Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Manuel Cunha Ribeiro

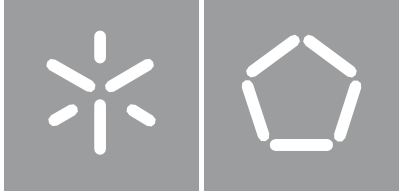
Influência do acabamento superficial do molde na refletividade ótica de polímeros

setembro de 2026

Influência do acabamento superficial do molde na refletividade ótica de polímeros

Carlos Manuel Cunha Ribeiro

UMinho | 2026



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Manuel Cunha Ribeiro

Influência do acabamento superficial do molde na refletividade ótica de polímeros

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor António José Vilela Pontes

setembro de 2026

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual
CC BY-NC-SA

Agradecimentos

Gostaria de, primeiramente, expressar a minha profunda gratidão a todas as pessoas que, ao longo de todo o meu percurso académico, se cruzaram comigo e, de várias e distintas maneiras, contribuíram para o meu crescimento, não só a nível académico como também pessoal e profissional. Em particular:

Ao meu orientador, Professor Doutor António Pontes, pelo apoio, orientação, incentivo e empenho prestados ao longo de toda a dissertação e que foram importantes ao longo deste percurso.

À Universidade do Minho, pelo compromisso em compartilhar conhecimento e ensinar com excelência ao longo destes anos de formação académica e em especial à diretora do curso Professora Doutora Carla Martins. Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, Engenheiro Manuel Nadais e Engenheiro Maurício, ao Engenheiro João Rodrigues do DoneLab, pelo auxílio na realização dos trabalhos experimentais, onde a sua experiência e orientações contribuiram significativamente para a realização deste projeto.

Gostaria também de agradecer, em particular, ao Alberto Santos pela oportunidade única que me concedeu e na qual lhe estarei imensa e genuinamente grato. A todos os colaboradores da Multiborracha que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu colega de mestrado Gustavo Santana, pelo apoio, amizade, partilha e camaradagem constantes ao longo do tempo todo.

À minha mãe, pela presença constante, amor e apoio incondicional em todas as fases da minha vida e em especial ao meu paí pelo mesmo e pela pressão extra que sempre colocou para atingir este objetivo.

Aos meus irmãos e avós, pelo carinho, incentivo, valores e por fazerem de mim uma pessoa melhor.

À minha esposa Ana Ribeiro, por todo o apoio, paciência, amizade e amor que me dedica diariamente. Tenho sorte.

Por último ao meu querido filho Carlos Duarte por ser a minha maior força, inspiração e amor neste mundo. Espero que esta jornada que atravessei lhe tenha servido de inspiração para o seu futuro, sabendo que poderá sempre contar com o pai em tudo na vida.

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho: 16 de setembro de 2026

Nome completo: Carlos Manuel Cunha Ribeiro

Assinatura: Assinado por: **Carlos Manuel Cunha Ribeiro**
Num. de Identificação: 13627180
Data: 2026.09.16 21:11:49+01'00'

Resumo

A crescente utilização de componentes poliméricos em aplicações óticas tem aumentado a necessidade de compreender os fatores que influenciam a qualidade superficial e o desempenho ótico das peças produzidas por moldação por injeção. O acabamento superficial do molde condiciona a topografia da superfície moldada e, consequentemente, a interação da luz com o material.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do acabamento superficial do molde na refletividade ótica de polímeros processados por moldação por injeção. Foram estudados o PMMA e o PC, utilizando os acabamentos superficiais Ra 0,034 e Ra 0,055 e diferentes condições de processamento, nomeadamente velocidade e pressão de injeção e temperatura do molde.

Após a produção das amostras, foram caracterizadas a rugosidade superficial e o brilho, de modo a avaliar a replicação da superfície moldante e a sua influência no comportamento ótico das peças. A rugosidade foi analisada através de parâmetros de perfil superficial e o brilho através de medições a 20° e 60°, permitindo avaliar a reflexão especular da luz. Os resultados demonstraram que o acabamento superficial do molde influencia e condiciona a qualidade superficial das peças. O PMMA apresentou maior estabilidade face às alterações das condições de processamento, com menor variabilidade da rugosidade e maior consistência na reprodução da superfície moldante. O PC revelou maior sensibilidade às condições de processamento, mas apresentou valores de brilho superiores. Apesar da estabilidade do PMMA, os seus valores de rugosidade tenderam a estabilizar em níveis superiores. A análise conjunta da rugosidade e do brilho demonstrou que a refletividade ótica não depende exclusivamente da qualidade geométrica da superfície, no entanto é também influenciada pelas propriedades reológicas dos materiais, entre outros, o índice de fluidez. O maior índice de refração do PC contribuiu para níveis superiores de reflexão especular, enquanto o PMMA destacou-se pela estabilidade do processo e pela homogeneidade na replicação da superfície.

Conclui-se que a obtenção de componentes poliméricos com fim ótico depende da combinação entre o acabamento superficial do molde, as condições de processamento e as propriedades do material.

Palavras-chave: Moldação por injeção; Acabamento superficial do molde; Rugosidade superficial; Brilho; Refletividade ótica; PMMA; Policarbonato; SPI.

Abstract

The growing use of polymeric components in optical applications has increased the need to understand the factors that influence the surface quality and optical performance of parts produced by injection moulding. The surface finish of the mould determines the topography of the moulded surface and, consequently, the interaction of light with the material.

The aim of this study was to evaluate the influence of the mould's surface finish on the optical reflectivity of polymers processed by injection moulding. PMMA and PC were studied, using Ra 0,034 and Ra 0,055 surface finishes and different processing conditions, namely injection speed, injection pressure and mould temperature.

Following the production of the samples, surface roughness and gloss were characterised in order to assess the replication of the moulding surface and its influence on the optical behaviour of the parts. Roughness was analysed using surface profile parameters, and gloss was measured at 20° and 60°, enabling the assessment of specular light reflection. The results demonstrated that the surface finish of the mould influences and determines the surface quality of the parts. PMMA exhibited greater stability in the face of changes in processing conditions, with lower variability in roughness and greater consistency in the reproduction of the moulding surface. PC proved to be more sensitive to processing conditions but exhibited higher gloss values. Despite the stability of PMMA, its roughness values tended to stabilise at higher levels. A joint analysis of roughness and gloss showed that optical reflectivity does not depend solely on the geometric quality of the surface; it is also influenced by the rheological properties of the materials, including, amongst others, the fluidity index. The higher refractive index of PC contributed to higher levels of specular reflection, whilst PMMA stood out for its process stability and the uniformity of the surface replication.

It can be concluded that the production of polymeric components for optical applications depends on the combination of the mould's surface finish, the processing conditions and the material's properties.

Keywords: Injection moulding; Mould surface finish; Surface roughness; Gloss; Optical reflectivity; PMMA; Polycarbonate; SPI.

ÍNDICE

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros ii

Agradecimentos iii

Declaração de Integridade iv

Resumo v

Abstract vi

Lista de Abreviatura e Siglas xii

Lista de Figuras xiii

Lista de Tabelas xviii

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Enquadramento Geral 1

1.2. Motivação 3

1.3. Definição do Problema 4

1.4. Objetivos 4

1.5. Estrutura da Dissertação 5

2. ESTADO DA ARTE 7

2.1. Moldação por Injeção 7

2.1.1. Ciclo de moldação 7

2.1.2. Molde 9

2.1.3. Processamento 11

2.1.3.1. Influência da Velocidade de Injeção 12

2.1.3.2. Influência da Temperatura 13

2.1.3.3. Influência da Pressão 14

2.2. Polímeros 15

2.2.1. Classificação dos Materiais Poliméricos 16

2.2.2. Termoplásticos amorfos 17

2.2.3. Termoplásticos semicristalinos 18

2.2.4. Polimetilmetacrilato (PMMA) 19

2.2.5. Policarbonato (PC) 20

2.2.6. Propriedades gerais do PMMA e do PC 22

2.3. Aços 23

2.3.1. Influência do Aço no Acabamento Superficial 23

2.3.2. Aço Inox AISI 420 24

2.3.3. Polimento de Alto Brilho 26

2.3.3.1. Polimento Manual 29

2.3.3.2. Polimento Eletroquímico e Químico. 30

2.3.3.3. Polimento a laser 33

2.4. Rugosidade 34

2.4.1. Princípios 34

2.4.2. Medição da rugosidade 35

2.4.3. Parâmetros de avaliação da rugosidade 37

2.5. Escala 41

2.6. Brilho 42

2.6.1. Princípios 42

2.6.2. Medição e parâmetros de avaliação do brilho 43

2.6.3. Fundamentos Óticos e Índice de Refração 45

2.7. Refletividade ótica e propriedades 47

2.7.1. Natureza da Luz Visível e Interação com Polímeros 47

2.7.2. Quantificação da Refletividade Ótica 48

3. TRABALHO EXPERIMENTAL 49

3.1 Medologia do Trabalho Experimental 49

3.1.1. Equipamentos Utilizados 52

3.1.1.1. Rugosímetro 52

3.1.1.2. Medidor de Brilho 53

3.1.1.3. Máquina de Injeção 53

3.2. Meios Experimentais 55

3.2.1. Aço AISI 420 55

3.2.2. Acabamento dos postiços nº201 e nº202. 56

3.2.3. Materiais Poliméricos Utilizados 57

3.3. Ensaios e Caracterizações 59

3.3.1. Ensaios Realizados 59

3.3.2. Caracterização dos postiços nº 201 e nº202. 59

3.3.3. Caracterizações das peças PMMA – Rugosidade 61

3.3.4. Caracterizações das peças PC – Rugosidade 65

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 69

4.1. Avaliação da Capacidade de Replicação Geométrica dos Polímeros 69

4.1.1. Análise do Comportamento do PMMA 69

4.1.2. Análise do Comportamento do PC 71

4.2. Análise comparativa entre rugosidades do PMMA e do PC 73

4.3. Avaliação do Brilho na Refletividade Ótica 74

4.3.1. Análise do Brilho do PMMA 75

4.3.2. Análise do Brilho do PC 79

4.4. Análise Global da Refletividade Ótica dos Materiais Estudados 83

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 85

5.1. Conclusão 85

5.2. Propostas de Trabalho Futuro 86

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88

ANEXOS 100

ANEXO I – Ficha Técnica PMMA Acryplas HD03 da Wanhua 100

ANEXO II – Ficha Técnica PC *1220R* da *Lotte Chemical* 102

ANEXO III – Ficha Técnica Polyblak 1850 da *A. Schulman* 104

ANEXO IV – Tabela dos valores obtidos de rugosidade e brilho das amostras em PMMA 105

ANEXO V – Tabela dos valores obtidos de rugosidade e brilho das amostras em PC..... 106

ANEXO VI – Desvios de rugosidade dos acabamentos e polímeros..... 107

Lista de Abreviatura e Siglas

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

ASTM – American Society for Testing and Materals

CCD – Dispositivo de Carga Acoplada

CMOS – Semicondutor de Óxido Metálico Complementar

DOI – Distinção de Imagem

HRC – Dureza Rockwell C

ISO – International Organization for Standardization

LED – Diodo Emissor de Luz

LVDT – Transformador Diferencial Variavel Linear

n – Indice de Refração

PC – Policarbonato

PMMA – Polimetilmetacrilato

PVD – Depositção Fisca a Vapor

RΔ_q – Raiz Quadrada Média dos Declives do Perfil Avaliado

Ra – Rugosidade Média Aritmética

Rpc – Número de Largura Média dos Elementos do Perfil Avaliado

Rq – Rugosidade Quadrática Média

Rt – Altura Máxima do Perfil Avaliado

Rz – Altura Máxima do Perfil

SEM – Microscopia Ótica de Varrimento

SPI – Society of the Plastics Industry

Tg – Temperatura de Transição Vitrea

Tm – Temperatura de Fusão

UB – Unidade de Brilho

μm – micron

UV – Ultravioleta

Lista de Figuras

Figura 1. Desenho esquemático de uma máquina de injeção (Mitschang & Hildebrandt, 2012). 7

Figura 2. Ciclo de moldação (Cunha. A et al., 2003). 8

Figura 3. Esquema ilustrativo da composição de um molde convencional (Boothroyd et al., 2001). 10

Figura 4. Classificação dos polímeros (Cunha & Pouzada, 1997)..... 16

Figura 5. Estrutura linear e ramificada (termoplásticos). (Charles A. Harper, 2000) 17

Figura 6. Síntese do PMMA a partir do metacrilato de metilo. (Prezotto, 2019) 19

Figura 7. Unidade repetitiva do policarbonato de bisfenol A. (Berins, 2002) 20

Figura 8. Desenho esquemático da camada passiva (Alcântara, 2021). 25

Figura 9. Microestrutura do aço AISI 420 na condição de fornecimento (recozido) (adaptado de (Alcántara Alza et al., 2023)). 25

Figura 10. Imagem de microscopia SEM de abrasivo de diamante tradicional. (Tsai & Hoo, 2019) 27

Figura 11. Ilustração esquemática de uma célula de eletropolimento. (Chaghazardi & Wüthrich, 2022) 30

Figura 12. a) Etapas do polimento químico. b) mecanismo de remoção. (Yan et al., 2025)..... 32

Figura 13. Representação esquemática do polimento a laser. (Nesli & Yilmaz, 2021) 34

Figura 14. Esquema de um rugosímetro de contacto. (Bhushan, 2000)..... 35

Figura 15. Esquema de um Perfilómetro ótico. (Bhushan et al., 1985) 36

Figura 16. Definição do desvio médio aritmético do perfil (Ra). (Gadelmawla et al., 2002) 38

Figura 17. Definição da altura máxima do perfil em 10 pontos (Rz ISO e DIN). (Gadelmawla et al., 2002) 38

Figura 18. Definição da altura máxima do perfil (Rt). (Gadelmawla et al., 2002) 39

Figura 19. Contagem do número de larguras médias dos elementos do perfil (RPc). (Gadelmawla et al., 2002) 40

Figura 20. Diagrama de um medidor de brilho. (ASTM D2457-03, 2003) 44

Figura 21. Comparação entre o índice de refração, o brilho teórico e o ângulo de incidência. (Galiatsatos, 2007) 47

Figura 22. a) Reflexão especular, b) Reflexão difusa. 48

Figura 23. Projeto do molde. Os postiços estão colocados no lado móvel. 49

Figura 24. Fluxograma do trabalho experimental. 51

Figura 25. Rugosimetro Alicona InfiniteFocus SL. 52

Figura 26. Medidor de brilho SAGT525 da *SAMA Tools*. 53

Figura 27. Máquina de Injeção Boy 22A 54

Figura 28. Regulador de Temperaura Piovan. 55

Figura 29. Lado móvel do molde com os postiços inseridos. 55

Figura 30. Vista explodida do lado móvel do molde. 56

Figura 31. Postiços Moldantes a) SPI A1 e b) SPI A3. Cada um com dimensão de 50x75mm. 57

Figura 32. Amostra exemplar. 57

Figura 33. Exemplo medição das rugosidades dos postiços a) Ra 0,034, b) Ra 0,055. 61

Figura 34. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034. 61

Figura 35. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034. 62

Figura 36. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034. 62

Figura 37. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055. 63

Figura 38. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055. 63

Figura 39. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055. 64

Figura 40. a) medição PMMA Ra0,055, b) medição PMMA Ra0,034. 64

Figura 41. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034. 65

Figura 42. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034. 66

Figura 43. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034. 66

Figura 44. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055. 67

Figura 45. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055. 67

Figura 46. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055. 68

Figura 47. a) medição PC Ra 0,055, b) medição PC Ra 0,034. 68

Figura 48. Imagem tridimensional da superficie do PC com acabamento Ra 0,055 na condição T2. 73

Figura 49. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034. 76

Figura 50. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034. 76

Figura 51. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034. 77

Figura 52. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055. 77

Figura 53. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055. 78

Figura 54. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055. 78

Figura 55. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034. 80

Figura 56. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034. 80

Figura 57. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034. 81

Figura 58. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055. 81

Figura 59. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055. 82

Figura 60. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055. 82

Lista de Tabelas

Tabela 1. Propriedades gerais do PMMA e do PC 22

Tabela 2. Tabela da granulametria das pastas diamantadas. (http://geolit.com.br/pastas-diamantadas - acesso dia 12/03/2026) 28

Tabela 3. Descrição do tipo de acabamento da escala SPI. (Berins, 2002) 42

Tabela 4. Codificação das amostras e respetivas condições de processamento..... 50

Tabela 5. Caracteristicas gerais da máquina de Injeção Boy 22A. 54

Tabela 6. Caracteristicas do PMMA Acryplas HD03. 58

Tabela 7. Caracteristicas do PC 1220R. 58

Tabela 8. Caracteristicas do Pigmento Polyblack 1850. 58

Tabela 9. Condições ideiais de processamento das amostras. 59

Tabela 10. Valores de rugosidade dos 2 postiços. 60

Tabela 11. Valores de Ra, desvios percentuais e absolutos nas amostras em PMMA (Acabamento Ra 0,034 e Ra 0,055). 69

Tabela 12. Valores de Ra desvios percentuais e absolutos nas amostras em PC (Acabamento Ra 0,034 e Ra 0,055). 71

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Geral

A produção à escala industrial de polímeros sintéticos, intensificada a partir de meados do século XX, constituiu um marco na evolução dos materiais de engenharia, promovendo um crescimento exponencial do seu consumo e produção à escala Mundial (Geyer et al., 2017). Este desenvolvimento foi impulsionado, sobretudo, pela elevada relação custo-desempenho destes materiais, aliada à sua facilidade de processamento através de tecnologias como a moldação por injeção, extrusão e termoformação, bem como pela sua elevada versatilidade em termos de formulação, modificação estrutural e adaptação funcional (Ashby, 2011).

Neste contexto, características intrínsecas como a baixa densidade, a elevada resistência química, a estabilidade dimensional e a possibilidade de ajuste das propriedades físicas e mecânicas contribuíram para a substituição progressiva de materiais tradicionais, como metais, cerâmicos e vidro, em inúmeras aplicações industriais e tecnológicas (Ashby, 2011). Para além dessa substituição, os polímeros permitiram o desenvolvimento de novas soluções de engenharia e design anteriormente inviáveis, viabilizando a produção de componentes leves, geometrias complexas e sistemas com requisitos funcionais específicos, incluindo propriedades óticas, térmicas e mecânicas ajustáveis (Escobar et al., 2003).

Como consequência, a crescente incorporação de materiais poliméricos em aplicações de uso comum e de elevada exigência técnica — nomeadamente nos setores automóvel, eletrónico, médico e ótico — consolidou o seu papel como materiais estratégicos na engenharia moderna, evidenciando a importância do controlo rigoroso das suas propriedades funcionais e superficiais ao longo do processo de fabrico (Alipoori, 2023).

Nas últimas décadas, a integração de polímeros em aplicações com requisitos óticos exigentes, como componentes de iluminação, sistemas óticos, dispositivos eletrónicos, aplicações automóveis e ótica de precisão, tem intensificado a necessidade de controlo rigoroso da qualidade superficial das peças produzidas por moldação por injeção (Osswald & Menges, 2012). Entre as propriedades mais críticas, a refletividade ótica assume particular relevância, uma vez que influencia diretamente o desempenho

funcional, a eficiência luminosa e a perceção estética dos produtos finais (Born et al., 1999; Hecht, 2017).

O processo de moldação por injeção destaca-se como uma das tecnologias mais utilizadas na indústria transformadora de polímeros, devido à sua elevada produtividade, repetibilidade e capacidade de produzir peças com geometrias complexas e elevada precisão dimensional (Guo, 2022). Contudo, a qualidade ótica das superfícies moldadas não depende exclusivamente dos parâmetros de processamento, sendo fortemente condicionada pela topografia superficial do molde, em particular pelo seu acabamento e nível de rugosidade (J. Li et al., 2023a; Piccolo et al., 2021). Neste sentido, a superfície do molde pode ser interpretada como uma "matriz ótica", cuja micro e nanotopografia é, em larga medida, replicada na superfície do polímero solidificado durante o processo de enchimento e arrefecimento (Piccolo et al., 2021).

A refletividade ótica de superfícies poliméricas revela-se altamente sensível às irregularidades superficiais à escala micro e submicrométrica, as quais promovem fenómenos de dispersão difusa da luz e alteram significativamente o comportamento ótico global da superfície (Larena et al., 2002). Pequenas variações em parâmetros de rugosidade, como Ra (Rugosidade Média Aritmética), Rq (Rugosidade Quadrática Média) e Rz (Altura Máxima do Perfil), podem originar alterações substanciais na refletividade especular e difusa, afetando propriedades como o brilho, a transparência aparente e a eficiência ótica de componentes funcionais (Simonsen et al., 2009).

Paralelamente, polímeros de elevado desempenho ótico, como o polimetilmetacrilato (PMMA) e o policarbonato (PC), são amplamente utilizados em aplicações óticas devido à sua elevada transmitância luminosa, boa estabilidade dimensional e adequadas propriedades mecânicas. Contudo, estes materiais apresentam comportamentos distintos no que diz respeito à replicação da topografia do molde, em função das suas propriedades reológicas, térmicas e óticas, dificultando a generalização do impacto do acabamento superficial do molde sobre a refletividade final das peças moldadas (Peixoto et al., 2022).

Em contexto industrial, a seleção do acabamento superficial do molde é frequentemente baseada em critérios empíricos, funcionais ou estéticos, recorrendo a classificações normalizadas, como por exemplo a escala SPI (*Society of the Plastics Industry*), sem uma quantificação sistemática do seu impacto nas propriedades óticas mensuráveis das superfícies moldadas. Esta abordagem, ainda que prática, limita a otimização do desempenho ótico dos componentes e pode conduzir a variabilidade na qualidade superficial, especialmente em aplicações de elevada exigência funcional (R. Fan et al., 2024).

Deste modo, evidencia-se a necessidade de estudos experimentais sistemáticos e controlados que permitam estabelecer correlações quantitativas entre o acabamento superficial do molde, a capacidade de replicação da topografia pelo polímero e a refletividade ótica das superfícies moldadas por injeção. A compreensão aprofundada destas relações constitui um bom contributo para o desenvolvimento de metodologias de engenharia mais sólidas, preditivas e cientificamente fundamentadas, capazes de suportar o projeto e fabrico de componentes poliméricos com desempenho ótico otimizado.

1.2. Motivação

Em ambiente industrial, a otimização da qualidade ótica das superfícies moldadas é frequentemente condicionada pela ausência de modelos preditivos sólidos que relacionem parâmetros de fabrico, características do molde e desempenho ótico mensurável, conduzindo a abordagens iterativas baseadas na tentativa e erro (Osswald & Menges, 2012).

Adicionalmente, a crescente exigência de diferenciação estética e funcional dos produtos poliméricos tem conduzido a uma maior necessidade de controlo fino do brilho, da difusão da luz e da aparência superficial, parâmetros diretamente relacionados com a refletividade ótica (Turbil et al., 2022). A perceção visual do utilizador final, bem como o desempenho funcional de sistemas óticos, pode ser significativamente afetada por microvariações superficiais que não são facilmente detetáveis por métodos convencionais de controlo de qualidade (Born et al., 1999).

Outro aspeto motivador reside na escassez de estudos experimentais sistemáticos que quantifiquem, de forma integrada, o impacto de variáveis de fabrico nas propriedades óticas superficiais de peças moldadas por injeção.

Do ponto de vista industrial, esta lacuna de conhecimento dificulta a tomada de decisão fundamentada durante as fases de projeto do produto e do processo, nomeadamente na definição de especificações funcionais associadas ao desempenho ótico. A inexistência de diretrizes claras e quantitativas conduz, muitas vezes, ao sobredimensionamento de requisitos ou à adoção de margens de segurança conservadoras, com impacto direto nos custos de produção e na eficiência do processo (Osswald and Menges, 2012).

Assim, a motivação do presente estudo assenta na necessidade de aprofundar o conhecimento científico sobre os fatores que influenciam a refletividade ótica de superfícies poliméricas moldadas,

através de uma abordagem experimental rigorosa. A geração de dados quantitativos e comparáveis permitirá suportar metodologias de engenharia mais fortes, promovendo a otimização do desempenho ótico, a redução da variabilidade superficial e a melhoria da qualidade funcional e estética dos componentes poliméricos.

1.3. Definição do Problema

A refletividade ótica é particularmente sensível à microtopografia da superfície, uma vez que irregularidades com dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz visível (≈ 380 – 750 nm) podem provocar dispersão significativa da radiação incidente (Cao & Sendur, 2019). Consequentemente, superfícies aparentemente lisas a nível macroscópico podem apresentar comportamentos óticos distintos devido a variações subtis na rugosidade micrométrica (Piccolo et al., 2021).

Outro desafio relevante prende-se com o facto de diferentes polímeros responderem de forma distinta ao mesmo acabamento superficial do molde, devido às suas propriedades viscoelásticas, coeficientes de contração e cinética de solidificação (Holzer et al., 2010; Piccolo et al., 2021; Vera et al., 2017). Esta variabilidade dificulta a extrapolação de resultados entre materiais e aplicações.

Adicionalmente, a ausência de metodologias padronizadas que integrem simultaneamente caracterização da rugosidade do molde, replicação superficial do polímero e medição da refletividade ótica constitui uma lacuna metodológica na literatura.

A resolução deste problema permitirá estabelecer relações claras entre parâmetros de acabamento superficial do molde, condições de processamento e propriedades óticas finais, contribuindo para o desenvolvimento de componentes poliméricos com desempenho ótico otimizado e maior previsibilidade de qualidade (Osswald & Menges, 2012).

1.4. Objetivos

O objetivo geral da dissertação a desenvolver é analisar e quantificar a influência do acabamento superficial do molde na refletividade ótica de polímeros moldados por injeção.

De forma mais específica, o estudo pretende:

- Caracterizar diferentes tipos de acabamento superficial de moldes, através de parâmetros normalizados de rugosidade (Ra, Rq, Rz e Rt) e topografia superficial;

- Avaliar a capacidade de replicação superficial dos polímeros selecionados em função do acabamento do molde;
- Medir e comparar a refletividade ótica das superfícies poliméricas moldadas, recorrendo a técnicas de caracterização ótica normalizadas;
- Estabelecer correlações entre os parâmetros de rugosidade superficial e a refletividade ótica obtida;
- Identificar tendências e orientações que possam apoiar a seleção de acabamentos de molde adequados a aplicações poliméricas com requisitos óticos específicos.

O cumprimento destes objetivos permitirá contribuir para um melhor entendimento científico da relação entre acabamento superficial do molde e desempenho ótico de polímeros, fornecendo igualmente suporte técnico para decisões de projeto e fabrico em contexto industrial.

1.5. Estrutura da Dissertação

A dissertação de mestrado está dividida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, incluindo o enquadramento geral, a contextualização científica e tecnológica, a motivação do estudo e os objetivos da investigação.

O segundo capítulo é dedicado ao estado da arte, onde são abordados os princípios relacionados com o processo de moldação por injeção, os principais parâmetros influenciadores do processo para a melhor replicação da topografia do molde, a classificação geral dos materiais poliméricos e os polímeros sob objeto de estudo. É também abordada a rugosidade superficial e os fenómenos óticos associados à interação da luz com superfícies poliméricas, o aço e a sua influência no acabamento e os tipos de polimentos existentes para se obterem as rugosidades a estudar. São igualmente apresentados os conceitos de refletividade especular e difusa, bem como os parâmetros de caracterização da rugosidade (como Ra, Rq, Rz e Rt) e as suas implicações no desempenho funcional e ótico das superfícies. Por fim é apresentada a escala e os conceitos do brilho.

O terceiro capítulo descreve detalhadamente a metodologia experimental adotada, incluindo os equipamentos utilizados, a seleção dos materiais poliméricos e o aço do molde, a caracterização dos acabamentos superficiais dos moldes e das peças injetadas, os parâmetros de processamento utilizados na injeção e os procedimentos de ensaio e medição.

O quarto capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos, incluindo a caracterização da rugosidade e do brilho superficial das peças moldadas, a análise da capacidade de replicação da topografia do molde pelos diferentes polímeros, a avaliação da refletividade ótica dos materiais estudados e uma análise comparativa entre os dois polímeros objeto de estudo.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões da dissertação, sintetizando os resultados mais relevantes e as contribuições científicas do estudo. São ainda propostas recomendações para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Moldação por Injeção

A moldação por injeção é um processo que se baseia na fusão, transporte e conformação de materiais poliméricos no interior de um molde fechado, permitindo a obtenção de componentes com elevada precisão dimensional e qualidade superficial consistente. Os moldes de injeção, enquanto ferramentas de elevada complexidade e precisão, são importantes no desempenho global do processo, sendo frequentemente considerados um dos principais fatores que condicionam a viabilidade técnica e económica da produção de peças plásticas em série (Pereira & Corrêa, 2024). Na Figura 1 é apresentado um desenho esquemático da composição de uma máquina de injeção, onde se observam três blocos e um sistema de controlo. Os blocos são compostos por uma unidade de injeção, um molde e uma unidade de fecho.

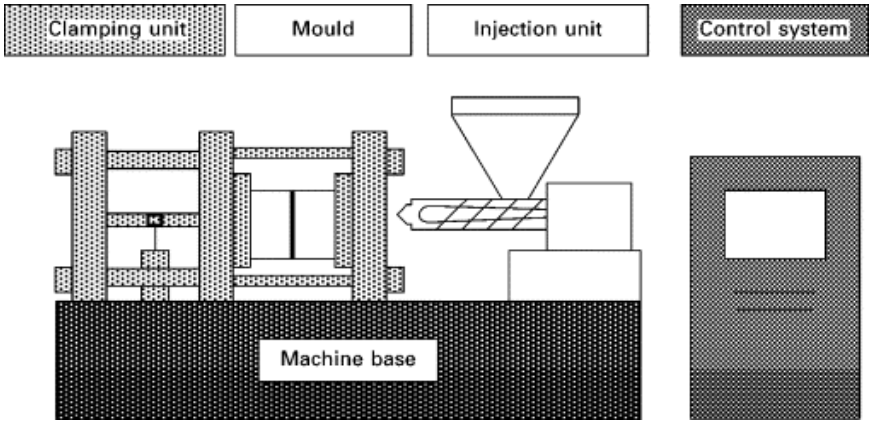


Figura 1. Desenho esquemático de uma máquina de injeção (Mitschang & Hildebrandt, 2012).

2.1.1. Ciclo de moldação

A moldação por injeção de termoplásticos desenvolve-se segundo um ciclo produtivo sequencial, tipicamente constituído por três fases: enchimento, plastificação/compactação e ejeção, conforme esquematizado na Figura 2 (Vera et al., 2017).

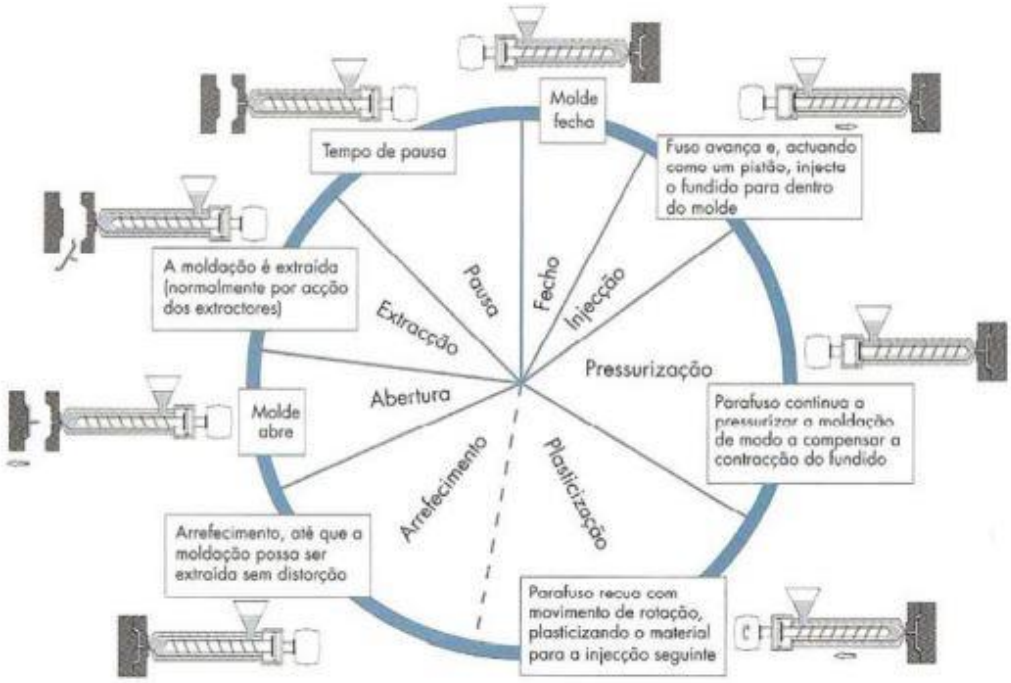


Figura 2. Ciclo de moldação (Cunha. A et al., 2003).

A primeira fase, designada por enchimento ou injeção, corresponde ao momento em que o material polimérico previamente fundido na unidade de injeção é introduzido na cavidade do molde. Nesta etapa, o polímero fundido escoa através do sistema de canais de alimentação até preencher completamente o volume existente entre a cavidade e o macho do molde. A alimentação do material é assegurada pelo avanço do fuso da unidade de injeção, sendo este movimento acompanhado por um aumento significativo da pressão no interior do molde. Em paralelo, ocorre a dosagem e preparação da próxima carga de material no interior da unidade de plastificação, garantindo a continuidade do ciclo produtivo (Araújo et al., 2023).

A segunda fase inicia-se quando a cavidade do molde se encontra totalmente preenchida, sendo frequentemente associada à etapa de compactação e plastificação subsequente (Vera et al., 2017). Durante este período, a pressão no interior do molde atinge valores máximos, sendo mantida durante um determinado tempo de compactação, cuja função é compensar a contração do material durante o arrefecimento e assegurar o preenchimento completo de todos os detalhes geométricos da cavidade (Vera et al., 2017). O tempo de compactação depende fortemente do tipo de polímero, das suas propriedades reológicas e térmicas, bem como da espessura da peça moldada. Após esta etapa, o fuso da unidade injetora é progressivamente retraído, conduzindo à diminuição gradual da pressão no interior do molde. Simultaneamente, ocorre o arrefecimento do material, que é particularmente intenso durante

o período de compactação (Vera et al., 2017). Caso o material não esteja totalmente solidificado, pode verificar-se refluxo do fundido através do canal de injeção, fenómeno que pode ser minimizado através de um adequado dimensionamento e conceção do sistema de alimentação. De um modo geral, o tempo associado à plastificação e arrefecimento constitui a parcela mais longa do ciclo de moldação por injeção (Vera et al., 2017).

