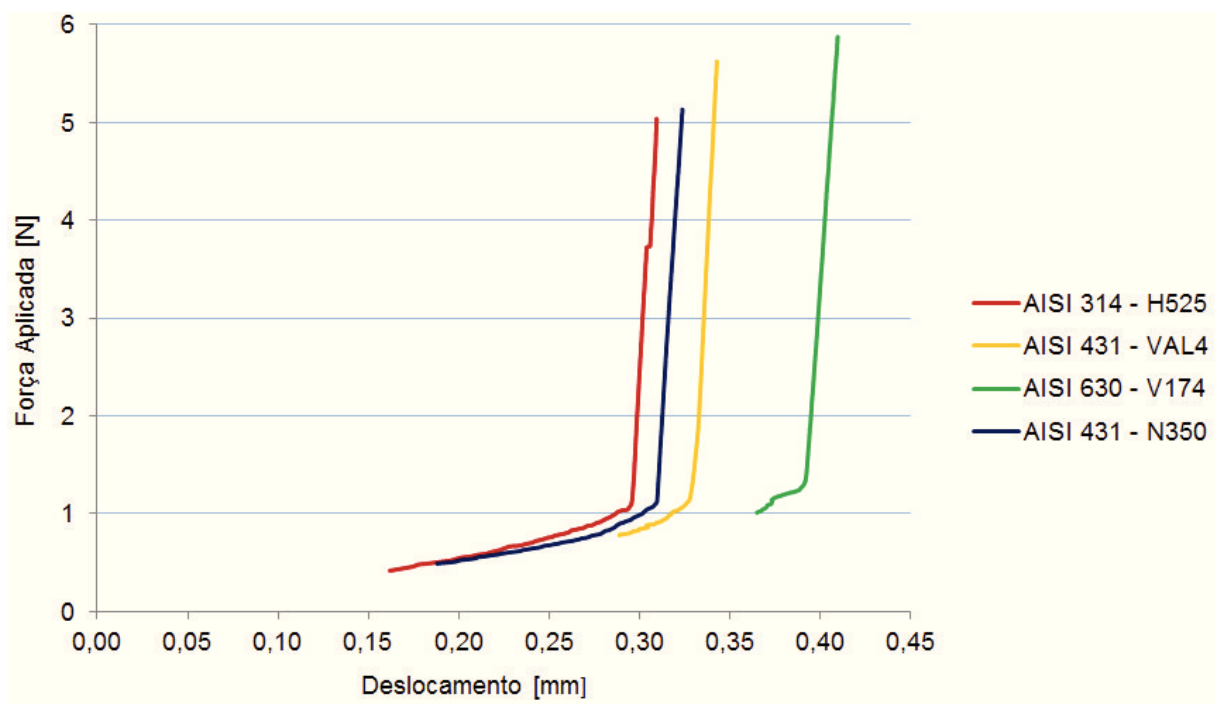


Figura 40: Curva características dos materiais no ensaio DMA à temperatura de 380°C

Como se pode observar nas figuras 39 e 40, não existiram alterações significativas no comportamento dos materiais. Contudo, à temperatura de 380°C existe um pequeno aumento do deslocamento para os quatro materiais. Relativamente ao AISI 630 – V174 nota-se que este apenas começa a sofrer algum deslocamento quando a força aplicada é superior a 1N comparativamente com o ensaio à temperatura ambiente.

A tabela 10, mostra os valores do módulo de elasticidade obtidos através dos ensaios DMA, para os quatro materiais.

Tabela 10: Módulo de elasticidade dos materiais nos ensaios DMA à temperatura ambiente e a 380°C

| Material | $E_{\text{flexão}}$ (temperatura ambiente) [MPa] | $E_{\text{flexão}}$ (380°C) [MPa] |
|-----------------|--|-----------------------------------|
| AISI 314 - H525 | 158313,35 | 133600,89 |
| AISI 431 - VAL4 | 188201,27 | 144201,43 |
| AISI 630 - V174 | 164500,13 | 135211,13 |
| AISI 431 - N350 | 162803,82 | 160103,09 |

Comparando os valores da tabela 10 com os valores obtidos do módulo de elasticidade no limite elástico no ensaio de flexão em 3 pontos (tabela 9), conclui-se que os resultados estão coerentes. No ensaio de flexão em 3 pontos o material com o maior módulo de elasticidade foi o AISI 431 – VAL4, sendo também o que teve maior módulo de elasticidade no ensaio DMA à temperatura ambiente. No entanto a 380°C o material que teve o maior módulo de elasticidade foi o AISI 431 – N350.

No domínio elástico a deformação é aproximadamente proporcional à tensão. A relação entre a tensão e a deformação é o módulo de elasticidade, quanto maior forem as forças de atração entre os átomos maior é o módulo de elasticidade do material. Convém também referir que o modo de elasticidade dos metais decresce com o aumento da temperatura [22]

4.1.3 Ensaio de dureza

Como já referido anteriormente, foram realizados quatro ensaios de dureza Rockwell na escala C. Foram realizados ensaios de dureza antes do primeiro ensaio industrial e após cada um dos três ensaios industriais, ou seja, três ensaios industriais e quatro ensaios de dureza. De salientar que os ensaios de dureza foram realizados segundo a norma NP 141. As tabelas 11, 12, 13 e 14 mostram os resultados obtidos em cada um dos ensaios.

Tabela 11: Valores médios de dureza HRC e desvio padrão antes do primeiro ensaio industrial

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor Médio [HRC] | 6,90 | 32,95 | 33,75 | 31,85 |
| Desvio Padrão | 0,57 | 0,64 | 0,35 | 1,06 |

Como se pode verificar na tabela 11, o material que apresentou melhores resultados de dureza foi o AISI 630 – V174 uma vez que apresentou o menor valor de desvio padrão. De salientar, que o material AISI 314 – H525 não apresentou valores de dureza relevantes uma vez que segundo a escala C dos ensaios Rockwell só se considera que um material apresenta dureza para valores superior a 20 HRC.

Após o primeiro ensaio industrial, foram realizados novos ensaios de dureza como mostra a tabela 12.

Tabela 12: Valores médios de dureza HRC e desvio padrão depois do primeiro ensaio industrial

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor Médio [HRC] | 7,85 | 32,75 | 31,75 | 31,95 |
| Desvio Padrão | 2,05 | 0,35 | 0,35 | 0,78 |

Como se pode verificar na tabela 12, os materiais que apresentaram resultados mais contantes foram o AISI 431 – VAL4 e AISI 630 – V174 uma vez que tiveram o menor desvio padrão. O material com maior dureza foi o AISI 431 – VAL4 e o AISI 314 – H525 continuou a não apresentar valores de dureza significativos.

Tabela 13: Valores médios de dureza Rockwell C e desvio padrão dos materiais, após o segundo ensaio industrial

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor Médio [HRC] | 9,00 | 34,25 | 33,20 | 30,30 |
| Desvio Padrão | 4,24 | 0,78 | 0,99 | 1,56 |

No terceiro ensaio de dureza, após o segundo ensaio industrial (tabela 13), o material que apresentou melhores resultados foi o AISI 431 – VAL4, com menor desvio padrão, sendo também o que apresentou a média do valor registado de dureza mais elevada. Mais uma vez o material AISI 314 – H525 não apresentou valores significativos de dureza e teve um valor de desvio padrão elevado.

Após o terceiro e último ensaio industrial, os valores de dureza obtidos foram os que estão representados na tabela 14.

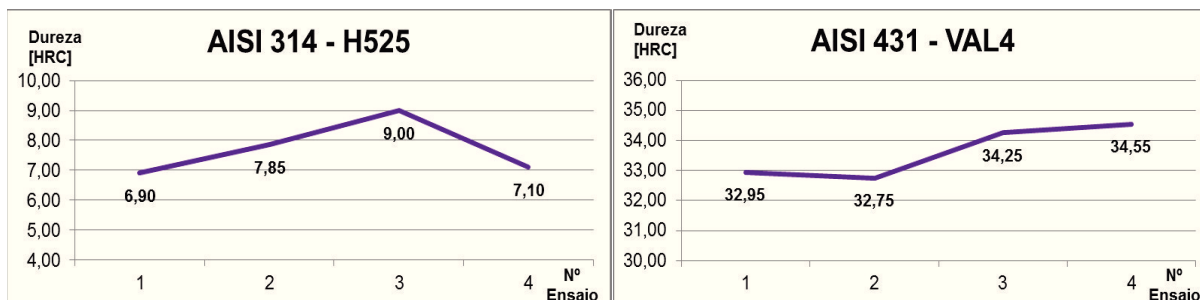
Tabela 14: Valores médios de dureza Rockwell C e desvio padrão dos vários materiais, após o terceiro ensaio industrial

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor Médio [HRC] | 7,10 | 34,55 | 35,25 | 33,05 |
| Desvio Padrão | 1,27 | 0,78 | 2,05 | 1,06 |

Neste quarto ensaio de dureza, o material AISI 431-VAL4 teve novamente o valor do desvio padrão mais baixo, no entanto o que teve o valor médio de dureza mais elevado foi o AISI 630 – V174.

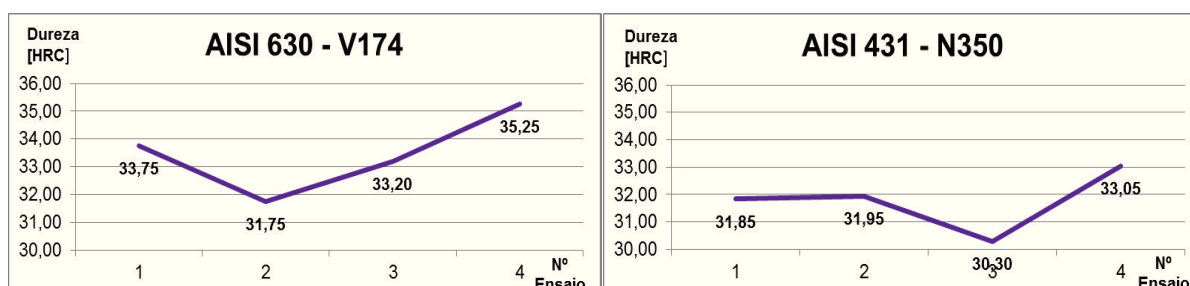
Com os valores obtidos nos vários ensaios de dureza, pode-se concluir que o material AISI 314 – H525 não teve dureza. Os restantes materiais tiveram valores de dureza muito próximos uns dos outros sendo que o AISI 431 – VAL4 e o AISI 630 V174 apresentaram os valores mais elevados de dureza e o AISI 431 – VAL4 foi o que apresentou uma dureza mais constante ao longo dos vários ensaios realizados.

A figura 41 representa a variação dos valores médios de dureza Rockwell C obtidos pelos vários materiais em cada um dos quatro ensaios realizados.



a) Variação do valor médio de dureza HRC do material AISI 314 – H525

b) Variação do valor médio de dureza HRC do material AISI 431 – VAL4



c) Variação do valor médio de dureza HRC do material AISI 630 – V174

d) Variação do valor médio de dureza HRC do material AISI 431 – N350

Figura 41: Variação dos valores registados nos quatro ensaios de Dureza Rockwell C para os vários materiais

Como se pode verificar na figura 41, não existe nenhuma dispersão relevante na dureza dos materiais AISI 431 – VAL4, AISI 630 – V174 e AISI 431 – N350, apresentado estes materiais uma pequena tendência crescente da dureza. Relativamente ao material AISI 314 – H525 nunca apresentou valores significativos de dureza, ou seja pode-se afirmar que é um aço macio.

Seriam necessários realizar mais ensaios de dureza para se poder concluir com total exatidão se não existe dispersão relevante e se existe alguma tendência crescente, decrescente ou inconstante nos valores obtidos.

De referir que, segundo experiências realizadas com vários materiais nos processos de fabrico da Crisal, os valores de dureza podem não ser preponderantes para o desempenho

de cada um dos materiais, no entanto, a sua dureza é importante na aplicação em causa, ou seja, no processo de fabrico prensado.

4.2 Resultados dos ensaios industriais

Durante os ensaios industriais, foi possível analisar e medir vários parâmetros, nomeadamente: as temperaturas de trabalho dos moldes, de cada um dos materiais, nas várias zonas da máquina de moldação e a reacção dos moldes aos ciclos de produção.

4.2.1 Medição de temperaturas

As temperaturas medidas, nas várias zonas dos moldes e da máquina de moldação, em cada um dos ensaios industriais, encontram-se nas tabelas 15, 16 e 17. De referir, que as temperaturas foram medidas em graus Celsius.

Tabela 15: Temperaturas, em graus Celsius, medidas em cada zona do molde e em cada zona da máquina no primeiro ensaio industrial

| Zona Máquina | Material | Zona do Molde | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | X | | | | Y | | | | Z | | | |
| | | Repetição | | | | | | | | | | | |
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| A | AISI 314 - H525 | 413 | 415 | 420 | 466 | 408 | 426 | 444 | 410 | 465 | 445 | 442 | 461 |
| | AISI 431 - VAL4 | 418 | 418 | 447 | 440 | 396 | 454 | 405 | 416 | 451 | 422 | 416 | 441 |
| | AISI 630 - V174 | 458 | 417 | 442 | 448 | 443 | 473 | 410 | 425 | 426 | 436 | 443 | 413 |
| | AISI 431 - N350 | 425 | 431 | 423 | 443 | 410 | 462 | 406 | 428 | 431 | 440 | 470 | 434 |
| B | AISI 314 - H525 | 433 | 418 | 418 | 415 | 423 | 409 | 411 | 408 | 412 | 419 | 413 | 424 |
| | AISI 431 - VAL4 | 431 | 420 | 422 | 418 | 402 | 403 | 406 | 394 | 418 | 420 | 428 | 415 |
| | AISI 630 - V174 | 411 | 422 | 425 | 421 | 391 | 395 | 399 | 404 | 406 | 414 | 418 | 424 |
| | AISI 431 - N350 | 428 | 430 | 429 | 428 | 401 | 400 | 400 | 401 | 421 | 423 | 422 | 414 |
| C | AISI 314 - H525 | 393 | 393 | 408 | 404 | 408 | 407 | 410 | 408 | 408 | 412 | 410 | 413 |
| | AISI 431 - VAL4 | 415 | 406 | 410 | 404 | 398 | 406 | 398 | 400 | 418 | 409 | 413 | 411 |
| | AISI 630 - V174 | 408 | 395 | 406 | 412 | 394 | 394 | 393 | 394 | 408 | 412 | 415 | 411 |
| | AISI 431 - N350 | 411 | 415 | 405 | 413 | 397 | 398 | 397 | 398 | 411 | 415 | 415 | 413 |