Por fim, a terceira fase corresponde à ejeção da peça (Vera et al., 2017). Após a solidificação suficiente do polímero no interior do molde, ocorre a abertura do sistema de fecho, permitindo a remoção da peça moldada com o auxílio de pinos ejetores ou sistemas de extração mecânica (Vera et al., 2017). Esta etapa deve ser cuidadosamente controlada para evitar deformações, marcas de extração ou danos na superfície da peça. Concluída a ejeção, o molde fecha novamente, iniciando-se um novo ciclo de moldação por injeção (Vera et al., 2017).

2.1.2. Molde

O molde de injeção é a ferramenta responsável pela conformação da peça plástica pretendida, sendo o seu projeto diretamente condicionado por diversos fatores, tais como a geometria da peça, o número de cavidades, o volume de produção, as tolerâncias dimensionais e os requisitos funcionais e superficiais do produto final (Menges et al., 2013). Assim, o desenvolvimento do molde exige uma abordagem de engenharia mais fina, uma vez que este deve garantir não só a reprodução fiel da geometria da peça, mas também a estabilidade do processo, a eficiência térmica e a durabilidade ao longo de elevados ciclos produtivos (Pereira & Corrêa, 2024).

De um modo geral, os moldes convencionais de injeção são constituídos por duas partes principais: o lado fixo (a cavidade) e o lado móvel (a bucha ou macho). O lado fixo corresponde à metade do molde onde o polímero fundido é injetado e onde se define tradicionalmente a superfície exterior da peça, enquanto o lado móvel encontra-se a metade oposta, sendo esta responsável tradicionalmente pela definição das superfícies internas e pelo suporte do sistema de ejeção (Pereira & Corrêa, 2024). O molde deve ser dimensionado para suportar as elevadas pressões e forças mecânicas associadas ao processo de injeção, garantindo simultaneamente um escoamento adequado do material e um enchimento uniforme da cavidade, de modo a evitar defeitos como vazios, linhas de soldadura ou enchimento incompleto (Boothroyd et al., 2001; Pereira & Corrêa, 2024). Na Figura 3 é apresentado o

esquema ilustrativo de um molde convencional onde se observam as diferentes componentes e acessórios que constituem o molde.

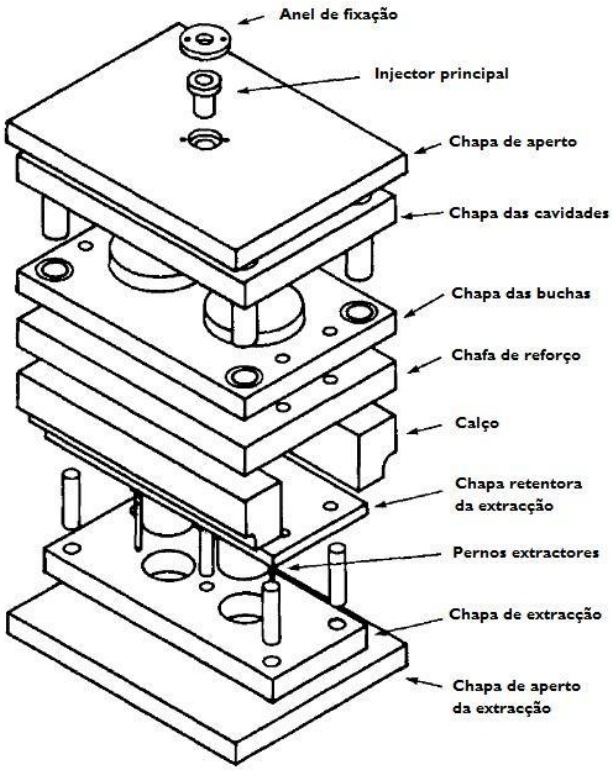


Figura 3. Esquema ilustrativo da composição de um molde convencional (Boothroyd et al., 2001).

A transferência do material polimérico fundido desde a máquina de injeção até à cavidade do molde é realizada através do sistema de alimentação, que inclui o canal principal, os canais de distribuição e os pontos de injeção. Outro elemento da composição do molde é o sistema de refrigeração, constituído por canais de arrefecimento localizados no interior das placas da cavidade e da bucha (e/ou postiços). Estes canais permitem a circulação de líquido refrigerante, tendo como principal função dissipar o calor transferido pelo material fundido e controlar a temperatura do molde ao longo do ciclo produtivo. Adicionalmente, os moldes integram sistemas de ventilação (escapes de gás), normalmente posicionados ao longo do plano de partição, cuja função é permitir a saída do ar e dos gases presentes na cavidade durante o enchimento. A ausência de ventilação adequada pode conduzir ao aprisionamento de gases, originando defeitos como queimaduras, falhas de enchimento ou imperfeições superficiais. Estes canais de ventilação são, geralmente, de pequenas dimensões, com espessuras típicas na ordem de algumas centésimas de milímetro e espaçamento regular, assegurando a evacuação eficiente dos gases sem permitir a fuga significativa do material fundido (Menges et al., 2013).

2.1.3. Processamento

No processamento de peças de injeção, existem variáveis a controlar para garantir a produtividade e a qualidade do produto final (Pereira & Corrêa, 2024). A componente térmica, especificamente a temperatura de injeção — correspondente à temperatura do material no cilindro da máquina — deve ser ajustada para assegurar a fusão completa do polímero, mantendo simultaneamente as suas propriedades físico-químicas. Cada material apresenta uma temperatura de processamento específica, geralmente próxima ou superior à sua temperatura de fusão ou de transição vítrea, devendo esta ser respeitada para evitar a degradação térmica ou variações nas propriedades mecânicas (Menges et al., 2013).

A temperatura do molde influencia diretamente a qualidade do brilho e a integridade superficial da peça (Pereira & Corrêa, 2024). O molde promove o arrefecimento controlado do material fundido; a taxa de arrefecimento influencia diretamente a contração, a estabilidade dimensional, a cristalinidade (nos polímeros semicristalinos) e as propriedades mecânicas finais, sendo que o ajuste térmico do molde importa na mitigação de defeitos como empenos ou marcas de contração (Marconi et al., 2023).

Do ponto de vista molecular, quando o polímero é aquecido, as cadeias adquirem mobilidade para o escoamento. Durante o arrefecimento, ocorre a reorganização das cadeias e o restabelecimento das ligações intermoleculares. Se o arrefecimento for excessivamente rápido, as cadeias podem ficar "congeladas" numa configuração menos organizada, resultando em tensões internas e redução das propriedades mecânicas. Este fenómeno ocorre rapidamente em polímeros com elevada razão superfície-volume, onde a pressão de injeção deve ser suficiente para garantir a replicação antes da solidificação precoce (Pina-Estany et al., 2017).

O controlo da pressão ao longo do ciclo é outra variável a considerar. A pressão aplicada determina o preenchimento da cavidade, a compensação da contração volumétrica e a densificação do material (Pereira & Corrêa, 2024). Inicialmente, aplica-se a pressão de injeção para promover o enchimento quase total da cavidade (enchimento volumétrico), fase em que se verifica um aumento gradual da pressão à medida que o polímero avança (Araújo et al., 2023). Variações na geometria da cavidade podem causar quedas de pressão significativas que afetam a uniformidade da peça (Dario Loaldi, 2020).

Após o enchimento, a fase de compactação é responsável por compensar a contração do material durante o arrefecimento inicial e reduzir vazios internos (Araújo et al., 2023; Dario Loaldi, 2020). O ponto

de comutação V/P (velocidade para pressão) é um dos parâmetros mais importantes para a repetibilidade do processo, pois se for programado incorretamente pode causar falhas de preenchimento ou tensões excessivas. Finalmente, com a solidificação do ponto de injeção (jito), a pressão na cavidade cai abruptamente até à ejeção do componente (Araújo et al., 2023).

2.1.3.1. Influência da Velocidade de Injeção

A velocidade de injeção V_{inj} é um dos fatores a considerar no preenchimento da cavidade, influenciando diretamente a replicação da textura do molde na superfície do polímero. Velocidades elevadas aceleram o preenchimento antes da solidificação da camada superficial, otimizando a transferência da topografia do molde e a refletividade ótica ao reduzir a rigidez prematura da frente de fluxo, cuja velocidade v_f é proporcional a V_{inj} via taxa de fluxo:

$$Q = V_{inj} \cdot A \tag{1}$$

onde A é a área da seção transversal. (Pereira & Corrêa, 2024; Tosello et al., 2023). No entanto, velocidades excessivas podem induzir variações na microestrutura superficial, comprometendo a uniformidade do brilho em certos regimes de escoamento por alterar o deslizamento na parede da cavidade, especialmente quando a tensão de corte (Masato et al., 2018):

$$\tau = \eta\,\dot{\gamma} \tag{2}$$

excede limiares, com taxa de corte:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \tag{3}$$

onde η é a viscosidade, R o raio do canal (Guo, 2022; Tosello et al., 2023). A correta modulação do perfil de velocidade é importante para estabilizar a frente de fluxo e mitigar defeitos estéticos decorrentes de tensões de corte excessivas (Hopmann & Kobel, 2023). A otimização desse parâmetro deve ocorrer com o controle da temperatura da cavidade, garantindo que a réplica da textura atenda aos padrões de refletividade (Pereira & Corrêa, 2024). Além disso, a interação entre velocidade de avanço e geometria das microestruturas do molde afeta as tensões residuais superficiais, influenciando a difusão e o desvio da luz refletida (Guo, 2022).

Adicionalmente, a velocidade de propagação da frente de fluxo e a temperatura do molde influenciam o desenvolvimento da pressão no interior da cavidade durante o enchimento, condicionando a recuperação da rigidez superficial do polímero. Este fenómeno impacta a capacidade de replicação da superfície do molde e, consequentemente, na obtenção de componentes com maior fidelidade ótica (Dario Loaldi, 2020; Pereira & Corrêa, 2024). Paralelamente, diversos estudos demonstram que o aumento da velocidade de injeção promove um aumento localizado da temperatura do ar na interface entre o fundido e a superfície do molde, favorecendo o preenchimento das microcavidades e, por conseguinte, a sua replicação (Dario Loaldi, 2020; Tosello et al., 2023). Por outro lado, o comportamento instável observado em regimes de velocidade intermediária pode resultar na formação de micro defeitos superficiais do tipo "casca de laranja", os quais impactam negativamente a rugosidade média e, consequentemente, a difusão especular da peça final (Masato et al., 2018).

2.1.3.2. Influência da Temperatura

A regulação térmica durante o ciclo de injeção governa a cinética de cristalização e a viscosidade do fundido, parâmetros estes que condicionam diretamente a fidelidade da cópia da rugosidade superficial da cavidade sobre a peça. (Piccolo et al., 2021; Reddy et al., 2023).

Temperaturas de molde elevadas, preferencialmente superiores à temperatura de transição vítrea (T_g) para polímeros amorfos, reduzem a viscosidade local na interface e prolongam o tempo de preenchimento, garantindo uma replicação fiel das microestruturas superficiais (Peixoto et al., 2022). Este comportamento é descrito pela dependência da viscosidade em relação à temperatura de acordo com o modelo de Arrhenius, expresso por:

$$\eta(\mathrm{T}) = \eta_o exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

Onde:

- $\eta(\mathrm{T})$ é a viscosidade aparente na temperatura absoluta,
- η_0 é a constante viscosa,
- E_a é a energia do escoamento viscoso,
- R é a constante universal dos gases,
- T é a temperatura absoluta.

a redução da viscosidade favorece a penetração do polímero nas irregularidades da cavidade. Contudo, a gestão desta variável térmica exige um equilíbrio rigoroso, uma vez que a temperatura na interface molde/polímero (T_f) é ditada pelas propriedades térmicas dos materiais, sendo expressa por:

$$\frac{T_f - T_p}{T_p - T_{mi}} = \frac{(K\rho c)_m}{(K\rho c)_p} \tag{5}$$

onde os índices p e m representam o produto da condutividade térmica, densidade e calor específico de cada meio (Vera et al., 2017). Elevadas temperaturas de fundido, embora otimizem a replicação superficial, podem comprometer o desempenho ótico de componentes de precisão devido ao aumento da birrefringência induzida e ao prolongamento excessivo do ciclo de arrefecimento (Dario Loaldi, 2020). Adicionalmente, o controlo da temperatura na interface é importante para mitigar tensões residuais, uma vez que uma dissipação térmica heterogênea pode induzir variações locais no índice de refração e comprometer a uniformidade da refletividade ótica da peça moldada (Pereira & Corrêa, 2024; Rodriguez et al., 2021).

2.1.3.3. Influência da Pressão

A variável operacional de pressão é importante no garante do preenchimento completo da cavidade e assegurar que a interface polímero-molde copie com fidelidade a topografia das superfícies (Pereira & Corrêa, 2024). Efetivamente, níveis adequados de pressão de compactação tornam-se importantes para compensar a contração volumétrica e garantir uma replicação precisa da rugosidade do molde, visto que a fidelidade geométrica em microestruturas é aprimorada com o incremento desta variável (Pereira & Corrêa, 2024; Reddy et al., 2023). Contudo, variações na geometria da cavidade induzem quedas de pressão significativas que prejudicam a uniformidade da replicação, sendo frequentemente necessário elevar a pressão de compactação para mitigar tais perdas e assegurar uma distribuição de tensões mais estável junto à parede do molde (Dario Loaldi, 2020). Matematicamente, este efeito é corroborado pela relação entre a pressão de cavidade e a densidade de compactação, onde o gradiente de pressão $\left(\frac{dp}{dx}\right)$ atua como força motriz para a deformação das cadeias poliméricas contra as irregularidades da superfície, conforme descrito por:

$$P_c = \frac{\eta \cdot Q}{h^3} \tag{6}$$

sendo η a viscosidade do material e h a espessura da cavidade. Esta dependência ressalta que, em geometrias complexas com elevadas razões superfície-volume, o incremento da pressão de injeção é indispensável para superar o arrefecimento precoce e garantir a replicação fiel de detalhes óticos, conforme corroborado por estudos que associam a pressão máxima alcançada na cavidade antes da solidificação à qualidade final do componente (Pina-Estany et al., 2017). Nesse contexto, é necessário a monitorização da pressão de cavidade, pois permite identificar o ponto de comutação V/P ideal e minimizar desvios de processo que comprometeriam a estabilidade dimensional e o acabamento superficial da peça (Araújo et al., 2023). Desta forma, a correlação precisa entre o perfil de pressão na cavidade e a integridade da superfície moldada minimiza defeitos estéticos e otimiza a refletividade ótica, dado que uma pressão insuficiente durante a fase de compactação resulta em falhas de replicação da microtopografia do molde (Araújo et al., 2023).

2.2. Polímeros

Os polímeros são de facto definidos como macromoléculas compostas por cadeias longas de unidades repetitivas (Vera et al., 2017). Essa estrutura macromolecular é mantida por ligações covalentes estáveis de alta energia entre os átomos, predominantemente de carbono, que se pode ligar a outros elementos como hidrogénio, oxigénio, azoto, enxofre ou nitrogénio para formar diversas arquiteturas moleculares, originando uma diversidade significativa de arquiteturas moleculares (Agnaou, 2014).

A unidade estrutural básica de um polímero é o monómero, uma molécula de baixa massa molecular que, através de reações químicas específicas, se repete sequencialmente ao longo da cadeia, formando uma macromolécula. A ligação sucessiva de monómeros dá origem ao polímero propriamente dito, cuja massa molecular elevada é responsável pelas propriedades mecânicas e térmicas características destes materiais (Bryce, 1997). O processo químico responsável pela formação do polímero denomina-se polimerização.

A polimerização pode ser classificada segundo o meio reacional utilizado, destacando-se os processos em massa (volume), solução, suspensão, emulsão e microemulsão. A escolha do método influencia a morfologia do polímero, a distribuição de massa molecular e a eficiência do processo industrial (Jennings et al., 2016).

Os polímeros podem classificar-se como naturais e sintéticos, havendo as suas ramificações (Braga & Silva, 2017), como se pode verificar na Figura 4.

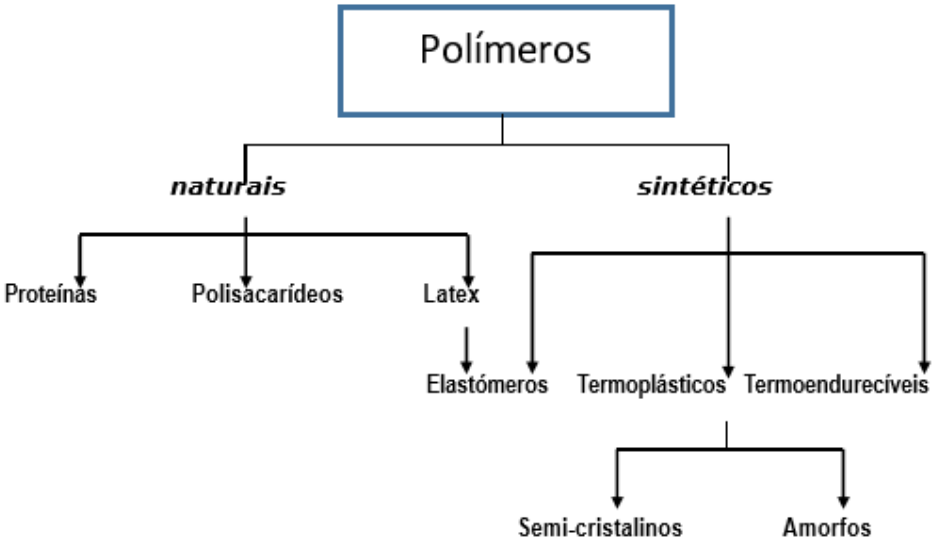


Figura 4. Classificação dos polímeros (Cunha & Pouzada, 1997).

2.2.1. Classificação dos Materiais Poliméricos

Do ponto de vista estrutural e funcional, os materiais poliméricos podem ser classificados em termoplásticos e termoendurecíveis, em função da natureza das ligações intermoleculares e da arquitetura das cadeias macromoleculares (Mark James E., 2007).

Os termoplásticos (elementos que incorporam este estudo) são constituídos por cadeias lineares ou ramificadas, cujas interações intermoleculares são predominantemente do tipo secundário, nomeadamente forças de *Van der Waals* e ligações de hidrogénio. Estas interações são relativamente fracas quando comparadas com ligações covalentes, permitindo que o material seja aquecido acima da sua temperatura de transição vítrea ou de fusão, tornando-se processável no estado fundido (Grønborg, 2024). Após arrefecimento, o material solidifica sem sofrer alteração química permanente. Esta característica possibilita o reaquecimento e reprocessamento sucessivo, desde que não ocorra degradação térmica significativa (Mark James E., 2007). Exemplos comuns incluem o polipropileno (PP), polietileno (PE), policarbonato (PC) e polimetilmetacrilato (PMMA), entre outros. Na Figura 5 é apresentada uma ilustração simplificada das estruturas lineares e ramificadas dos termoplásticos.

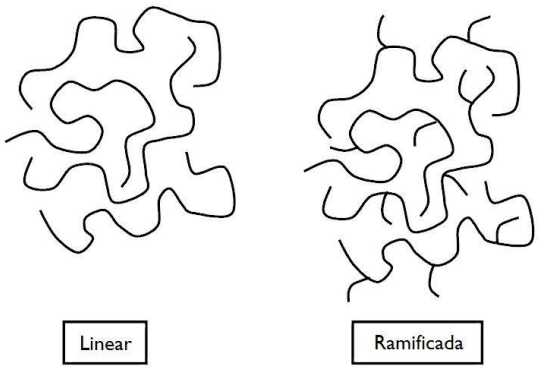


Figura 5. Estrutura linear e ramificada (termoplásticos). (Charles A. Harper, 2000)

2.2.2. Termoplásticos amorfos

Os materiais poliméricos amorfos caracterizam-se por apresentarem uma organização molecular desordenada, na qual as cadeias macromoleculares se encontram dispostas na forma de "novelos aleatórios", sem uma estrutura cristalina definida (Flory, 1984). Neste tipo de polímeros, a coesão e a consistência do material resultam essencialmente do elevado grau de entrelaçamento e das interações intermoleculares entre as cadeias, que se interpenetram de forma irregular, contribuindo para a sua rigidez e estabilidade estrutural (Agnaou, 2014; Perez, 1998).

Do ponto de vista térmico, os termoplásticos amorfos são normalmente utilizados em gamas de temperatura inferiores à sua temperatura de transição vítrea (T_g), condição na qual o material se encontra no estado vítreo e apresenta elevada estabilidade dimensional (Bobzin et al., 2021). Nesta região, a mobilidade molecular é significativamente limitada, o que reduz as deformações pós-processamento e as variações dimensionais ao longo do tempo (Clavier, 2017).

Em termos óticos, os polímeros amorfos tendem a ser maioritariamente transparentes, uma vez que a homogeneidade do seu índice de refração e a ausência de regiões cristalinas evitam a dispersão significativa da luz (Boztepe et al., 2017). Uma exceção relevante corresponde a alguns copolímeros de estireno modificados, como o ABS (L. Xu et al., 2024).

Adicionalmente, estes materiais apresentam, de modo geral, valores de contração relativamente baixos durante a solidificação, tipicamente na ordem de 0,5% a 1%, sendo inferiores aos observados em polímeros semicristalinos que sofrem contração adicional devido à formação de cristais densos. A reduzida contração volumétrica dos polímeros amorfos traduz-se numa maior precisão dimensional das

peças moldadas, permitindo obter tolerâncias mais apertadas com menores custos de ajuste no processo e na ferramenta (Grønborg, 2024; Marconi et al., 2023).

2.2.3. Termoplásticos semicristalinos

Os polímeros semicristalinos distinguem-se pela presença simultânea de duas fases morfologicamente distintas: uma fase amorfa desordenada e uma fase cristalina altamente organizada (Clavier, 2017). Esta última é constituída por regiões onde as cadeias moleculares se encontram espacialmente ordenadas, formando estruturas conhecidas como esferulites (Andrews, 2009).

Do ponto de vista ótico, os polímeros semicristalinos apresentam, em estado natural, uma coloração tipicamente branca ou opaca (Y. Wang et al., 2023). Esta característica resulta da dispersão da luz nas regiões cristalinas, cuja diferença de índice de refração relativamente à fase amorfa provoca fenómenos de difusão interna da radiação luminosa (Boztepe et al., 2017).

Em termos térmicos, estes materiais apresentam uma gama de utilização compreendida entre a temperatura de transição vítrea (T_g), associada à fase amorfa, e a temperatura de fusão (T_m), correspondente à desorganização das regiões cristalinas (Andrews, 2009). Nesta faixa de temperaturas, a fase amorfa contribui para a tenacidade, enquanto a fase cristalina fornece rigidez estrutural e maior resistência química. A combinação de um "esqueleto" cristalino rígido com uma matriz amorfa resulta num compromisso equilibrado entre rigidez e ductilidade (Boztepe et al., 2017).

Relativamente ao comportamento dimensional, os polímeros semicristalinos apresentam valores de contração significativamente superiores aos observados em materiais amorfos (Marconi et al., 2023).

Diversos polímeros termoplásticos são utilizados em aplicações onde a refletividade ótica é relevante. Entre eles, o polimetilmetacrilato (PMMA) destaca-se pela elevada transmitância luminosa e boa estabilidade ótica, sendo amplamente utilizado em lentes e elementos de iluminação (Wu et al., 2022). O policarbonato (PC) combina boa transparência com elevada resistência ao impacto, sendo comum em aplicações de segurança e componentes estruturais translúcidos (Sushmita et al., 2021).

Outros polímeros, como o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS), embora menos transparentes, são frequentemente utilizados em componentes onde o controlo da reflexão e do brilho superficial tem

impacto significativo na peça, nomeadamente em peças de interior automóvel e eletrónica de consumo (Pereira & Corrêa, 2024).

2.2.4. Polimetilmetacrilato (PMMA)

Comumente designado por acrílico, o PMMA é um polímero sintético caracterizado pelo seu custo relativamente acessível, elevada versatilidade e facilidade de processamento por técnicas como a moldação por injeção, extrusão e moldação por compressão. Este material é obtido a partir do monómero metacrilato de metilo (MMA), através de um processo de polimerização que ocorre predominantemente por mecanismo radicalar (Figura 6). Nessa reação, a formação de cadeias poliméricas é iniciada por radicais livres, geralmente gerados por iniciadores químicos, como peróxidos orgânicos, que promovem a abertura das ligações duplas do monómero e a subsequente propagação da cadeia macromolecular (Bryce, 1997; Campo. E. A., 2006).

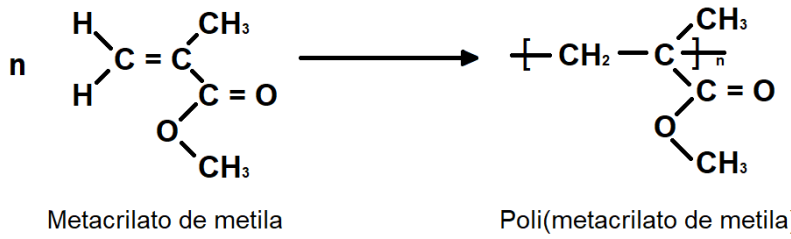


Figura 6. Síntese do PMMA a partir do metacrilato de metilo. (Prezotto, 2019)

Do ponto de vista estrutural, o PMMA é um polímero amorfo, que apresenta uma organização molecular desordenada e ausência de regiões cristalinas. Esta característica microestrutural está diretamente associada às suas propriedades óticas excecionais, nomeadamente elevada transparência e baixa dispersão da luz (El-naggar et al., 2024; Minami, 2010). De facto, quando adequadamente processado e com elevada pureza, o PMMA incolor pode atingir níveis de transmissão de luz branca na ordem dos 90 a 92%, sendo as perdas essencialmente atribuídas a fenómenos de reflexão superficial (Araújo et al., 2023). Paralelamente, apresenta valores de nevoeiro ótico (*haze*) bastante reduzidos, tipicamente entre 1% e 2%, o que o torna particularmente adequado para aplicações óticas e componentes transparentes (Bryce, 1997; Campo. E. A., 2006).

Além da sua transparência, o PMMA distingue-se pela sua elevada estabilidade face à radiação ultravioleta e às condições atmosféricas, demonstrando boa resistência ao envelhecimento, à humidade

e à degradação ambiental. Estas características tornam-no especialmente indicado para aplicações em ambientes exteriores, como painéis, coberturas, sinalética e componentes expostos à radiação solar.

Em termos mecânicos, o PMMA apresenta boa resistência ao risco e à abrasão quando comparado com outros termoplásticos transparentes, bem como uma rigidez relativamente elevada devido à sua estrutura amorfa vítrea. A sua superfície dura e estável contribui para a manutenção das propriedades óticas ao longo do tempo (Sansul et al., 2023). Contudo, apesar da sua rigidez e transparência, este material possui menor resistência ao impacto do que outros polímeros como o policarbonato, sendo este um aspeto relevante na seleção do material para aplicações estruturais (El-Nasser, 2017).

Devido à combinação de elevada transparência, facilidade de processamento, boa resistência superficial e estabilidade ambiental, o PMMA é frequentemente considerado uma alternativa leve ao vidro em múltiplas aplicações industriais, onde a qualidade superficial e a fidelidade ótica são requisitos imperativos (Sansul et al., 2023).

2.2.5. Policarbonato (PC)

Do ponto de vista químico, o policarbonato é um polímero sintético obtido, na maioria dos casos, a partir da polimerização por policondensação do bisfenol A (BPA) com fosgénio ou, em rotas mais recentes e ambientalmente sustentáveis, através de processos sem fosgénio utilizando carbonatos orgânicos. A estrutura molecular do PC caracteriza-se pela presença de grupos carbonato (-O-(C=O)-O-) na cadeia principal (Moustaghfir, 2004) (Figura 7), que conferem rigidez à cadeia polimérica e contribuem significativamente para as suas propriedades mecânicas e térmicas. A polimerização conduz à formação de cadeias macromoleculares predominantemente lineares, o que permite o seu reprocessamento por métodos térmicos convencionais, como a moldação por injeção e a extrusão.

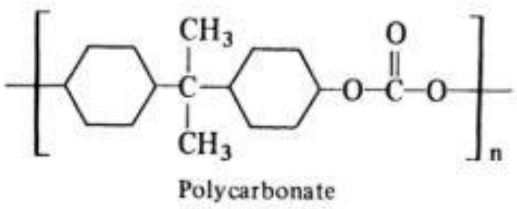


Figura 7. Unidade repetitiva do policarbonato de bisfenol A. (Berins, 2002)

Em termos morfológicos, o policarbonato é classificado como um polímero amorfo, apresentando uma estrutura molecular desordenada e ausência de fase cristalina (Agnaou, 2014; Y. Wang et al., 2023). Esta característica confere-lhe uma elevada transparência ótica, com níveis de transmissão luminosa que podem atingir aproximadamente 85 a 91% no estado incolor, sendo, por isso, frequentemente utilizado em aplicações onde a transparência é um requisito funcional (Minami, 2010; Y. Wang et al., 2023). A sua natureza amorfa também contribui para uma contração relativamente baixa durante o processamento, permitindo a obtenção de peças com elevada precisão dimensional e excelente reprodução de detalhes do molde (Peixoto et al., 2022; Pereira & Corrêa, 2024).

Uma das propriedades características do policarbonato é a sua elevada resistência ao impacto, significativamente superior à de outros polímeros transparentes, como o PMMA (El-Nasser, 2017). Esta elevada tenacidade resulta da capacidade das cadeias poliméricas absorverem e dissiparem energia mecânica antes da fratura, tornando o material particularmente adequado para aplicações estruturais e de segurança, tais como viseiras, proteções, componentes automóveis e blindagens transparentes. Adicionalmente, o PC apresenta boa resistência ao calor, com uma temperatura de transição vítrea (T_g) tipicamente na ordem dos 140–150 °C, o que lhe confere estabilidade dimensional em ambientes térmicos exigentes (Y. Wang et al., 2023).

Do ponto de vista ótico, embora seja altamente transparente, o policarbonato apresenta maior suscetibilidade ao risco e à abrasão superficial quando comparado com materiais como o PMMA. Por essa razão, em aplicações óticas e superfícies expostas, é comum a aplicação de revestimentos protetores para melhorar a resistência ao desgaste e preservar a qualidade ótica ao longo do tempo (Y. Wang et al., 2023).

Relativamente ao comportamento ambiental, o policarbonato demonstra boa resistência à deformação sob carga e à fluência, bem como estabilidade dimensional em condições de serviço prolongadas. No entanto, apresenta sensibilidade à radiação ultravioleta, podendo sofrer degradação fotoquímica ao longo do tempo, o que se traduz em amarelecimento e perda de propriedades mecânicas. Para mitigar este efeito, são frequentemente incorporados estabilizantes UV ou aplicados revestimentos protetores em aplicações exteriores (Pedersen et al., 2015).

Do ponto de vista do processamento, o policarbonato apresenta uma viscosidade relativamente elevada no estado fundido, exigindo temperaturas de processamento superiores às de muitos termoplásticos comuns, tipicamente entre 260 °C e 320 °C (Moustaghfir, 2004). A sua elevada

viscosidade e sensibilidade à humidade tornam necessária a secagem prévia do material antes do processamento por moldação por injeção, de forma a evitar a degradação hidrolítica e defeitos como bolhas ou perda de propriedades mecânicas (Moustaghfir, 2004).

Devido à combinação de transparência ótica, elevada resistência ao impacto, estabilidade térmica e boa processabilidade, o policarbonato é utilizado em diversos setores industriais, incluindo a indústria automóvel, eletrónica, médica, ótica e de construção. Aplicações típicas incluem lentes, componentes eletrónicos, painéis transparentes, equipamentos de proteção, dispositivos médicos e elementos estruturais transparentes, onde se exige simultaneamente desempenho mecânico elevado e propriedades óticas adequadas (Marconi et al., 2023).

2.2.6. Propriedades gerais do PMMA e do PC

De acordo com (Minami K, 2010) as propriedades gerais do PMMA e do PC apresentam-se de acordo com o exposto na Tabela 1:

Tabela 1. Propriedades gerais do PMMA e do PC

Material	Características	Polimetilmetacrilato (PMMA)	Policarbonato (PC)
Óticas	Comprimento de onda (nm)	390-1600	360-1600
	Índice de refração a 587nm e 20°C	1.4918	1.5855
	Valor Abbe $\frac{nD-1}{nF-nC}$	57.2(53)	34(29.9)
	Transmitância (%) espessura 3.2mm	92	85-91
	Haze (%) espessura 3.2mm	1.3	1.7
Físicas	Massa específica (g/cm^3)	1.18	1.25
	Máxima Temperatura Serviço (°C)	92	124
	Coeficiente de dilatação linear $\frac{1}{K}$	$6.8x10^{-5}$	$6.6x10^{-5}$
	Resistência à abrasão $1-10$	10	2
Ambiente	$\frac{dn}{dT}(x10^{-5})$	-8.5	-11.8...-14.3
	Sensibilidade à humidade	Alta	Baixa
	Absorção de água (peso %) 23°C, ISO	0.30	0.15
Manufatura	Processabilidade	Excelente	Pobre
	Birrefringência	Baixa	Alta
Química	Resistência ao álcool	Limitada	Limitada
Custos	Custo aproximado (€/kg)	3.3	4.4

2.3. Aços

2.3.1. Influência do Aço no Acabamento Superficial

O material utilizado na fabricação do molde, em particular o aço, condiciona diretamente tanto as possibilidades de obtenção de diferentes acabamentos superficiais como a durabilidade do molde ao longo do ciclo produtivo, uma vez que diferentes materiais apresentam comportamentos distintos durante operações de polimento e texturização. Estas diferenças refletem-se diretamente nos valores de rugosidade final da cavidade do molde, condicionando a topografia que pode ser reproduzida na peça moldada. Não obstante, os aços para moldes são amplamente utilizados na indústria devido à sua elevada resistência mecânica, boa estabilidade dimensional e adequada capacidade de polimento, características requisitadas na produção de peças com elevada qualidade superficial (Pedroso et al., 2024).