Tabela 16: Temperaturas, em graus Celsius, medidas em cada zona do molde e em cada zona da máquina no segundo ensaio industrial

| Zona Máquina | Material | Zona do Molde | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | X | | | | Y | | | | Z | | | |
| | | Repetição | | | | | | | | | | | |
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| A | AISI 314 - H525 | 460 | 457 | 434 | 461 | 429 | 522 | 472 | 453 | 456 | 440 | 482 | 479 |
| | AISI 431 - VAL4 | 440 | 457 | 445 | 432 | 421 | 477 | 430 | 452 | 507 | 518 | 542 | 525 |
| | AISI 630 - V174 | 423 | 458 | 434 | 457 | 415 | 449 | 438 | 436 | 526 | 550 | 540 | 538 |
| | AISI 431 - N350 | 422 | 445 | 495 | 423 | 434 | 506 | 477 | 452 | 433 | 490 | 514 | 537 |
| B | AISI 314 - H525 | 415 | 408 | 413 | 412 | 405 | 416 | 401 | 423 | 475 | 445 | 468 | 482 |
| | AISI 431 - VAL4 | 412 | 421 | 417 | 422 | 410 | 406 | 408 | 404 | 458 | 426 | 485 | 462 |
| | AISI 630 - V174 | 411 | 419 | 414 | 410 | 428 | 402 | 405 | 397 | 474 | 480 | 457 | 455 |
| | AISI 431 - N350 | 405 | 415 | 416 | 411 | 407 | 407 | 392 | 411 | 441 | 445 | 466 | 443 |
| C | AISI 314 - H525 | 404 | 404 | 407 | 405 | 398 | 400 | 409 | 398 | 391 | 395 | 395 | 392 |
| | AISI 431 - VAL4 | 409 | 411 | 410 | 410 | 397 | 395 | 396 | 396 | 399 | 402 | 402 | 400 |
| | AISI 630 - V174 | 404 | 405 | 404 | 408 | 391 | 395 | 391 | 392 | 398 | 405 | 396 | 402 |
| | AISI 431 - N350 | 409 | 407 | 410 | 410 | 391 | 391 | 392 | 392 | 397 | 400 | 401 | 397 |

Tabela 17: Temperaturas em graus Celsius medidas em cada zona do molde e em cada zona da máquina no terceiro ensaio industrial

| Zona Máquina | Material | Zona do Molde | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | X | | | | Y | | | | Z | | | |
| | | Repetição | | | | | | | | | | | |
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| A | AISI 314 - H525 | 431 | 410 | 450 | 425 | 500 | 468 | 477 | 466 | 616 | 506 | 546 | 528 |
| | AISI 431 - VAL4 | 410 | 409 | 434 | 409 | 468 | 443 | 455 | 462 | 589 | 577 | 581 | 593 |
| | AISI 630 - V174 | 406 | 443 | 406 | 415 | 425 | 473 | 428 | 464 | 560 | 514 | 562 | 557 |
| | AISI 431 - N350 | 428 | 411 | 414 | 440 | 446 | 465 | 471 | 474 | 554 | 552 | 593 | 523 |
| B | AISI 314 - H525 | 411 | 413 | 414 | 409 | 422 | 413 | 421 | 413 | 477 | 446 | 441 | 452 |
| | AISI 431 - VAL4 | 424 | 424 | 430 | 424 | 413 | 397 | 408 | 410 | 479 | 481 | 451 | 462 |
| | AISI 630 - V174 | 413 | 415 | 410 | 406 | 403 | 415 | 404 | 403 | 471 | 451 | 438 | 443 |
| | AISI 431 - N350 | 421 | 418 | 414 | 406 | 402 | 425 | 419 | 409 | 462 | 472 | 464 | 446 |
| C | AISI 314 - H525 | 400 | 405 | 400 | 399 | 395 | 397 | 398 | 396 | 401 | 396 | 400 | 405 |
| | AISI 431 - VAL4 | 407 | 407 | 407 | 407 | 391 | 391 | 393 | 391 | 400 | 401 | 400 | 407 |
| | AISI 630 - V174 | 405 | 403 | 403 | 404 | 390 | 391 | 393 | 398 | 398 | 397 | 400 | 400 |
| | AISI 431 - N350 | 408 | 408 | 404 | 408 | 397 | 391 | 397 | 395 | 405 | 404 | 405 | 412 |

De acordo com os valores obtidos, é possível verificar que no primeiro ensaio (na primeira vez que os moldes foram colocados a trabalhar na máquina de moldação), as temperaturas medidas em cada uma das zonas dos moldes e nas várias zonas da máquina, foram mais estáveis do que no segundo e terceiro ensaios. Provavelmente, se fossem realizados mais ensaios, a tendência era observar-se instabilidade nas temperaturas medidas, uma vez que os materiais iriam começar a deteriorar-se por fadiga e resistir menos aos choques térmicos.

As temperaturas medidas nos ensaios industriais, encontram-se representadas nas figuras 42, 43 e 44. Para cada um dos materiais foram feitas 36 medições de temperatura. As 12 primeiras medições foram realizadas na zona A da máquina, 4 medições na zona X do molde, 4 medições na zona Y do molde e mais 4 medições na zona Z do molde. As 12 medições seguintes foram realizadas da mesma forma na zona B da máquina e as últimas 12 medições foram realizadas na zona Z da máquina.

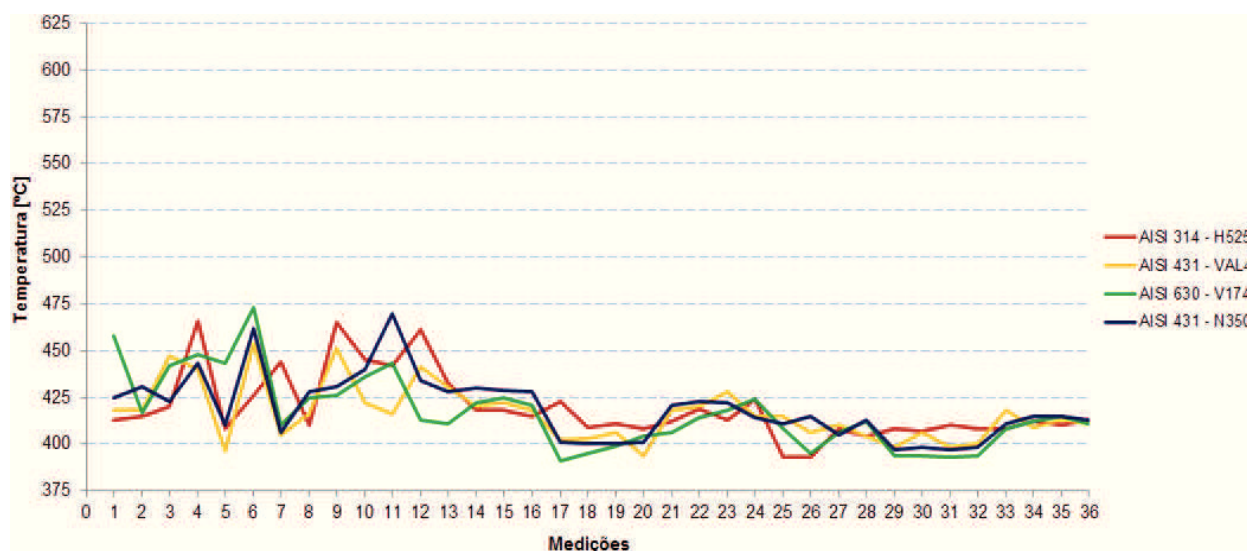


Figura 42: Temperaturas medidas em cada zona do molde nas diferentes zonas da máquina no primeiro ensaio industrial

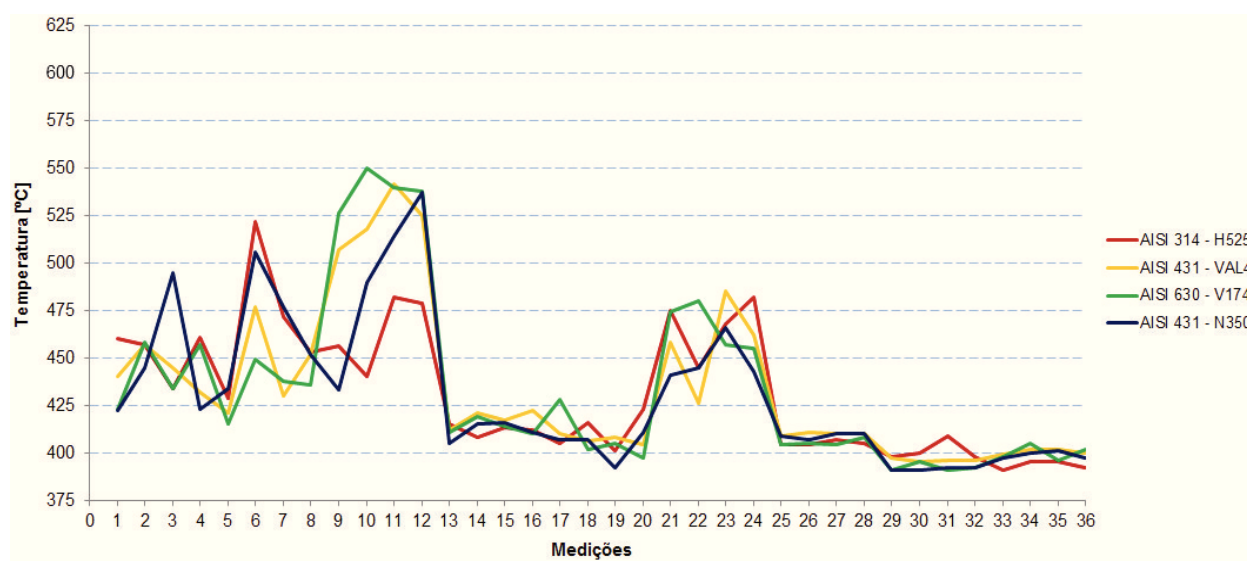


Figura 43: Temperaturas medidas em cada zona do molde nas diferentes zonas da máquina no segundo ensaio industrial

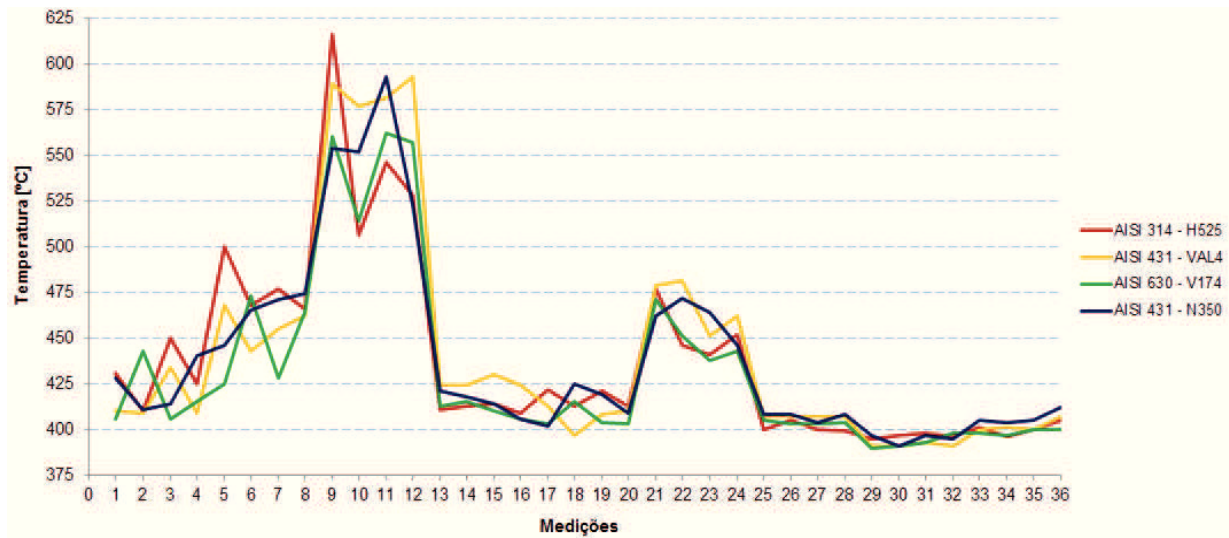


Figura 44: Temperaturas medidas em cada zona do molde nas diferentes zonas da máquina no terceiro ensaio industrial

Através da interpretação das figuras 42, 43 e 44, verifica-se que as temperaturas foram mais constantes na zona C da máquina de moldação (últimas 12 medições), mais precisamente na zona da máquina em que se dá a libertação da peça de vidro do molde. Nesta zona, o molde já não tem a peça de vidro no seu interior e prepara-se para sofrer novo choque térmico com a entrada de uma nova gota.

As temperaturas mais instáveis foram medidas na zona A da máquina, (primeiras 12 medições), principalmente na zona Z dos moldes (entre a 8ª e 12ª medição). A prensagem da gota contra as paredes interiores do molde foi um fator que influenciou essa instabilidade. Por esse motivo, esta é a zona mais crítica da máquina de moldação, ao nível das temperaturas. A instabilidade da temperatura na zona Z do molde, pode também ter origem num sistema (existente naquela zona) para queimar o pé da haste e assim retirar as rebarbas resultantes do excesso de vidro que fica acumulado entre o molde e o anel. Trata-se de um sistema rotativo, constituído por tochas que queimam gás natural, tipicamente conhecido por queimador. Este sistema, apesar de ser rotativo, está situado junto à zona Z do molde e assim poderá influenciar a temperatura nessa zona.

Na zona B da máquina de moldação, as temperaturas do molde mantiveram-se estáveis, com exceção da zona Z. No entanto, essa zona do molde apresenta valores inferiores aos medidos na mesma zona do molde na zona A da máquina de moldação.

4.2.1.1 Temperaturas na zona do molde

Os valores médios de temperaturas medidas nas várias zonas do molde estão representados na figura 45.

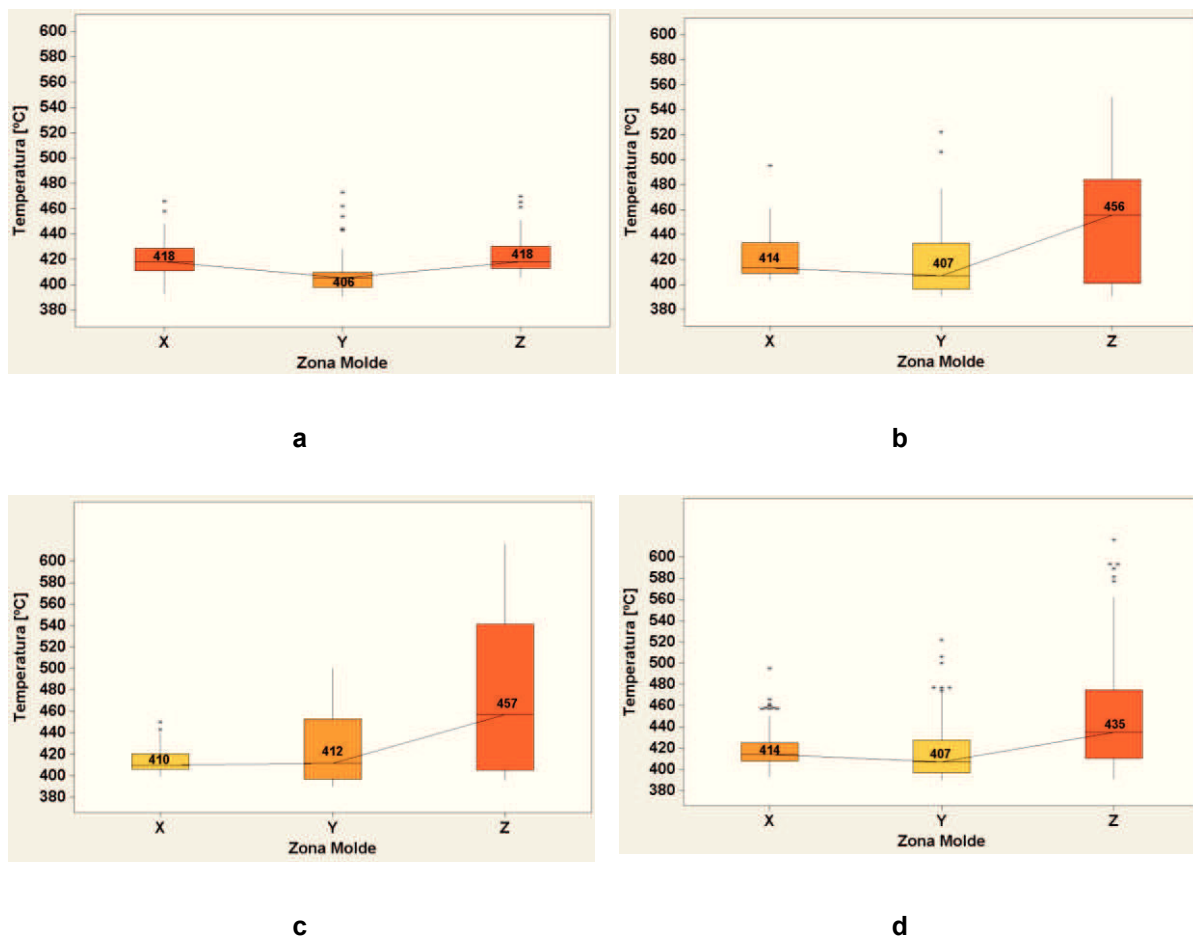


Figura 45: Temperaturas dos materiais medidas nas zonas X, Y e Z do molde nos vários ensaios industriais realizados, **a)** primeiro ensaio, **b)** segundo ensaio, **c)** terceiro ensaio e **d)** todos os ensaios

Analisando individualmente cada um dos ensaios industriais realizados, as temperaturas dos moldes medidas no primeiro e segundo ensaio foram consideravelmente diferentes relativamente às que foram medidas no terceiro ensaio. No primeiro e segundo ensaios, as temperaturas médias medidas, na zona X do molde, foram superiores às medidas na zona Y. Enquanto que no terceiro ensaio a temperatura média medida na zona X do molde foi superior à medida na zona Y. Apesar destas diferenças, não se pode afirmar que existiram diferenças significativas das temperaturas.