Entre os aços mais comuns destacam-se os aços pré-endurecidos, como o P20 (DIN/W.Nr. 1.2311), frequentemente utilizados em moldes destinados a produções de média escala, devido ao seu equilíbrio entre maquinalidade e resistência ao desgaste (Pedroso et al., 2025). Por outro lado, os aços ferramenta, como o H13 (DIN/W.Nr. 1.2344), são preferencialmente aplicados em moldes sujeitos a condições térmicas e mecânicas mais severas, apresentando maior resistência ao choque térmico e à fadiga (M. Wang et al., 2020). Para aplicações que exigem elevados níveis de brilho superficial ou resistência à corrosão, são frequentemente selecionados aços inoxidáveis martensíticos, como o AISI 420 (DIN/W. Nr. 1.2085), cuja microestrutura favorece operações de polimento fino (Kim & Lee, 2023).

Por sua vez, o acabamento superficial da cavidade do molde condiciona a definição da topografia final da superfície do polímero moldado (J. Li et al., 2023b). Em grande medida, a rugosidade e a textura do molde são replicadas na superfície da peça, embora o grau de replicação dependa do comportamento reológico do polímero e das condições de processamento adotadas, como temperatura, pressão e velocidade de injeção (J. Q. Li et al., 2012).

Diversas técnicas de acabamento superficial podem ser aplicadas aos moldes, permitindo obter superfícies com características topográficas distintas. O polimento mecânico, a texturização química e a texturização a laser são métodos comuns para controlar intencionalmente a topografia da cavidade do molde (Pereira & Corrêa, 2024). Estudos demonstram que variações no tipo de acabamento superficial

podem alterar significativamente as propriedades funcionais da superfície moldada, incluindo o seu comportamento ótico e a aparência visual.

De forma mais específica, a fresagem convencional tende a produzir superfícies com marcas de ferramenta bem definidas, geralmente associadas a níveis mais elevados de rugosidade. Em contraste, processos de retificação e polimento mecânico permitem reduzir significativamente a rugosidade superficial, possibilitando a obtenção de superfícies de alto brilho (D. J. Whitehouse, 2011). Mais recentemente, técnicas avançadas como a texturização a laser têm vindo a ser utilizadas para criar padrões controlados à microescala, permitindo ajustar de forma precisa a refletividade e a difusão da luz (Ali et al., 2023). Tratamentos químicos e processos de eletropolimento são igualmente empregues quando se pretende obter superfícies extremamente lisas e isotrópicas.

2.3.2. Aço Inox AISI 420

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em diferentes famílias, nomeadamente austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação, sendo esta classificação baseada na sua microestrutura predominante. Cada família apresenta propriedades distintas em termos de dureza, resistência mecânica, resistência à corrosão, maquinabilidade e capacidade de acabamento superficial (Mohammed & Cashell, 2021). Estes aços caracterizam-se pela elevada resistência à corrosão, resultante essencialmente da presença de crómio na sua composição química (Costa, 2017). De forma geral, considera-se que um aço é inoxidável quando apresenta um teor mínimo de cerca de 10,5% de crómio, elemento responsável pela formação de uma camada passiva de óxido de crómio (Cr_2O_3) na superfície do material (Magalhães, 2017). Esta película passiva é extremamente fina, aderente e auto-regenerativa, funcionando como uma barreira protetora contra a oxidação e outros mecanismos de degradação química, o que confere aos aços inoxidáveis uma elevada durabilidade em ambientes agressivos (de Moura et al. 2023). Esta composição química permite que o material seja submetido a tratamentos térmicos de têmpera e revenido, conduzindo à formação de uma microestrutura martensítica endurecida, com elevada dureza e boa resistência ao desgaste (Hassan & Jawad, 2018).

A Figura 8 representa uma ilustração dessa camada passiva regenerativa.

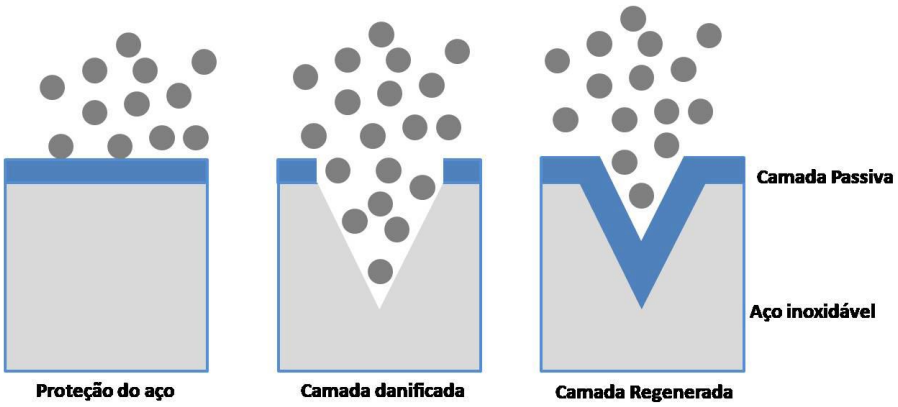


Figura 8. Desenho esquemático da camada passiva (Alcântara, 2021).

Do ponto de vista metalúrgico, o AISI 420 apresenta uma combinação equilibrada entre resistência à corrosão moderada, elevada dureza e boa resistência mecânica (Alcântara, 2021), o que o torna particularmente adequado para aplicações onde são exigidas superfícies de elevada qualidade e resistência ao desgaste, como é o caso de moldes de injeção e peças com requisitos estéticos rigorosos (de Moura et al. 2023). Após tratamento térmico, este aço pode atingir valores de dureza na ordem dos 48–52 HRC, podendo, em condições específicas, alcançar valores superiores, dependendo do ciclo térmico aplicado (Hassan & Jawad, 2018).

Outra característica relevante do AISI 420 é a sua boa capacidade de polimento, fator que o distingue de muitos outros aços ferramenta (Juiña et al., 2022). A sua microestrutura relativamente homogénea e a presença controlada de carbonetos finos (Figura 9) contribuem para uma resposta favorável aos processos de acabamento superficial, permitindo a obtenção de superfícies com rugosidade extremamente reduzida.

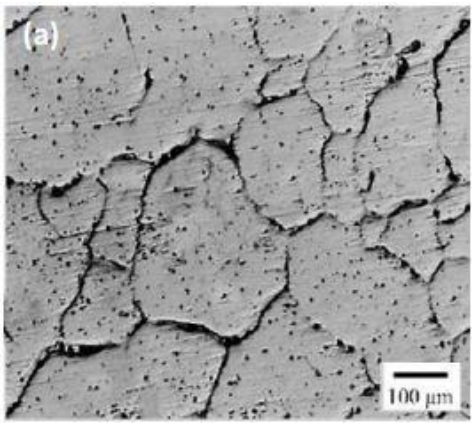


Figura 9. Microestrutura do aço AISI 420 na condição de fornecimento (recozido) (adaptado de (Alcántara Alza et al., 2023)).

A sua microestrutura enfatiza a sua aplicação em moldes que exigem elevado brilho superficial, transparência ótica das peças (produzidas em PMMA ou PC, por exemplo) e elevada resistência ao desgaste abrasivo (Juiña et al., 2022).

Entre as principais propriedades que justificam a sua utilização destacam-se:

- Elevada dureza após tratamento térmico;
- Boa resistência ao desgaste e à abrasão;
- Resistência à corrosão superior à dos aços ferramenta convencionais;
- Boa estabilidade dimensional;
- Excelente polibilidade;
- Boa resistência ao ataque químico por gases libertados durante o processamento de polímeros.

Adicionalmente, a resistência à corrosão do AISI 420 é destacável em ambientes de moldação onde existem ciclos térmicos repetitivos, presença de humidade ou processamento de polímeros higroscópicos, contribuindo para uma maior vida útil do molde e menor necessidade de manutenção (Samei et al., 2021). De frisar que o polimento deste aço carece de verificação prévia de microporosidades que possam existir.

2.3.3. Polimento de Alto Brilho

O polimento de moldes é, maioritariamente, um processo manual que exige elevado nível de competência técnica, experiência prática e sensibilidade por parte do operador. Apesar dos avanços tecnológicos verificados na área do fabrico assistido por computador, a automatização completa do polimento com elevada repetibilidade, controlo fino da topografia e tempos de ciclo reduzidos continua a representar um desafio industrial significativo. Consequentemente, têm vindo a ser desenvolvidas estratégias com o objetivo de otimizar o processo, reduzindo o tempo de execução e os custos associados, sem comprometer a qualidade superficial final (Klocke et al., 2011).

Para que o polimento seja eficaz, é importante adotar uma abordagem sequencial e progressiva na seleção dos abrasivos (Pessoles & Tournier, 2009). O processo deve iniciar-se com abrasivos de granulometria mais elevada, destinados à remoção das irregularidades mais pronunciadas resultantes de operações anteriores, como fresagem ou eletroerosão. Posteriormente, procede-se à utilização de abrasivos de grão progressivamente mais fino, até se atingir o nível de acabamento pretendido. Contudo,

a escolha inadequada de um abrasivo demasiado agressivo pode introduzir riscos profundos na superfície do aço, dificultando as etapas subsequentes e aumentando significativamente o tempo necessário para atingir o acabamento final (Klocke et al., 2011). Assim, torna-se indispensável uma avaliação prévia da condição superficial da cavidade do molde, de modo a definir uma estratégia de polimento adequada, baseada na sequência correta de granulometrias.

Na prática industrial, são utilizados diversos materiais e ferramentas abrasivas, incluindo pedras abrasivas, lixas, limas diamantadas, cerâmicas, feltros e pastas diamantadas. Numa fase inicial, recorrem-se geralmente a pedras abrasivas com grão adequado para eliminar marcas de maquinação mais acentuadas. De seguida, utilizam-se lixas de granulometria decrescente (por exemplo começando na 400# até chegar à 1500#) para reduzir progressivamente os riscos superficiais. O acabamento final é frequentemente realizado com pastas diamantadas aplicadas com feltros ou suportes específicos, permitindo atingir níveis de rugosidade muito reduzidos (Klocke et al., 2011).

A pasta diamantada é constituída por partículas de diamante sintético dispersas numa matriz pastosa, frequentemente à base de poliol, que mantém os grãos abrasivos em suspensão e assegura uma distribuição homogénea durante a aplicação (Pessoles & Tournier, 2009). Na Figura 10 podemos constatar numa imagem de microscopia SEM a dispersão dos diamantes de uma pasta diamantada comum.

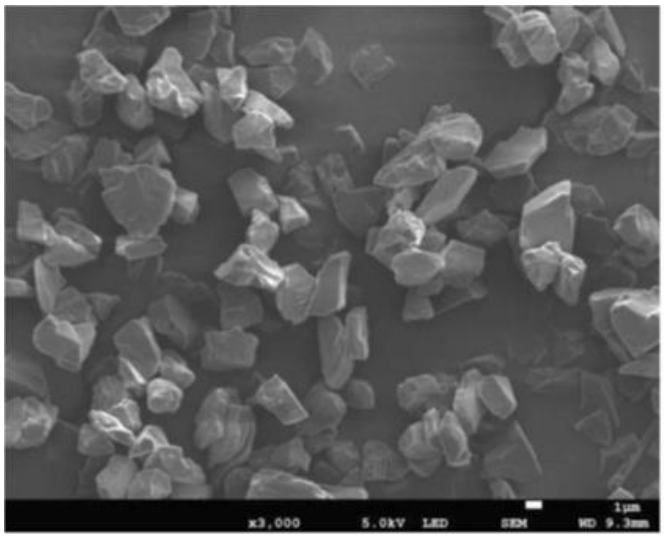


Figura 10. Imagem de microscopia SEM de abrasivo de diamante tradicional. (Tsai & Hoo, 2019)

Devido à extrema dureza do diamante, este material permite uma remoção de material muito controlada e uniforme, sendo possível alcançar valores de rugosidade inferiores a 0,3 µm e, em

condições ideais, ainda mais reduzidos (Magalhães, 2017). Quando corretamente aplicada, a pasta diamantada confere ao aço um acabamento com elevada refletividade, frequentemente descrito como efeito espelhado (Uchida et al., 2003). Na Tabela 2 podemos analisar os diferentes níveis e cores das pastas diamantadas mediante o acabamento pretendido:

Tabela 2. Tabela da granulametria das pastas diamantadas. (http://geolit.com.br/pastas-diamantadas - acesso dia 12/03/2026)

Tabela de pastas diamantadas		
Mícron	Aplicação	Cor
0 - ½	Polimento Final	CINZA
1 - 2	Super Polimento	LARANJA
0 - 2	Polimento Espelhado	VERMELHO
2 - 4	Acabamento de Peças	OCRE
3 - 6	Acabamento de Peças	AMARELO
4 - 8	Lapidação Fina	AZUL CLARO
6 - 12	Lapidação	VERDE
10 - 20	Semi Acabamento de pedras	LILÁS
20 - 40	Pequenos Desbaste - Aços Cartelos	AZUL
40 - 60	Desbate Rápido Pré-Polimento	MARROM
36 - 54	Preparação Dimensional Primeiros Desbates	PRETO
60 - 80	Grão grosso para desbastes	INCOLOR

Importa salientar que o polimento de alto brilho exige um nível de disciplina significativamente superior ao necessário para acabamentos mais foscos ou técnicos (Klocke et al., 2011). A obtenção de superfícies espelhadas implica rigoroso controlo das condições ambientais, elevada limpeza do local de trabalho e cuidados constantes com a superfície do molde e com as ferramentas utilizadas. A presença de partículas de pó com dimensões micrométricas pode provocar riscos ou defeitos superficiais visíveis, comprometendo a qualidade final da zona moldante (Klocke et al., 2011). Por esta razão, o polimento de alto brilho é frequentemente realizado em ambientes controlados, com sistemas de aspiração de partículas e procedimentos rigorosos de limpeza entre etapas (Klocke et al., 2011; Pessoles & Tournier, 2009).

Embora o processo de polimento continue fortemente dependente da intervenção humana, têm surgido diversas soluções tecnológicas com o objetivo de aumentar a eficiência e a consistência do acabamento superficial. Entre estas incluem-se ferramentas motorizadas de alta precisão, sistemas

ultrassónicos e equipamentos com controlo digital de parâmetros operacionais. Paralelamente, encontram-se em desenvolvimento máquinas capazes de realizar polimento de forma parcialmente ou totalmente automatizada (Pessoles & Tournier, 2009).

2.3.3.1. Polimento Manual

Embora o termo "manual" sugira apenas o uso da força física e da lixa, o polimento de moldes moderno é, na verdade, apoiado por um arsenal de dispositivos de precisão que amplificam a eficácia do polidor e permitem alcançar geometrias complexas. No início do processo, para as fases de desbaste e nivelamento, o polidor recorre frequentemente a máquinas de movimento alternativo, conhecidas tecnicamente como *Diprofilers*. Estes dispositivos pneumáticos ou elétricos simulam o movimento de vaivém da mão humana, mas com uma frequência e consistência impossíveis de replicar manualmente, permitindo que pedras cerâmicas ou limas diamantadas removam marcas de fresagem com rapidez e precisão geométrica.

Para as áreas de difícil acesso, como nervuras estreitas ou quinas vivas onde uma ferramenta rotativa causaria danos, o equipamento utilizado é o polidor ultrassónico. Este aparelho converte energia elétrica em vibrações microscópicas de alta frequência (na casa dos 20 a 40 kHz), fazendo com que a ponta da ferramenta — geralmente uma pedra cerâmica fina ou uma ponta de metal impregnada — oscile apenas alguns mícrons. Esta tecnologia permite "erodir" as marcas de eletroerosão sem arredondar os cantos do molde (Jefferies., 2012).

À medida que o trabalho progride para as fases de acabamento com pasta de diamante, entram em cena as micro-retíficadoras rotativas de alta velocidade. Estas são equipadas com mandris que seguram feltros, pontas de borracha ou escovas de pelo de cavalo (Oliveira et al., 2016; Pessoles & Tournier, 2009). No entanto, para o polimento "espelhado" de altíssima exigência, o polidor ainda confia em suportes manuais de madeira de balsa ou cobre, que oferecem o *feedback* tátil necessário para sentir a resistência do aço.

Para complementar estas ferramentas, a bancada de um mestre polidor inclui sempre dispositivos de limpeza por ultrassons, onde as componentes do molde são mergulhadas para garantir que nenhum resíduo de abrasivo grosso permaneça nos poros do metal antes da troca para um grão mais fino. Finalmente, a inspeção não é deixada ao acaso: utilizam-se lupas de pala de alta ampliação, microscópios

portáteis e lâmpadas de luz fria de alto contraste, que revelam riscos microscópicos ou distorções óticas ("ondas") na superfície.

2.3.3.2. Polimento Eletroquímico e Químico.

O polimento eletroquímico, frequentemente referido como eletropolimento, representa uma abordagem radicalmente diferente do método mecânico, pois substitui a abrasão física pela dissolução anódica controlada da superfície do metal (Yi et al., 2020). Em vez de "empurrar" o material com lixas, este processo remove as imperfeições microscópicas através de uma reação química assistida por eletricidade, sendo particularmente interessante para moldes com geometrias internas complexas, onde as ferramentas manuais ou rotativas simplesmente não conseguem alcançar com uniformidade.

Nesta operação, a componente metálica é imersa num banho eletrolítico — geralmente uma mistura ácida viscosa de ácido sulfúrico e ácido fosfórico — e ligado ao terminal positivo (ânodo) de uma fonte de corrente contínua (conforme esquema apresentado na Figura 11). Enquanto a corrente flui para os cátodos (terminais negativos), que são posicionados estrategicamente no tanque para envolver a peça, ocorre um fenómeno físico: uma película líquida de alta resistência forma-se na interface entre o metal e o eletrólito (Yi et al., 2020). Esta película é mais fina sobre os "picos" da rugosidade do aço e mais espessa nos "vales". Como a resistência elétrica é menor onde a película é mais fina, a corrente concentra-se nos picos, dissolvendo-os preferencialmente e nivelando a superfície até que esta atinja um estado de brilho espelhado e passivação química, o que aumenta significativamente a resistência à corrosão do molde (Brusov et al., 2020).

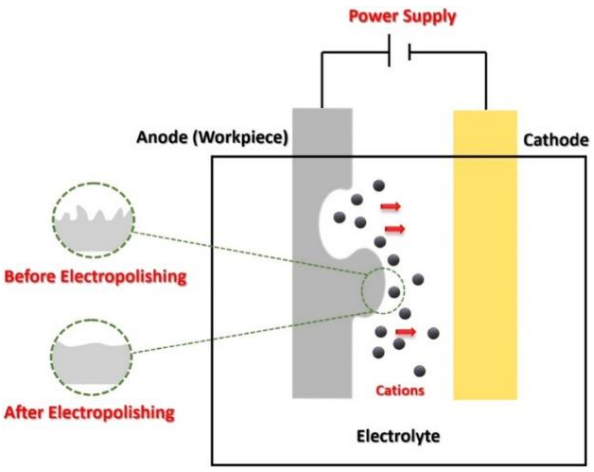


Figura 11. Ilustração esquemática de uma célula de eletropolimento. (Chaghazardi & Wüthrich, 2022)

O arsenal de aparelhos necessários para esta técnica é consideravelmente distinto da bancada de polimento manual. O coração do sistema é o retificador de corrente contínua, um dispositivo que permite um controlo extremamente fino da voltagem e da densidade de corrente. O banho ocorre em tanques de polimento fabricados em materiais resistentes a ácidos, como polipropileno ou chumbo, equipados com sistemas de aquecimento e arrefecimento por serpentinas, já que a temperatura do eletrólito deve ser mantida numa janela rigorosa (geralmente entre 40°C e 60°C) para garantir a estabilidade da reação (Brusov et al., 2020).

Além disso, o processo exige sistemas de agitação (seja mecânica ou por ar comprimido) para evitar a formação de bolhas de gás na superfície do molde, o que causaria marcas indesejadas conhecidas como "rastos de gás" (Brusov et al., 2020). Após a imersão, é importante a utilização de tanques de lavagem em cascata e sistemas de neutralização para garantir que nenhum resíduo ácido permaneça nos poros ou canais de refrigeração do molde. Embora o eletropolimento não corrija defeitos macroscópicos como marcas profundas de fresagem — exigindo ainda um pré-polimento mecânico —, ele elimina o risco de camadas deformadas, tensões residuais e o temido efeito de "casca de laranja", entregando uma superfície quimicamente pura e com uma suavidade microscópica superior.

Por sua vez, o polimento químico, ao contrário do eletroquímico, prescinde totalmente da aplicação de corrente elétrica externa, baseando-se exclusivamente numa reação de oxidação-redução autocatalítica entre a superfície do aço e uma solução química agressiva (Kaneko & Sato, 1990). Este processo é frequentemente descrito como um "ataque controlado", onde o banho químico é formulado para dissolver as micro-asperezas do metal a uma velocidade superior à dos "vales" da rugosidade (conforme representado na Figura 12). É uma técnica extremamente eficiente para componentes de moldes com geometrias internas impossíveis de alcançar manualmente, como canais de refrigeração complexos ou cavidades com texturas profundas, onde a uniformidade da remoção de material é a prioritária (Kaneko & Sato, 1990).

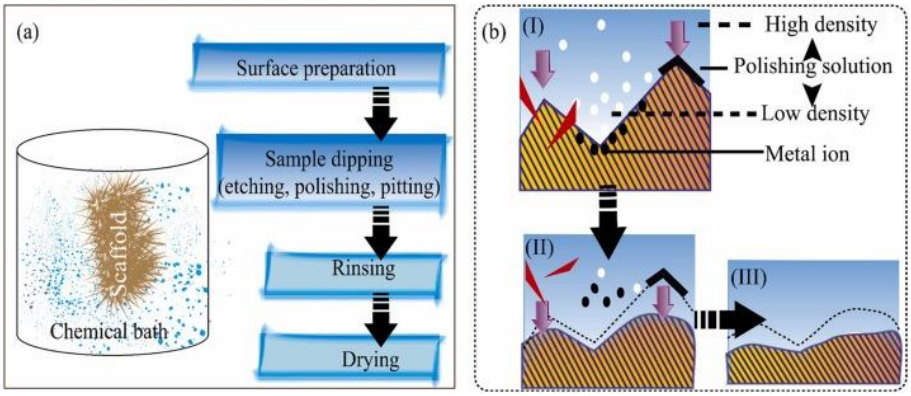


Figura 12. a) Etapas do polimento químico. b) mecanismo de remoção. (Yan et al., 2025)

Nesta operação, a componente metálica é imersa num banho químico de imersão, composto geralmente por uma mistura complexa de ácidos (nítrico, clorídrico ou fosfórico) combinada com agentes de brilho, tensioativos e inibidores de corrosão (Brusov et al., 2020). Estes aditivos criam uma camada viscosa de difusão sobre a peça que regula a passagem dos iões metálicos. O sucesso do polimento químico depende da cinética da reação; por isso, o controlo da temperatura e da concentração da solução é muito mais rigoroso do que em processos mecânicos. Se o banho estiver demasiado quente ou concentrado, o aço sofrerá um ataque generalizado (corrosão), perdendo a tolerância dimensional; se estiver demasiado fraco, a superfície ficará baça.

O conjunto de aparelhos para o polimento químico foca-se na gestão do fluido e na segurança. Os tanques de imersão são construídos em polímeros de alta densidade ou aço inoxidável revestido com teflon para resistir à corrosão química extrema. Um componente importante no sistema é o sistema de exaustão e lavagem de gases, uma vez que a reação química liberta vapores ácidos e óxidos de azoto que devem ser neutralizados antes de serem libertados. Para garantir que a solução fresca toque em todas as superfícies da peça de forma equitativa, utilizam-se agitadores mecânicos de vaivém ou sistemas de bombagem de circulação forçada, que evitam a estagnação do reagente em zonas mortas a tratar.

Após a imersão, que dura habitualmente entre alguns segundos a poucos minutos, a peça passa por estações de lavagem por aspersão e tanques de passivação química, que interrompem imediatamente a reação e criam uma camada protetora contra a oxidação pós-processo. Embora o polimento químico não atinja o brilho "espelho absoluto" de um polimento manual com diamante de 1 micron, ele oferece uma superfície extremamente limpa, livre de tensões mecânicas e com uma rugosidade uniforme em 100% da área exposta, sendo a solução ideal para preparar superfícies que receberão tratamentos

posteriores como a nitruração ou revestimentos PVD (*Physical Vapor Deposition* – Deposição Física de Vapor).

2.3.3.3. Polimento a laser

O polimento a laser surge como uma alternativa tecnologicamente avançada aos métodos abrasivos convencionais, permitindo a automatização do acabamento em superfícies complexas na indústria de moldes (Krishnan & Fang, 2019; Temmler et al., 2012). Este processo baseia-se num princípio térmico de fusão superficial, onde um feixe de alta intensidade funde uma camada micrométrica do aço (Krishnan & Fang, 2019; Temmler et al., 2012). Sob a influência da tensão superficial, o material no estado líquido flui dos picos para os vales da topografia rugosa, resultando num alisamento uniforme após a solidificação que reduz significativamente a rugosidade original proveniente de processos anteriores como a eletroerosão (Krishnan & Fang, 2019). Esta tecnologia destaca-se pela sua elevada produtividade, podendo ser até 30 vezes mais rápida do que o polimento manual, além de oferecer uma repetibilidade superior ao eliminar a variabilidade associada à sensibilidade do operador humano (Temmler et al., 2012).

Em aços de ferramentas endurecidos, a aplicação do laser permite reduzir a rugosidade superficial de valores iniciais superiores a $1{,}0\mu m$ para níveis próximos de $0{,}16\mu m$, possibilitando ainda o tratamento seletivo de áreas de design complexo (Temmler et al., 2012). No entanto, a implementação industrial exige um controlo rigoroso dos parâmetros operacionais, uma vez que os rápidos ciclos térmicos podem induzir tensões residuais ou a formação de uma zona termicamente afetada na camada superficial (Krishnan & Fang, 2019). Para mitigar estes efeitos metalúrgicos, têm sido desenvolvidas estratégias avançadas como o uso de sistemas de feixe duplo (*dual-beam*), que combinam o polimento com o recozimento simultâneo para otimizar a microdureza e a integridade final da zona moldante (X. Xu et al., 2022).

O polimento por radiação laser visa permitir a obtenção de diferentes níveis de brilho na superfície do molde. Trata-se de uma abordagem inovadora, na qual o feixe de radiação funciona como uma ferramenta flexível e sem contacto direto, promovendo a fusão de uma fina camada metálica. No estado líquido, as irregularidades presentes na superfície tendem a ser suavizadas por efeito de auto-organização, resultante da ação das tensões superficiais (Krishnan & Fang, 2019).

A Figura 1 seguinte apresenta, de forma esquemática, o princípio de funcionamento do processo de polimento a laser onde se verifica o varrimento da incidência do laser da esquerda para a direita.

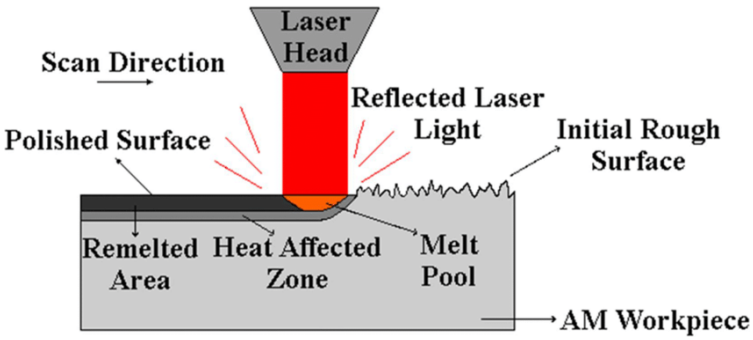


Figura 13. Representação esquemática do polimento a laser. (Nesli & Yilmaz, 2021)

2.4. Rugosidade

2.4.1. Princípios

Através da medição da rugosidade é possível caracterizar, de forma quantitativa e objetiva, a topografia da superfície, permitindo verificar com rigor o nível de textura introduzido durante os processos de fabrico ou acabamento (D. Whitehouse, 2002).

O acabamento superficial é normalmente expresso por parâmetros de rugosidade medidos em micrómetros (µm), sendo a rugosidade superficial um dos indicadores de maior destaque da qualidade geométrica de uma superfície. O controlo deste parâmetro desempenha duas funções: por um lado, permite monitorizar e validar as etapas de fabrico, como a maquinagem, retificação ou polimento; por outro, contribui para assegurar que a superfície cumpre os requisitos funcionais e estéticos definidos em projeto. Estas duas vertentes — controlo do processo e desempenho funcional — influenciam diretamente a qualidade e o comportamento do produto final (D. Whitehouse, 2002).

A crescente relevância da caracterização da rugosidade no âmbito das especificações geométricas levou ao desenvolvimento de normas técnicas específicas, nomeadamente a norma europeia ISO 4287. Esta norma estabelece a terminologia, definições e parâmetros necessários para a avaliação da textura superficial, incluindo a rugosidade, a ondulação e o perfil primário, promovendo a uniformização de critérios de medição e interpretação de resultados (Qualidade, 2011).

2.4.2. Medição da rugosidade

Atualmente existem diversos equipamentos destinados à medição da rugosidade, os quais podem ser classificados em duas categorias: métodos por contacto e métodos sem contacto. Nos sistemas por contacto, a medição é realizada através de um palpador que percorre fisicamente a superfície a analisar, registando as variações do perfil topográfico. Já nos métodos sem contacto, a aquisição de dados é efetuada por técnicas óticas, frequentemente baseadas em feixes laser ou sistemas de interferometria, eliminando o contacto direto com a superfície (Bhushan, 2000).

Nos instrumentos de medição por contacto, existem limitações associadas às características geométricas do próprio palpador. A forma e o raio da ponta de contacto condicionam a capacidade de detetar determinadas irregularidades, uma vez que o apalpador não consegue medir cavidades mais profundas do que o seu próprio raio nem identificar raios de curvatura inferiores ao da sua extremidade. Estas restrições podem conduzir a uma subavaliação de determinados detalhes microscópicos da superfície (Bhushan, 2000).

O rugosímetro de contacto (Figura 14) é um aparelho composto por uma cabeça de medição que, por conseguinte, contem um palpador e um braço. Esse braço está ligado a um transdutor linear LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* – Transformador Diferencial Variavel Linear) que monitoriza os movimentos verticais. Por sua vez, o solenoide de força do aparelho está conectado ao braço do palpador no eixo de flexão, promovendo a pressão do palpador sobre a amostra. O sensor de proximidade serve para limitar a localização do palpador em relação à amostra. Durante o varrimento, o transdutor gera um sinal analógico correspondente às flutuações verticais do palpador. Este sinal é posteriormente amplificado, filtrado e processado matematicamente para o cálculo dos diversos parâmetros de rugosidade (R_a, R_q, R_z, entre outros) (Bhushan, 2000).

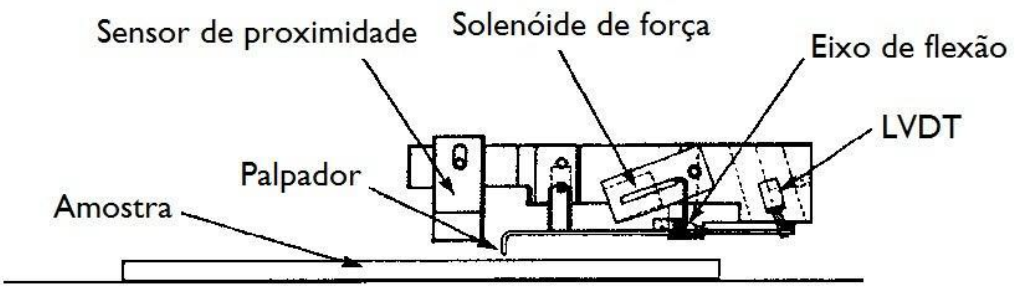


Figura 14. Esquema de um rugosímetro de contacto. (Bhushan, 2000)

Um esquema típico de um rugosímetro sem contacto (ou perfilómetro ótico) representa o princípio de medição baseado na interação entre um feixe luminoso e a topografia da superfície. Nestes sistemas (Figura 15), uma fonte de luz (laser, luz branca ou LED) é direcionada para a superfície da amostra através de um sistema ótico composto por lentes e, em alguns casos, divisores de feixe. A radiação refletida pela superfície é posteriormente captada por um detetor (CCD/CMOS ou fotodíodo), permitindo reconstruir o perfil tridimensional da rugosidade sem contacto físico com o material.

Durante a medição, o feixe incidente interage com as irregularidades da superfície, sendo refletido com diferentes intensidades e fases em função da altura local $z(x, y)$. O sinal ótico recolhido é convertido em dados digitais, a partir dos quais se obtém o perfil de rugosidade e parâmetros como R_a, R_q, R_z e/ou R_t. Em técnicas interferométricas, a altura da superfície é determinada pela diferença de caminho ótico entre o feixe de referência e o feixe refletido pela amostra, enquanto nos sistemas confocais a posição de foco máximo está diretamente associada à altura topográfica (Liao et al., 2018).

Este tipo de instrumentação distingue-se dos rugosímetros de contacto por eliminar erros associados ao raio do palpador e à força de contacto, sendo particularmente adequado para superfícies de elevado brilho, materiais macios ou microestruturas complexas. Contudo, a sua precisão pode ser influenciada pela refletividade, transparência ou absorção ótica da superfície, bem como pelo comprimento de onda utilizado, que limita a resolução espacial da medição (Liao et al., 2018).

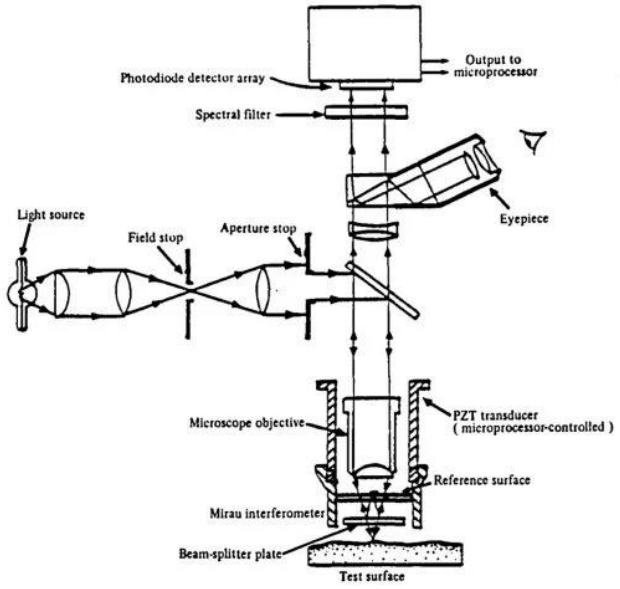


Figura 15. Esquema de um Perfilómetro ótico. (Bhushan et al., 1985)

Por sua vez, nos sistemas óticos — que operam sem contacto físico — a principal limitação está relacionada com o comprimento de onda da radiação utilizada, o qual determina a resolução espacial alcançável. Adicionalmente, superfícies com elevada refletividade ou com elevada capacidade de absorção luminosa podem dificultar a correta deteção do sinal, comprometendo a precisão da medição. Nestes casos, podem ocorrer erros associados à saturação do sensor ou à insuficiente captação da luz refletida, afetando a fiabilidade dos resultados obtidos (Bhushan, 2000).