Se observarmos na figura 45 d), verifica-se que a temperatura média não variou significativamente, comparativamente com a temperatura média medida em cada ensaio individualmente (figura 45 a, b e c). Também é possível observar que os moldes apresentaram sempre o valor médio mais elevado de temperatura na zona Z. Este aumento de temperatura, nesta zona do molde, poderá ser resultado, da existência na primeira zona de medição de temperatura da máquina, do sistema que permite queimar o pé das hastes para retirar as rebarbas de vidro.

4.2.1.2 Temperaturas na zona da máquina de moldação

Os valores médios de temperaturas medidas nas várias zonas da máquina de moldação estão representados na figura 46.

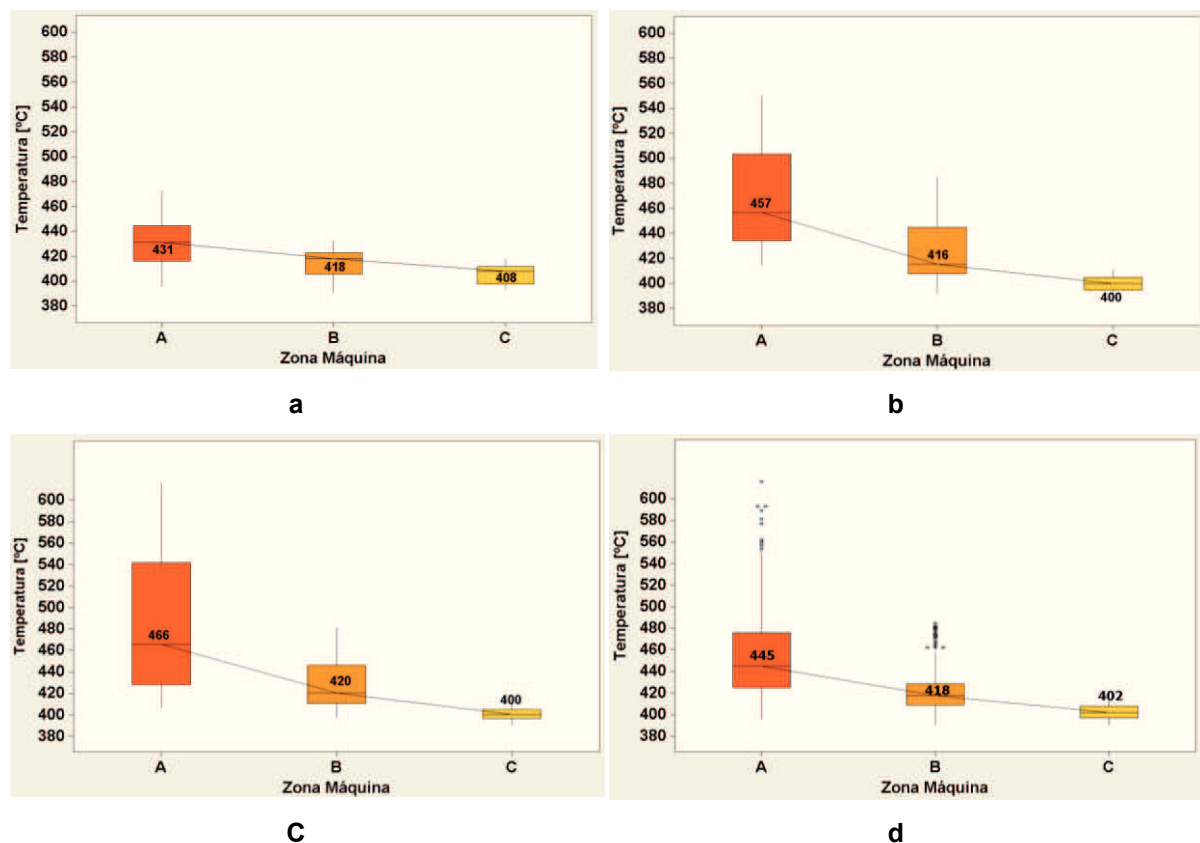


Figura 46: Temperaturas dos materiais medidas nas zonas A, B e C da máquina nos vários ensaios industriais realizados, **a)** primeiro ensaio, **b)** segundo ensaio, **c)** terceiro ensaio e **d)** todos os ensaios

Como se pode observar na figura 46, através do valor médio medido de temperatura, nas várias zonas da máquina, constata-se que estes foram sempre superiores na zona A. Tanto numa análise individual, de temperaturas medidas em cada ensaio, como numa análise conjunta aos três ensaios.

As temperaturas, foram superiores na zona A, uma vez que é a zona da máquina imediatamente a seguir à queda da gota de vidro na cavidade do molde. Por isso, a gota encontra-se a uma temperatura mais elevada do que no resto do processo de moldação. A partir dessa zona, os moldes diminuem a sua temperatura até darem uma volta completa à máquina e voltarem a receber a gota de vidro no seu interior.

A zona C da máquina de moldação, por se tratar da zona onde os moldes já não têm vidro no seu interior, foi a zona onde se mediram menores valores de temperatura. De realçar também, que a dispersão das temperaturas medidas foi menor na zona C da máquina. Nesta zona, a temperatura dos moldes é mais constante e homogénea.

4.2.1.3 Temperaturas dos materiais

Os valores médios de temperaturas dos materiais, medidos nos vários ensaios industriais, estão representados na figura 47.

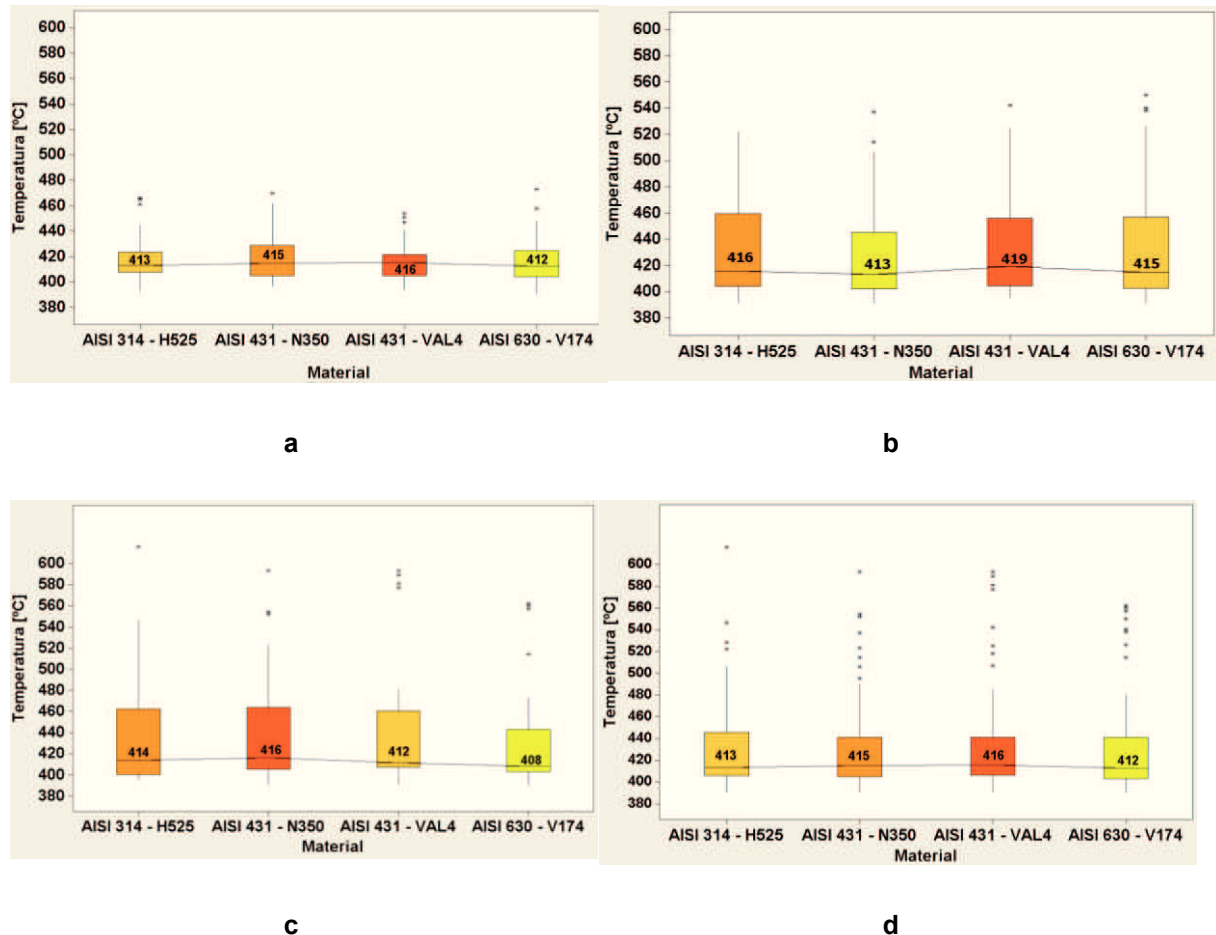


Figura 47: Temperaturas dos materiais medidas durante os ensaios industriais realizados **a)** primeiro ensaio, **b)** segundo ensaio, **c)** terceiro ensaio e **d)** todos os ensaios

Relativamente à temperatura dos materiais, verifica-se que o material AISI 431 – VAL4 obteve as temperaturas médias mais elevadas, no primeiro e segundo ensaios industriais. No terceiro ensaio o material que obteve a temperatura média mais elevada foi o AISI 431 – N350. Comparando as temperaturas medidas nos vários ensaios realizados individualmente com os ensaios em conjunto, verifica-se que as diferenças de temperatura não são significativas uma vez que a maior diferença de temperaturas médias medidas foi de apenas 8°C no terceiro ensaio.

4.2.1.4 Temperaturas dos materiais na zona do molde

Na figura 48, podem-se observar as temperaturas medidas, nos vários ensaios industriais, em cada zona do molde dos quatro materiais.

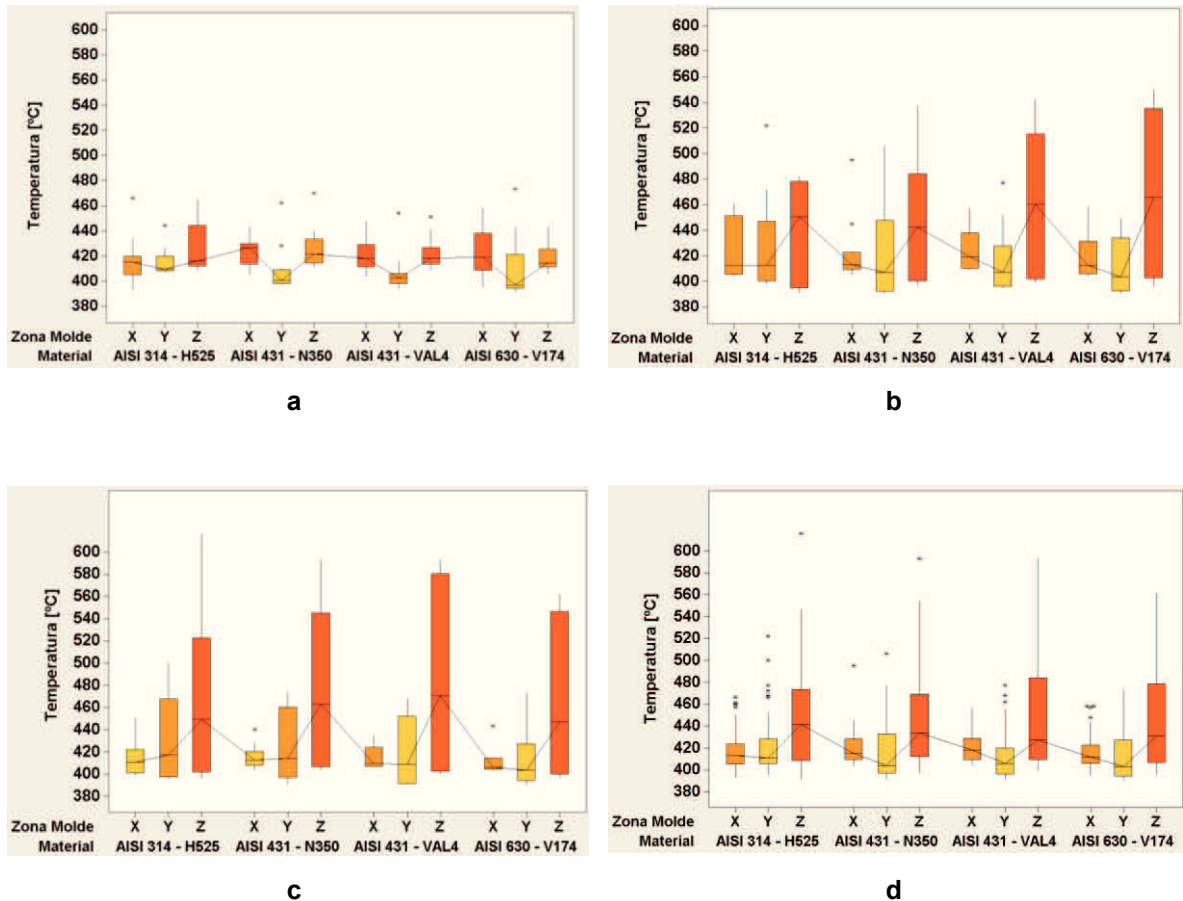


Figura 48: Temperaturas dos materiais medidas nas zonas X, Y e Z dos moldes durante os ensaios industriais realizados **a)** primeiro ensaio, **b)** segundo ensaio, **c)** terceiro ensaio e **d)** todos os ensaios

As temperaturas medidas na zona dos moldes, nos vários materiais, não variaram significativamente no mesmo ensaio. No entanto, foram diferentes de ensaio para ensaio, como se pode observar na figura 48. No primeiro ensaio, as temperaturas medidas foram mais baixas e por isso houve menor dispersão. No terceiro ensaio, as temperaturas foram mais elevadas e houve assim maior dispersão. Verifica-se também, que a zona Z do molde,

foi onde se mediu o valor médio de temperatura mais elevado, existindo também aí maior dispersão de temperaturas. Foi a zona do molde com maior instabilidade térmica.