2.4.3. Parâmetros de avaliação da rugosidade

A quantificação da rugosidade superficial pode ser efetuada recorrendo a análises bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Enquanto a caracterização em 2D se limita à avaliação de um perfil linear ao longo de um comprimento de amostragem, a abordagem 3D permite uma análise topográfica de uma área da superfície, oferecendo uma visão mais representativa da morfologia real. De acordo com a sua finalidade funcional, estes parâmetros de rugosidade são comummente classificados em três grupos distintos: parâmetros de amplitude, parâmetros espaciais e parâmetros híbridos (Gadelmawla et al., 2002; Qualidade, 2011).

Os parâmetros de amplitude são os indicadores que quantificam as discrepâncias estatísticas das irregularidades verticais de uma superfície. No contexto da moldação de polímeros para fins óticos, estas métricas permitem verificar a amplitude das microirregularidades do molde determinando assim o grau de difusão da luz na peça final. No âmbito desta categoria, destacam-se o desvio médio aritmético (R_a), o desvio quadrático médio (R_q), a altura máxima de dez pontos (R_z) e a altura máxima do perfil (R_t) (Reddy et al., 2023).

Entre estes, o R_a estabelece-se como a métrica mais difundida em contexto de controlo de qualidade industrial. Este parâmetro representa a média aritmética dos desvios absolutos das irregularidades em relação à linha média do perfil (y), calculada ao longo de um comprimento de amostragem específico (l), conforme ilustrado na Figura 16.

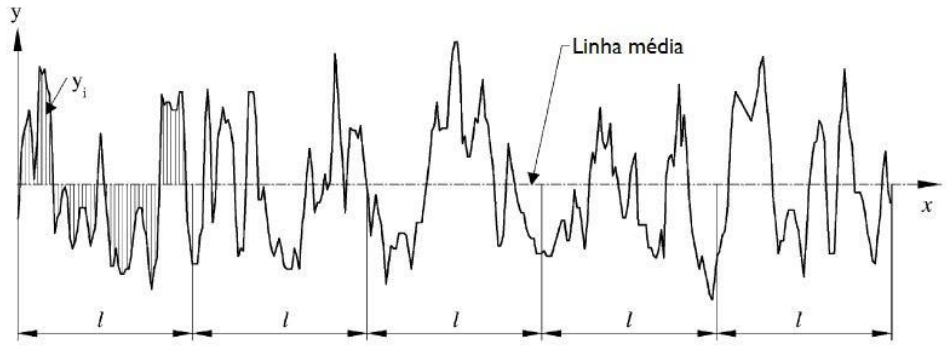


Figura 16. Definição do desvio médio aritmético do perfil (Ra). (Gadelmawla et al., 2002)

Matematicamente, a rugosidade R_a é definida pela integral da função do perfil, como demonstrado na Equação 7:

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y(x)|\, dx \tag{7}$$

Ao contrário do R_a, o parâmetro R_z apresenta uma sensibilidade superior na deteção de irregularidades acentuadas. A definição desta métrica varia consoante o referencial normativo adotado: a norma ISO define-o como a diferença de altura entre a média dos cinco picos mais elevados e a dos cinco vales mais profundos num dado comprimento de amostragem. Já a norma DIN estabelece o R_z como a média aritmética da soma das amplitudes desses mesmos pontos (Figura 17).

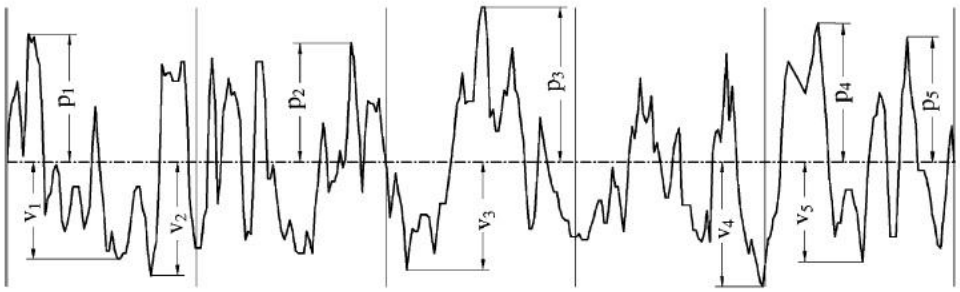


Figura 17. Definição da altura máxima do perfil em 10 pontos (Rz ISO e DIN). (Gadelmawla et al., 2002)

As formulações matemáticas correspondentes encontram-se detalhadas nas equações 8 e 9 onde p e v representam, respetivamente, os picos e vales registados (Gadelmawla et al., 2002).

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i - \sum_{i=1}^{n} v_i\right) \quad (8)$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i - \sum_{i=1}^{n} v_i\right) \quad (9)$$

Por sua vez, a rugosidade R_q (RMS – *Root Mean Square*) traduz o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície, assumindo-se como um indicador mais sólido para a caraterização estatística da topografia. Devido à sua natureza quadrática, o R_q é mais reativo do que o R_a na presença de desvios significativos em relação à linha média, sendo calculado através da Equação 10, onde l corresponde ao comprimento de análise e $y(x)$ à função do perfil (Gadelmawla et al., 2002).

$$R_a = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l \{y(x)\}^2\, dx} \quad (10)$$

Por fim, o parâmetro Rt (ou R_{max}) destaca-se pela sua extrema sensibilidade a descontinuidades pontuais. Este é definido pela amplitude total entre o pico mais alto e o vale mais profundo da superfície dentro do comprimento de avaliação, conforme ilustrado na Figura 18 (Gadelmawla et al., 2002).

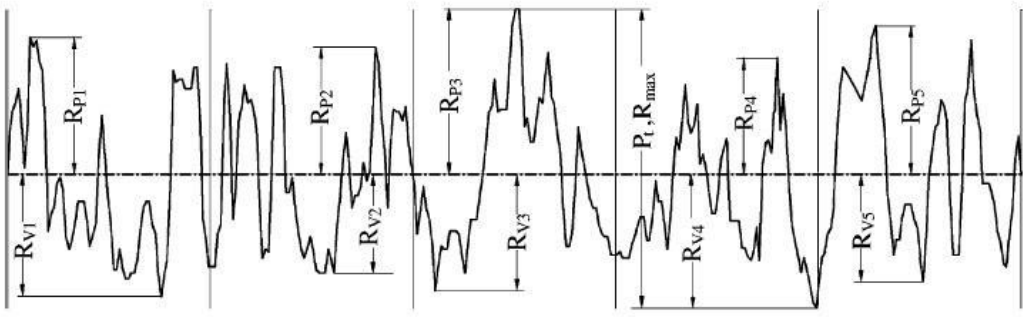


Figura 18. Definição da altura máxima do perfil (Rt). (Gadelmawla et al., 2002)

Os parâmetros espaciais (ou horizontais) destinam-se à caracterização das propriedades longitudinais dos desvios superficiais, focando-se na periodicidade e no espaçamento das irregularidades. No seio

desta categoria, assume particular relevância a densidade de picos do perfil, designada por RP_c (*Peak Count Number*) (Gadelmawla et al., 2002; Qualidade, 2011).

O RP_c quantifica a frequência de picos locais que ultrapassam uma banda de tolerância pré-definida pelo utilizador em relação à linha média. Para que um pico seja contabilizado, o perfil deve cruzar consecutivamente os limites superior e inferior desta banda, filtrando assim o ruído de medição irrelevante. Este parâmetro é calculado ao longo do comprimento de avaliação e expresso em picos por centímetro (picos/cm), conforme ilustrado na Figura 19.

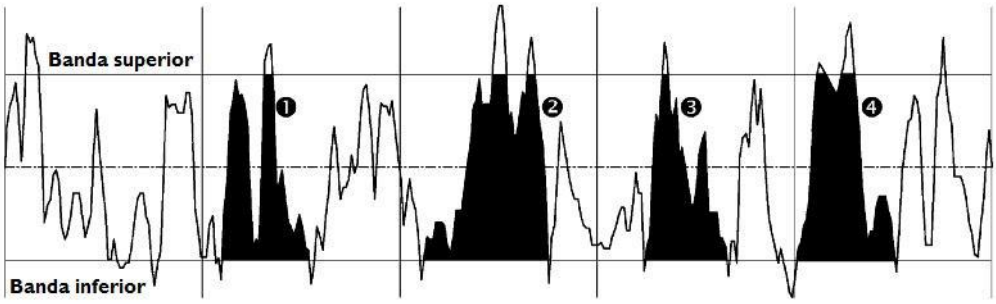


Figura 19. Contagem do número de larguras médias dos elementos do perfil (RPc). (Gadelmawla et al., 2002)

Esta métrica serve para prever o comportamento de aderência e as propriedades de difusão ótica da superfície polimérica final (Gadelmawla et al., 2002).

Os parâmetros híbridos derivam da correlação entre as características de amplitude e as propriedades espaciais da superfície. Consequentemente, qualquer variação morfológica, quer ocorra na dimensão vertical (altura) ou na horizontal (espaçamento), reflete-se diretamente nestes indicadores. No âmbito desta categoria, o parâmetro de maior relevância é o desvio quadrático médio do declive do perfil, designado por $R\Delta_q$(*Root Mean Square Slope*) (Gadelmawla et al., 2002; Qualidade, 2011).

O $R\Delta_q$ quantifica a inclinação média das irregularidades ao longo do perfil analisado. Fisicamente, este parâmetro ajuda no estudo da refletividade ótica, uma vez que o ângulo de inclinação local das microgeométricas define a direção dos raios de luz refletidos (reflexão especular vs. difusa) (Toscani et al., 2020). Matematicamente, o $R\Delta_q$ é calculado através da raiz quadrada da média das derivadas do perfil, como se apresenta na Equação 11, onde l representa o comprimento de amostragem e $\frac{dy}{dx}$ a inclinação local do perfil de rugosidade (Gadelmawla et al., 2002):

$$R\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^L \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} \quad (11)$$

2.5. Escala

No que concerne à quantificação do acabamento, apesar da existência de métodos de metrologia ótica de elevada precisão (como a perfilometria laser), o seu elevado custo e sensibilidade ambiental confinam-nos frequentemente a contextos de investigação. Na prática industrial, privilegia-se a utilização de métodos comparativos por inspeção visual e tátil, sendo a escala SPI (*Society of the Plastics Industry*) o padrão de referência mais difundido para a normalização de acabamentos de moldes (Berins, 2002).

A escala SPI categoriza o acabamento superficial em 12 classes distintas, distribuídas por quatro grupos principais, que evoluem do estado especular ao fosco (Berins, 2002):

Classes A (A-1, A-2, A-3): Correspondem a acabamentos de alto brilho, obtidos através de polimento diamantado em aços previamente tratados termicamente. São superfícies de elevada qualidade ótica, aplicáveis na produção de lentes, viseiras e componentes refletoras, apesar do elevado custo e exigência de mão-de-obra.

Classes B (B-1, B-2, B-3): Proporcionam um acabamento semi-brilhante. O polimento é efetuado com lixas de grão fino, garantindo a eliminação de quaisquer marcas de mecanização ou de ferramenta, sem atingir o brilho especular do grupo A.

Classes C (C-1, C-2, C-3): Resultam em superfícies foscas (*mate*), obtidas por pedras de polimento. Embora isentas de marcas de ferramentas, estas superfícies não conferem brilho à peça moldada.

Classes D (D-1, D-2, D-3): Destinam-se a acabamentos texturizados ou industriais, onde o molde é submetido a jato de areia (esferas de vidro ou óxido de alumínio). Estas classes são frequentemente aplicadas para dissimular defeitos de moldação, como rechupes, ou para conferir propriedades antirreflexo (Reddy et al., 2023).

A prevalência do método comparativo nas empresas justifica-se pela sua relação custo-benefício e pela robustez face aos equipamentos eletrónicos de precisão, que exigem calibrações frequentes e ambientes controlados (Berins, 2002). Na Tabela 3 são expostos os diferentes tipos de acabamentos aplicados na indústria dos moldes:

Tabela 3. Descrição do tipo de acabamento da escala SPI. (Berins, 2002)

Acab.	Descrição	Rugosidade média (µm)	Observações
A1	Pasta de diamante grau 3	0,012 – 0,025	Para acabamento em espelho e óticos. Polimento mais demorado Influência do aço no resultado final
A2	Pasta de diamante grau 6	0,025 – 0,05	
A3	Pasta de diamante grau 15	0,05 – 0,10	
B1	Lixa de papel 600	0,05 – 0,10	Remove as marcas da maquinação Favorece a desmoldagem Acabamento ligeiramente refletor, com brilho
B2	Lixa de papel 400	0,10 – 0,15	
B3	Lixa de papel 320	0,28 – 0,32	
C1	Pedra 600	0,35 – 0,40	Remove as marcas da maquinação Favorece a desmoldagem Acabamento *mate*, sem brilho
C2	Pedra 400	0,45 – 0,55	
C3	Pedra 320	0,63 – 0,70	
D1	Jato de vidro a seco a 200mm distância; 0,7MPa durante 5s	0,80 – 1,00	Para fins decorativos Ajuda a disfarçar defeitos de contração e diversas imperfeições Acabamento baço, não refletor
D2	#240 Oxido alumínio a 125mm distância; 0,7MPa durante 5s	1,00 – 2,80	
D3	#24 Oxido alumínio a 125mm distância; 0,7MPa durante 5s	3,20 – 18,0	

2.6. Brilho

2.6.1. Princípios

A caracterização da aparência de superfícies poliméricas é um domínio complexo que se divide fundamentalmente em dois vetores: os atributos cromáticos, relacionados com a cor, e os atributos geométricos, associados à reflexão da luz e ao brilho (Campo. E. Alfredo, 2006). Embora o sistema visual humano possua uma sensibilidade intrínseca excecional, sendo capaz de distinguir variações subtis de intensidade luminosa que superam frequentemente a resolução de instrumentos óticos básicos, a sua avaliação padece de uma subjetividade inerente (Kigle-Boeckler, 1995). Por ser uma análise estritamente

comparativa e dependente de fatores fisiológicos e contextuais do observador, a inspeção humana não permite uma quantificação absoluta e reprodutível (Kigle-Boeckler, 1995). Para colmatar esta limitação e responder às rigorosas exigências de qualidade e estética na indústria dos plásticos, tornou-se necessário o recurso a equipamentos de metrologia ótica (Dawkins, 2013). Estes dispositivos permitem converter a perceção visual em dados numéricos precisos, para assim validar se uma peça cumpre os requisitos de projeto (Dawkins, 2013).

Neste contexto, a cor de um polímero é determinada pela interação da radiação com o material através da absorção seletiva, podendo ser descrita rigorosamente por sistemas de coordenadas como os valores de triestímulo (x, y, z) ou o sistema de Munsell, que categoriza a resposta espetral em termos de matriz, luminosidade e saturação (Dawkins, 2013). Por outro lado, o brilho — parâmetro importante no estudo do acabamento superficial de moldes — está intrinsecamente ligado à reflexão direcional da luz (Pereira & Corrêa, 2024). Ao contrário da cor, que depende fortemente da composição química e dos pigmentos, o brilho é condicionado pela uniformidade da superfície e pelo índice de refração do material (Pereira & Corrêa, 2024). Assim, a capacidade de uma superfície polimérica em refletir a luz de forma especular ou difusa é uma consequência direta da fidelidade da réplica da textura do molde e das propriedades óticas intrínsecas do polímero utilizado (Dawkins, 2013).

2.6.2. Medição e parâmetros de avaliação do brilho

A quantificação do brilho em superfícies poliméricas é realizada através da medição da reflectância especular, que define a proporção da luz incidente refletida numa direção igual e oposta à normal da superfície (Pereira & Corrêa, 2024). Segundo a norma ISO 2813, o instrumento padrão para esta avaliação é o medidor de brilho (*glossmeter*), que projeta um feixe de luz colimado a um ângulo de incidência específico (θ) e mede a intensidade da luz refletida através de uma abertura recetora (Ariño et al., 2004). Na Figura 20 está apresentado esquematicamente um aparelho de medição de brilho onde se pode verificar que este é constituído por uma fonte de luz incandescente que gera um feixe de luz. Esse feixe de luz incidirá no recetor. O recetor, por sua vez, deve ser um dispositivo fotossensível capaz de reagir à incidência da radiação visível (ASTM D2457-03, 2003).

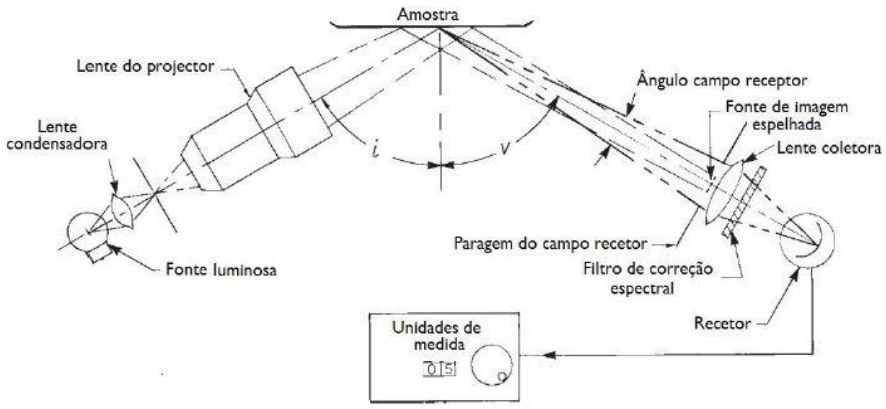


Figura 20. Diagrama de um medidor de brilho. (ASTM D2457-03, 2003)

O parâmetro de avaliação é o Unidade de Brilho (UB ou *GU - Gloss Unit*). Esta escala linear baseia-se num padrão de referência de vidro preto altamente polido, com um índice de refração de 1,567 para o comprimento de onda da linha D do sódio, ao qual é atribuído o valor de 100 UB para todos os ângulos de incidência (Minami, 2010). Para polímeros, o brilho medido é uma função direta da qualidade da réplica da superfície do molde e da frescura da interface ar-polímero.

A seleção do ângulo de medição é importante e depende do nível de brilho da amostra, sendo categorizada em três geometrias padrão (Pereira & Corrêa, 2024):

60° (Ângulo Universal): Utilizado para a maioria dos polímeros com brilho intermédio (10–70 UB) (Chailad & Yang, 2024).

20° (Alto Brilho): Aplicado quando a leitura a 60° excede 70 UB (Chailad & Yang, 2024). Este ângulo é mais sensível a efeitos de nevoeiro ótico (*haze*) e a pequenas variações na microrrugosidade provenientes do polimento do molde (Minami, 2010).

85° (Baixo Brilho/Mate): Recomendado quando o valor a 60° é inferior a 10 UB, sendo ideal para analisar superfícies com texturas rugosas ou gravadas quimicamente, onde a reflexão difusa predomina (Minami, 2010).

Além da intensidade absoluta (UB), a avaliação do brilho exige frequentemente a análise de parâmetros complementares. O *Haze* de Reflexão é um destes indicadores, descrevendo a dispersão da luz em ângulos adjacentes ao pico especular.

Em peças injetadas, um valor elevado de nevoeiro ótico pode indicar uma má replicação da superfície do molde ou a presença de microtexturas superficiais não desejadas, que dissipam a luz e reduzem a nitidez da imagem refletida (conhecida como *Distinctness of Image - DOI*) (Minami, 2010). A correlação entre estes parâmetros óticos e os parâmetros topográficos do molde (como o Ra ou Rz) permitem o controlo de qualidade no desenvolvimento de moldes de alta precisão.

O brilho final de uma peça injetada é o resultado de uma interação complexa entre as propriedades óticas intrínsecas do material, a topografia da cavidade do molde e a eficiência da replicação superficial durante o processamento (Simonsen et al., 2005).

No âmbito dos polímeros de engenharia transparentes, como o Polimetilmetacrilato (PMMA) e o Policarbonato (PC), o índice de refração (n) atua como o indicador da natureza do material. Este parâmetro define a capacidade do polímero em interagir com a radiação incidente. Complementarmente, a microrrugosidade da superfície do molde é um fator com impacto direto no brilho, uma vez que dita o balanço entre a reflexão especular e a difusa. Por último, existe um fator de influência indireta: a fidelidade de replicação. Esta depende da interface tribológica entre o fundido e o metal, sendo condicionada pela reologia do polímero, pela condutividade térmica do aço e pelos parâmetros de pressão e temperatura impostos no ciclo de injeção (Simonsen et al., 2005).

2.6.3. Fundamentos Óticos e Índice de Refração

O brilho medido numa superfície é uma manifestação da sua refletividade, a qual está estritamente ligada ao índice de refração (n). Esta propriedade ótica é característica de cada macromolécula e pode ser estimada através da relação de Lorentz-Lorenz (Equação 12), que estabelece uma correlação entre a estrutura eletrónica e a densidade do meio:

$$\frac{(n^2-1)}{(n^2-2)} \cdot \frac{1}{\rho} = \left(\frac{4}{3}\right) \pi \cdot N \cdot \alpha \cdot M \tag{12}$$

Nesta formulação, n representa o índice de refração, ρ a densidade, N o número de Avogadro, M a massa molecular e α a polarizabilidade molecular. A polarizabilidade reflete a facilidade com que a nuvem eletrónica da molécula é deformada por um campo elétrico externo; tipicamente, estruturas com maior volume molar e densidade eletrónica apresentam valores de n mais elevados (Galiatsatos, 2007).

No caso específico dos materiais em estudo, o PMMA apresenta um índice de refração de aproximadamente 1,492 (El-Nasser, 2017), enquanto o PC exibe um valor superior, cerca de 1,585 (Peixoto et al., 2022). Esta diferença justifica por que razão, sob as mesmas condições de acabamento superficial, o policarbonato tende a apresentar um brilho especular intrínseco superior ao do PMMA. De uma forma geral, a maioria dos polímeros situa-se no intervalo de 1,33 a 1,73 (Galiatsatos, 2007).

Embora o PMMA e o PC sejam tipicamente amorfos, em polímeros passíveis de cristalização, o aumento do grau de cristalinidade resulta numa maior compacidade molecular (densidade) (Clavier, 2017), elevando consequentemente o índice de refração (Galiatsatos, 2007)

A eficiência com que a luz é refletida na interface ar-polímero é quantificada pelo coeficiente de reflexão (R), definido pela razão entre a intensidade da luz refletida (l_r) e a incidente (l_0) (Pereira & Corrêa, 2024). Segundo as Leis de Fresnel (Equação 13), este coeficiente é dependente do ângulo de incidência e do ângulo de refração (θ) (Cao & Sendur, 2019):

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \left[\frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha - \beta)} + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha - \beta)}\right] \tag{13}$$

Para incidência normal, a relação simplifica-se para (Cao & Sendur, 2019):

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \tag{14}$$

evidenciando que o brilho aumenta proporcionalmente ao índice de refração do material (Pereira & Corrêa, 2024). Além do material, o brilho percecionado aumenta com o incremento do ângulo de incidência, atingindo o seu máximo teórico quando a reflexão se aproxima da totalidade (Galiatsatos, 2007). Em suma, o desempenho estético de uma peça produzida em PMMA ou PC é o somatório da sua capacidade intrínseca de refletir a luz e da perfeição geométrica da sua superfície, obtida através do polimento rigoroso do molde (Pereira & Corrêa, 2024). A Figura 21 esclarece esse aumento do brilho face ao aumento do índice de refração, assim como o angulo de incidência até atingir o valor de refração máximo teórico.

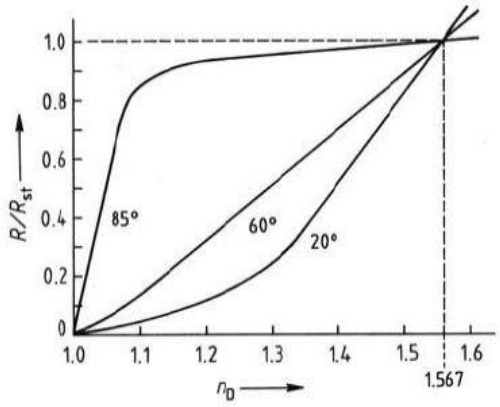


Figura 21. Comparação entre o índice de refração, o brilho teórico e o ângulo de incidência. (Galiatsatos, 2007)

2.7. Refletividade ótica e propriedades

2.7.1. Natureza da Luz Visível e Interação com Polímeros

A luz visível compreende uma estreita faixa do espetro eletromagnético, com comprimentos de onda (λ) situados aproximadamente entre os 380 nm e os 750 nm (El-Nasser, 2017). Para polímeros amorfos como o PMMA e o PC, a sua elevada transmitância deve-se à ausência de centros de dispersão (cristalitos) maiores que o comprimento de onda da luz (Perez, 1998). Quando um feixe incide sobre a interface ar-polímero, parte da energia é refletida, outra é absorvida e a restante é transmitida (Boztepe et al., 2017). Segundo (Hecht, 2017), a resposta ótica do material é governada pela sua permissividade elétrica e pela frequência da radiação incidente, que determinam o índice de refração do meio e, consequentemente, a sua capacidade de refletividade.

A natureza da reflexão é ditada pela relação entre a rugosidade superficial e o comprimento de onda da luz incidente (λ) (Y. Y. Fan & Huynh, 1992). De acordo com o critério de *Rayleigh*, uma superfície é considerada óticamente lisa se as irregularidades forem significativamente menores que $\frac{\lambda}{8}$ (Minami, 2010).

Reflexão Especular: Ocorre em superfícies com microrrugosidade desprezável (como moldes polidos a espelho) (Ribeiro & Carneiro, 2016). O feixe incidente é refletido num ângulo único, seguindo a Lei de Snell-Descartes (Cao & Sendur, 2019). Em polímeros como o PC, a elevada reflexão especular confere um aspeto metálico ou vítreo à peça (Pazos et al., 2003).

Reflexão Difusa: Manifesta-se quando a superfície apresenta irregularidades macro ou micrométricas (provenientes de moldes texturizados ou com desgaste) (Ribeiro & Carneiro, 2016). Nestes casos, a luz é dispersa em múltiplos ângulos (reflexão Lambertiana), resultando numa aparência baça ou mate, comum em polímeros reforçados ou moldes sujeitos a jato de areia (Galiatsatos, 2007).

Na Figura 22 podemos verificar as diferentes projeções da luz mediante a refletividade da superfície, nomeadamente se esta absorve ou espalha. À esquerda a luz tem uma refletividade quase total, no entanto, à direita existe uma elevada dispersão de luz (Galiatsatos, 2007).

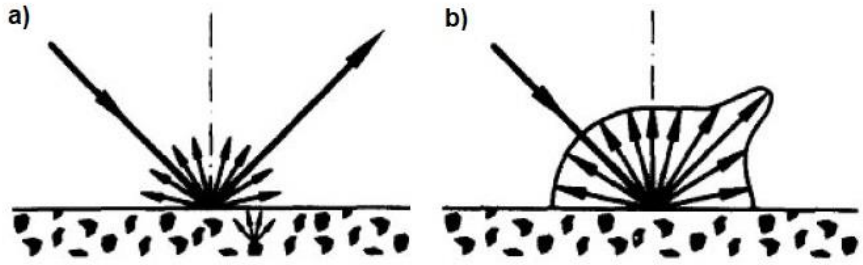


Figura 22. a) Reflexão especular, b) Reflexão difusa.

2.7.2. Quantificação da Refletividade Ótica

A medição da refletividade ótica é realizada através da espetrofotometria ou da brilhometria, dependendo do objetivo da análise (Fernández-García et al., 2017). A refletância total (R) é a soma da componente especular e difusa (Zarobila et al., 2024).

Para a caracterização rigorosa, utiliza-se a esfera de integração, um dispositivo que permite capturar toda a luz refletida pela amostra num ângulo de 2 π esterradianos, eliminando a dependência do ângulo de visão (Fernández-García et al., 2017). Em contextos industriais, o parâmetro DOI (*Distinctness of Image*) é frequentemente empregue para quantificar a nitidez da imagem refletida em polímeros de alto brilho, sendo um indicador sensível à presença de rugosidade de baixa frequência (conhecida como "casca de laranja" (Wiesbaden, 2013).

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi desenvolvido em diversas entidades, nomeadamente na Multiborracha – Acessórios de Plástico e Borracha, Lda que forneceu os aços, a sua maquinação e a estrutura moldante. Numa segunda entidade foram polidos os postiços com os acabamentos em alto brilho e no departamento de Engenharia de Polimeros da Universidade do Minho foram realizadas as injeções e caracterizações das amostras.

3.1 Medologia do Trabalho Experimental

A metodologia experimental foi estruturada em quatro fases: conceção e preparação do molde, produção das amostras por moldação por injeção, caracterização metrológica das superfícies e análise dos resultados obtidos.

Na fase 1, inicialmente foi projetado o molde (Figura 23) e encomendados os aços. Posteriormente foram feitas as maquinações e ajustes dos postiços moldantes. Depois dos postiços moldantes estarem ajustados foram polidos em dois acabamentos distintos, um com o acabamento SPI A1 e outro com SPI A3. Por fim, nesta etapa foram medidas as rugosidades Ra, Rq, Rz e Rt de cada postiço.

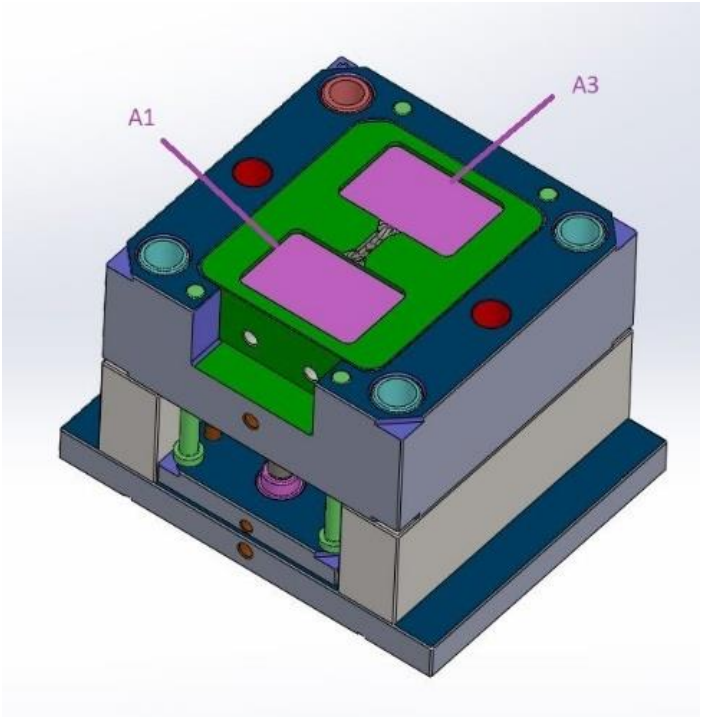


Figura 23. Projeto do molde. Os postiços estão colocados no lado móvel.

Na fase 2 foram injetadas as amostras em dois materiais, PMMA e PC respetivamente.

Neste processo obtiveram-se 72 amostras em PMMA, codificadas como PMMA-A1 e PMMA-A3 e 72 amostras em PC, codificadas como PC-A1 e PC-A3. De frisar que em cada material foram injetadas 6 amostras em condições e variáveis de processamento distintas, de acordo com o exposto na Tabela 4:

Tabela 4. Codificação das amostras e respetivas condições de processamento.

Material	Acab.	Código	Qtd.	Acab.	Código	Qtd.	Condição		
PMMA	SPI A1	PMMA-A1-C1V1	6	SPI A3	PMMA-A3-C1V1	6	$V_{inj}\uparrow$	$P_{inj} =$	$T_{molde} =$
		PMMA-A1-C1V2	6		PMMA-A3-C1V2	6	$V_{inj}\downarrow$	$P_{inj} =$	$T_{molde} =$
		PMMA-A1-C2P1	6		PMMA-A3-C2P1	6	$V_{inj} =$	$P_{inj}\uparrow$	$T_{molde} =$
		PMMA-A1-C2P2	6		PMMA-A3-C2P2	6	$V_{inj} =$	$P_{inj}\downarrow$	$T_{molde} =$
		PMMA-A1-C3T1	6		PMMA-A3-C3T1	6	$V_{inj} =$	$P_{inj} =$	$T_{molde}\uparrow$
		PMMA-A1-C3T2	6		PMMA-A3-C3T2	6	$V_{inj} =$	$P_{inj} =$	$T_{molde}\downarrow$
PC		PC-A1-C1V1	6		PC-A3-C1V1	6	$V_{inj}\uparrow$	$P_{inj} =$	$T_{molde} =$
		PC-A1-C1V2	6		PC-A3-C1V2	6	$V_{inj}\downarrow$	$P_{inj} =$	$T_{molde} =$
		PC-A1-C2P1	6		PC-A3-C2P1	6	$V_{inj} =$	$P_{inj}\uparrow$	$T_{molde} =$
		PC-A1-C2P2	6		PC-A3-C2P2	6	$V_{inj} =$	$P_{inj}\downarrow$	$T_{molde} =$
		PC-A1-C3T1	6		PC-A3-C3T1	6	$V_{inj} =$	$P_{inj} =$	$T_{molde}\uparrow$
		PC-A1-C3T2	6		PC-A3-C3T2	6	$V_{inj} =$	$P_{inj} =$	$T_{molde}\downarrow$

A fase 3 passa pelas caracterizações das amostras obtidas na fase 2, onde são medidas as rugosidades Ra, Rq, Rz e Rt e o brilho de cada amostra.

A fase 4 passa pela análise e tratamento dos resultados obtidos.

Na Figura 24 estão apresentadas esquematicamente e resumidamente as fases deste trabalho.

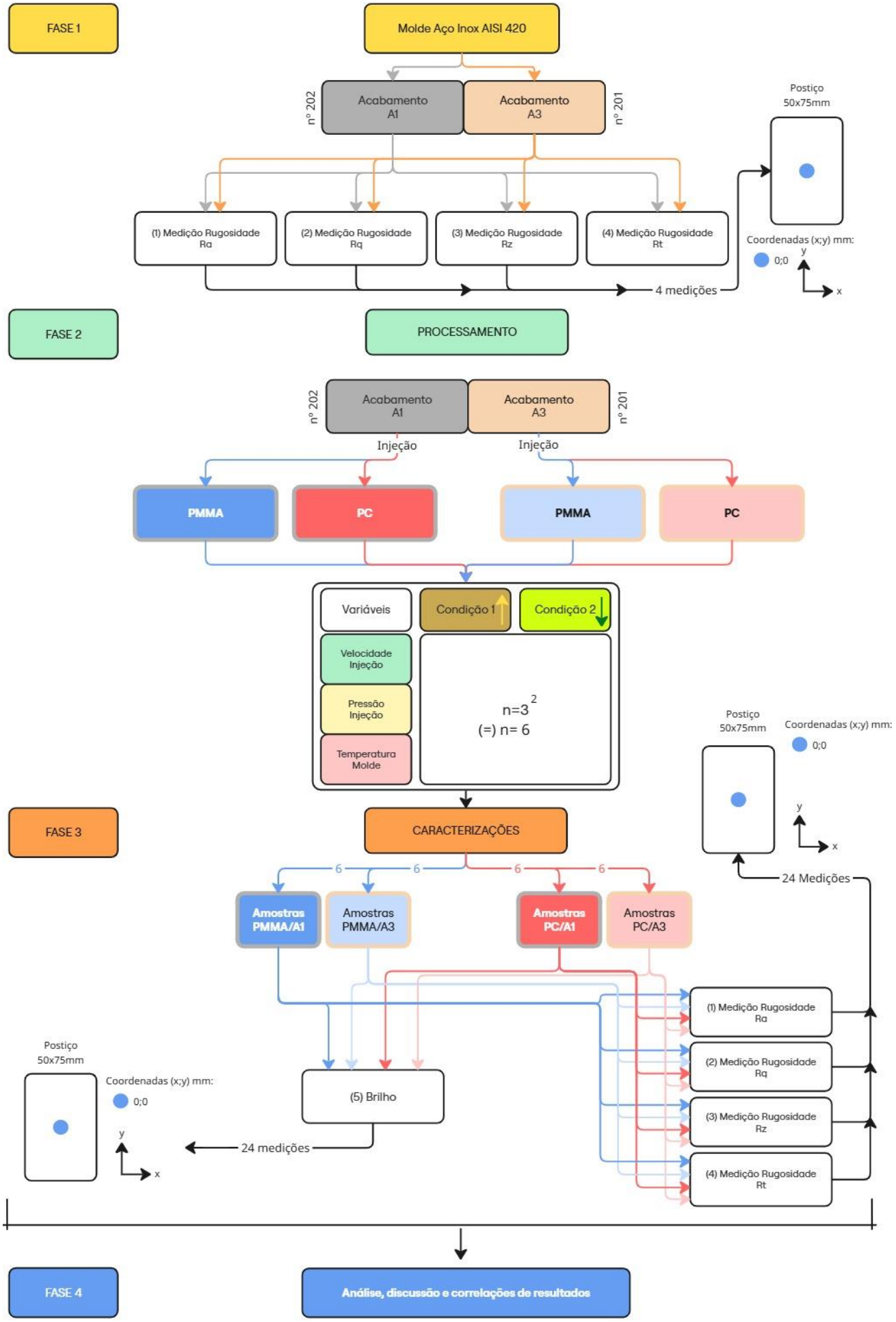


Figura 24. Fluxograma do trabalho experimental.

3.1.1. Equipamentos Utilizados

3.1.1.1. Rugosímetro

A caracterização da rugosidade superficial foi realizada através do sistema ótico *Alicona InfiniteFocus SL*, um equipamento de metrologia tridimensional sem contacto. O seu funcionamento assenta na aquisição de imagens da superfície em diferentes posições focais, permitindo reconstruir um modelo tridimensional e determinar com elevada precisão a topografia superficial. A amostra em estudo é colocada na base do aparelho e depois são ajustados os parâmetros óticos (zoom, contraste, luminosidade, entre outros).

Neste trabalho, o equipamento foi utilizado para medir a rugosidade dos insertos do molde e das peças moldadas, permitindo determinar parâmetros como Ra, Rq, Rz e Rt. Para o efeito o comprimento de medição em todas as caracterizações realizadas foi de 0,25mm. Os resultados obtidos possibilitaram avaliar a qualidade do acabamento superficial e o grau de replicação da topografia do molde pelos polímeros estudados. Na Figura 25 é exposto o equipamento utilizado. Sabendo que o ensaio foi realizado segundo a norma *ISO 21920 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture - Profile.*



Figura 25. Rugosimetro Alicona InfiniteFocus SL.

3.1.1.2. Medidor de Brilho

A avaliação do brilho superficial foi realizada utilizando um medidor de brilho SAGT525 da *SAMA Tools* (Figura 26), equipamento que mede a quantidade de luz refletida especularmente por uma superfície sob um ângulo de 20°, 60° e 85°. Os resultados são expressos em Unidades de Brilho (UB), permitindo quantificar objetivamente o nível de brilho das amostras. O aparelho é colocado em cima da amostra e é efetuada a medição.

Neste trabalho, o equipamento foi utilizado para avaliar a influência do acabamento superficial do molde no brilho das peças moldadas através dos ângulos 20° e 60°, permitindo estabelecer correlações entre rugosidade superficial, capacidade de replicação e comportamento ótico dos polímeros estudados. O ensaio foi realizado segundo a norma *ISO 2813 – Paints and Vanishes – Determination of Gloss value at 20°, 60° and 85°.*



Figura 26. Medidor de brilho SAGT525 da *SAMA Tools*.

3.1.1.3. Máquina de Injeção

A produção das amostras foi realizada numa máquina de injeção de termoplásticos *Boy 22A* de 2012 (Figura 27). O equipamento é responsável pela fusão, injeção e conformação do material polimérico no interior do molde. O seu funcionamento baseia-se na plastificação do polímero através de um fuso rotativo aquecido, seguida da injeção do material fundido para a cavidade do molde sob condições controladas de temperatura, pressão e velocidade.

Neste trabalho, a máquina de injeção foi utilizada para produzir as amostras em PMMA e PC, garantindo condições de processamento reprodutíveis e adequadas ao estudo.



Figura 27. Máquina de Injeção Boy 22A

As principais caracteristicas desta máquina de injeção são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Caracteristicas gerais da máquina de Injeção Boy 22A.

Máquina de injeção Boy 22A			
Força de fecho (kN)	220	Diametro do fuso (mm)	22
Força máxima de abertura do molde (kN)	40	Volume Máximo de Injeção (cm^3)	30.4
Dimensão dos pratos (mm)	400x400	Pressão de injeção (kN)	65.8
Distância entre colunas (mm)	254x254	Avanço máximo do fuso (mm)	80
Altura mínima do molde (mm)	200		

Como membro auxiliar para a definição e controlo da temperatura do molde, foi utilizado um regulador de temperatura "*Piovan*" (Figura 28).



Figura 28. Regulador de Temperaura Piovan.

3.2. Meios Experimentais

3.2.1. Aço AISI 420

Foram utilizados 3 tipos de aço para este projeto. A estrutura moldante foi feita em 1.1730. Os postiços de alojamento foram feitos em 1.2311 e por último os postiços nº 201 e 202 em aço inox em AISI 420 (1.2083) (Figura 29).

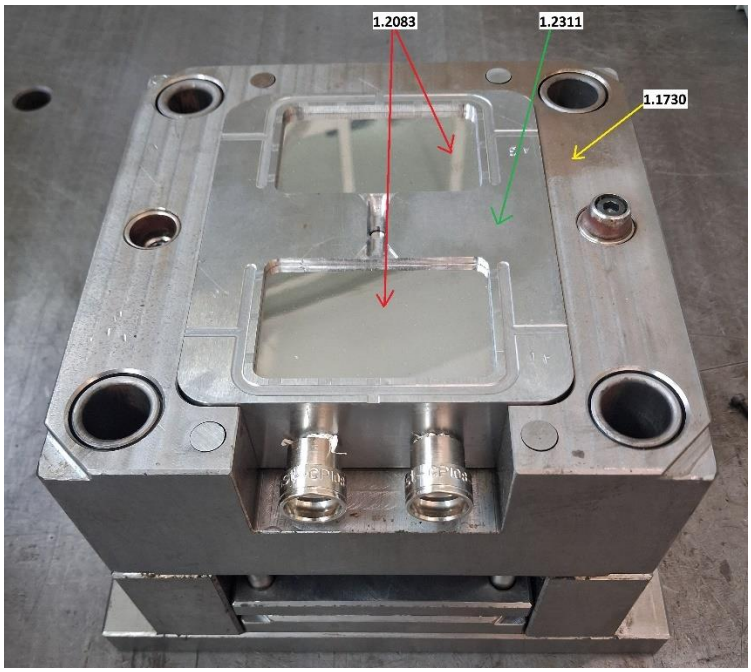


Figura 29. Lado móvel do molde com os postiços inseridos.

3.2.2. Acabamento dos postiços nº201 e nº202.

Os postiços nº 201 (SPI A3) e nº 202 (SPI A1) foram maquinados e ajustados ao postiço nº200 respectivamente. Na Figura 30 podemos visualizar graficamente a sequência de montagem.

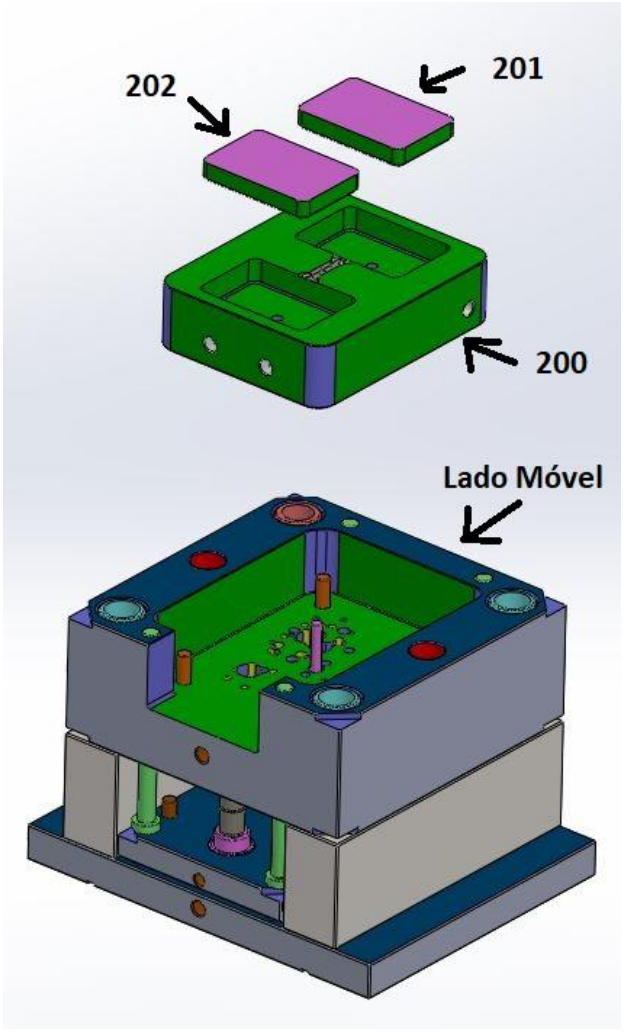


Figura 30. Vista explodida do lado móvel do molde.

Posteriormente foram temperados e revenidos a vácuo até obter uma dureza de 50HRC. Concluido o tratamento térmico, a superfície moldante dos postiços foi retificada e pré-polida até à lixa de gramagem 1500. Por último, no postiço com o acabamento SPI A3 foi aplicada uma pasta de diamante nº 15 e no postiço com o acabamento SPI A1 foi aplicada primeiramente uma pasta de diamante nº 6 e no fim a nº3.

A utilização destas diferentes pastas, como demonstrado no Estado da Arte, permite estabelecer diferenças de rugosidades entre postiços (Figura 31).

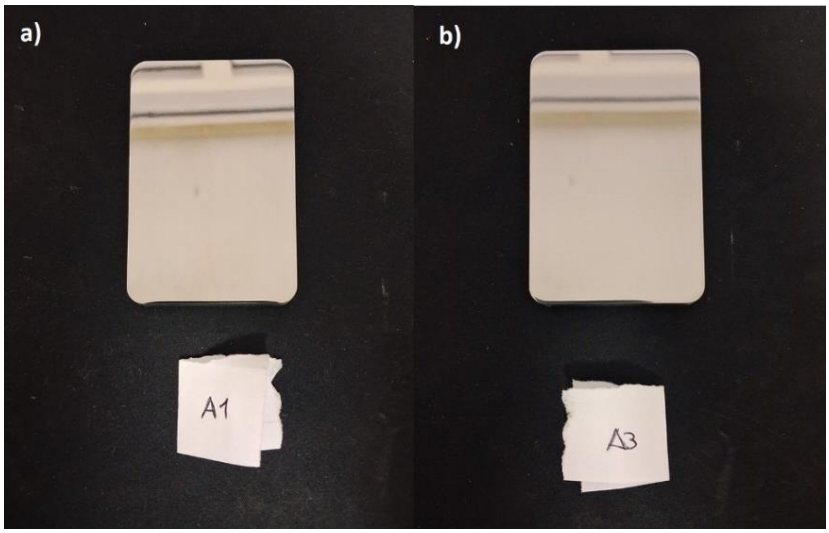


Figura 31. Postiços Moldantes a) SPI A1 e b) SPI A3. Cada um com dimensão de 50x75mm.

As amostras poliméricas deverão ter aproximadamente as dimensões de 50x75x3mm, conforme exemplar apresentado na Figura 32.



Figura 32. Amostra exemplar.

3.2.3. Materiais Poliméricos Utilizados

Os polímeros selecionados para injeção das amostras foram o PMMA e PC transparentes, contudo para o rugosímetro poder fazer a leitura superficial correta foi aplicado um pigmento preto em cada material.

O PMMA utilizado tem a designação *Acryplas HD03* da *Wanhua* e as suas propriedades estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Caracteristicas do PMMA Acryplas HD03.

PMMA Acryplas HD03	
Massa específica (g/cm^3)	1.19
MFI (g/10min)	3
Temperatura Tg (°C)	100
Indice de Refração	1.49
Haze (%)	<=0.500
Transmitância (3mm)	92%
Temperutura Processamento (°C)	220-260
Temperatura Molde (°C)	50-90
Temperatura secagem (°C)	80-90
Tempo de secagem (h)	3-4

O PC utilizado tem a designação *PC 1220R* da *Lotte Chemical* e as suas propriedades estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Caracteristicas do PC 1220R.

PC 1220R	
Massa específica (g/cm^3)	1.20
MFI (g/10min)	22
Indice de Refração	1.585
Haze (%)	<0.800
Transmitância (3mm)	89%
Temperutura Processamento (°C)	290-310
Temperatura Molde (°C)	60-90
Temperatura secagem (°C)	120
Tempo de secagem (h)	4

O pigmento preto utilizado para colorir as amostras tem a designação *Polyblak 1850* da *A. Schulman.* As suas propriedades estão apresentadas na Tabela 8:

Tabela 8. Caracteristicas do Pigmento Polyblack 1850.

Pigmento Preto - Polyblack 1850	
Teor de Aditivo (SRF-Type)	50%
Massa específica (g/cm^3)	1.22
Teor de Mistura (ppm)	<1500

De frisar que a incorporação do pigmento foi de 1% da quantidade total misturada.

3.3. Ensaios e Caracterizações

3.3.1. Ensaios Realizados

Nas parametrizações dos ensaios foram utilizados os materiais indicados no ponto 3.2.3, e determinaram-se que as condições ideiais de processamento foram as expostas na Tabela 9.

Tabela 9. Condições ideiais de processamento das amostras.

	Bico	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1	
$T_{Fuso}(°C)$	260	255	250	245	245	**PMMA**
	310	300	290	280	270	**PC**
t_{arref} (s)			20			
Avanço do fuso (mm/s)			58 (4s)			
F_{fecho}(bar)			50			
V_{inj} (mm/s)			60			
P_{inj} (bar)	100		2ª P_{inj} (bar)		80 (3s)	
T_{molde} $(°C)$			70			

O alcance dos parâmetros "*standard*" foram atingidos através de tentativa e erro em obter as peças visualmente uniformes, sem defeitos visíveis e/ou palpáveis, incluindo rebarbas, fraco preenchimento, entre outros. Posteriormente, determinaram-se os valores ↑ e ↓ de cada condição, fixando-se nas seguintes:

V_{inj} ↑ = 80mm/s V_{inj} ↓ = 40 mm/s

P_{inj} ↑ = 120 bar P_{inj} ↓ = 80 bar

T_{molde} ↑ = 80 °C T_{molde} ↓ = 60 °C

Em relação à temperatura do molde, foi utilizada água como líquido de refrigeração e o encremento da temperatura estava condicionado à não ultrapassagem dos 80°C por causa da tubagem de refrigeração existente no DEP.

3.3.2. Caracterização dos postiços nº 201 e nº202.

A caracterização inicial dos postiços permitiu estabelecer a condição de referência para a avaliação da capacidade de replicação superficial dos materiais poliméricos. Os resultados demonstraram

diferenças entre os acabamentos SPI A1 e SPI A3. Para se achar um valor médio e desvio padrão fizeram-se medições em 3 pontos na zona central dos postiços e obtiveram-se os seguintes resultados médios (Tabela 10):

Tabela 10. Valores de rugosidade dos 2 postiços.

SPI A1	Média	Desvio Padrão
Ra	**0,034**	0,003
Rq	0,044	0,003
Rz	0,197	0,004
Rt	0,253	0,032
SPI A3	Média	Desvio Padrão
Ra	**0,055**	0,004
Rq	0,068	0,006
Rz	0,292	0,004
Rt	0,392	0,035

O acabamento SPI A1 apresentou valores inferiores de Ra e Rq, indicando uma superfície globalmente mais lisa. Contudo, observou-se uma dispersão significativa nos valores de Rz, sugerindo a presença de heterogeneidade local na superfície do postiço, possivelmente associada ao processo de polimento manual.

O acabamento SPI A3 apresentou valores mais elevados de Ra e Rq, mas uma distribuição mais homogénea dos resultados. Tal comportamento indica uma textura superficial mais uniforme ao longo da área analisada. Consequentemente, apesar do SPI A1 apresentar menor rugosidade média, o SPI A3 revelou uma maior consistência metrológica entre pontos de medição. De frisar que os valores obtidos no acabamento SPI A1 aproximaram-se da escala SPI A2 (0,025 – 0,050 μm), o que nos direciona para outro tipo de designação como forma de identificação dos acabamentos factualmente apurados neste trabalho.

Na Figura 33 expõe-se um exemplo das medições realizadas aos postiços nº 201 e nº 202 onde se vislumbram os diferentes acabamentos superficiais de cada um.

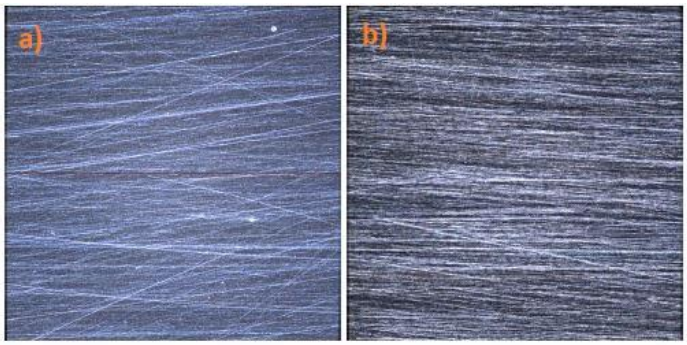


Figura 33. Exemplo medição das rugosidades dos postiços a) Ra 0,034, b) Ra 0,055.

3.3.3. Caracterizações das peças PMMA – Rugosidade

Após a caracterização dos postiços moldantes e como constactado no ponto anterior, os acabamentos passaram-se a designar por Ra 0,034 e Ra 0,055. Para o PMMA, depois de medidas todas as amostras, foram obtidos os valores médios apresentados da Figura 34 à Figura 39. De realçar que para obter os valores médios foram medidas no mínimo 3 e no máximo 6 amostras por condição, dependendo da sua qualidade.

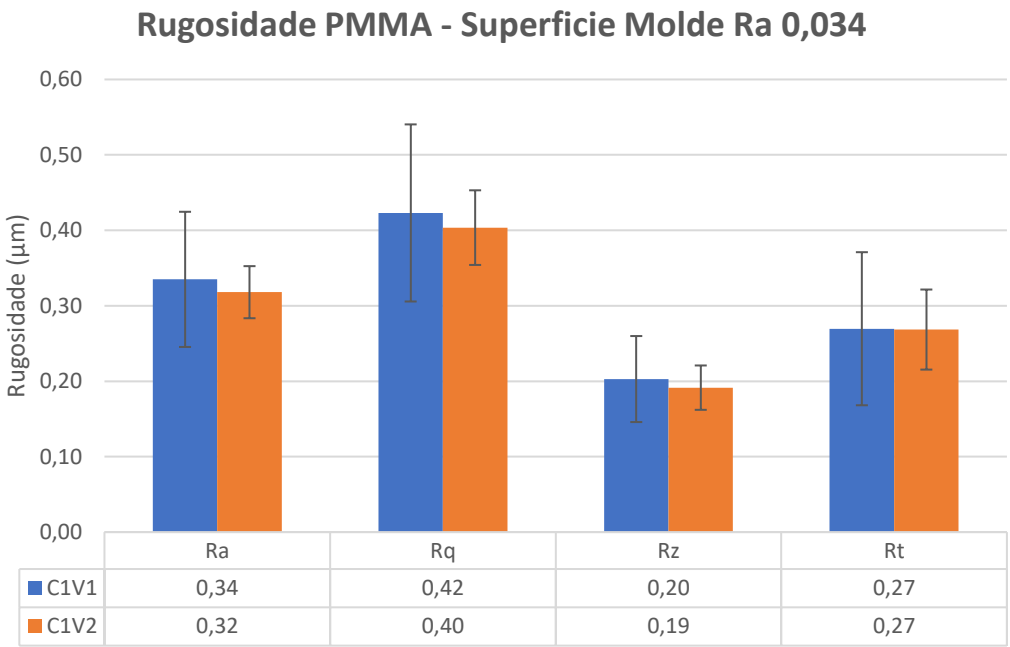


Figura 34. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034.

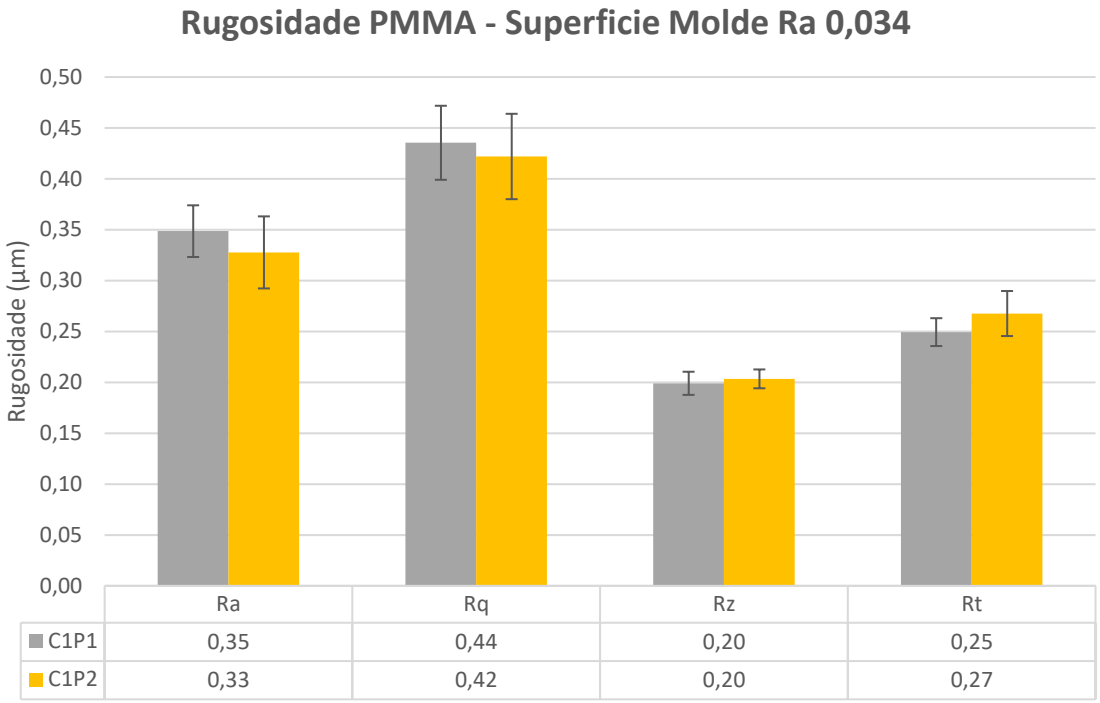


Figura 35. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034.

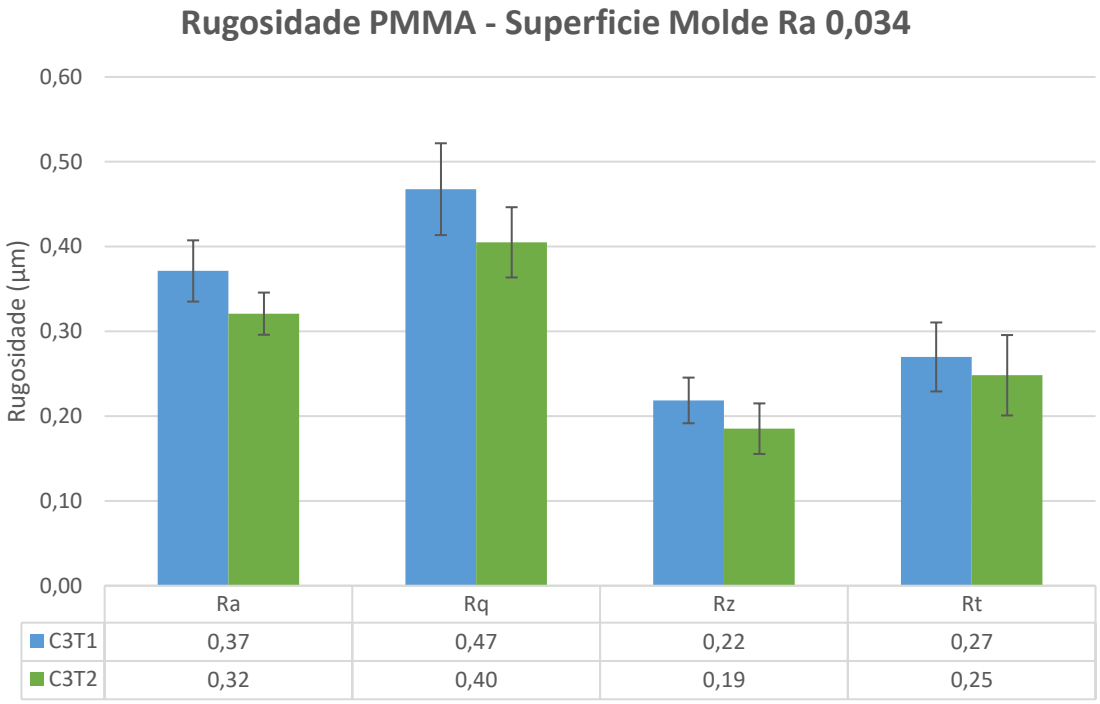


Figura 36. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034.

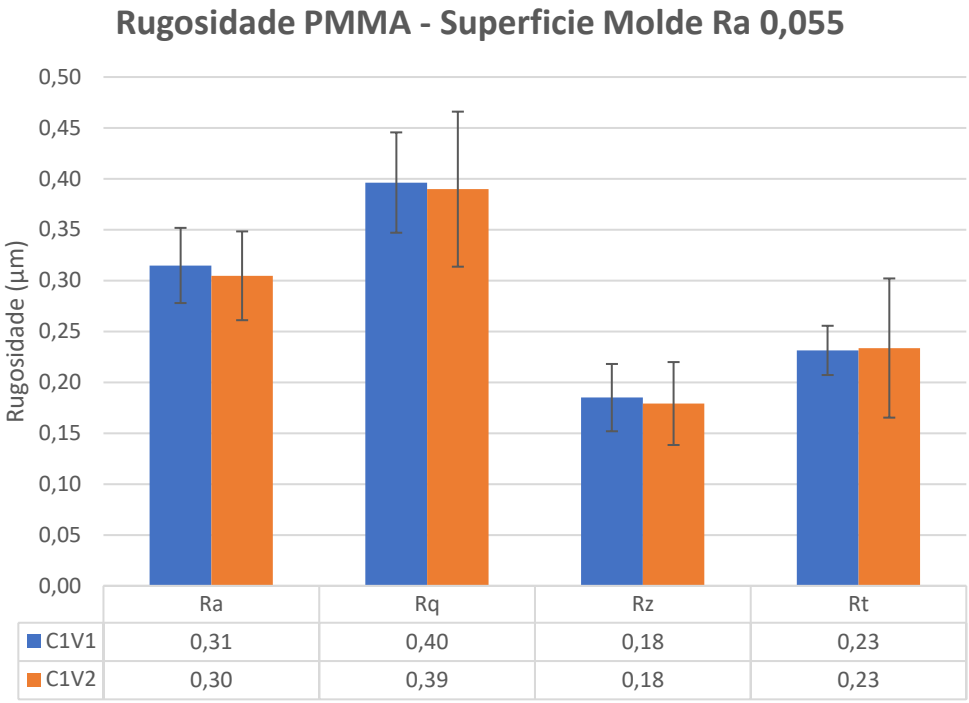


Figura 37. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055.

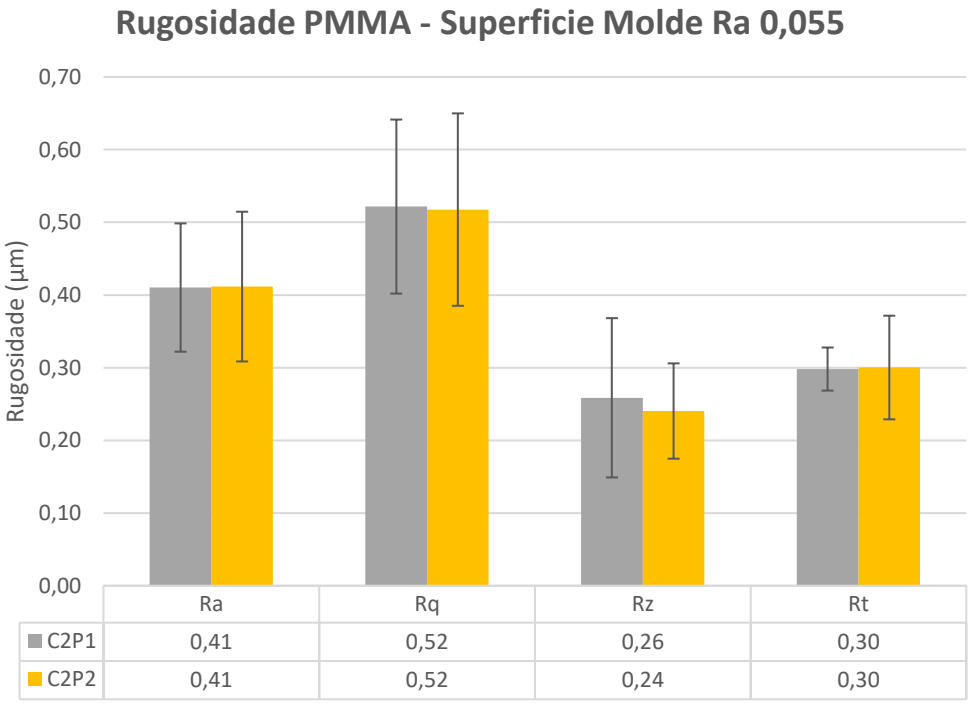


Figura 38. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055.

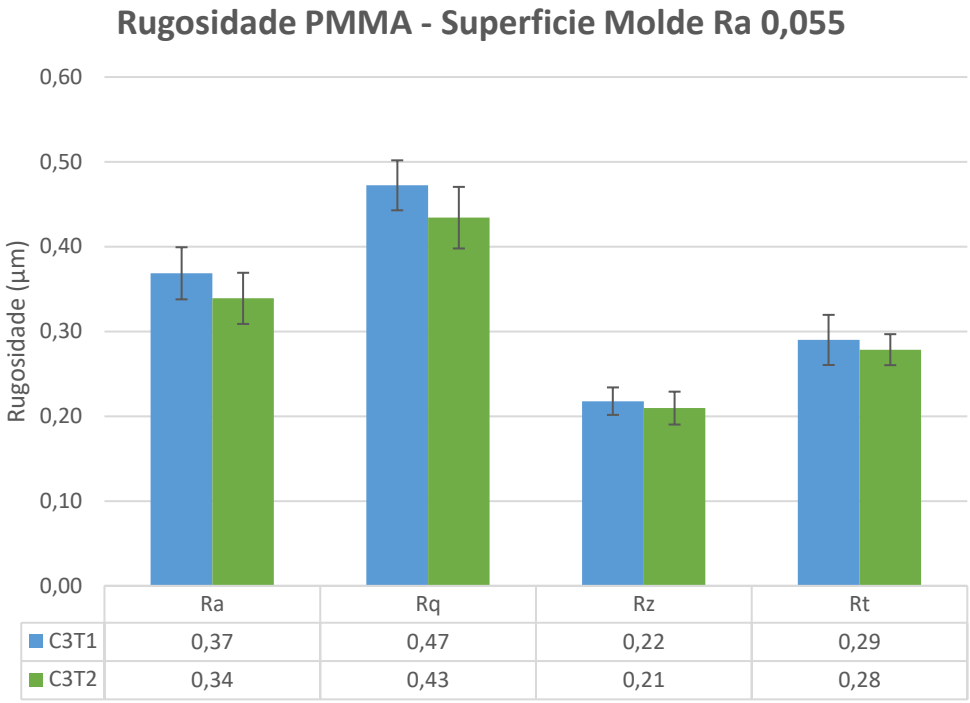


Figura 39. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055.

Na Figura 40 verificamos, a título de exemplo, uma das medições de superfície realizadas às amostras PMMA. A linha a vermelho corresponde ao *cut-off* ($\lambda_c = 0{,}25mm$) determinado para o exercício.