4.2.1.5 Temperaturas dos materiais na zona da máquina de moldação

Na figura 49 podem observar-se as temperaturas médias medidas, durante os vários ensaios, nas várias zonas da máquina de moldação e nos diferentes materiais.

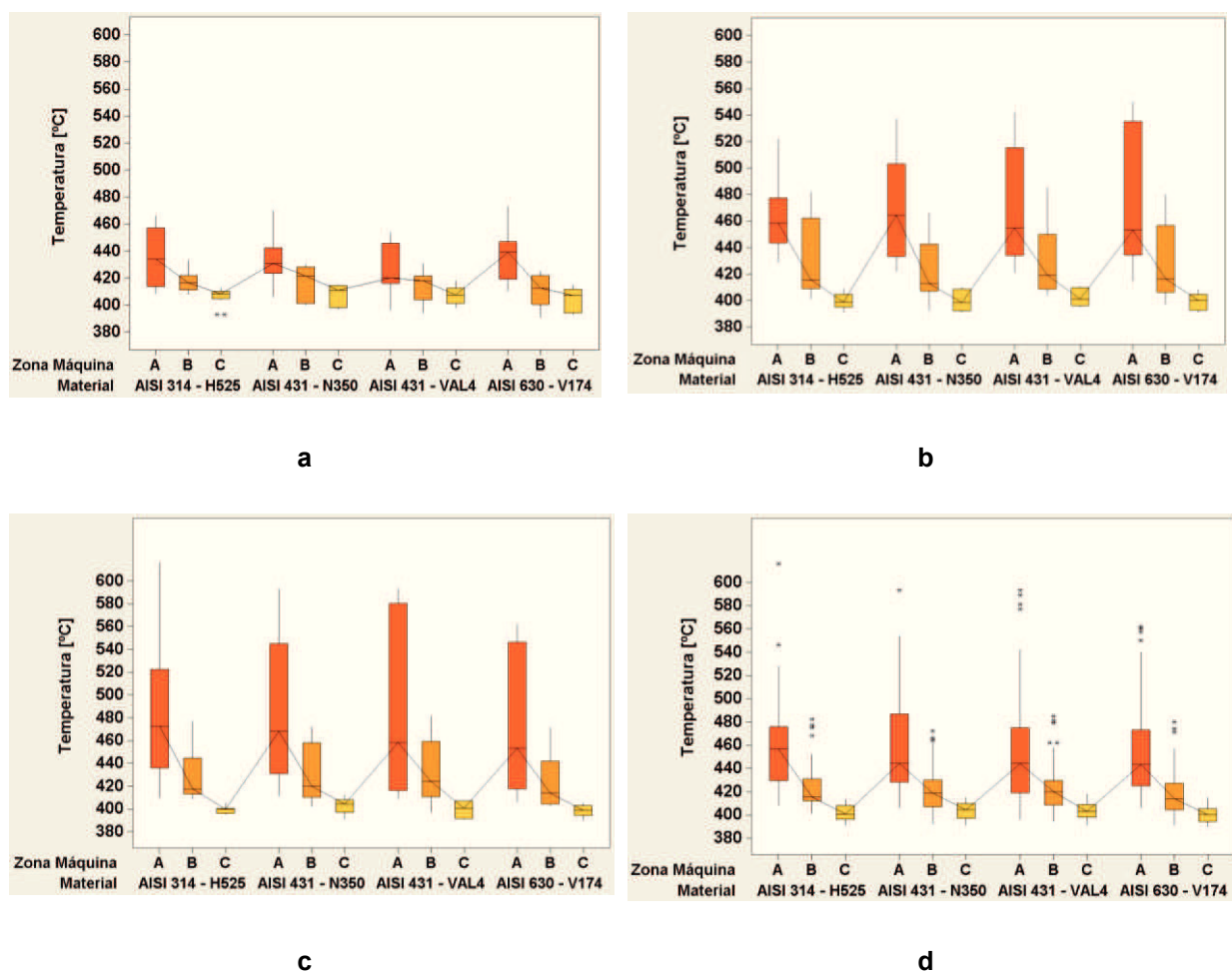


Figura 49: Temperaturas dos materiais, medidas nas zonas A, B e C da máquina – a) primeiro ensaio industrial, b) segundo ensaio industrial, c) terceiro ensaio industrial e d) todos os ensaios industriais

Analisando a figura 49 constata-se que todos os materiais apresentaram temperaturas mais elevadas na zona A e menos elevadas na zona C. Verifica-se também, que a zona A da

máquina, foi aquela onde os valores medidos apresentaram uma maior dispersão, enquanto que a zona C, foi a zona onde apresentam menor dispersão.

Tanto na análise individual, das temperaturas medidas nos vários ensaios industriais, como na análise conjunta das temperaturas medidas nos vários ensaios, não se verificaram diferenças de temperaturas significativas entre os vários materiais. Contudo, existiram valores médios de temperaturas mais elevadas no segundo ensaio, comparativamente com o primeiro ensaio e mais elevadas no terceiro ensaio, comparativamente com o segundo ensaio. Seria necessário efetuar mais medições de temperaturas, ao longo de mais ciclos produtivos. Assim, poder-se-ia verificar se esta tendência se mantinha e se os materiais apresentariam facilidade em aumentarem de temperatura, ou se eventualmente a sua condutibilidade térmica seria variável à medida que fossem utilizados.

4.2.1.6 Temperaturas individuais dos materiais na zona da máquina e do molde

Também foi feita uma análise individual aos valores de temperaturas medidos nos moldes e nas máquinas para os vários materiais como se pode observar nas figuras 50, 51 e 52.

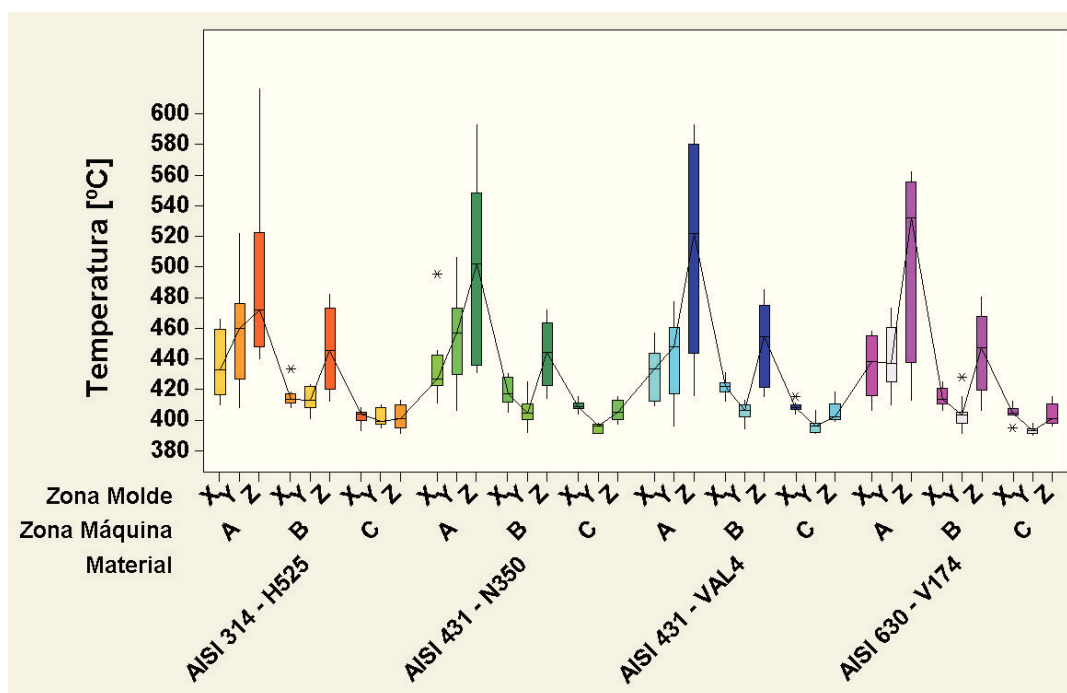


Figura 50: Temperaturas individuais dos materiais nas várias zonas dos moldes e da máquina

A figura 50 representa todas as temperaturas medidas nas várias zonas do molde e da máquina de moldação para os diferentes materiais ao longo dos três ensaios industriais. Verifica-se que não existiram diferenças nem oscilações significativas das temperaturas nos vários materiais, como se pode observar através da linha de tendência da figura. Contudo, a zona X do molde, foi a zona mais fria independentemente do material e a zona Z do molde foi a zona mais quente.

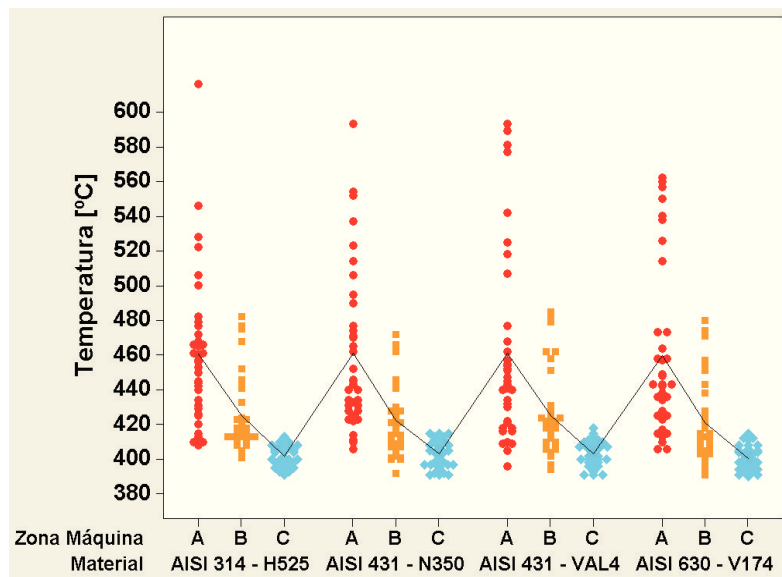


Figura 51: Temperaturas individuais dos materiais nas várias zonas da máquina

A figura 51 representa todas as temperaturas medidas nas várias zonas da máquina para os diferentes materiais ao longo dos três ensaios industriais. Não se observaram diferenças significativas das temperaturas nos vários materiais, como se pode verificar através da linha de tendência da figura. Verifica-se no entanto, que a zona A da máquina foi a zona onde se mediram valores mais elevados e mais dispersos da temperatura, enquanto que a zona C foi onde se mediram valores mais baixos e menos dispersos de temperatura.

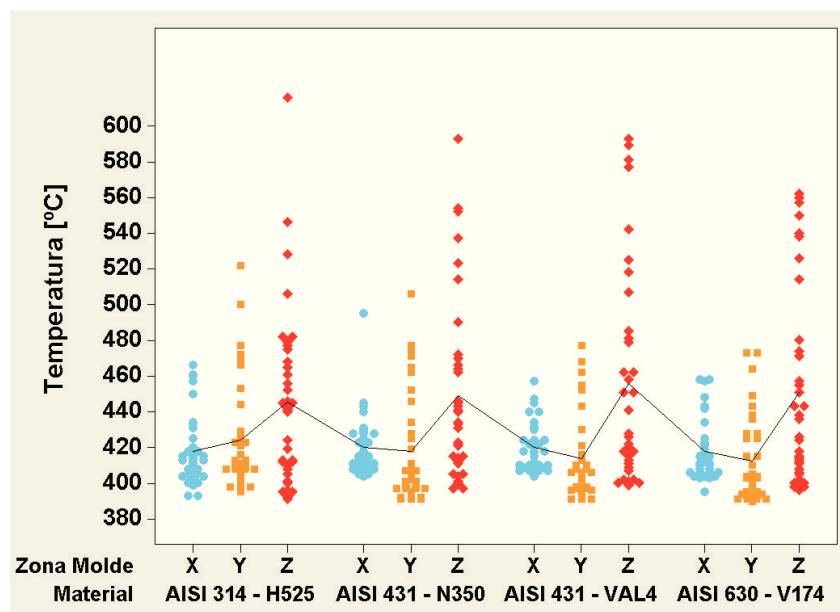


Figura 52: Temperaturas individuais dos materiais nas várias zonas do molde

A figura 52 representa todas as temperaturas medidas nas várias zonas do molde nos diferentes materiais, ao longo dos três ensaios industriais. Não se observaram diferenças significativas das temperaturas nos vários materiais, como se pode verificar através da linha de tendência da figura. A zona Z, foi a zona do molde onde foram medidos os maiores valores de temperatura e onde existiu maior dispersão desta, em todos os materiais. A zona X, foi a zona do molde que apresentou valores de temperaturas menos dispersos. Foi a zona do molde onde a temperatura esteve mais constante.

4.2.2 Análise da geometria do molde após os ensaios industriais

Relativamente aos comportamentos dos materiais de cada um dos moldes ensaiados, não se verificaram danos superficiais nem estruturais em cada um dos moldes. Todos reagiram bem à cadência, pressão e velocidade de prensagem impostos pela máquina, tendo realizado os ciclos de produção de forma normal.

Após a realização dos vários ensaios industriais, foram comparadas as dimensões das cavidades dos quatro moldes com o objetivo de se verificar se houve alteração dimensional significativa das cavidades e consequentemente aumento do volume [Anexo X]. Desta forma seria possível verificar se as peças finais de vidro de produções seguintes, teriam

maior volume e conseqüentemente maior peso, para vidro com a mesma densidade. O molde que teve maior oscilação das dimensões iniciais (controladas antes do primeiro ensaio industrial) e das dimensões finais (controladas após o terceiro ensaio industrial) foi o molde construído no material AISI 314 – H525. Após a modelação 3D da haste, com as dimensões iniciais do molde e as dimensões registadas no final do terceiro ensaio industrial, verificou-se que a variação de volume e de peso foi insignificante. A variação do peso da haste foi de cerca 1 grama (figuras 53 e 54).



Figura 53: Modelação 3D da haste (simulação da peça final após os vários ensaios industriais)

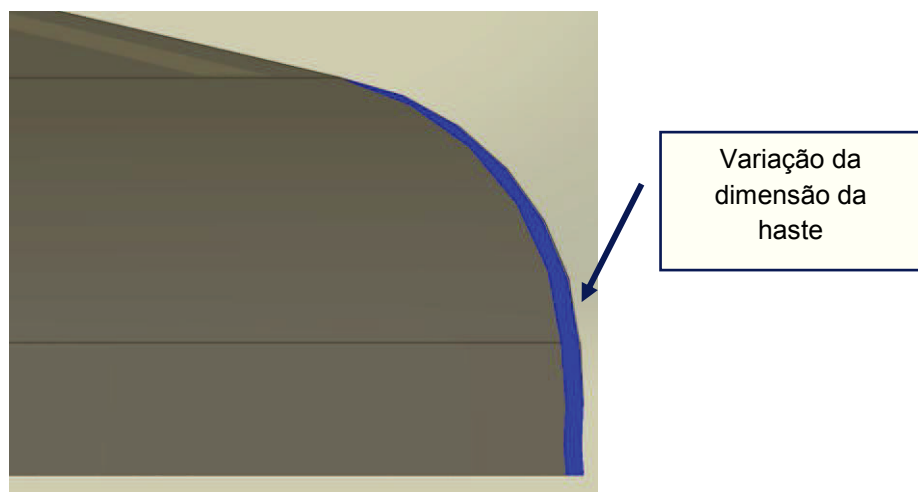


Figura 54: Diferença de geometria da peça final de vidro na fase inicial e após o terceiro ensaio industrial – molde em aço AISI 314 – H525 (simulação 3D)

Como se pode observar na figura 53 e posteriormente, de uma forma ampliada do pé da haste (figura 54), a diferença de volume é a zona que se encontra marcada a azul. A diferença de volume calculada através da simulação 3D foi de cerca 1 grama, ou seja, cerca de 1,1% do peso de referência da haste. De referir, que por vezes, podem surgir variações maiores no peso das peças finais de vidro, com um máximo de 10%. Os moldes estão sujeitos a um constante desgaste e por isso necessitam de tarefas de reparação, nomeadamente polimento e enchimento, de forma a restabelecerem-se as medidas iniciais.

4.3 Resultados do controlo de qualidade das peças de vidro produzidas

4.3.1 Análise de defeitos

Os resultados obtidos com a análise dos defeitos das peças finais de vidro estão expressos na tabela 18. Importa referir, que foram atribuídos valores à qualidade das peças para melhor se classificarem relativamente à sua qualidade. Assim, atribuiu-se o valor de um (1) às peças que apresentaram defeitos evidentes e que originaram a sua rejeição. Os valores dois (2) e três (3) foram atribuídos às peças que apresentaram algum tipo de defeito mas que não foi suficiente para as rejeitar ou que não apresentaram qualquer tipo de defeito, respetivamente. De referir ainda que a mesma peça pode apresentar dois tipos de defeitos e ser aceite, caso estes não sejam significativos. O mesmo não acontece se apresentar 3 ou 4 tipos de defeito, sendo rejeitada nestes casos.

Tabela 18: Classificação da qualidade das amostras de acordo com os defeitos analisados

| | Material | Número da Amostra | Tipos de Defeitos | | | | Resultado | Pontuação Total |
|----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------|---------|-----------|-----------------|
| | | | Rebarbas | Costuras Desencotradas | Acamado da Gota | Picados | | |
| Segundo ensaio industrial | AISI 314 - H525 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | 48 |
| | | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | AISI 431 - VAL4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | 47 |
| | | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | AISI 630 - V174 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | 46 |
| | | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | ACEITE | |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| AISI 431 - N350 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | 43 | |
| | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | ACEITE | | |
| | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | ACEITE | | |
| | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | | |
| Terceiro ensaio industrial | AISI 314 - H525 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | 46 |
| | | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | AISI 431 - VAL4 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | ACEITE | 44 |
| | | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | |
| | | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | |
| | | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | ACEITE | |
| | AISI 630 - V174 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | 44 |
| | | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | |
| | | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | |
| | | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | ACEITE | |
| AISI 431 - N350 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | 45 | |
| | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | | |
| | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | ACEITE | | |
| | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | ACEITE | | |

1 - REJEITADO

2 - APROVADO (RAZOÁVEL)

3 - APROVADO (MUITO BOM)

De acordo com os resultados obtidos e expressos na tabela 18, pode afirmar-se que as peças que tiveram melhor qualidade foram as produzidas com o molde no material AISI 314-H525. No entanto, comparando as amostras analisadas no segundo e terceiro ensaios industrial, verifica-se que houve um aumento de defeitos, não sendo, apesar de tudo, motivo de rejeição das peças.

As figuras 55 e 56, representam alguns defeitos analisados e mencionados na tabela 18 e a comparação entre peças de vidro com e sem defeito.

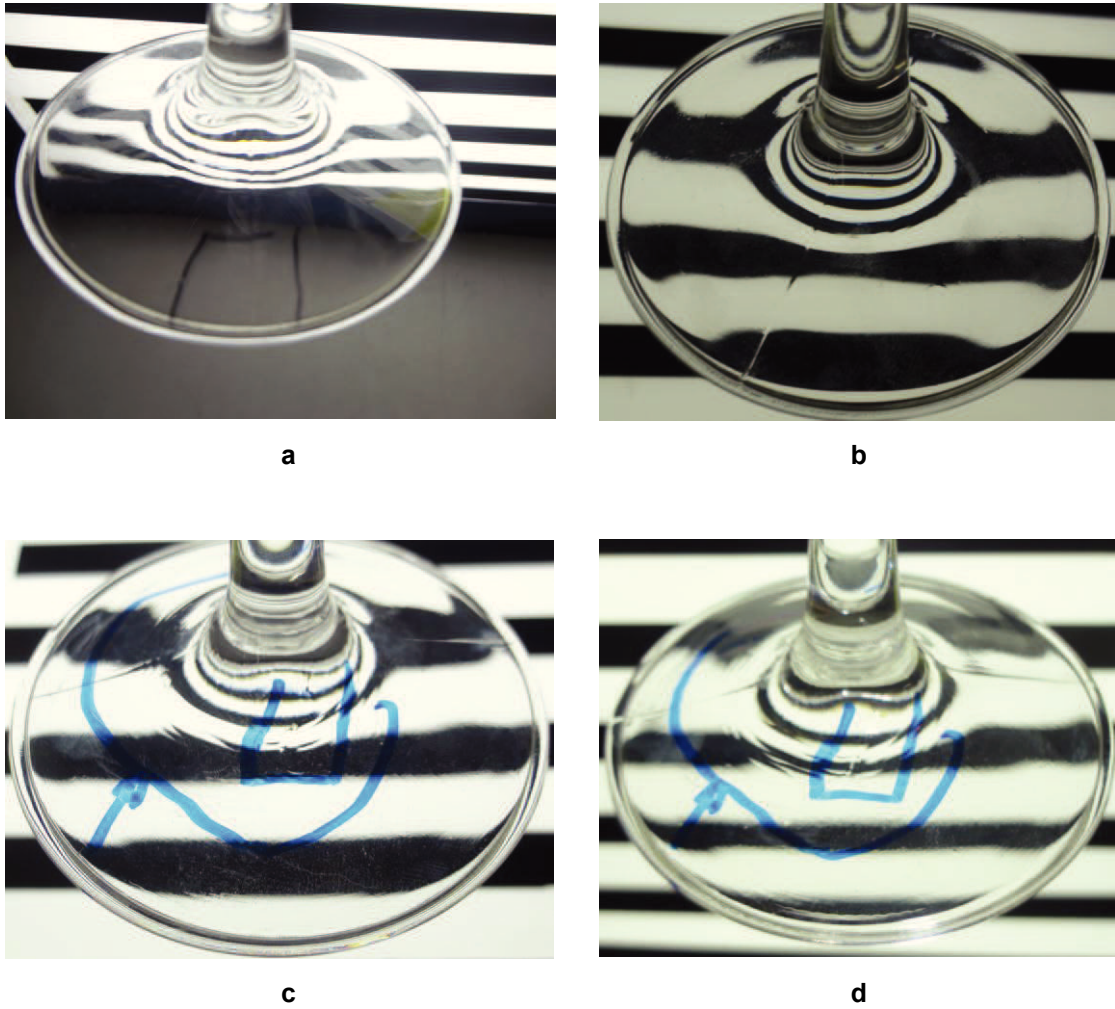


Figura 55: Comparação de defeitos do pé da haste ao nível do acamado da gota, **a)** e **b)** peças com bom acabamento, **c)** e **d)** peças com pequenos defeitos

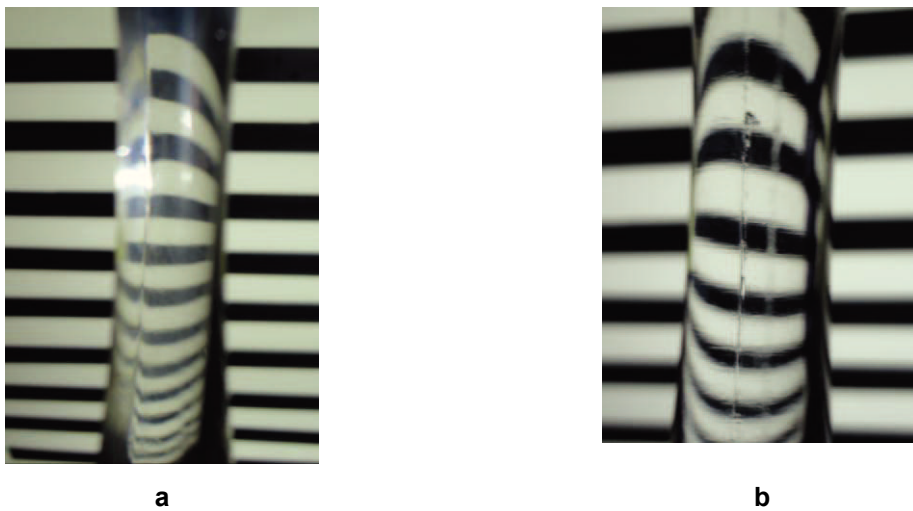


Figura 56: Comparação de defeitos da haste ao nível de linhas de juntas e estalados, **a)** peça com bom mau acabamento, **b)** peça com mau acabamento

4.3.2 Análise de pesos

Após a análise de defeitos das amostras, foi necessário efetuar a pesagem de cada uma para se observar a variação de peso de cada peça de vidro produzida pelos moldes nos quatro materiais.

Os pesos das amostras recolhidas estão representados na tabela 19.

Tabela 19: Resultados dos pesos das amostras após o segundo ensaio industrial

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Peso da Amostra nº 1 [g] | 292,00 | 288,00 | 291,00 | 294,00 |
| Peso da Amostra nº 2 [g] | 292,00 | 292,00 | 290,00 | 293,00 |
| Peso da Amostra nº 3 [g] | 292,00 | 283,00 | 290,00 | 296,00 |
| Peso da Amostra nº 4 [g] | 293,00 | 286,00 | 287,00 | 288,00 |
| Peso Médio das Amostras [g] | 292,25 | 287,25 | 289,50 | 292,75 |
| Desvio Padrão | 0,50 | 3,77 | 1,73 | 3,40 |

Analisando a tabela 19, nota-se que o material que obteve melhores resultados do controle do peso das peças de vidro foi o AISI 314 – H525, uma vez que foi o que teve menor valor de desvio padrão. Quer dizer que foi no molde desse material que se verificou o controle nos pesos das peças de vidro produzidas (pesos mais constantes).

Tabela 20: Resultados dos pesos das amostras após o terceiro fabrico

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Peso da Amostra nº 1 [g] | 292,00 | 292,00 | 290,00 | 296,00 |
| Peso da Amostra nº 2 [g] | 298,00 | 291,00 | 292,00 | 290,00 |
| Peso da Amostra nº 3 [g] | 292,00 | 286,00 | 297,00 | 296,00 |
| Peso da Amostra nº 4 [g] | 291,00 | 293,00 | 290,00 | 288,00 |
| Peso Médio das Amostras [g] | 293,25 | 290,50 | 292,25 | 292,50 |
| Desvio Padrão | 3,20 | 3,11 | 3,30 | 4,12 |

Analisando a tabela 20, constata-se que os moldes que obtiveram melhores resultados no controle do peso das peças de vidro foi o AISI 431-VAL4 seguindo-se imediatamente o AISI 314 – H525, uma vez que apresentaram os valores de desvio padrão mais baixos. No entanto, nesta segunda análise, após o terceiro ensaio industrial, os pesos médios das amostras recolhidas foram relativamente superiores aos pesos médios das amostras recolhidas após o segundo ensaio industrial, análise anterior. Os valores de desvio padrão

também foram consideravelmente mais elevados, ou seja, houve maior oscilação no peso das peças de vidro.

Se compararmos todos os valores registados de todas as amostras em conjunto, tabela 21, os melhores resultados foram obtidos pelo material AISI 314 – H525 não só ao nível do desvio padrão como ao nível da estabilidade do peso das amostras uma vez que foram as amostras que tiveram o peso mais perto de 295 gramas.

Saliente-se que esta análise, porém, não representa 100% a realidade, uma vez que do peso total de cada amostra, apenas 27,5% corresponde ao peso da haste. A haste tem um valor projectado de 81 gramas com tolerância de 10 gramas enquanto que o bojo tem um peso projectado de 214 gramas com tolerância de 10 gramas também [Anexo IX].

Tabela 21: Peso médio e desvio padrão de todas as peças mostras analisadas

| | AISI 314 - H525 | AISI 431 - VAL4 | AISI 630 - V174 | AISI 431 - N350 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Peso médio das Amostras [g] | 292,75 | 288,88 | 290,88 | 292,63 |
| Desvio Padrão | 2,19 | 3,64 | 2,85 | 3,50 |

Convém também referir, que foi realizado um controlo dimensional por amostragem das peças de vidro fabricados ao longo dos vários ensaios industriais e que nenhuma foi rejeitada por ter as dimensões fora dos limites de controlo.

4.4 Resultados da análise da cavidade de um molde de iniciar do processo de fabrico soprado girado

Como forma de melhor interpretar alguns defeitos que por vezes surgem em certas peças de vidro fabricadas em moldes construídos com o material AISI 431 – N350, normalmente usados nos moldes da Crisal, foram analisados alguns moldes de iniciar utilizados no processo de fabrico soprado girado.

Através de um ensaio de inspecção visual, nomeadamente o ensaio de endoscopia, foram analisados alguns defeitos no molde, principalmente fraturas, fissuras e picados. O equipamento de inspecção utilizado foi uma máquina de endoscopia de ultra som e a escala foi de 1 para 10, ou seja, 1 mm na imagem corresponde a 10 mm no real.

O molde foi dividido em quatro quadrantes e em quatro sectores para melhor interpretar os resultados e associar os defeitos à sua posição de trabalho, como mostra a figura 57.

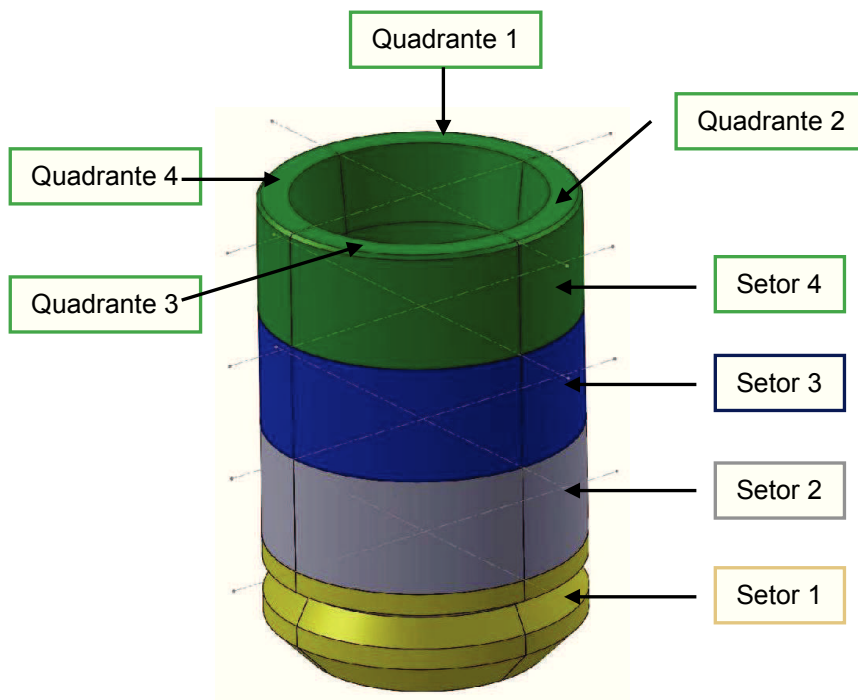


Figura 57: Representação dos quadrantes e dos sectores no molde de iniciar, (simulação 3D)

Os defeitos detetados no molde de iniciar analisado, estão representados na tabela 22.