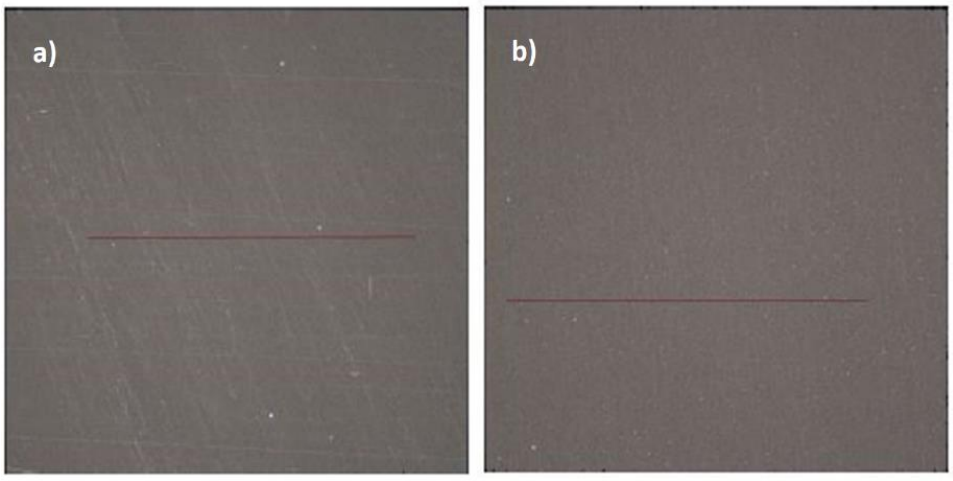


Figura 40. a) medição PMMA Ra0,055, b) medição PMMA Ra0,034.

3.3.4. Caracterizações das peças PC – Rugosidade

À semelhança do PMMA para o PC, depois de medidas todas as amostras, foram obtidos os valores médios apresentados desde a Figura 41 à Figura 46.

De realçar que, também para estas amostras, para obter os valores médios foram medidas no mínimo 3 e no máximo 6 amostras por condição, dependendo da sua qualidade.

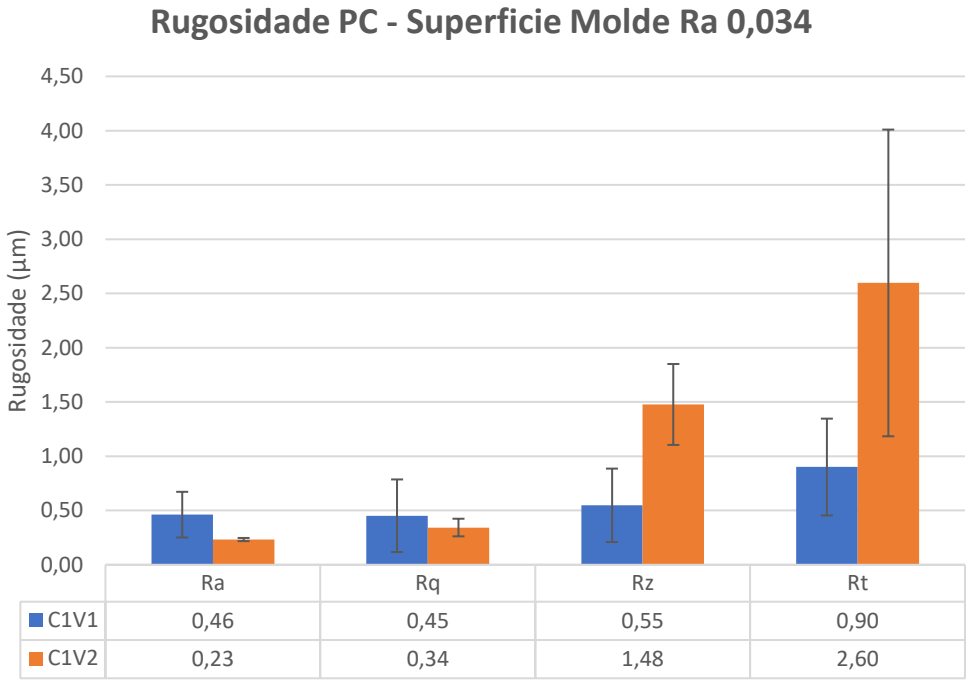


Figura 41. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034.

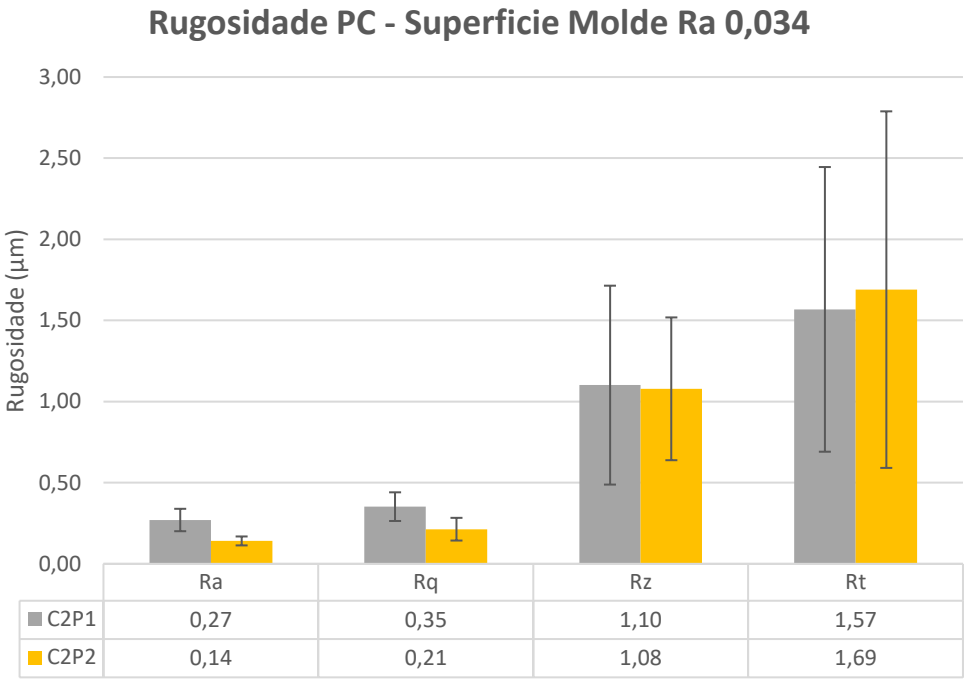


Figura 42. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034.

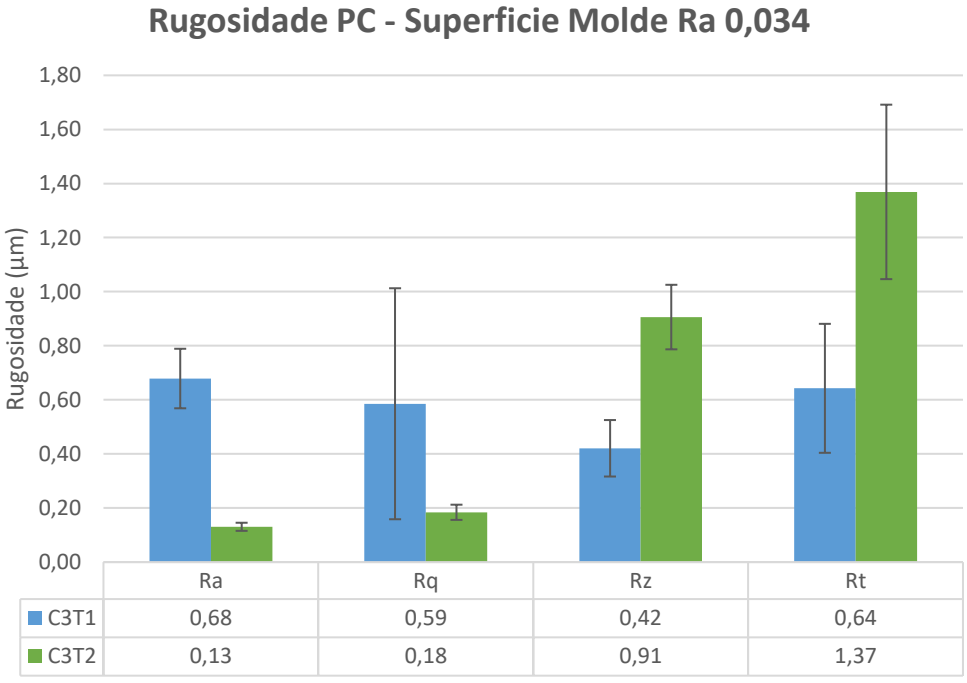


Figura 43. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034.

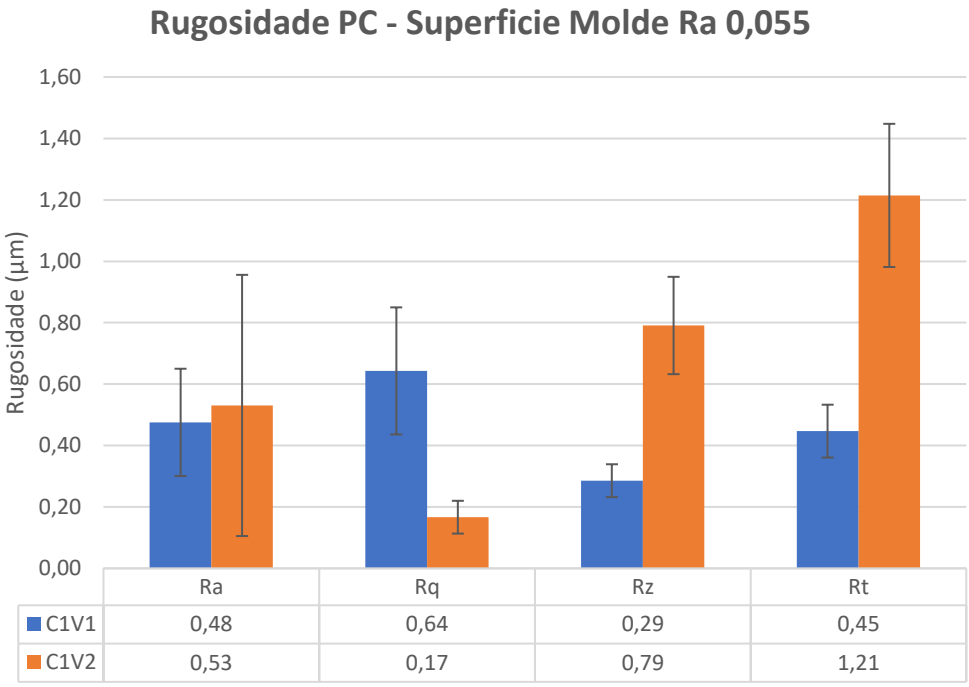


Figura 44. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055.

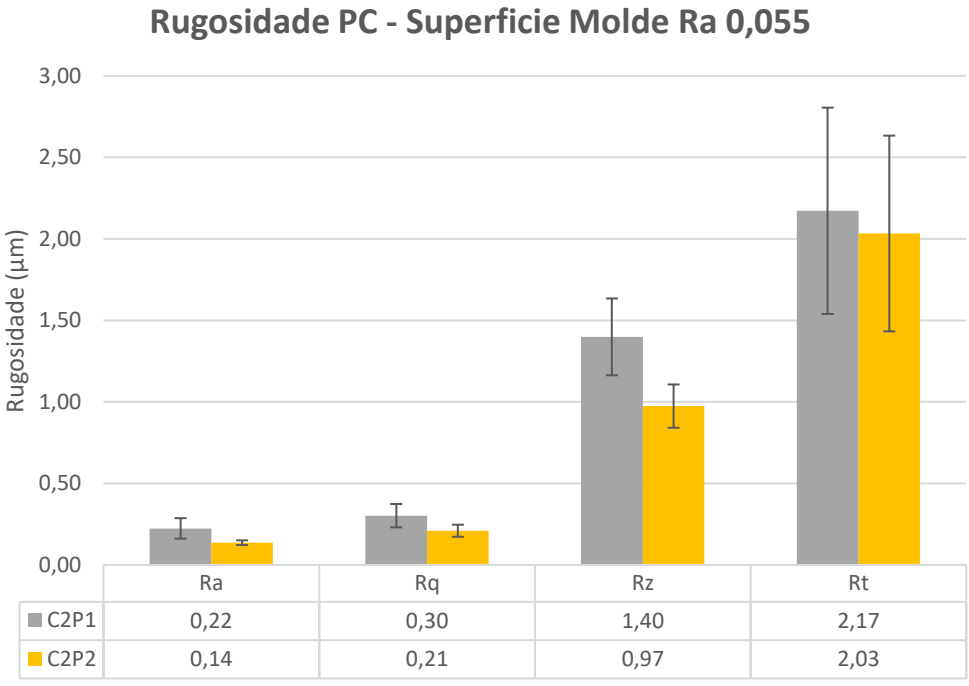


Figura 45. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055.

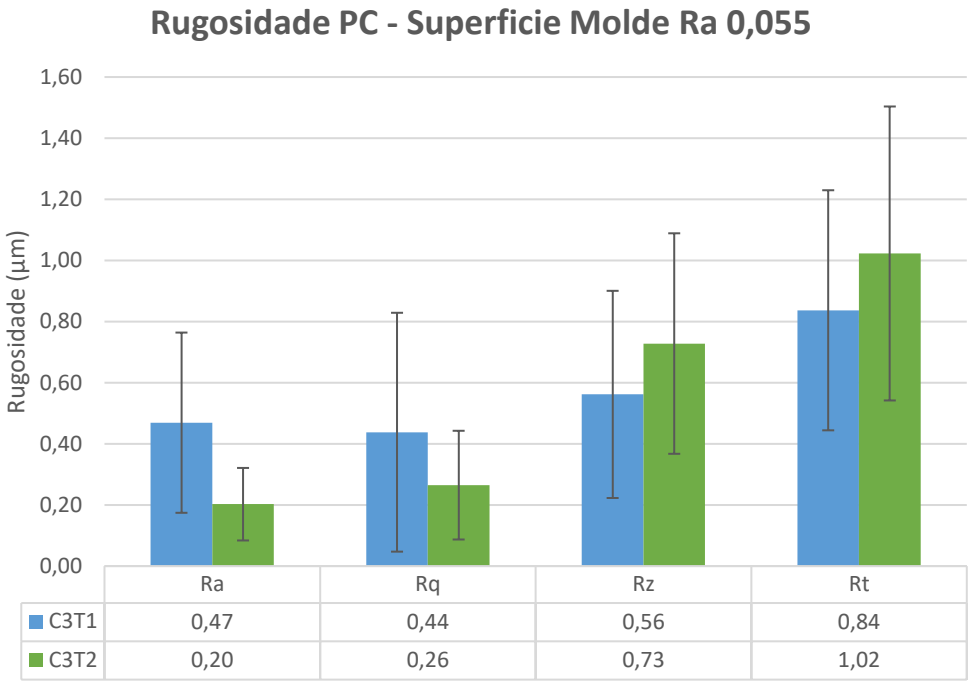


Figura 46. Valores médios de Ra, Rq, Rz e Rt das amostras em PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055.

Na Figura 47 verificamos, a título de exemplo, uma das medições realizadas às amostras PC.

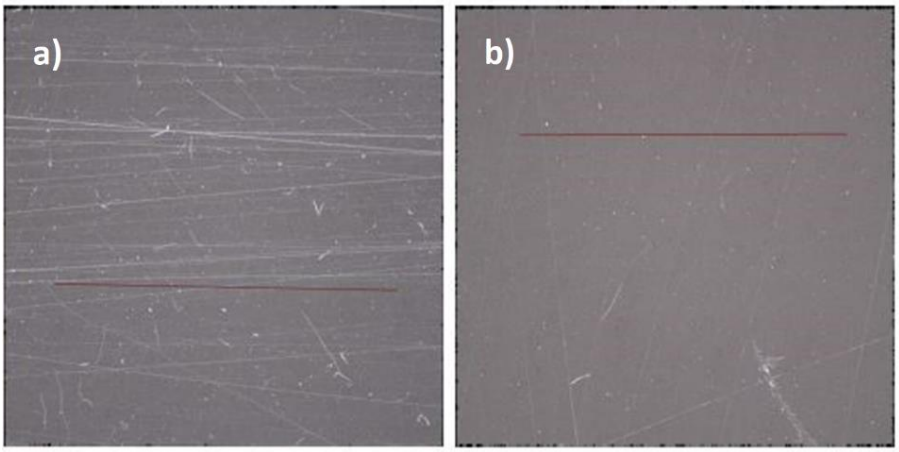


Figura 47. a) medição PC Ra 0,055, b) medição PC Ra 0,034.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Avaliação da Capacidade de Replicação Geométrica dos Polímeros

A fidelidade de replicação é determinada através do desvio percentual $\Delta R\%$ entre a rugosidade medida na superfície da peça injetada $R_{peça}$ e a rugosidade homóloga da cavidade do molde R_{molde} conforme expresso pela Equação 15:

$$\Delta R_a\% = \left(\frac{R_{peça} - R_{molde}}{R_{peça}}\right) x\ 100 \qquad (15)$$

Os resultados experimentais revelam que, independentemente do material polimérico ensaiado, as superfícies replicadas apresentam predominantemente desvios percentuais positivos $(\Delta R_a\% > 0)$, indicando que as peças moldadas exibem uma rugosidade final superior à da matriz metálica que as originou. Este fenómeno afasta-se do cenário de replicação ideal $(\Delta R_a\% = 0)$ e reflete a complexidade termomecânica do processo de injeção.

4.1.1. Análise do Comportamento do PMMA

Os desvios observados na rugosidade R_a das amostras de PMMA injetadas sobre o acabamento Ra 0,034 e Ra 0,055, sob diferentes condições de processamento, encontram-se detalhados na Tabela 11.

Tabela 11. Valores de R_a, desvios percentuais e absolutos nas amostras em PMMA (Acabamento Ra 0,034 e Ra 0,055).

PMMA						
	Ra 0,034			Ra 0,055		
Condição	**R_a da peça (μm)**	**Desvio percentual $\Delta R_a\%$**	**Desvio Absoluto R_a (μm)**	**R_a da peça (μm)**	**Desvio percentual $\Delta R_a\%$**	**Desvio Absoluto R_a (μm)**
Valor de Referência do molde	0,034	–	–	0,055	–	–
$V1$ 80mm/s	0,34	900	0,31	0,31	464	0,26
$V2$ 40mm/s	0,32	841	0,28	0,30	446	0,25
$P1$ 120bar	0,35	929	0,32	0,41	646	0,36
$P2$ 80bar	0,33	871	0,29	0,41	646	0,36
$T1$ 80ºC	0,37	988	0,34	0,37	573	0,31
$T2$ 60ºC	0,32	842	0,29	0,34	518	0,28
Média	0,34	895		0,37	549	
Desvio máximo R_a entre condições	0,05			0,11		

De uma forma geral, verifica-se que o PMMA apresentou uma resposta relativamente estável às alterações das condições de processamento, não se verificando variações abruptas da rugosidade superficial entre as diferentes condições ensaiadas.

Relativamente à velocidade de injeção, a condição V2 conduziu a valores de rugosidade ligeiramente inferiores aos obtidos na condição V1, independentemente do acabamento superficial do molde. No acabamento Ra 0,034 observou-se uma redução da rugosidade média R_a de 0,34μm para 0,32μm, enquanto no acabamento Ra 0,055 a redução foi de 0,31μm para 0,30μm. Embora estas diferenças não sejam muito expressivas, sugerem que velocidades de enchimento mais reduzidas favorecem uma replicação superficial ligeiramente mais eficiente. Isto poderá estar relacionado com uma diminuição das tensões de corte junto à parede da cavidade, reduzindo potenciais perturbações no escoamento da camada superficial do polímero fundido.

A influência da pressão de injeção mostrou-se menos impactante. No acabamento Ra 0,034, as condições P1 e P2 originaram valores praticamente idênticos de rugosidade, respetivamente 0,35μm e 0,33μm. De forma semelhante, no acabamento Ra 0,055 verificou-se valores idênticos de rugosidade média, neste caso de 0,41μm.

Por outro lado, a temperatura do molde apresentou uma influência mais evidente neste estudo comparativo. Nos dois acabamentos observou-se um aumento da rugosidade quando a temperatura do molde foi elevada da condição T2 para T1. No acabamento Ra 0,034 a rugosidade média aumentou de 0,32μm para 0,37μm, enquanto no acabamento Ra 0,055 passou de 0,34μm para 0,37μm. Isto parece sugerir que o aumento da temperatura promoveu alterações na dinâmica de solidificação da camada superficial, conduzindo a uma ligeira degradação da qualidade topográfica da superfície moldada.

A comparação entre estes acabamentos permite ainda verificar que o acabamento Ra 0,034 não originou necessariamente superfícies mais lisas nas peças injetadas. Apesar de apresentar uma rugosidade inicial inferior à do acabamento Ra 0,055, os valores finais medidos nas amostras de PMMA foram muito próximos entre si (valor mínimo obtido 0,30μm e valor máximo de 0,41μm – desvio máximo de 0,11μm).

Globalmente, os resultados obtidos permitem concluir que o PMMA apresentou uma elevada estabilidade no processo e uma reduzida sensibilidade às alterações dos parametros. Entre as variáveis analisadas, a temperatura do molde mais alta foi a que exerceu maior influência sobre a rugosidade final

das peças no acabamento Ra 0,034, enquanto a pressão revelou um efeito reduzido no acabamento Ra 0,034, mas mais significativo no Ra 0,055, originando inclusive os desvios mais acentuados. Relativamente à velocidade de injeção esta apenas originou variações moderadas nos dois casos. De frisar em qualquer um dos acabamentos nenhum valor atingiu um valor próximo da rugosidade dos postiços indicando o impacto reológico do polímero escolhido para o estudo.

4.1.2. Análise do Comportamento do PC

Para além do PMMA, como já referido, o estudo estendeu-se ao Policarbonato (PC). Os valores de rugosidade média aritmética (R_a), os respetivos desvios percentuais $\Delta R_a\%$ e absolutos obtidos para as amostras de PC injetadas sob as mesmas condições de processo e acabamentos de molde encontram-se sistematizados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de R_a desvios percentuais e absolutos nas amostras em PC (Acabamento Ra 0,034 e Ra 0,055).

PC						
	Ra 0,034			Ra 0,055		
Condição	**R_a da peça (μm)**	**Desvio percentual $\Delta R_a\%$**	**Desvio Absoluto R_a (μm)**	**R_a da peça (μm)**	**Desvio percentual $\Delta R_a\%$**	**Desvio Absoluto R_a (μm)**
Valor de Referência do molde	0,034	—	—	0,055	—	—
$V1$ 80mm/s	0,46	1253	0,43	0,48	773	0,43
$V2$ 40mm/s	0,23	575	0,20	0,53	864	0,48
$P1$ 120bar	0,27	694	0,24	0,22	300	0,17
$P2$ 80bar	0,14	312	0,11	0,14	155	0,09
$T1$ 80ºC	0,68	1900	0,65	0,47	755	0,42
$T2$ 60ºC	0,13	283	0,10	0,20	264	0,15
Média	0,32	836		0,34	519	
Desvio máximo R_a entre condições	0,55			0,39		

Os resultados obtidos para o policarbonato (PC) mostram um comportamento substancialmente diferente do observado no PMMA, o que mostra uma maior sensibilidade às condições de processamento e uma maior dispersão dos valores de rugosidade medidos. No entanto, verifica-se que também este polímero não atinge valores de rugosidade na mesma escala que os postiços, apesar das propriedades reológicas serem, nomeadamente o índice de fluidez, significativamente diferentes.

Relativamente à influência da velocidade de injeção no acabamento Ra 0,055 observou-se uma diminuição da rugosidade média quando a velocidade foi aumentada, passando de 0,53μm na condição V2 para 0,48μm na condição V1. Esta diferença sugere que as velocidades mais elevadas favoreceram o enchimento da cavidade e melhoraram a capacidade de replicação da superfície moldante. No acabamento Ra 0,034 verificou-se igualmente uma forte dependência da velocidade, embora com uma magnitude maior. A rugosidade aumentou de aproximadamente 0,23μm para 0,46μm quando a velocidade foi alterada entre as condições ensaiadas.

Relativamente à pressão de injeção, os resultados demonstraram uma influência positiva na redução da rugosidade superficial. No acabamento Ra 0,055 observou-se uma redução da rugosidade média de 0,22μm para 0,14μm entre as condições analisadas. Tendência semelhante foi observada no acabamento Ra 0,034, onde os valores diminuíram de 0,27μm para 0,14μm. Estes resultados sugerem que níveis mais elevados de compactação na injeção favorecem um contacto mais íntimo entre o polímero fundido e a superfície do molde, melhorando a reprodução da microgeometria superficial.

A variável que exerceu maior influência sobre os resultados foi, contudo, a temperatura do molde. A passagem da condição T2 para T1 originou aumentos muito significativos da rugosidade nos 2 acabamentos. No acabamento Ra 0,055 a rugosidade média aumentou de 0,20μm para 0,48μm. No acabamento Ra 0,034 observou-se um efeito ainda mais pronunciado, registando-se um aumento de 0,13μm para 0,68μm. Este último valor corresponde à maior rugosidade medida em todo o exercício.

Assim verifica-se que estes resultados indicam que temperaturas elevadas do molde e velocidade de injeção reduzidas podem comprometer significativamente a qualidade superficial do PC. Uma possível explicação encontra-se no aumento do tempo de permanência do material em estado fundido junto à superfície do molde, favorecendo fenómenos de aderência local e aumentando a suscetibilidade da camada superficial a deformações durante a extração da peça. Na imagem tridimensional que se segue (Figura 48), pode-se verificar as microirregularidades verificadas ao longo das medições do PC.



Figura 48. Imagem tridimensional da superficie do PC com acabamento Ra 0,055 na condição T2.

A comparação entre os acabamentos Ra 0,034 e Ra 0,055 mostra ainda que o PC apresenta uma elevada dependência da interação entre o acabamento superficial e as condições de processamento. Enquanto algumas condições permitiram obter rugosidades relativamente reduzidas e próximas das observadas no molde, outras originaram desvios muito elevados, evidenciando uma janela de processamento mais estreita do que a observada no PMMA.

4.2. Análise comparativa entre rugosidades do PMMA e do PC

De uma forma geral, verificou-se que o PMMA apresentou uma resposta mais estável às alterações dos parametros operatórios, enquanto o PC evidenciou uma maior variabilidade dos resultados de rugosidade. Esta diferença pode estar relacionada com as características dos materiais utilizados, nomeadamente no seu índice de fluidez (MFI). O PMMA *Acryplas HD03* utilizado neste trabalho possui um MFI de 3g/10 min, enquanto o PC *1220R* apresenta um MFI significativamente superior, de 22g/10 min.

À partida, um valor de MFI mais elevado indica uma menor viscosidade do fundido e, consequentemente, uma maior facilidade de escoamento durante a moldação por injeção. Sob esta perspetiva, era expectável que o PC apresentasse uma melhor capacidade de preenchimento das microirregularidades da superfície do molde e, por conseguinte, uma maior fidelidade de replicação. Contudo, os resultados experimentais mostram, não só que essa relação não é linear em todas as condições de processamento estudadas, mas também que as rugosidades obtidas nas peças moldadas foram muito dependentes das condições de processamento que unicamente pela sua fluidez. Em determinadas condições, nomeadamente nas associadas à temperatura mais elevada do molde (T1), no

PC observaram-se aumentos significativos da rugosidade superficial, situação que não ocorreu com a mesma intensidade nas amostras de PMMA.

Este comportamento sugere que a qualidade superficial final não depende exclusivamente da capacidade de escoamento do fundido, estando também dependente da sua orientação, contração volumétrica e arrefecimento geral. O PC foi processado a temperaturas significativamente superiores às utilizadas para o PMMA, atingindo temperaturas de processamento entre 290°C e 310°C, enquanto o PMMA foi processado entre 220°C e 260°C. Estas temperaturas mais elevadas aumentam a energia térmica disponível na interface molde-polímero e podem favorecer fenómenos de aderência superficial, relaxação de tensões e deformação da camada superficial durante a fase de extração.

Por outro lado, apesar do PMMA apresentar um MFI inferior e, teoricamente, uma maior resistência ao escoamento, os resultados evidenciaram uma maior estabilidade da rugosidade entre as diferentes condições de velocidade, pressão e temperatura. Este comportamento sugere que a reprodução da superfície moldante ocorreu de forma mais consistente ao longo da janela de processamento que se estudou.

Outro aspeto relevante prende-se com a interação entre o material fundido e os acabamentos superficiais Ra 0,034 e Ra 0,055. Os resultados mostraram que o PMMA manteve níveis de rugosidade relativamente consistentes nos dois acabamentos, enquanto o PC apresentou diferenças mais pronunciadas entre condições equivalentes. Esta observação reforça a ideia de que o PC possui uma janela de processamento mais condicionada, contudo um pouco mais próxima, nalguns casos, dos valores de rugosidade dos postiços moldantes.

Assim, estes resultados demonstram que a obtenção de superfícies com baixa rugosidade não depende apenas da fluidez do material, mas da combinação entre propriedades reológicas, condições de processamento e interação termomecânica estabelecida entre o polímero fundido e a superfície do molde.

4.3. Avaliação do Brilho na Refletividade Ótica

A avaliação do brilho foi realizada com o objetivo de complementar a análise da rugosidade e estabelecer uma ligação direta entre o acabamento superficial das peças moldadas e a sua resposta ótica. Conforme apresentado no Estado da Arte, o brilho corresponde à fração de luz refletida de forma

especular por uma superfície e constitui um indicador indireto da qualidade ótica da interface ar-polímero. A intensidade desta reflexão depende simultaneamente do índice de refração do material e da regularidade geométrica da superfície.

Do ponto de vista físico, superfícies com baixa rugosidade tendem a preservar a direção da luz refletida, originando reflexão predominantemente especular e valores elevados de brilho. À medida que a rugosidade aumenta, cresce a componente difusa da reflexão devido à dispersão da luz por irregularidades superficiais, conduzindo à diminuição do brilho aparente.

Os resultados apresentados neste capítulo devem, contudo, ser interpretados considerando que o brilho não é governado exclusivamente pela rugosidade. Mesmo para superfícies com acabamento semelhante, materiais com índices de refração diferentes refletem quantidades distintas de luz na interface ar-polímero. No caso dos materiais utilizados neste trabalho, o PMMA possui um índice de refração aproximado de 1,492, enquanto o PC apresenta um valor superior, próximo de 1,585. Assim, sob condições geométricas equivalentes, o policarbonato tende teoricamente a apresentar maior brilho especular intrínseco.

4.3.1. Análise do Brilho do PMMA

As amostras de PMMA apresentaram níveis elevados de brilho para ambos os acabamentos estudados, confirmando a adequação do material a aplicações óticas. Os valores médios medidos a 60° e 20° situaram-se, respetivamente entre 98UB e 93UB e 93UB e 87UB para o acabamento Ra 0,034. Para o acabamento Ra 0,055 os valores a 60° foram aproximadamente entre 100UB e 91UB, enquanto as medições a 20° oscilaram entre as 95UB e 86UB.

Da Figura 49 à Figura 54 são apresentados os valores médios de brilho do PMMA nos acabamentos Ra 0,034 e Ra 0,055, respetivamente.

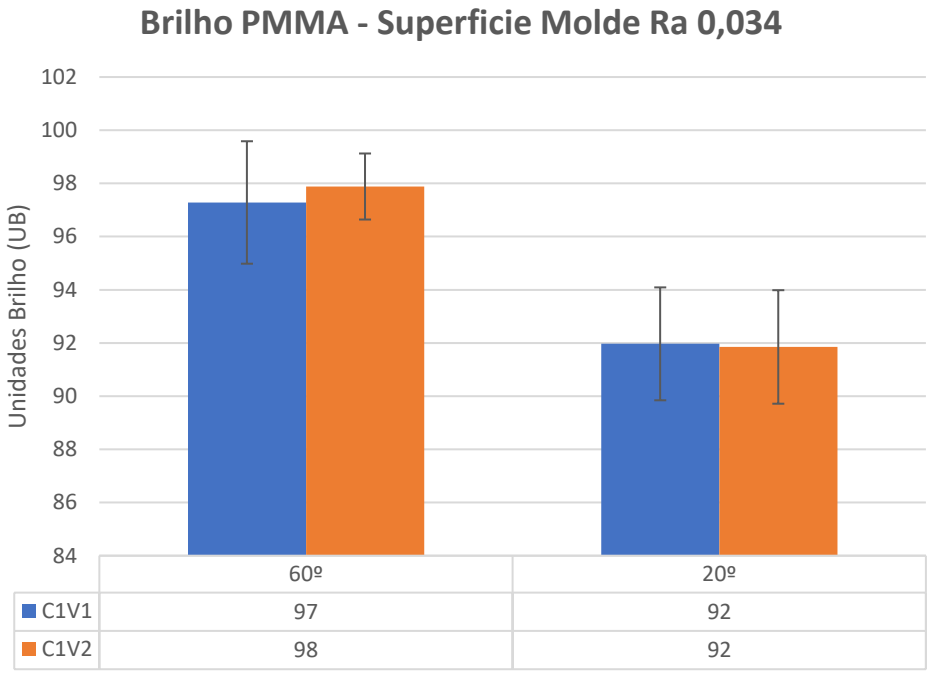


Figura 49. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034.

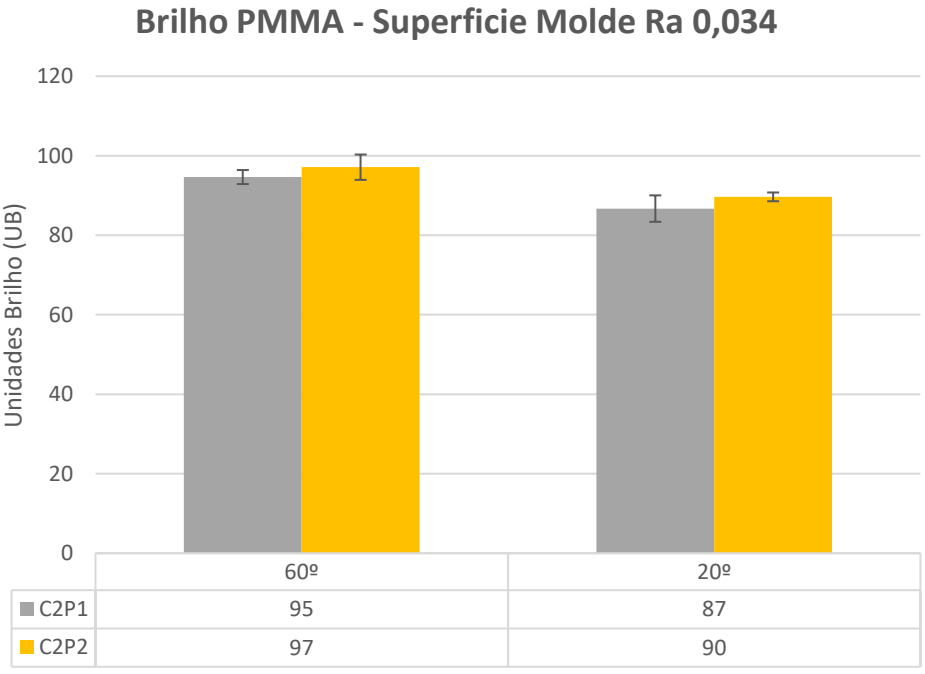


Figura 50. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034.