Tabela 22: Defeitos registados num molde de iniciar do processo soprado girado

| | Quadrante 1 | Quadrante 2 | Quadrante 3 | Quadrante 4 |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Setor 1 | ■ | ■ ● | ▲ | ▲ ■ |
| Setor 2 | ▲ ■ | ▲ | ● | ■ |
| Setor 3 | ● | ■ | ▲ | ■ |
| Setor 4 | ■ | ■ | ● | ▲ ■ |

- Picados ■
- Fraturas ▲
- Fissuras ●
- Oxidação ■

Não se pode afirmar que algum sector do molde analisado tenha apresentado mais defeitos do que os outros. No sector 1 foram registados seis defeitos, no sector 2 cinco defeitos, no sector 3 quatro defeitos e no sector 4 cinco defeitos.

O molde apresentou uma grande deterioração do seu interior, como mostram as figuras 58 e 59, provocando defeitos em todas as peças de vidro que foram produzidas por esse molde. De referir que apesar de se tratar de um molde de iniciar, assim que o vidro entra no

seu interior a cerca de 1000°C fica imediatamente com defeitos e nem o facto de o vidro girar no interior do molde vai fazer com que os defeitos desapareçam. O comportamento do vidro é comparado a um espelho. Se o molde tiver defeitos o vidro fica com esses defeitos, e apesar de ainda estar apenas na pré-forma da peça de vidro, esses defeitos vão permanecer e evidenciam-se na peça de vidro final.

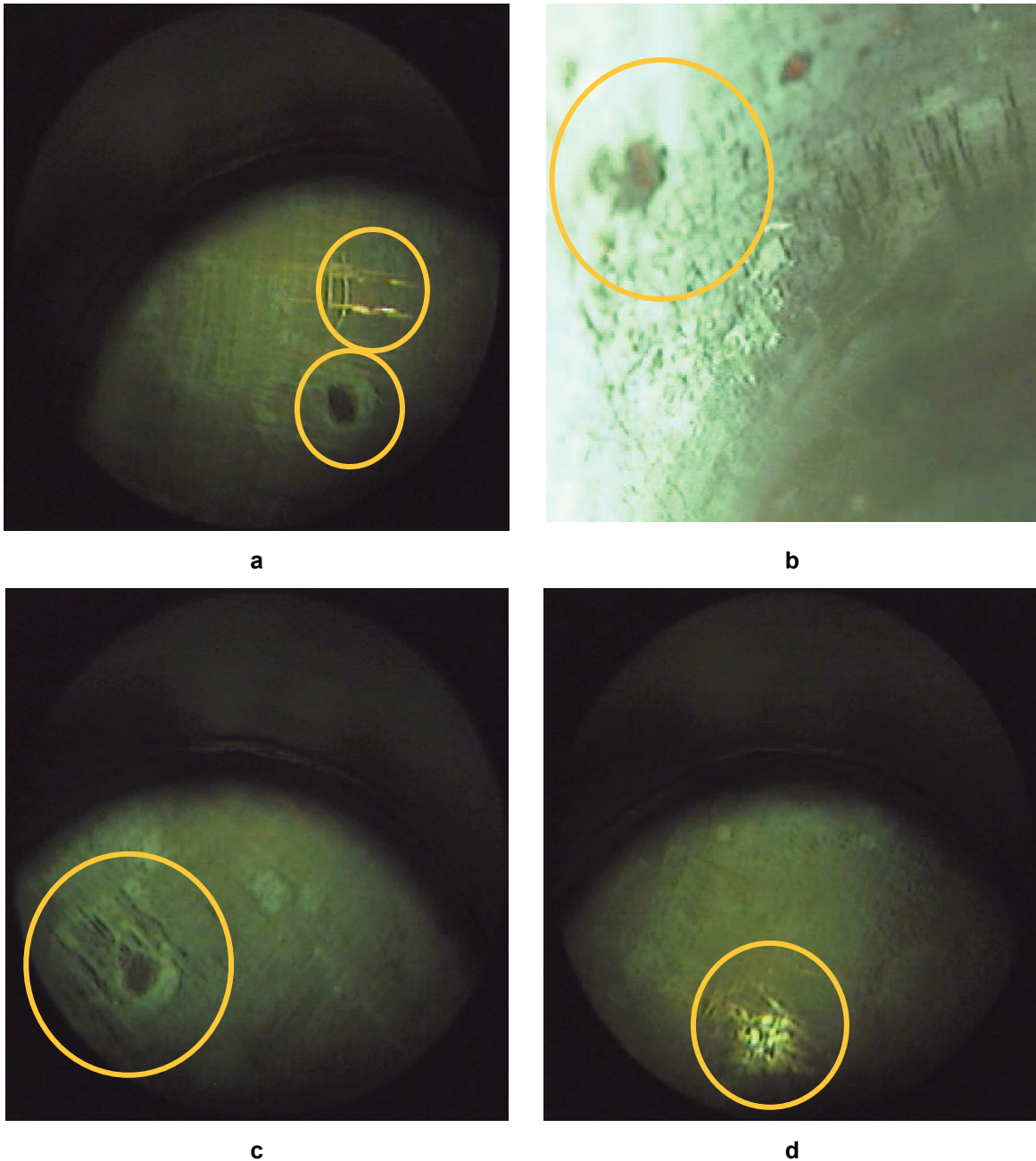


Figura 58: Imagens de defeitos no interior de um molde no material AISI 431 – N350, **a)** oxidação e fraturas, **b)** oxidação, **c)** oxidação e **d)** fraturas

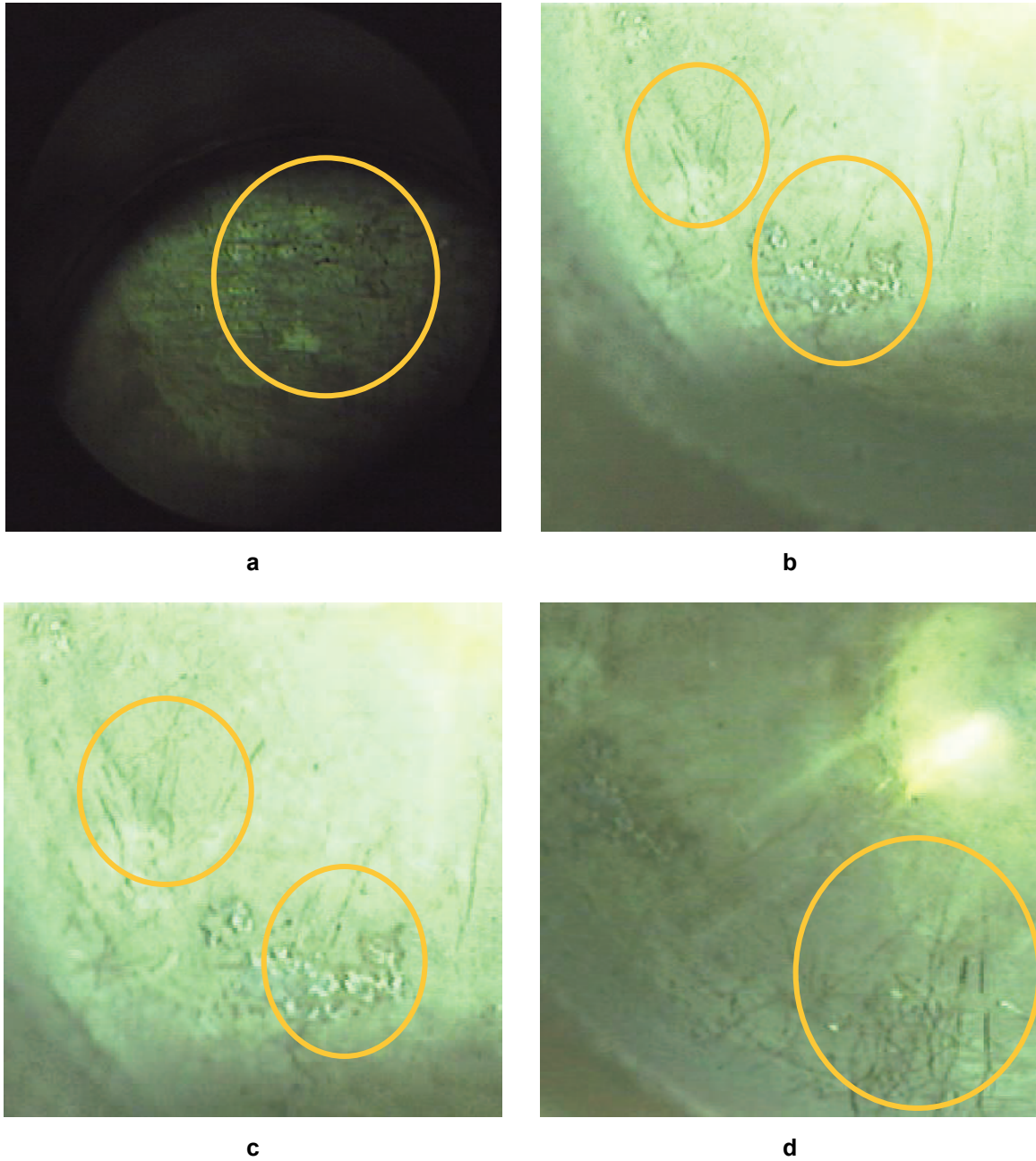


Figura 59: Imagens de defeitos na cavidade de um molde no material AISI 431 – N350, **a)** picados, **b)** picados e fissuras, **c)** picados e fissuras e **d)** fissuras

Os defeitos existentes no molde podem ter sido causados por diversos fatores, sendo os mais relevantes:

- Baixa pureza do acetileno usado para lubrificar o interior do molde;
- Falta de capacidade do material do molde para resistir a choques térmicos de grande amplitude;
- Deterioração e desgaste do molde ao fim de vários ciclos produtivos;

- Má qualidade do material do molde;
- Baixa resistência à corrosão.

Os aços não resistem tanto quanto se desejaria aos choques térmicos. Por vezes, na utilização de acetileno como lubrificante do interior do molde, este fica com pequenas partículas que se vão formando e conseqüentemente provocar defeitos na peça de vidro sob a forma de picados.

Considerando o molde analisado, uma peça desprovida de defeitos internos, existem algumas fendas de fadiga que se iniciaram na superfície do molde e na zona da máxima tensão. A nucleação das fendas de fadiga à superfície foi possivelmente facilitada pelo facto de a deformação plástica dos grãos cristalinos que se encontravam à superfície ser mais fácil que os grão localizados no interior. Assim, depois da análise endoscópica, observaram-se algumas fendas que provocaram defeitos nas peças finais de vidro. Considerando que estamos perante um liga polifásica (aço de alta resistência) como é o caso do material AISI 431 – N350, as fendas nuclearam-se nas descontinuidades existentes à superfície do molde, nomeadamente através de inclusões não metálicas ou partículas duras. Normalmente são partículas de segunda fase ou impurezas que não foram dissolvidas durante o processo de obtenção do material. As micro fendas localizam-se ou nas próprias inclusões ou na interface entre a inclusão e a matriz metálica, zonas em que a concentração de tensões foi mais elevada [29].

A resistência à corrosão também é um fator bastante importante, visto que o ambiente de trabalho dos moldes apresenta condições propícias para o desenvolvimento da corrosão. Sendo a corrosão a deterioração de um material, por acção química ou eletroquímica do meio em que está envolvido, verifica-se que os moldes sofreram alterações indesejáveis nomeadamente desgaste. Além disso também é possível que tenham sofrido modificações estruturais [32]. A corrosão é um processo espontâneo que transforma os materiais em que a sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os objetivos para os quais foram seleccionados [32]

Como possível resolução para eliminação deste tipo de defeitos poderão existir as seguintes opções:

- O acetileno utilizado deve ter a pureza máxima para aplicações industriais (99,5%) e caso os defeitos permaneçam deve ter a pureza utilizada em aplicações medicinais (99,9%);

- Os moldes devem vir acompanhados por um certificado de qualidade do material que ateste que o material do molde é o material pretendido e foi produzido segundo determinadas condições;
- Caso os defeitos permaneçam devem ser experimentados moldes em materiais alternativos, como por exemplo os três materiais alternativos estudados neste projecto.

5. Conclusão

O presente trabalho incidiu sobre a análise realizada a diversos materiais metálicos utilizados na construção de moldes, de onde se destacaram quatro aços inoxidáveis. Mediante esta análise, foram identificadas melhorias que podem conduzir ao incremento de qualidade final das peças de vidro, nomeadamente as hastes dos cálices fabricados pelo processo soprado prensado da Crisal.

Inicialmente procedeu-se a uma análise através do método AHP onde se verificou que, entre os dezasseis materiais pré-selecionados, apenas quatro cumprem os requisitos estabelecidos pela Crisal para o fabrico dos moldes. No conjunto dos materiais inicialmente analisados constavam ligas de aço inoxidável, ferro fundido, bronze e grafite. Após a seleção dos materiais que se consideraram mais indicados para utilizar no processo de fabrico escolhido, foi analisado o comportamento mecânico e real de vários materiais, através de ensaios de caracterização mecânica dos materiais e de ensaios industriais, respetivamente.

Mediante os resultados obtidos nos ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios DMA verificaram-se as diferenças existentes entre os 4 materiais selecionados, destacando-se o aço AISI 630 – V174 como o mais resistente à flexão, tanto à temperatura ambiente como a 380°C. Trata-se assim de um aço de elevada resistência e que poderá ser utilizado no fabrico de grandes lotes de encomendas de peças de vidro.

Foram realizados ensaios industriais em moldes produzidos nos quatro materiais selecionados através do método AHP. Nesses ensaios, verificou-se que as temperaturas medidas em várias zonas da máquina de moldação e nas várias zonas dos moldes foram constantes nos vários materiais. Ou seja, os vários materiais, não apresentaram diferenças significativas de temperatura. Contudo, conclui-se que a zona A da máquina foi a zona que apresentou temperaturas mais elevadas ao longo do processo de moldação, bem como a zona Z do molde, que também apresentou sempre temperaturas mais elevadas. Como melhoria do processo de moldação, poder-se-á otimizar a zona da máquina onde se

mediram as temperaturas mais elevadas, de forma que o molde tenha a mesma temperatura em todo o seu redor, e não apenas numa determinada zona.

Quanto às durezas que os materiais apresentaram antes e depois de cada um dos ensaios industriais, não existiram diferenças significativas, salientando-se o facto do material AISI 314 – H525 apresentar dureza excessivamente baixa e o material com menor variação de dureza ao longo dos vários ensaios ter sido o AISI 431 – VAL4.

Relativamente aos defeitos detetados e analisados nas peças de vidro, existem múltiplas explicações para cada um deles, e muitas mais podem ainda surgir, à medida que se investigam e analisam as variáveis de controlo do processo de fabrico. A temperatura ideal dos moldes, a lubrificação das suas cavidades, o seu arrefecimento e a força de prensagem são variáveis que têm de estar sempre muito bem controladas para garantir a qualidades das peças de vidro. O molde onde foram produzidas as peças com melhor acabamento foi o construído com o material AISI 314 – H525. A variação de pesos das peças não se mostrou muito relevante na comparação entre materiais dos moldes, contudo, o que apresentou melhor resultado foi o AISI 630 – V174 com apenas 2% de variação de peso das peças, o que poderá ser explicado pela elevada dureza deste material.

Pelo exposto, o material AISI 314 – H525 poderá ser utilizado no fabrico de moldes para a produção de peças de vidro de elevadíssima qualidade, independentemente da quantidade de cada produção. Já para peças onde a qualidade não seja fator determinante para o cliente, o material mais indicado será o AISI 630 – V174.

Caso o objetivo da Crisal seja ao nível da otimização do custo dos moldes, então os materiais AISI 431 – VAL4 ou o AISI 431 – N350 serão os mais indicados.