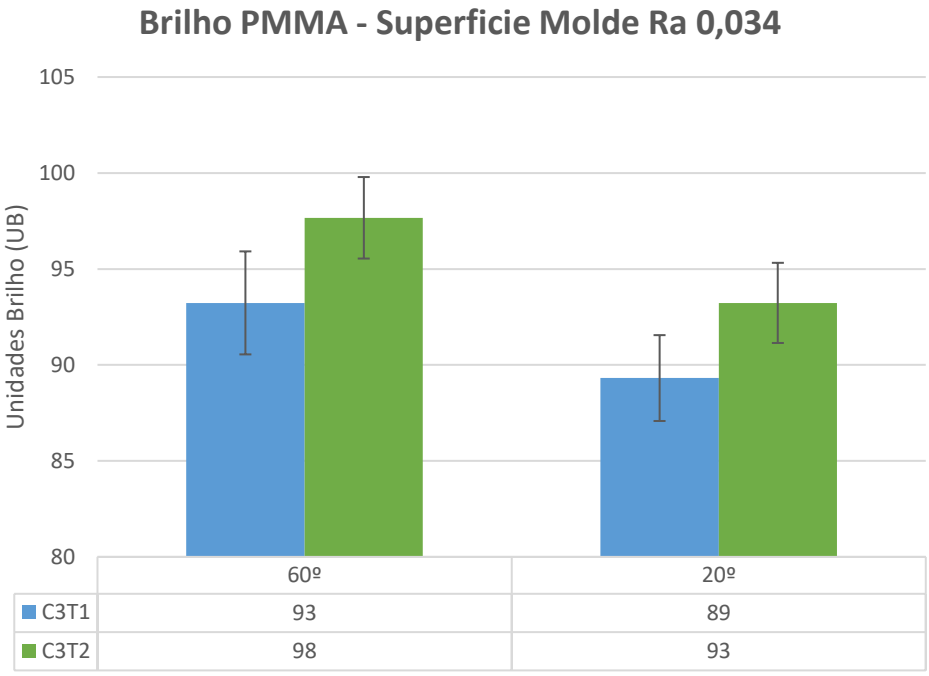


Figura 51. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034.

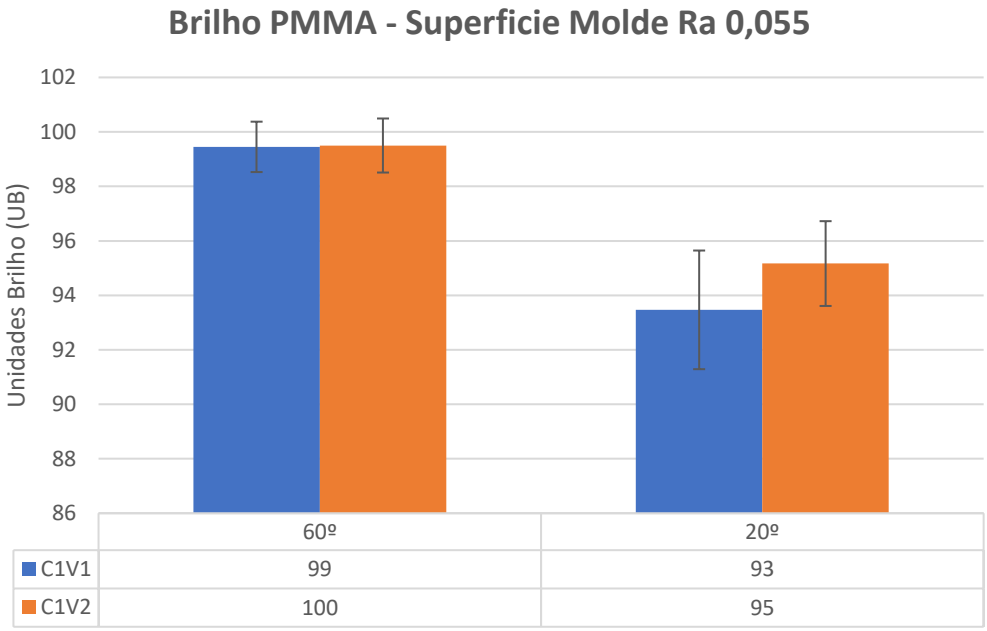


Figura 52. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055.

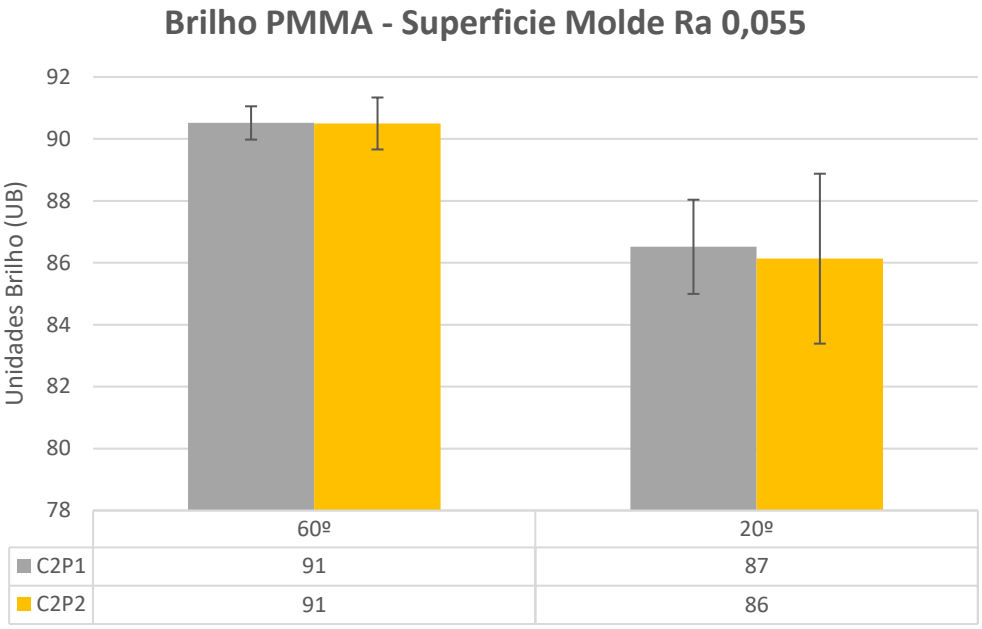


Figura 53. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055.

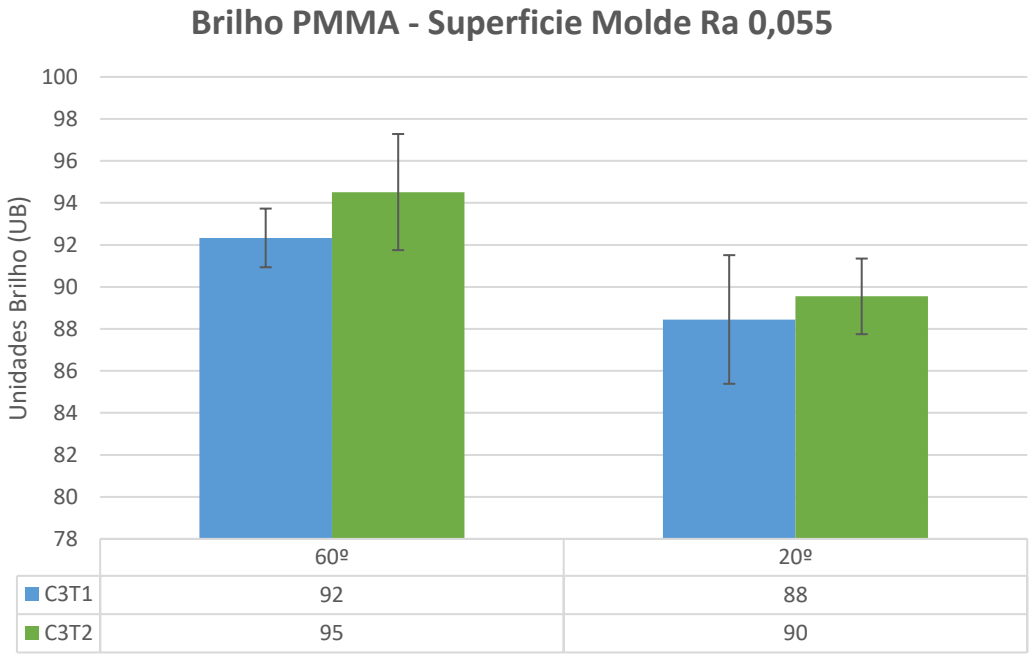


Figura 54. Valores médios de brilho das amostras PMMA, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055.

No acabamento Ra 0,034 a condição V1 e V2 foram identificas a 20°, enquanto as diferenças entre P1 e P2 foram pequenas (respetivamente 87UB e 90UB), de realçar que P1 atingiu o menor nível de UB

neste acabamento. A condição T1 apresentou também um dos menores níveis de brilho a 20°, ao passo que T2 produziu o maior valor medido a 20°, neste caso 93UB.

Verifica-se que no acabamento Ra 0,055, as variações associadas à velocidade foram as que atingiram os melhores níveis a 20°, nomeadamente 93UB em V1 e 95UB em V2. Já em relação à pressão de injeção os valores foram os menores, atingindo os 87UB e 86UB, respetivamente P1 e P2. Por sua vez, a temperatura do molde não demonstrou uma influência significativa: as condições T1 e T2 originaram os valores de brilho muito idênticos, não ultrapassando as 90UB.

Relacionando estes resultados com a análise de rugosidade, verifica-se que o PMMA apresentou simultaneamente baixa dispersão dos parâmetros R_a entre condições operatórias e variações relativamente contidas de brilho, resultando num desvio máximo de 9UB no ângulo de 20°. Este paralelismo é coerente com o mecanismo ótico descrito anteriormente: superfícies cuja topografia varia pouco entre condições tendem a manter uma distribuição angular de reflexão também mais estável. Em termos processuais, o PMMA utilizado revelou uma resposta ótica previsível e pouco sensível às alterações moderadas de temperatura do molde e à pressão de injeção, sendo a velocidade de injeção a variável que mais influenciou o brilho dentro da janela estudada.

4.3.2. Análise do Brilho do PC

O PC apresentou os maiores níveis absolutos de brilho observados neste estudo. No acabamento Ra 0,034, os valores a 60° situaram-se aproximadamente entre 106UB e 100UB, enquanto no acabamento Ra0,055 variaram entre cerca de 107UB e 100UB. As medições a 20° oscilaram entre aproximadamente 105UB e 90UB, no acabamento Ra 0,14 e 103UB e 89UB no acabamento Ra 0,26.

Da Figura 55 à Figura 60, respetivamente nos acabamentos Ra 0,034 e Ra 0,055, são apresentados os valores médios obtidos para o brilho do PC.

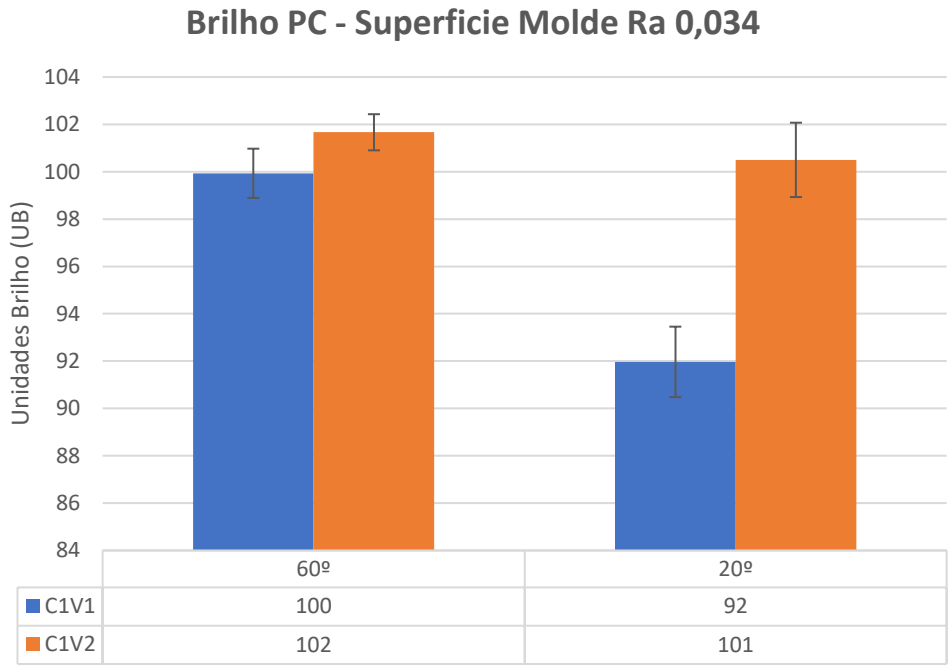


Figura 55. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,034.

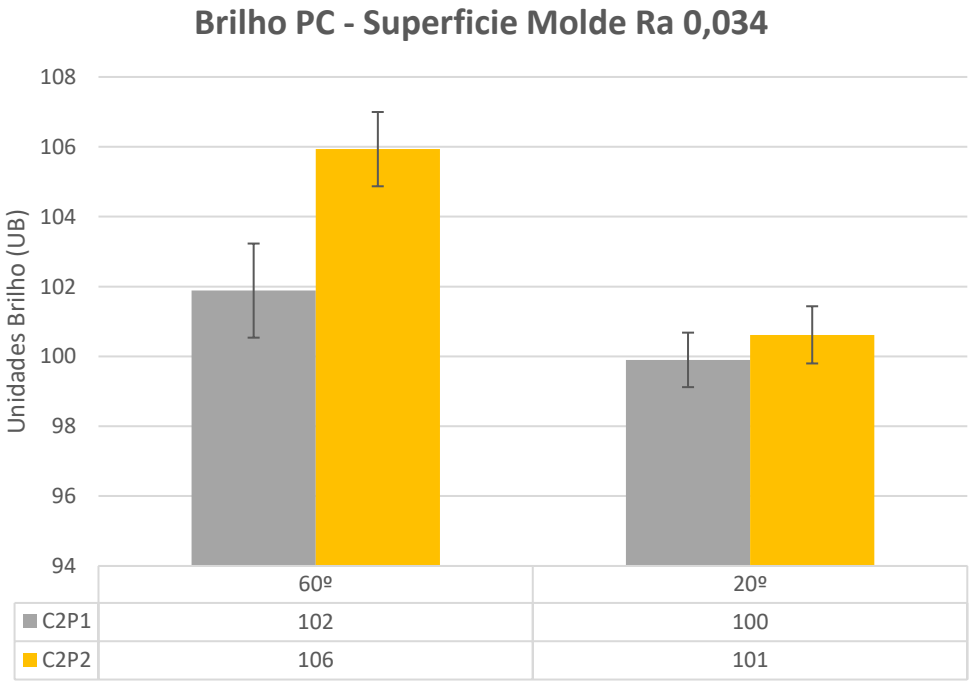


Figura 56. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,034.

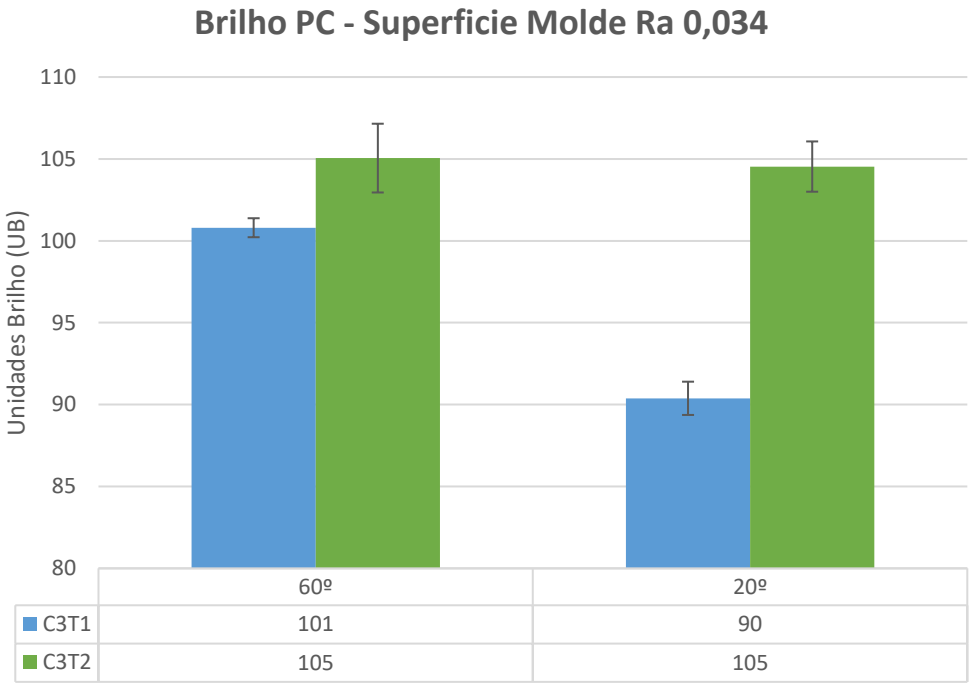


Figura 57. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,034.

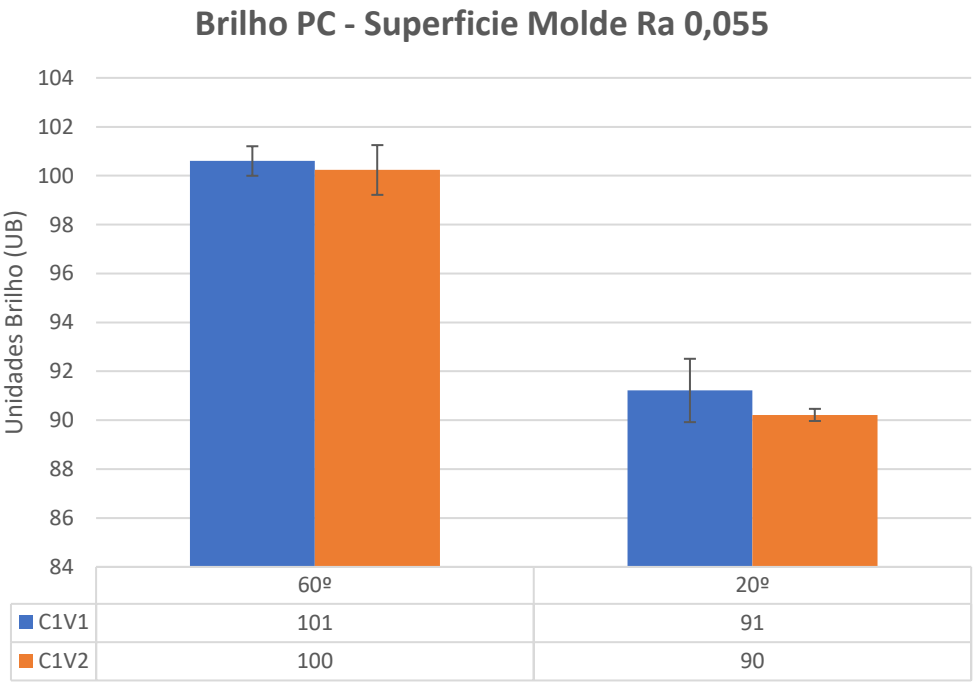


Figura 58. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis V1 e V2, com acabamento Ra 0,055.

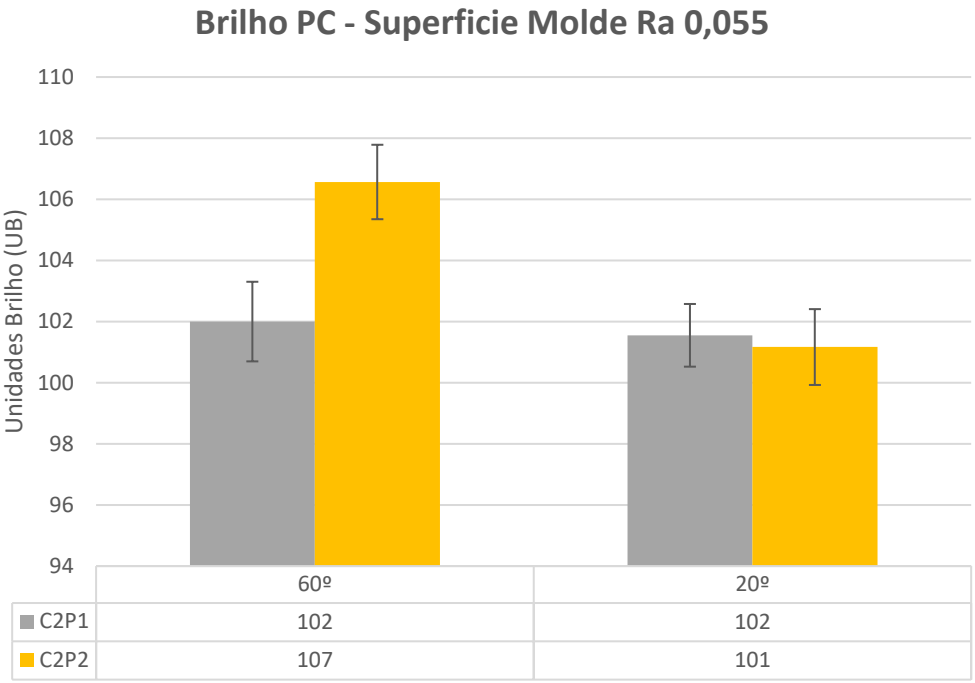


Figura 59. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis P1 e P2, com acabamento Ra 0,055.

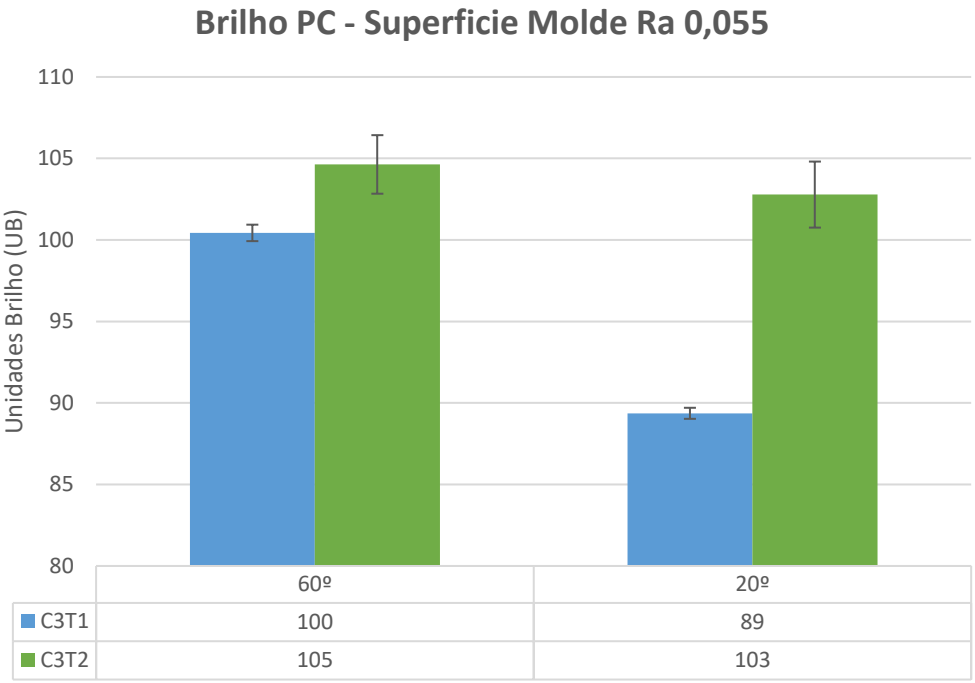


Figura 60. Valores médios de brilho das amostras PC, variáveis T1 e T2, com acabamento Ra 0,055.

Verifica-se que no acabamento Ra 0,055, as alterações da velocidade de injeção (V1 e V2) e T1 produziram variações relativamente pequenas do brilho (2UB) a 20°. Já as condições P1 e T2 atingiram os maiores valores deste conjunto, superiores a 100UB. No acabamento Ra 0,034 observaram-se oscilações muito idênticas: V2 aumentou significativamente o brilho face a V1, P1 e P2 produziram valores praticamente idênticos a 20° e T1 conduziu a 90UB a 20°, o valor de brilho mais baixo neste acabamento, e T2 com 105UB ao maior brilho medido a 20°.

A interpretação destes resultados deve considerar duas contribuições distintas. A primeira é ótica e intrínseca ao material: o PC possui índice de refração superior ao do PMMA, o que aumenta a fração de luz refletida especularmente na interface ar-polímero. A segunda é geométrica de processamento: apesar de o PC ter apresentado maior variabilidade de rugosidade entre condições operatórias, determinadas combinações de pressão e temperatura favoreceram a formação de superfícies suficientemente regulares para preservar uma reflexão especular intensa.

A elevada fluidez do PC facilita o contacto do fundido com a superfície do molde e pode favorecer a reprodução de microirregularidades relevantes para a reflexão especular. Contudo, os resultados demonstram que esta vantagem reológica não se traduziu numa estabilidade ótica equivalente à observada no PMMA: o brilho do PC mostrou-se mais dependente da combinação específica de velocidade, pressão e temperatura aplicada durante a moldação.

4.4. Análise Global da Refletividade Ótica dos Materiais Estudados

A análise dos resultados de rugosidade e brilho permite que, embora exista uma tendência geral para associar superfícies menos rugosas a níveis mais elevados de brilho, os resultados obtidos mostram que esta relação não é exclusivamente dependente da topografia superficial, sendo igualmente condicionada pelas características óticas intrínsecas de cada polímero.

Ao comparar os resultados de rugosidade obtidos para o PMMA e para o PC, verifica-se que o PMMA apresentou uma resposta superficial mais uniforme ao longo das diferentes condições de processamento. As variações observadas entre as diversas combinações de velocidade de injeção, pressão de injeção e temperatura do molde foram relativamente reduzidas quando comparadas com as registadas no PC. Esta maior estabilidade poderá estar relacionada com a menor sensibilidade do material às alterações térmicas verificadas durante o ciclo de injeção.

O comportamento observado no PC foi distinto. Apesar da elevada capacidade de escoamento associada ao grau comercial utilizado, verificou-se uma maior dispersão dos resultados de rugosidade, particularmente nas condições em que a velocidade de injeção e temperatura do molde foram incrementadas. Este comportamento sugere que a transferência da topografia do molde para a superfície da peça é fortemente influenciada pelos fenómenos térmicos e dinâmicos que ocorrem na interface molde-polímero durante o arrefecimento e solidificação.

Contudo, quanto aos resultados de brilho são analisados em paralelo com os resultados de rugosidade, verifica-se que a relação entre ambas as propriedades não é totalmente proporcional. Em várias condições experimentais, o PC apresentou valores de brilho superiores aos obtidos para o PMMA, mesmo quando a rugosidade medida não era necessariamente inferior.

Entre essas propriedades destaca-se o índice de refração. Conforme apresentado no Estado da Arte, o PC possui um índice de refração de aproximadamente 1,585, superior ao valor de 1,491 apresentado pelo PMMA. Esta diferença implica que uma maior fração da radiação luminosa incidente é refletida na interface ar-polímero, contribuindo para níveis mais elevados de brilho especular.

Por outro lado, o PMMA apresenta uma transmitância ótica superior, próxima de 92%, e valores de *haze* inferiores aos do PC. Estas características indicam uma maior capacidade de transmissão da luz através do material, mas não implicam necessariamente níveis mais elevados de reflexão superficial. Assim, enquanto o PMMA tende a privilegiar a passagem da luz através do componente, o PC evidencia uma maior capacidade de reflexão na superfície.

Este aspeto ajuda a compreender porque motivo as diferenças observadas nos resultados de brilho não acompanharam diretamente as tendências verificadas na rugosidade. A resposta ótica medida através do brilho resulta simultaneamente da quantidade de luz refletida pela superfície e da forma como essa reflexão ocorre. Consequentemente, duas superfícies com rugosidades semelhantes podem apresentar valores de brilho distintos quando produzidas em materiais com propriedades óticas diferentes.

Desta forma, a análise conjunta das caracterizações realizadas evidencia que a refletividade ótica observada nas peças moldadas resulta da interação entre a capacidade de replicação da superfície do molde, o comportamento do material durante o processamento e as propriedades óticas próprias de cada polímero.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusão

O principal objetivo deste trabalho consistiu em estudar a influência do acabamento superficial do molde na refletividade ótica de peças poliméricas produzidas por moldação por injeção, recorrendo à análise comparativa entre os acabamentos Ra 0,034 e Ra 0,055, 6 condições de processamento distintas e entre dois materiais amplamente utilizados em aplicações óticas, o PMMA e o PC.

Relativamente à rugosidade, verificou-se que as condições de processamento influenciam a capacidade de replicação superficial dos materiais estudados. Entre os parâmetros analisados, a temperatura do molde revelou ser a variável mais relevante, produzindo alterações evidentes nos valores de rugosidade medidos. A velocidade de injeção e a pressão de injeção também contribuíram para modificar a superfície das peças produzidas, embora com menor impacto quando comparadas com os efeitos associados à temperatura.

A análise comparativa dos materiais permitiu identificar que o PMMA apresentou uma resposta globalmente mais estável às alterações das condições de processamento, evidenciando uma menor dispersão dos resultados de rugosidade e uma maior consistência na reprodução da superfície moldante. Este comportamento traduz-se numa maior estabilidade no processo e numa menor sensibilidade a pequenas variações dos parâmetros de moldação.

Por sua vez, o PC revelou uma maior dependência das condições de processamento, apresentando oscilações mais significativas dos resultados de rugosidade entre as diferentes condições estudadas. Apesar de possuir um índice de fluidez substancialmente superior ao do PMMA, verificou-se que a maior facilidade de escoamento não se traduziu automaticamente numa melhor estabilidade superficial. Este resultado indica que a qualidade final da superfície depende de um conjunto de fatores mais complexo do que a simples fluidez do material durante o enchimento da cavidade. Reforça-se também que a rugosidade dos postiços nunca foi totalmente transporta para as amostras obtidas, inclusive não originando valores suficientes para enquandrar estas na mesma escala SPI dos postiços. Tal facto pode indiciar que os valores de MFI dos polímeros em estudo, mais a orientação do escoamento, a contração volumétrica, o arrefecimento, entre outros, possam ter resultado em valores de Ra superiores e por conseguinte a não obtenção da classe A da escala SPI. No entanto, realça-se que em algumas condições de processamento o PC atingiu valores muito mais próximos, indiciando que possivelmente valores de

MFI ainda mais altos, nessas mesmas condições podessem vir a atingir os valores de rugosidade do molde.

Relativamente à avaliação do brilho, esta permitiu complementar a análise da rugosidade verificando-se que ambos os materiais apresentaram níveis de brilho elevados. No entanto, o PC apresentou sistematicamente valores de brilho superiores aos obtidos para o PMMA.

Embora o PMMA tenha demonstrado maior estabilidade superficial, os resultados de brilho mostraram que a resposta ótica final não depende exclusivamente da rugosidade da superfície. Neste contexto, o maior índice de refração do PC contribuiu para uma reflexão especular mais intensa da luz, justificando os níveis de brilho superiores obtidos ao longo do programa experimental.

Do ponto de vista industrial, os resultados obtidos evidenciam que a seleção do material deve ser realizada em função dos requisitos específicos da aplicação. O PMMA revelou vantagens associadas à estabilidade no processamento e à consistência da qualidade superficial obtida, características boas quando se pretende assegurar elevada repetibilidade produtiva. Por outro lado, o PC destacou-se pela sua capacidade de proporcionar níveis superiores de brilho e refletividade, tornando-se uma solução particularmente interessante para aplicações onde a intensidade da reflexão especular é mais critica.

Em termos globais foi possível caracterizar a influência do acabamento superficial do molde na qualidade superficial das peças produzidas, compreender a forma como diferentes condições de processamento afetam essa resposta e relacionar esses efeitos com o comportamento ótico dos materiais estudados sabendo que as propriedades destes também são condicionantes.

5.2. Propostas de Trabalho Futuro

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho permitiram aprofundar o conhecimento sobre o tema, no entanto, a complexidade dos fenómenos envolvidos abre diversas oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos complementares que permitam aprofundar e expandir as conclusões alcançadas.

Uma das linhas de investigação consiste na realização de caracterizações óticas complementares, recorrendo a técnicas de medição de refletância espectral e transmitância. Embora a medição do brilho permita avaliar de forma eficaz a reflexão especular da luz, estas técnicas possibilitariam uma

caracterização mais ampla do comportamento ótico dos materiais ao longo de diferentes comprimentos de onda, aproximando a análise das condições reais de utilização de muitos componentes óticos.

Outra possibilidade passa pela ampliação do número de materiais estudados. A inclusão de outros polímeros transparentes utilizados em aplicações óticas, tais como COP, COC ou SAN por exemplo, permitiria estabelecer comparações entre diferentes comportamentos reológicos e óticos, contribuindo para uma compreensão mais pronunciada da influência das propriedades intrínsecas dos materiais na qualidade superficial e na refletividade ótica.

Considera-se igualmente importante alargar o estudo a outros níveis de acabamento superficial do molde. A inclusão de acabamentos mais finos e/ou com superfícies texturizadas permitiria avaliar de forma mais detalhada a relação entre a topografia do molde e a resposta ótica das peças produzidas, contribuindo para a definição de critérios mais precisos de seleção de acabamentos em função dos requisitos da aplicação.