É importante salientar que todos os materiais utilizados nos moldes de fabricação de vidro de mesa têm de obedecer a determinados índices de desempenho, de forma a não comprometer nem a eficiência do processo de fabrico, nem a qualidade final das peças produzidas.

De realçar que este projeto foi apenas o início, ou seja, o ponto de partida para análise dos materiais mais adequados a um processo de fabrico de peças de vidro de mesa, podendo ser aplicados aos restantes processos produtivos da Crisal. Devido á dificuldade em se obter informação e em realizar mais e diferentes ensaios com amostras de material e com os

moldes, é de todo conveniente dar seguimento a este projeto no futuro, pelo que se apresentam algumas propostas de trabalho futuro:

- Analisar mais materiais para fabrico dos moldes para vidro de mesa;
- Analisar materiais para moldes destinados aos processos soprado parado e soprado girado;
- Efetuar mais ensaios industriais, ensaios de dureza aos moldes e ensaios de controlo de qualidade às peças finais de vidro durante mais produções de modo a validar os resultados já obtidos e obter resultados adicionais, eventualmente mais precisos e rigorosos;
- Realizar ensaios de dureza à cavidade do molde e, se possível, com este a uma temperatura de cerca 500°C;
- Efetuar medições de temperatura na cavidade do molde quando este está a ser utilizado no processo produtivo, apesar da elevadíssima dificuldade de ordem operacional e de disponibilidade de equipamento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Bibliografia

- [1] Alves, Fernando J. L., Da Silva, Lucas F. M., Marques, António T., “Materiais de Construção”, editora Publindústria, ISBN-978-989-723-049-3, 2013.
- [2] Crisal, “Manual de Acolhimento”, Libbey Inc., 2010.
- [3] Smith, William F., “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais”, 3ª edição, editora McGRAW-HILL, ISBN 972-8298-68-4, 1998.
- [4] O’ Connor, Rod, “Fundamentos de Química”, editora Harper & Row, 1977.
- [5] Frade, José M. C. B. C., “Conformação Automática de Formas Complexas em Vidro de Mesa” Universidade de Aveiro, Dissertação de Doutoramento, 2010.
- [6] Shreve, R. Norris; Brink Jr, Joseph A., “Indústria de Processos Químicos”, 4ª edição, editora Guanabara, ISBN 85-7030-176-6, 1977.
- [7] Polanco, Raúl, “Apontamentos de Química de Vidro”, Universidade de Guadalajara, 1996.
- [8] Manoel, João A. H. M. C., “Análise de Processos Fabris na BA Vidro”, Universidade do Porto, Projeto de Mestrado, 2010.
- [9] Sorg, “Equipamento e Software de Controlo da Composição da Indústria de Vidro”, 2008.
- [10] Soares, J. Pinto, “Aços, Características Tratamentos”, 6ª edição, editora Publindústria, ISBN 978-989-20-1797-6, 2009.
- [11] Soares, J. Pinto, “Aços para Ferramentas, Características Tratamentos Aplicações”, editora Publindústria, ISBN 978-989-2015-42-2, 2009.

- [12] Totten, George E., “Stell Heat Treatment: Equipment and Process Design”, Metallurgy and Technologies, 2nd edition, editora CRC Press, ISBN-13: 978-0-8493-8454-7, 2006.
- [13] Van Vlack, Lawrence H., “Principios de Ciência e Tecnologia dos Materiais”, 4^a edição, editora campus, ISBN 85-7001-166-0, 1984.
- [14] <http://www.thyssenkrupp-portugal.com/produkte/produkte.html>, Outubro de 2013.
- [15] <http://www.universalafir.pt/item.php?id=91>, Outubro de 2013.
- [16] Kutz, Myer, “Handbook of Materials Selection”, editora Myer Kutz, ISBN 0-471-35924-6, 2002.
- [17] <http://www.bollinghaus.pt/werkstoffe.html?&L=1>, Outubro 2013.
- [18] http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Werkzeugstahl/Warmarbeitsstahl/2999_Thermodur_de.pdf, Janeiro, 2014
- [19] <http://www.ramada.pt/index.php?cat=50&eb=13>, Novembro 2013.
- [20] <http://www.universalafir.pt/item.php?id=168>, Novembro 2013.
- [21] http://www.valbruna-stainless-steel.com/product_search.php, Dezembro 2013.
- [22] Van Vlack, Lawrence H., “Principios de Ciência dos Materiais”, 9^a reimpressão, editora Edgard Blucher LTDA, CDD: 620.112, 1970, 1990.
- [23] Breyfogle III, F. W. Implementing Six Sigma, Smarter Solutions® Using Statistical Methods, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [24] Vasco, Joel, “A Micro Fabricação Aplicada ao Processo de Micro Injecção” Universidade do Minho, Tese de Mestrado, 2006.
- [25] Bañuelas, R., Antony, J., Case Study - Going From Six Sigma to Design for Six Sigma: an Exploratory Study Using Analytic Hierarchy Process, The TQM Magazine, Volume 15, Number 5, 334-344, 2003.

- [26] Nash, William A., “Resistência dos Materiais”, 3ª edição, editora McGRAW-HILL, 1990.
- [27] Menard, Kevin P., “Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction” editora CRC, ISBN 0-8493-8688-8, 1999.
- [28] Shigley, Joseph E., Mischke, Charles R., Budynas, Richard G., “Projeto de Engenharia Mecânica”, 7ª edição, editora Artmed, ISBN 85-363-0562-2, 2005.
- [29] Moura Branco, Carlos A. G., “MECÂNICA DOS MATERIAIS”, 4ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Serviço de Educação e Bolsas, ISBN 972-31-1147-0, 2006.
- [30] Manual de Defeitos, Libbey Portugal, 2012.
- [31] Bartuska, Miroslav, et Al, “Glass Defects”, Published by Glass Service and Práh, 1st edition, ISBN: 978-80-7252-217-0, 2001.
- [32] Gentil, Vicente, “Corrosão”, 2ª edição, editora Guanabara Dois SA, ISBN 85-7030-024-7, 1982.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

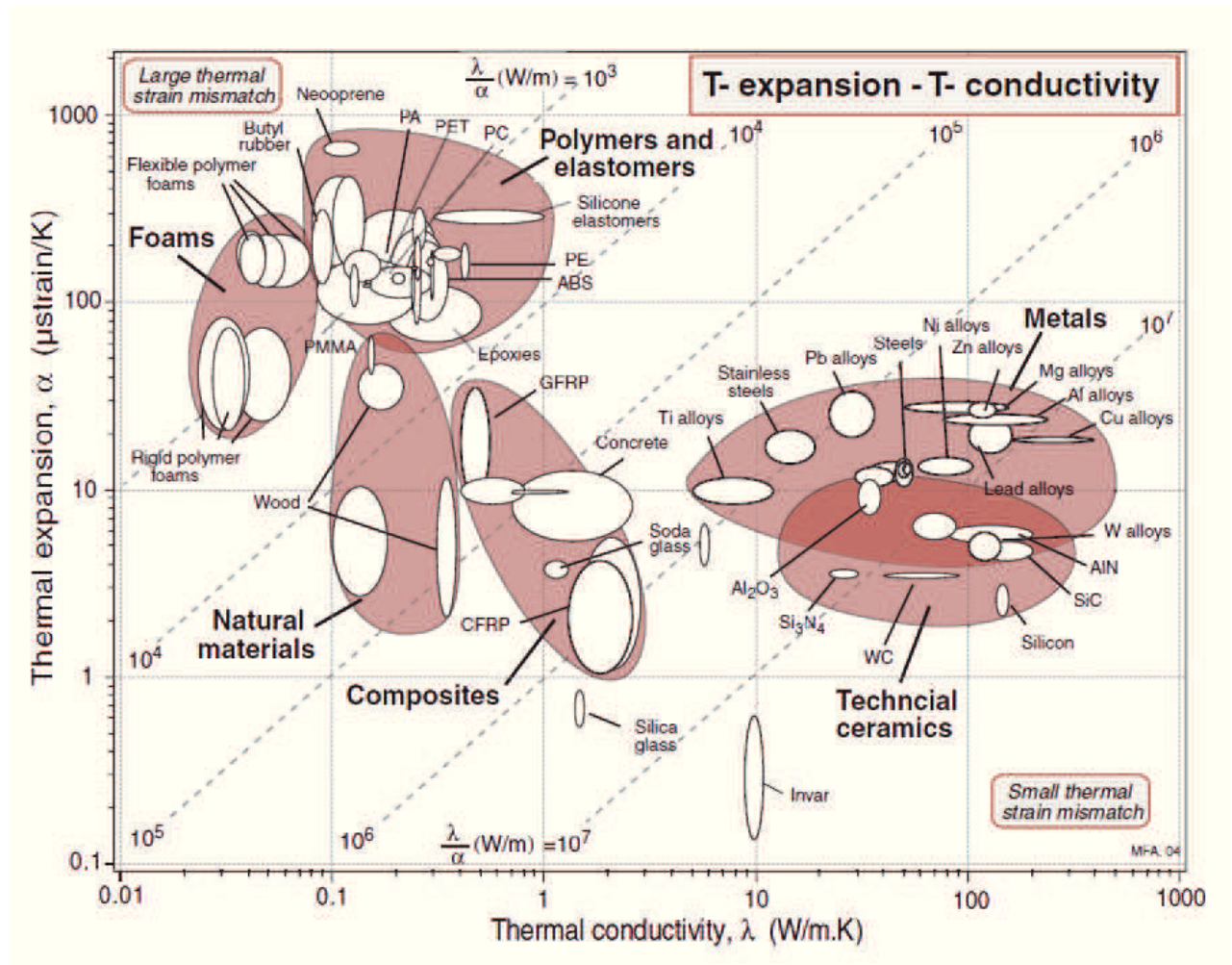
Anexo I

| Elemento de liga | C | Si | Mn (1) | Mn (2) | Cr | Ni (1) | Ni (3) | Al | W | V | Co | Mo | Cu | P | S | |
|-------------------------|--------------------------|-----|--------|--------|-----|--------|--------|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| Propriedades mecânicas | Dureza | ↑↑↑ | ↑ | ↑ | ↓↓↓ | ↑↑ | ↑ | ↓↓ | - | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | - |
| | Resistência à tracção | ↑↑↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑ | ↑ | - | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | - |
| | Limite de elasticidade | ↑↑↑ | ↑↑ | ↑ | ↓ | ↑↑ | ↑ | ↓ | - | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑ | - |
| | Alongamento | ↓ | ↓ | ~ | ↑↑↑ | ↓ | ~ | ↑↑↑ | - | ↓ | ~ | ↓ | ↓ | ~ | ↓ | ↓ |
| | Estricção | - | - | - | - | ↓ | - | ↑↑ | ↓ | ↓ | ~ | ↓ | ↓ | - | ↓ | ↓ |
| | Resistência ao impacto | ↓ | ↓ | - | - | ↓ | - | ↑↑↑ | ↓ | ~ | ↑ | ↓ | ↑ | - | ↓↓↓ | ↓ |
| | Elasticidade | ↓ | ↑↑↑ | ↑ | - | ↑ | - | - | - | - | ↑ | - | - | - | - | - |
| | Estabilidade a quente | ↓ | ↑ | ~ | - | ↑ | ↑ | ↑↑↑ | - | ↑↑↑ | ↑↑ | ↑↑ | ↑↑ | ↑ | - | - |
| Velocidade Crítica | | ↓ | ↓ | ↓↓ | ↓↓↓ | ↓↓ | ↓↓ | - | ↓↓ | ↓↓ | ↑↑ | ↓↓ | - | - | - | |
| Formação de carbonetos | | ↓ | ~ | - | ↑↑ | - | - | - | ↑↑ | ↑↑↑↑ | - | ↑↑↑ | - | - | - | |
| Resistência ao desgaste | | ↓↓↓ | ↓↓ | - | ↑ | ↓↓ | - | - | ↑↑↑ | ↑↑ | ↑↑↑ | ↑↑ | - | - | - | |
| Forjabilidade | | ↓ | ↑ | - | ↓ | ↓ | ↓↓↓ | ↓↓ | ↓↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓↓↓ | ↓ | ↓↓↓ | |
| Maquinabilidade | ↓ | ↓ | ↓ | ↓↓↓ | - | ↓ | ↓↓↓ | - | ↓↓ | - | ~ | ↓ | ~ | ↑↑ | ↑↑↑ | |
| Oxidação a quente | ↓ | ↓ | ~ | ↓↓ | ↓↓↓ | ↓ | ↓↓ | ↓↓ | ↓↓ | ↓ | ↓ | ↑↑ | ~ | - | - | |
| Aptidão à Nitruração | | ↓ | ~ | - | ↑↑ | - | - | ↑↑↑ | ↑ | ↑ | - | ↑↑ | - | - | - | |
| Resistência à corrosão | ~ | - | - | - | ↑↑↑ | - | ↑↑ | - | - | ↑ | - | - | ↑ | - | ↓ | |
| Aços magnéticos | Histerese | ↑↑ | ↓↓ | | | ↓ | | | ↓↓ | | ~ | | ~ | ↑ | - | ↑↑ |
| | Permeabilidade máxima | ↓↓ | ↑↑ | | ↓ | ↑ | | | ↑↑ | | ~ | | ~ | ↓ | - | ↓↓ |
| | Força coersiva | ↑↑↑ | ↓↓ | | ↑ | ↓ | | | ↓↓ | | ~ | | ~ | ↑ | | ↑↑↑ |
| | Remanência | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Perdas eléctricas (Watt) | ↑↑ | ↓↓↓ | | ↑ | ↓ | | | ↓↓↓ | | ~ | | ↓ | ↑ | - | ↑↑ |

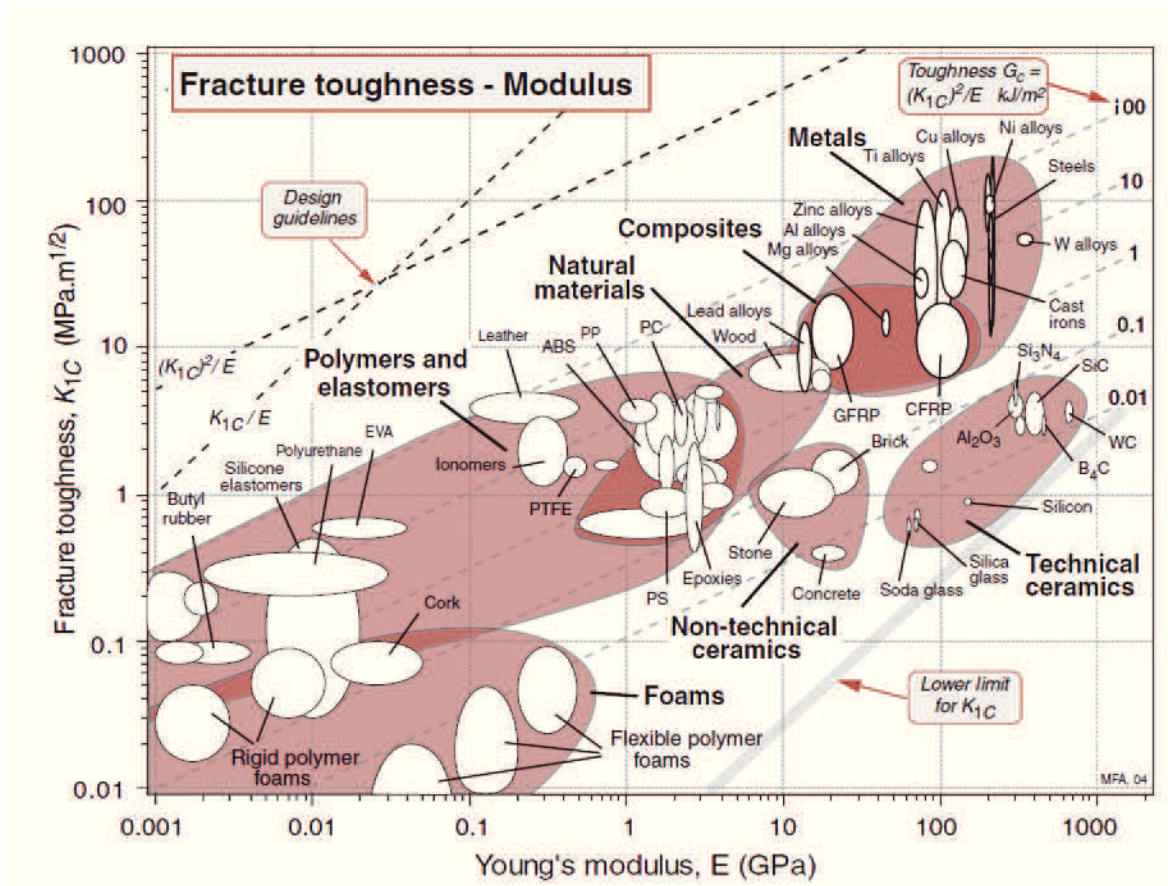
(1) = em aços perlíticos
 (2) = em aços austeníticos
 (3) = em aços CrNi austeníticos

↑ = aumento
 ↓ = redução
 várias setas = maior influência
 - = não característica ou desconhecida
 ~ = aproximadamente constante

Anexo II



Anexo III



Anexo IV



UNIVERSAL AFIR
Aços Especiais e Ferramentas, S.A.

Representante exclusivo em Portugal dos aços especiais Böhler

Marca: H 525

Nº de material: 1.4841

Perfis Disponíveis: ● —

Estado de fornecimento: AUSTENÍTICO

Aplicações: Canas pinoétricas, queimadores, válvulas para gases corrosivos, muflas e componentes para a indústria.

Categoria: AÇOS INOXIDÁVEIS

Cores de Identificação: Castanho



BÖHLER

Normas:

| Euronorma EN | AISIS | AFNOR | DIN | Werk. N.º |
|---------------------|-------|------------------|---------------------|-----------|
| (X 15 CrNiSi 25 20) | 310 | (Z 15 CNS 25-20) | (X 15 CrNiSi 25 20) | 1.4841 |

Composição Química (%):

| C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | V | W | Outros |
|--------|------|--------|-------|----|-------|---|---|--------|
| ≤ 0,20 | 1,50 | ≤ 2,00 | 25,00 | | 20,50 | | | |

Características Mecânicas:

| Dureza (HB) Máx. | Rm N/mm ² | Rp 0,2 N/mm ² | A (%) Lo=5do |
|------------------|----------------------|--------------------------|--------------|
| 250 | | | |

Forjamento e Tratamento Térmico:

| Forjamento | Recozimento | Redução de Tensões | Cementação | Têmpera | Meio de Arrefecimento | Revenido |
|------------|-------------|--------------------|------------|---------|-----------------------|----------|
| | 1050 - 1100 | | | | | |

Anexo V

BÖHLER N350

Warmformgebung

Schmieden:

1100 bis 800°C / Langsame Abkühlung

Hot forming

Forging:

1100 to 800°C / Slow cooling

Wärmebehandlung

Weichglühen:

680 bis 800°C / Ofen, Luft
Härte nach dem Weichglühen:
max. 295 HB.

Annealing:

680 to 800°C / Furnace, Air
Hardness after annealing:
max. 295 HB.

Härten:

950 bis 1050°C / Öl, Luft

Hardening:

950 to 1050°C / Oil, Luft

Anlassen:

I...750 bis 800°C + 650 bis 700°C¹⁾

II...600 bis 650°C

1) bei Ni an der unteren Analysengrenze kann 1 x Anlassen bei 620 bis 720°C ausreichen.

Tempering:

I...750 to 800°C + 650 to 700°C¹⁾

II...600 to 650°C

1) If Ni at the lower limit of analysis, one tempering at 620 to 720°C can be sufficient.

Gefüge im geglühtem Zustand:

Ferrit + Karbid

Structure as annealed:

Ferrite + carbide

Gefüge im vergütetem Zustand:

Anlassgefüge

Structure as hardened and tempered:

Tempered martensite

BÖHLER N350

Physikalische Eigenschaften


Physical properties

| | | | |
|---|------|-----------------------|------------------------|
| Dichte bei / Density at | 20°C | 7,70 | kg/dm ³ |
| Wärmeleitfähigkeit bei / Thermal conductivity at | 20°C | 25,0 | W/(m.K) |
| Spezifische Wärme bei / Specific heat at | 20°C | 460 | J/(kg.K) |
| Spez. elektr. Widerstand bei / Electrical resistivity at | 20°C | 0,70 | Ohm.mm ² /m |
| Elastizitätsmodul bei / Modulus of elasticity at | 20°C | 215 x 10 ³ | N/mm ² |
| Magnetisierbarkeit | | | vorhanden |
| Magnetic properties | | | magnetic |

| Wärmeausdehnung zwischen 20°C und ...°C, 10 ⁻⁶ m/(m.K) bei | Temperatur / Temperature | 10 ⁻⁶ m/(m.K) |
|--|-----------------------------|--------------------------|
| Thermal expansion between 20°C and ...°C, 10 ⁻⁶ m/(m.K) at | 100°C | 10,0 |
| | 200°C | 10,5 |
| | 300°C | 10,5 |
| | 400°C | 10,5 |

| Elastizitätsmodul, 10 ³ N/mm ² bei | Temperatur / Temperature | 10 ³ N/mm ² |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| Modulus of elasticity, 10 ³ N/mm ² at | 20°C | 215 |
| | 100°C | 212 |
| | 200°C | 205 |
| | 300°C | 200 |
| | 400°C | 190 |

Anexo VI

| | | |
|---|--------------------------|--------|
|  Acciaierie Valbruna S.p.A. | CATALOGO GENERALE ACCIAI | Rev. 0 |
| | VAL4 | |

CORRISPONDENZE:

| AISI | EN |
|------|--------|
| 431 | 1.4057 |

DESCRIZIONE:

Acciaio inossidabile martensitico, temprabile, offre resistenza a corrosione e alla fatica superiore a quella degli acciai al solo cromo.

COMPOSIZIONE CHIMICA (indicativa):

| C % | Cr % | Ni % | Mn % | Si % | S % |
|-------------|-----------|---------|------|------|-----|
| 0,15 - 0,20 | 15,5 - 17 | 1,5 - 2 | | | |

CARATTERISTICHE FISICHE:

| | | | |
|---|-----------------|-----------------|--|
| Densità (gr / cm ³ a 20°C) | 7,8 | | |
| Modulo di elasticità (N / mm ²) | 216.000 | | |
| Coefficiente di dilatazione termica (10 ⁻⁶ m / m °C) | 20• 200 °C 10,5 | 20• 400 °C 11,0 | |
| Conducibilità termica (W / m K a 20°C) | 25 | | |
| Resistività elettrica (Ω × mm ² / m a 20°C) | 0,70 | | |
| Magnetismo | Magnetico | | |

CARATTERISTICHE MECCANICHE:

| Stato fornitura: | HB | R _m (N/mm ²) | R _{p 0,2} (N/mm ²) | A ₅ % |
|------------------|-------|--|--|---------------------|
| Ricotto | ≤ 290 | | | |
| Bonificato | | 800 - 950 | ≥ 650 | ≥ 14 |

TRATTAMENTI TERMICI:

| | Temperatura di trattamento | Mezzo di raffreddamento |
|------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Ricottura | 650 - 750 | Lento in forno |
| Bonificato | Tempra 980 – 1180 °C in aria / olio | Rinvenimento a 650 - 700°C |

LAVORAZIONI A CALDO:

| FUCINATURA | Intervallo di Temperatura | Mezzo di raffreddamento |
|------------|---------------------------|---------------------------------|
| | 950 - 1180 °C | Raffreddare lentamente in forno |

RESISTENZA ALLA CORROSIONE:

Fra gli acciai martensitici è il più resistente alla corrosione, buon comportamento anche in atmosfera marina.


SALDABILITÀ:

Di norma non viene impiegato per applicazioni che richiedono la saldatura. Qualora questa sia necessaria occorre preriscaldare a 300 – 400°C. Subito dopo saldatura non raffreddare sotto i 100 – 150°C e procedere a immediato rinvenimento.

APPLICAZIONI:

Alberi di pompe, parti di valvole, coltelleria subacquea, corpi di centrifughe per l'industria del latte e alberi portaelica per acqua dolce.

Anexo VII

| | | |
|---|----------------------------|--------|
|  Acciaierie Valbruna S.p.A. | Material Data Sheet | Rev. 0 |
| V174 | | |

STANDARD DESIGNATIONS:

| AISI | EN |
|--------------|-------------------------|
| 630 (17-4PH) | 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4) |

DESCRIPTION:

Precipitation hardening Cr-Ni-Cu stainless steel. It shows high mechanical properties and good toughness at room temperature and under zero.

CHEMICAL ANALYSIS (approximate):

| C % | Si % | Mn % | Cr % | Ni % | Mo % | Cu % | Nb % | P % | S % |
|--------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------------|--------|--------------|
| ≤ 0,07 | ≤ 0,7 | ≤ 1,5 | 15 - 17 | 3 - 5 | ≤ 0,6 | 3 - 5 | 0,15 - 0,45 | ≤ 0,04 | 0,015 - 0,03 |

PHYSICAL PROPERTIES:

| | | | |
|---|-----------------|-----------------|--|
| Density (gr / cm ³ a 20°C) | 7,8 | | |
| Modulus of elasticity (N / mm ²) | 200.000 | | |
| Mean thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ m / m °C) | 20• 200 °C 10,8 | 20• 400 °C 11,7 | |
| Heat conductivity (W / m K a 20°C) | 15 | | |
| Specific electric resistance (Ω × mm ² / m a 20°C) | 0,77 | | |
| Magnetizable | Magnetic | | |

MECHANICAL PROPERTIES:

| Delivery condition: | HB | R _m (N / mm ²) | R _{p0,2} (N / mm ²) | A ₅ % |
|-------------------------------------|-----------|---|--|---------------------|
| Solution heat treated (Condition A) | 363 max | | | |
| Age hardened H900 | 388 - 444 | ≥ 1310 | ≥ 1170 | ≥ 10 |
| Age hardened H1150 | 277 min | ≥ 930 | ≥ 725 | ≥ 16 |
| Age hardened H1150 Double | 255 - 311 | ≥ 860 | ≥ 725 | ≥ 16 |

HEAT TREATMENTS:

| | Heating temperature | Cooling system |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|
| Solution heat treated (Condition A) | 1050°C | Water |
| Age hardened H900 | 480°C | Air |
| Age hardened H1150 | 620°C | Air |
| Age hardened H1150 Double | 620°C Double | Air |

HOT WORKING:

| HOT FORGING | Temperature range | Cooling system |
|-------------|-------------------|----------------------|
| | 1050 - 1200°C | Furnace slow cooling |

CORROSION RESISTANCE:

V174 shows corrosion resistance comparable to AISI 304 SS. It can substitute AISI 304 for many applications. Anyway, the choice of this steel is due, most of all, to its high strength.


WELDABILITY:

It can be welded without problems. If the weld bead must shows properties near to base metal, the electrodes shall have similar composition; otherwise, the electrodes shall be in austenitic steel. Residual thermal stresses can be removed with a post welding heat treatment (200 - 300°C).

APPLICATIONS:

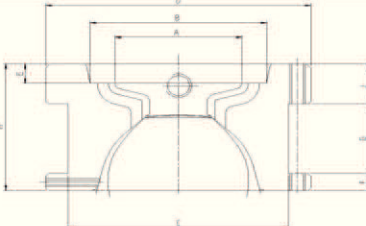
Engineering applications, nuclear, naval, chemical industry, transportations, weaponry, constructions.

ANEXO X

| | | |
|---|--------------------------|------------|
|  <p>Libbey PORTUGAL Crisal - Marinha Grande</p> | FICHA DE CONTROLO DE | DATA: |
| | MOLDES DE HASTES (ANTAS) | 02-07-2014 |

| | | |
|-------------------------------|---|----------------------------------|
| Referência: <u>Haste A 68</u> | Des N ^o : <u>52.08.750 a</u> | Rubrica: <u>Valdemiro Pontes</u> |
|-------------------------------|---|----------------------------------|

Controlo de ferramenta reparada, chegaram a 01,02-07-2014 da firma: Plasglass



Na reparação ter em **ATENÇÃO** em todos os moldes a afinação do ganzepe.as mossa_rebarbas, juntas desencontradas rebaixo 0,5_juntas abertas_boleadas_poros etc...
PS... ter também em **ATENÇÃO** nestes moldes quando forem cheios no diâmetro ext. Manter a cota do rebaixo (zona roscada) que o desenho pede que é de 1m/m.

Informação sobre as cores e as respectivas cotas:
 Cor **VERMELHA** informa que a cota está para-além do MÁXIMO
 Cor **AZUL** informa que a cota está para-além do MÍNIMO
 Ambas as cores informam cotas fora das tolerâncias pretendidas.

COTAS DO DESENHO

| | A | B | D | | | | | | |
|------|-------|--------------------|--------|--|--|--|--|--|--|
| Max. | 80,68 | 95x10 ^o | 120,00 | | | | | | |
| Nom. | 80,40 | 95x10 ^o | 119,98 | | | | | | |
| Min. | 80,38 | 95x10 ^o | 119,60 | | | | | | |

COTAS VERIFICADAS

| Peça/Rubrica | A | B | D | | | | | | |
|--------------|---|--------------------|--------|--|--|--|--|--|--|
| 1 | 80,49 80,86 | 95x10 ^o | 119,62 | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | 80,46 80,92 | 95x10 ^o | 119,70 | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | |
| 22 | 80,65 81,00 | 95x10 ^o | 119,59 | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | |
| 24 | 80,56 80,92 | 95x10 ^o | 119,61 | | | | | | |

COTAS DO DESENHO

| | A | B | D | | | | | | | | | |
|------|-------|--------|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Max. | 80,68 | 95x10º | 120,00 | | | | | | | | | |
| Nom. | 80,40 | 95x10º | 119,98 | | | | | | | | | |
| Min. | 80,38 | 95x10º | 119,60 | | | | | | | | | |

Referencia: Haste A 68 Des. Nº 52.08.750 a Rubrica: Valdemiro Pontes

COTAS VERIFICADAS

| Peça/Rubrica | A | B | D | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------|--------|---------------------------|--|--|--|------------|--|--|--|--|
| 25 | 80,58 80,77 | 95x10º | 119,63 | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 80,55 80,83 | 95x10º | 119,62 | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 80,51 81,06 | 95x10º | 119,54 | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 80,44 81,08 | 95x10º | 119,39 | arestas com mossas | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 80,52 80,65 | 95x10º | 119,95 | | | | | H 525 ZF 2 | | | | |
| 2 | 80,52 80,67 | 95x10º | 119,88 | | | | | H 525 ZF 2 | | | | |
| 3 | 80,56 80,55 | 95x10º | 119,87 | aresta com pequena mossas | | | | 1 4057 | | | | |
| 4 | 80,54 80,53 | 95x10º | 119,86 | poros | | | | 1 4057 | | | | |
| 5 | 80,53 80,59 | 95x10º | 119,93 | | | | | 17 - 4 PH | | | | |
| 6 | 80,55 80,57 | 95x10º | 119,85 | aresta com pequena mossas | | | | 17 - 4 PH | | | | |

Observações: _____