Por fim, considera-se particularmente interessante aprofundar a correlação quantitativa entre rugosidade superficial, brilho e refletividade ótica. O desenvolvimento de modelos que permitam prever o comportamento ótico das peças a partir dos parâmetros de rugosidade e das propriedades dos materiais poderá constituir uma ferramenta interessante para a indústria, permitindo otimizar o desenvolvimento de moldes e de processos produtivos destinados à fabricação de componentes poliméricos com requisitos óticos cada vez mais exigentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agnaou, R. (2014). *Semi-crystalline supramolecular polymers based on polyamides and PMMA* [Tese de Doutoramento, Université Pierre et Marie Curie]. https://theses.hal.science/tel-01169073v1

Alcántara Alza, V., Roncal, J. P., & Hurtado, W. G. (2023). *Deep Cryogenic Treatment applied to AISI 420 Stainless Steel, with subsequent Tempering or Aging: Evaluation of Hardness, Impact Toughness and Microstructure*. https://doi.org/10.35629/6734-12106476

Alcântara, C. M. de. (2021). *Relação estrutura-propriedades-processamento de aços inoxidáveis martensíticos* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais.

Ali, A., Piatkowski, P., & Alnaser, A. S. (2023). Study on the Origin and Evolution of Femtosecond Laser-Induced Surface Structures: LIPSS, Quasi-Periodic Grooves, and Aperiodic Micro-Ridges. *Materials*, *16*(6). https://doi.org/10.3390/ma16062184

Alipoori, S. (2023). *Metallurgical and Materials Data 2, no. 3 (2024): 65-80 Metallurgical and Materials Data Advanced Polymer Composite Materials: Fabrication Techniques, Mechanics and Diverse Applications*. https://doi.org/10.56801/MMD35

Andrews, E. H. (2009). The influence of morphology on the mechanical properties of crystalline polymers. *Pure and Applied Chemistry*, *31*(1–2), 91–111. https://doi.org/10.1351/197231010091

Araújo, C., Pereira, D., Dias, D., Marques, R., & Cruz, S. (2023). In-cavity pressure measurements for failure diagnosis in the injection moulding process and correlation with numerical simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *126*(1–2), 291–300. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11100-1

Ariño, I., Kleist, U., & Rigdahl, M. (2004). Color of pigmented plastics—Measurements and predictions. *Polymer Engineering & Science*, *44*, 141–152. https://doi.org/10.1002/pen.20013

Ashby, M. F. (2011). Materials Selection—The Basics. *Materials Selection in Mechanical Design*, 97–124. https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-663-7.00005-9

ASTM D2457-03. (2003). *ASTM D2457-03 Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics* (p. 5).

Berins, M. L. (2002). *Plastics Engineering Handbook Of The Society Of The Plastics Industry* (Springer Science & Business Media, Ed.; 5.ª ed.).

Bhushan, B. (2000). *Modern tribology handbook: Volume one: Principles of tribology* (CRC Press, Ed.; Ohio, Vol. 1).

Bhushan, B., Wyant, J., & Koliopoulos, C. (1985). Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry. *Applied Optics*, *24*, 1489–1497. https://doi.org/10.1364/AO.24.001489

Bobzin, K., Wietheger, W., & Knoch, M. A. (2021). Development of Thermal Spray Processes for Depositing Coatings on Thermoplastics. *Journal of Thermal Spray Technology*, *30*(1), 157–167. https://doi.org/10.1007/s11666-020-01147-x

Boothroyd, G., Dewhurst, P., & A. Knight, W. (2001). *Product Design for Manufacture and Assembly Third Edition* (CRC Press, Ed.; 3.ª ed.).

Born, M., Worf, E., Bhatia, A. B., & Clemmow, P. C. (1999). *Principles of Optics: Eletromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181

Boztepe, S., Gilblas, R., Olivier de Almeida, Schmidt, F., & Yannick Le Maoult. (2017). The role of microcrystalline structure on the temperature-dependent thermo-optical properties of semi-crystalline thermoplastics and non-invasive temperature measurements. Em SFT (Ed.), *Congrès annuel de la Société Française de Thermique*.

Braga, L. R., & Silva, F. M. (2017). Embalagens ativas: uma nova abordagem para embalagens alimentícias RESUMO. *Brazilian Journal of Food Research*, *4*, 170–186. https://periodicos.utfpr.edu.br/rebrapa

Brusov, A., Orr, G., Azoulay, M., & Golan, G. (2020). Electropolishing of single crystal and polycrystalline aluminum to achieve high quality optical and mechanical surfaces. *Bulgarian Chemical Communications*, *52*, 5–11. https://doi.org/10.34049/bcc.52.C.0105

Bryce, M. D. (1997). *Plastic Injection Molding: Material Selection and Product Design Fundamentals: II* (Society of Manufacturing Engineers, Ed.).

Campo. E. Alfredo. (2006). *The Complete Part Design Handbook* (Hanser Gardner Publishers, Ed.). https://doi.org/10.3139/9783446412927

Cao, L., & Sendur, K. (2019). Surface roughness effects on the broadband reflection for refractory metals and polar dielectrics. *Materials*, *12*(19). https://doi.org/10.3390/ma12193090

Chaghazardi, Z., & Wüthrich, R. (2022). Electropolishing of Additive Manufactured Metal Parts. *Journal of The Electrochemical Society*, *169*. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6450

Chailad, W., & Yang, L. (2024). Evaluation of Slurry-Eroded Rubber Surface Using Gloss Measurement. *Coatings*, *14*(7). https://doi.org/10.3390/coatings14070915

Charles A. Harper. (2000). *Modern Plastics handbook* (McGraw hill education, Ed.; 1.ª ed.).

Clavier, G. (2017). *A study of mechanical properties of semi-crystalline polymers using molecular simulation* [Tese de Doutoramento]. Université Paris-Saclay.

Costa, R. J. G. (2017). *Substituição parcial do titânio pelo nióbio em um aço ASTM 409: efeito na microestrutura, textura e estampabilidade* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais.

Cunha. A, Brito. A, & Pontes. A. (2003). *Manual do projetista para moldes de injeção de plástico* (CENTIMFE, Vol. 2).

Cunha, A. M., & Pouzada, A. S. (1997). *Processo de Moldação por injeção - Textos de Apoio ao Curso de Especialização / Mestrado. Universidade do Minho.* [Tese de Mestrado].

Dario Loaldi. (2020). *Integration of Micro and Nano Structures on Injection Moulded Devices: Process Chains and Enabling Technologies* [Tese de Doutoramento]. Technical University of Denmark.

Dawkins, M. S. (2013). Exploration of Impact of Technological Parameters on Surface Gloss of Plastic Parts. *Procedia CIRP*, *12*, 504–509. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198503200.003.0001

de Moura, A. N., & et al. (2023). Microstructure, crystallographic aspects and mechanical properties of AISI 420 martensitic stainless steel after different thermomechanical process routes. *Materials Chemistry and Physics*, *305*, 127. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127723

El-naggar, A. M., Alhaqbani, N., Alsaleh, A. A., Kamal, A. M., Albassam, A. A., & Aldhafiri, A. M. (2024). Structural, optical and electrical conduction characteristics of PMMA/PVAc/TBAI blended polymers. *Optical Materials*, *155*, 115867. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115867

El-Nasser, H. M. (2017). Morphology and Spectroscopic Ellipsometry of PMMA Thin Films. *Applied Physics Research*, *9*(2), 5. https://doi.org/10.5539/apr.v9n2p5

Escobar, W., Barrera, H., & Villazon, H. (2003). Importancia estratégica de los nuevos materiales en el desarrollo sostenible y como alternativa de competitividad. *Informador Técnico*, *67*, 21. https://doi.org/10.23850/22565035.819

Fan, R., Wei, S., Ji, H., Qian, Z., Tan, H., Mo, Y., & Ma, D. (2024). Surface variation analysis of freeform optical systems over surface frequency bands for prescribed wavefront errors. *Optics & Laser Technology*, *178*, 111223. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111223

Fan, Y. Y., & Huynh, V. M. (1992). Investigation of light scattering from rough periodic surfaces — numerical solutions. *Optics & Laser Technology*, *24*(3), 145–150. https://doi.org/10.1016/0030-3992(92)90102-8

Fernández-García, A., Sutter, F., Martínez-Arcos, L., Sansom, C., Wolfertstetter, F., & Delord, C. (2017). Equipment and methods for measuring reflectance of concentrating solar reflector materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *167*, 28–52. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.036

Flory, P. J. (1984). Conformations of macromolecules in condensed phases. Em *Pure & Appi. Clwrn* (Vol. 3, Número 3). https://doi.org/10.1351/pac198456030305

Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, *123*(1), 133–145. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2

Galiatsatos, V. (2007). Refractive Index, Stress-Optical Coefficient, and Optical Configuration Parameter of Polymers. Em *Physical Properties of Polymers Handbook* (pp. 823–853). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-69002-5_50

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Grønborg, F. (2024). *Polymer-Based Materials: Expanding properties through Parts, Processes, and Materials* [Tese de Doutoramento]. University of Denmark.

Guo, G. (2022). Investigation on surface roughness of injection molded polypropylene parts with 3D optical metrology. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, *16*(1), 17–23. https://doi.org/10.1007/s12008-021-00796-8

Hassan, F. A., & Jawad, Q. A. (2018). Experimental Study of the Effect of Austenitizing Temperature and Multiple Tempering on the Microstructure of AISI 410 Martensitic Stainless Steel. *Iraqi Journal*, *1*.

Hecht, Eugene. (2017). *Optics* (Pearson, Ed.; 5.ª ed.). Pearson. https://doi.org/10.5281/zenodo.3746415

Holzer, C., Gobrecht, J., Schift, H., & Solak, H. (2010). Replication of Micro- and Nanostructures on Polymer Surfaces. *Macromolecular Symposia*, *296*, 316–323. https://doi.org/10.1002/masy.201051044

Hopmann, C., & Kobel, T. (2023). Development of a methodical approach to set-up the injection velocity profile dependent on the part geometry. *Polymer Engineering*, *43*(5). https://doi.org/10.1515/polyeng-2022-0300

Jefferies., S. R. (2012). Polishing. *Contemporary Esthetic Dentistry*, (11), 267–303. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-06895-6.00011-6

Jennings, J., He, G., Howdle, S., & Zetterlund, P. (2016). Block Copolymer Synthesis by Controlled/Living Radical Polymerization in Heterogeneous Systems. *Chemical Society reviews*, *45*. https://doi.org/10.1039/c6cs00253f

Juiña, L. C., Dávalos, E. J., Landazurí, D. S., Guaño, S. E., & Moreno, N. V. (2022). Roughness analysis of a concave surface as a function of machining parameters and strategies for AISI 420 steel. *Materials Today: Proceedings*, *49*, 85–92. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.477

Kaneko, S., & Sato, Y. (1990). Electropolishing and Chemical Polishing for Stainless Steel. *The Surface Finishing Society of Japan*, *41*. https://doi.org/10.4139/SFJ.41.203

Kigle-Boeckler, G. (1995). Measurement of gloss and reflection properties of surfaces. *Metal Finishing*, *93*(5), 28–31. https://doi.org/10.1016/0026-0576(95)90685-B

Kim, J., & Lee, K. (2023). Surface Hardness and Corrosion Behavior of AISI 420 Martensitic Stainless Steels Treated by Plasma Oxy-Nitriding Processing. *Korean Journal of Materials Research*, *33*(7), 309–314. https://doi.org/10.3740/MRSK.2023.33.7.309

Klocke, F., Dambon, O., & Behrens, B. (2011). Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels. *Production Engineering*, *5*(5), 475–483. https://doi.org/10.1007/s11740-011-0301-6

Krishnan, A., & Fang, F. (2019). Review on mechanism and process of surface polishing using lasers. Em *Frontiers of Mechanical Engineering* (Vol. 14, Número 3, pp. 299–319). Higher Education Press. https://doi.org/10.1007/s11465-019-0535-0

Larena, A., Millán, F., Pérez, G., & Pinto, G. (2002). Effect of surface roughness on the optical properties of multilayer polymer films. *Applied Surface Science*, *187*(3–4), 339–346. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)01044-3

Li, J., Ma, H., Liu, W., Jiang, S., & Pan, B. (2023a). Effects of Cavity Thickness and Mold Surface Roughness on the Polymer Flow during Micro Injection Molding. *Polymers*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/polym15020326

Li, J., Ma, H., Liu, W., Jiang, S., & Pan, B. (2023b). Effects of Cavity Thickness and Mold Surface Roughness on the Polymer Flow during Micro Injection Molding. *Polymers*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/polym15020326

Li, J. Q., Chen, C., Jiang, S. F., Chai, G. Z., & Lian, Z. B. (2012). Effects of Process Parameters on Surface Gloss in Rapid Heat Cycle Molding Process. *Ultra-Precision Machining Technologies, CJUMP2011, Advanced Materials Research*, *497*, 132–136. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.497.132

Liao, H. S., Huang, G. T., Tu, H. Da, Lin, T. H., & Hwu, E. Te. (2018). A novel method for quantitative height measurement based on an astigmatic optical profilometer. *Measurement Science and Technology*, *29*(10). https://doi.org/10.1088/1361-6501/aadc49

Magalhães, C. H. X. M. (2017). *Efeito do Processamento Térmico nas transformações de fase ferrita-austenita em aço inoxidável duplex do tipo UNS S32304* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Ouro Preto.

Marconi, P., Amarante, E. M. de S., Fialho, R. L. L., Ferreira, C. V., Beal, V. E., & Junior, A. S. R. (2023). *Steel and aluminium moulds: comparative analysis of optimal parameters to inject amorphous and semicrystalline polymers* (Universidade Federal da Bahia, Ed.). Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3594364/v1

Mark James E. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook Second Edition* (Springer Science & Business Media, Ed.; 2.ª ed.).

Masato, D., Sorgato, M., Babenko, M., Whiteside, B., & Lucchetta, G. (2018). Thin-wall injection molding of polystyrene parts with coated and uncoated cavities. *Materials & Design*, *141*, 286–295. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.048

Menges, G. Prof. Dr.-Ing., Michaeli, W., & Mohren, P. (2013). *How to Make Injection Molds* (Oxford University Press, Ed.). https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136394658

Minami, K. (2010). Optical Plastics. Em *Handbook of Plastic Optics* (pp. 123–160). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9783527635443.ch5

Mitschang, P., & Hildebrandt, K. (2012). Polymer and composite moulding technologies for automotive applications. *Advanced Materials in Automotive Engineering*, 210–229. https://doi.org/10.1533/9780857095466.210

Mohammed, A., & Cashell, K. A. (2021). Structural Behaviour and Fire Design of Duplex and Ferritic Stainless Steel CHS Stub Columns. *International Journal of Steel Structures*, *21*(4), 1280–1291. https://doi.org/10.1007/s13296-021-00502-0

Moustaghfir, A. (2004). *Elaboration and caracterisation of zinc oxide thin films. Application as photoprotective coating on polycarbonate.* [Tese de Doutoramento]. Université Blaise Pascal.

Nesli, S., & Yilmaz, O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *114*. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06861-6

Oliveira, M. C., Vieira, A. C., Andrade, A. C., & Oliveira, I. A. (2016). Efeito dos procedimentos de acabamento e polimento na rugosidade superficial da cerâmica Noritake®. *Revista Bahiana de Odontologia*, *7*(2). https://doi.org/10.17267/2238-2720revbahianaodonto.v7i2.890

Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). Material Science of Polymers for Engineers. Em T. A. Osswald & G. Menges (Eds.), *Material Science of Polymers for Engineers (Third Edition)* (Third Edition, pp. I–XIX). Hanser. https://doi.org/https://doi.org/10.3139/9781569905241.fm

Pazos, M., Baselga, J., & Bravo, J. (2003). Limiting thickness estimation in polycarbonate lenses injection using CAE tools. *Journal of Materials Processing Technology*, (438–441), 143–144. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00425-4

Pedersen, G. A., Hvilsted, S., & Petersen, J. H. (2015). Migration of bisphenol A from polycarbonate plastic of different qualities. *Environmental project*, *1710*. www.mst.dk/english

Pedroso, A. F. V., Sebbe, N. P. V., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Sales-Contini, R. C. M., Costa, R. D. F. S., Barbosa, M. L. S., & Nogueira, F. R. (2024). A Concise Review on Materials for Injection Moulds and Their Conventional and Non-Conventional Machining Processes. Em *Machines* (Vol. 12, Número 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/machines12040255

Pedroso, A. F. V., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Alexandre, R. J. D., & Durão, L. M. (2025). A Brief Review on Hardened Tool Steel for Injection Moulds and Milling Operations. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 68–76. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95211-1_6

Peixoto, C., Valentim, P. T., Sousa, P. C., Dias, D., Araújo, C., Pereira, D., Machado, C. F., Pontes, A. J., Santos, H., & Cruz, S. (2022). Injection molding of high-precision optical lenses: A review. Em *Precision Engineering* (Vol. 76, pp. 29–51). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.002

Pereira, J. A., & Corrêa, H. L. (2024). *Análise e redução da variação do brilho em peças plásticas por injeção: um estudo de caso no setor automotivo.* https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.4993

Perez, J. (1998). *Physis and Mechanics of Amorphous Polymers* (CRC Press, Ed.; 1.ª ed.). https://doi.org/978-9054107668

Pessoles, X., & Tournier, C. (2009). Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. *Journal of Materials Processing Technology*, *209*(7), Pages. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.034ï

Piccolo, L., Puleo, K., Sorgato, M., Lucchetta, G., & Masato, D. (2021). Modeling the replication of submicron-structured surfaces by micro injection molding. *Materials & Design*, *198*(3), 109272. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109272

Pina-Estany, J., Colominas, C., Fraxedas, J., Llobet, J., Perez-Murano, F., Puigoriol-Forcada, J. M., Ruso, D., & Garcia-Granada, A. A. (2017). A statistical analysis of nanocavities replication applied to injection moulding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *81*(1), 131–140. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.11.003

Prezotto, M. (2019). *Sintese PMMA*. https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Sintese_PMMA.png (acesso - 25/04/2026). https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Sintese_PMMA.png

Qualidade, I. P. D. (2011). *NP EN ISO 4287 Especificações geométricas de produtos (GPS). Textura de superfície: Método do perfil. Termos, definições e parâmetros de textura de superfície* (p. 27).

Reddy, V. V., Krishna, A. V., Sjögren, A., & Rosén, B. G. (2023). Characterisation and analysis of the surface texture of injection-moulded automotive interior ABS and PP components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *128*(9–10), 4579–4592. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12209-z

Ribeiro, J. L. P., & Carneiro, M. H. D. S. (2016). A reflexão da luz nos periódicos de Ensino de Física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, *33*(2), 355. https://doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n2p355

Rodriguez, E. R., Tardif, X., Bailleul, J.-L., Allanic, N., Sobotka, V., & Thermal, V. S. (2021). *Thermal design methodology to hybrid manufacturing process of High Performance Thermoplastics Composites*. https://doi.org/10.25518/esaform21.3677ï

Samei, J., Asgari, H., Pelligra, C., Sanjari, M., Salavati, S., Shahriari, A., Amirmaleki, M., Jahanbakht, M., Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., & Mohammadi, M. (2021). A hybrid additively manufactured martensitic-maraging stainless steel with superior strength and corrosion resistance for plastic injection molding dies. *Additive Manufacturing*, *45*, 102068. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102068

Sansul, S., Yousif, E., & Zainulabdeen, K. (2023). A review study of the structure, properties and general application of poly(methyl methacrylate). *Characterization and Application of Nanomaterials*, *6*(1). https://doi.org/10.24294/can.v6i1.2537

Simonsen, I., Larsen, A., Andreassen, E., Ommundsen, E., & Nord-Varhaug, K. (2005). Estimation of gloss from rough surface parameters. *physica status solidi (b)*, *242*, 2995–3000. https://doi.org/10.1002/pssb.200562235

Simonsen, I., Larsen, A., Andreassen, E., Ommundsen, E., & Nord-Varhaug, K. (2009). Haze of surface random systems: An approximate analytic approach. *Phys. Rev. A*, *79*(6). https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.063813

Sushmita, K., Madras, G., & Bose, S. (2021). The journey of polycarbonate-based composites towards suppressing electromagnetic radiation. *Functional Composite Materials*, *2*(1), 13. https://doi.org/10.1186/s42252-021-00025-1

Temmler, A., Willenborg, E., & Wissenbach, K. (2012). Laser polishing. Em G. Hennig, X. Xu, B. Gu, & Y. Nakata (Eds.), *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII* (Vol. 8243, p. 82430W). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.906001

Toscani, M., Guarnera, D., Guarnera, G., Hardeberg, J. Y., & Gegenfurtner, K. (2020). Three Perceptual Dimensions for Specular and Diffuse Reflection. *ACM Transactions on Applied Perception*, *17*. https://doi.org/10.1145/3380741

Tosello, G., Gava, A., Hansen, H. N., Lucchetta, G., & Marinello, F. (2023). Effects of anisotropic and isotropic LIPSS on polymer filling flow and wettability of micro injection molded parts. *Optics & Laser Technology*, *158*(5–6), 108795. https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.077

Tsai, M., & Hoo, Z. (2019). Polishing single-crystal silicon carbide with porous structure diamond and graphene-TiO2 slurries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *105*. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04223-x

Turbil, C., Gozhyk, I., Teisseire, J., Simonsen, I., Ged, G., & Obein, G. (2022). *Predicting changes in visual appearance of periodic surface from BRDF measurments*. https://doi.org/10.48550/1703.00704

Uchida, T., Sato, T., Takeuchi, S., Kuramochi, N., & Kawashima, N. (2003). Basic Study on Dispersion and Surface Modification of Diamond Powders by Sonochemical Reaction. *Japanese Journal of Applied Physics*, *42*(5S), 2967. https://doi.org/10.1143/JJAP.42.2967

Vera, J., Brulez, A. C., Contraires, E., Larochette, M., Valette, S., & Benayoun, S. (2017). Micro-texturing and microinjection of thermoplastics. *Materiaux et Techniques*, *105*(3). https://doi.org/10.1051/mattech/2017034

Wang, M., Wu, Y., Wei, Q., & Shi, Y. (2020). Thermal fatigue properties of h13 hot-work tool steels processed by selective laser melting. *Metals*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/met10010116

Wang, Y., Liu, L., Tian, C., Wang, Y., Song, L., & shi, ying. (2023). *Crystallization, Morphology, Optical Properties, Tear Properties and Antibacterial Properties of Nano Zinc Oxide Composites*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2798303/v1

Whitehouse, D. (2002). *Surfaces and their measurement* (Hermes Penton, Ed.; 1.ª ed.).

Whitehouse, D. J. (2011). Handbook of surface and nanometrology . Em *Handbook of surface and nanometrology* (2nd ed.). CRC Press.

Wiesbaden, S. F. (2013). The orange peel effect and cloudiness of the surface become measurable. *JOT Journal für Oberflächentechnik*, *53*(9), 66. https://doi.org/10.1365/s35144-013-0944-5

Wu, W., Ouyang, Q., He, L., & Huang, Q. (2022). Optical and thermal properties of polymethyl methacrylate (PMMA) bearing phenyl and adamantyl substituents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *653*, 130018. https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2022.130018

Xu, L., Zhang, M., & Liu, B. (2024). Control of the rubber particle size and phase structure for the design of transparent methacrylate-acrylonitrile-butadiene-styrene resin with excellent performance. *Journal of Polymer Research*, *31*(7), 215. https://doi.org/10.1007/s10965-024-04061-w

Xu, X., Chen, X., Zhou, Y., Li, Y., & Liu, M. (2022). Laser Polishing and Annealing Injection Mold Using Dual-Beam Laser System. *Coatings*, *12*(12). https://doi.org/10.3390/coatings12121822

Yan, J., Mullany, B., Beaucamp, A., Meyer, D., & Sugita, N. (2025). Surface finishing by shape-adaptive processes. *CIRP Annals*, *74*(2), 1019–1045. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2025.04.084

Yi, R., Zhang, Y., Zhang, X., Fang, F., & Deng, H. (2020). A generic approach of polishing metals via isotropic electrochemical etching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *150*, 103517. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103517

Zarobila, C. J., Nadal, M. E., & Miller, C. C. (2024). Measuring gloss using spectral reflectance. *Measurement Science and Technology*, *35*(6), 65016. https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad204a

ANEXOS

ANEXO I – Ficha Técnica PMMA Acryplas HD03 da Wanhua

WANHUA PMMA

Product Technical Specification

Revision date: 2020-03-06

Product grade: HD03 Version: V 2.0

ACRYPLAS®HD03 polymethyl methacrylate

General information			
Properties	• Excellent clarity	• Excellent weather resistance	• Superior surface scratch resistance
Applications	• General purpose		
Appearance	• Clear/transparent		
Form	• Pellet		
Processing methods	• Molding	• Extrusion	

Product performance parameters:

Item	Test standard	Test conditions	Unit	Typical value
Physical properties				
Melt flow index	ISO 1133	230°C/3.8 kg	g/10 min	3.5
Molding shrinkage	ISO 294	—	%	0.2-0.6
Water absorption	ISO 62	24hr	%	0.3
Density	ISO 1183	—	g/cm³	1.19
Mechanical properties				
Tensile strength	ISO 527	5 mm/min	MPa	77
Tensile modulus	ISO 527	1 mm/min	MPa	3300
Elongation at break	ISO 527	5 mm/min	%	6
Bending strength	ISO 178	2 mm/min	MPa	125
Bending modulus	ISO 178	2 mm/min	MPa	3300
Unnotched impact strength of simply supported beam	ISO 179	1eU unnotched	kJ/m2	20
Notched impact strength of simply supported beam	ISO 179	1eA notched	kJ/m2	1.3
Thermal properties				
Vicat softening point	ISO 306	B50	°C	107
Heat deformation temperature	ISO 75	1.8 MPa	°C	101
Coefficient of linear expansion	ISO 11359	—	1/°C	6×10-5

WANHUA

PMMA

Project	Test standards	Test conditions	Unit	Typical values
Optical properties				
Transmittance	ISO 13468	3mm	%	92
Haze	ISO 14782	3mm	%	<0.5
Refractive index	ISO 489	nd	—	1.49
Combustion performance				
Flame retardant grade	UL94	1.5mm/3.0mm	Class	HB
Electrical properties				
Surface resistivity	ASTM D 527	—	Ω	>1016
Volume resistivity	ASTM D 527	—	Ω·m	□1013
Dielectric strength	ASTM D 149	4kv/sec	Kv/mm	20
Dielectric constant	ASTM D 150	60Hz	—	3.7
Recommended processing conditions				
Pre-drying temperature		°C		70~80
Pre-drying time		h		4-6
Injection molding temperature		°C		220-260
Mold temperature		°C		50-90

Version information

First published: February 10, 2019 Version: V 1.0

The indicators and data provided in this document are based on our current technical knowledge and practical experience and are for reference only. The specific guaranteed indicators are subject to the quality assurance certificate or the supply contract. Users purchasing our products are responsible for testing to verify suitability for their own processes and applications and to achieve the intended purpose. Our company cannot control further applications and processing of our products, therefore our liability is limited to the part delivered by us and used by you. We do not assume indirect losses arising from production using our products as raw materials. Our Market Department technical support and customer service center are willing to provide product-related consulting and application technical services; please feel free to write or call us.

Contact Address: No. 39 Chongqing Street, Economic and Technological Development Zone, Yantai City, Shandong Province, Wanhua Chemical Group Co., Ltd.

Customer service center inquiry phone: +86 (535) 3031576 Fax: +86 (535) 6857160

Mail Postal code: 264006 Website: http:/www.whchem.com

ANEXO II – Ficha Técnica PC *1220R* da *Lotte Chemical*

LOTTE CHEMICAL

PC-1220R

Polycarbonate resin

General Information

Description

Low viscosity
Easy mold release

Applications

Small and complicated injection product

Typical properties[1]

	Test Method	Typical value	Unit
Physical			
Melt Flow Index, 300℃, 1.2kg	ASTM D1238	22	g/10min
Specific Gravity	ASTM D792	1.20	
Mold Shrinkage	ASTM D955	0.5~0.7	%
Mechanical			
Tensile Strength, yield, 50mm/min	ASTM D638	630	kgf/cm²
Tensile Elongation, break, 50mm/min	ASTM D638	> 100	%
Flexural Strength, yield, 10mm/min	ASTM D790	920	kgf/cm²
Flexural Modulus, 10mm/min	ASTM D790	24,000	kgf/cm²
IZOD Impact Strength, notched, 23 ℃, 1/8"	ASTM D256	70	kg·cm/cm
notched, 23 ℃, 1/4"	ASTM D256	-	kg·cm/cm
Thermal			
Heat Distortion Temp. 4.6kgf/cm²	ASTM D648	139	℃
18.6kgf/cm²	ASTM D648	128	℃
Vicat Softening Temp. Rate B/50	ASTM D1525	150	℃
Optical			
Light Transmittance	ASTM D1003	89	%
Haze	ASTM D1003	< 0.8	%
Refractive Index	ASTM D542	1.585	

Notes

ISO 9001, 14001, /TS 16949

[1] Typical properties : these are not to be construed as specifications.

www.lottechem.com

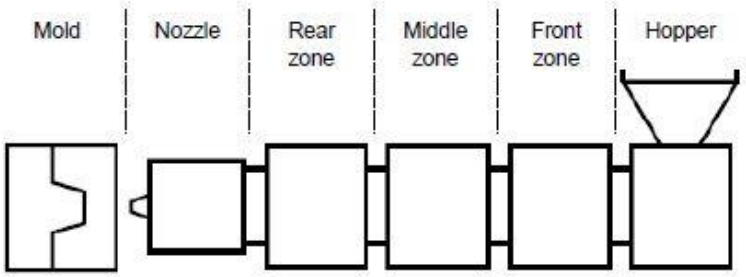
LOTTE CHEMICAL

PC-1220R

Polycarbonate resin

Processing guides[1]

		Typical value	Unit
Drying condition			
Drying temperature		120	℃
Drying time		4	hr
Maximum moisture content		0.02	%
Injection molding			
Melt temperature		290 ~ 310	℃
Nozzle temperature		280 ~ 300	℃
Barrel	Rear zone	290 ~ 310	℃
	Middle zone	280 ~ 300	℃
	Front zone	270 ~ 290	℃
Hopper temperature		60 ~ 80	℃
Mold temperature		60 ~ 90	℃



Recycling

Sprues and runners can be reground with virgin resin within the ratio of 20%. Care must be taken to ensure that the regrind is free from impurities and regrind should not be used in applications where impact performance and/or agency compliance are required.

Notes

ISO 9001, 14001, /TS 16949

[1] Processing guides : Typical processing parameters are noted. Actual processing conditions will depend on machine size, mold design, material residence time, shot size, etc.

www.lottechem.com

ANEXO III – Ficha Técnica Polyblak 1850 da *A. Schulman*

A. Schulman

POLYBLAK® 1850

Product Description

POLYBLAK® 1850 is a carbon black masterbatch for the colouring of polyolefins for extrusion and injection moulding.

POLYBLAK® 1850 contains 50 % SRF-type carbon black in polyethylene.

General

Material Status	• Commercial: Active		
Availability	• Europe		
Uses	• Masterbatch		
Appearance	• Black		
Processing Method	• Blown Film • Cast Film	• Extrusion Blow Molding • Injection Molding	• Pipe Extrusion

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)
Additive Content (Carbon Black, SRF-type)	50.0 %	50.0 %
Specific Gravity	1.22	1.22 g/cm³
Bulk Density	46.8 lb/ft³	750 kg/m³
Moisture Content	< 1500 ppm	< 1500 ppm
Heat Stability	572 °F	300 °C
Light Fastness	8	8
Weather Fastness	5	5

Usage

POLYBLAK® 1850 is especially suited for the colouring of polyethylene films, sheets and injection moulded parts for which a perfectly uniform dispersion of carbon black is required.

For injection and blow moulding applications we recommend an addition rate of 1 to 3 % POLYBLAK® 1850, depending on the opacity required. A higher addition rate for film applications is also possible.

Remark

This formulation does not contain diarylide pigments.

Regulatory

POLYBLAK® 1850 can be used in food-packaging according to:

- FDA: not approved
- EEC (2002/72): not approved

Detailed information available upon request.

Packaging & Storage

POLYBLAK® 1850 is packed in 25 kg polyethylene bags on 1250 kg shrink-wrapped pallets. The storage should not exceed 12 months for optimum performance.

Copyright ©, 2016 A. Schulman Inc.

ANEXO IV – Tabela dos valores obtidos de rugosidade e brilho das amostras em PMMA

			C1V1								C1V2										C1V1								C1V2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,36	0,29	0,30				0,31	0,04	0,28	0,37	0,28	0,29			0,30	0,04	60"	99,90	100,60	98,80	98,20	100,20	99,00	99	1	100,00	100,30	98,80	99,90	100,20	97,80	100	1
		Rq	0,45	0,36	0,37				0,40	0,05	0,35	0,50	0,35	0,36			0,39	0,08	20"	97,70	93,20	92,80	91,40	93,20	92,50	93	2	97,60	93,80	94,80	93,40	96,20	95,20	95	2
		Rz	0,22	0,18	0,16				0,18	0,03	0,16	0,24	0,16	0,17			0,18	0,04																		
		Rt	0,26	0,23	0,21				0,23	0,02	0,19	0,34	0,20	0,21			0,23	0,07																		
			C2P1								C2P2										C2P1								C2P2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,36	0,56	0,39	0,39	0,34		0,41	0,09	0,52	0,27	0,41	0,44			0,41	0,10	60"	90,20	91,50	90,80	90,20	90,20	90,20	91	1	90,80	91,50	90,20	90,10	91,20	89,20	91	1
	A3	Rq	0,45	0,73	0,49	0,50	0,43		0,52	0,12	0,66	0,34	0,52	0,55			0,52	0,13	20"	89,10	85,70	86,30	87,50	85,30	85,20	87	2	89,30	87,90	85,30	86,80	81,30	86,20	86	3
		Rz	0,21	0,45	0,22	0,23	0,18		0,26	0,11	0,31	0,15	0,24	0,26			0,24	0,07																		
		Rt	0,28	0,32	0,32	0,32	0,26		0,30	0,03	0,35	0,20	0,31	0,34			0,30	0,07																		
			C3T2								C3T1										C3T2								C3T1							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,37	0,34	0,31				0,34	0,03	0,36	0,40	0,34				0,37	0,03	60"	93,10	94,10	96,10	95,60	90,10	98,10	95	3	91,80	93,50	94,20	92,10	92,20	90,20	92	1
		Rq	0,47	0,44	0,40				0,43	0,04	0,46	0,51	0,45				0,47	0,03	20"	88,80	86,80	90,70	89,80	92,10	89,10	90	2	89,20	88,90	82,30	89,80	90,30	90,20	88	3
		Rz	0,23	0,20	0,19				0,21	0,02	0,20	0,23	0,22				0,22	0,02																		
		Rt	0,29	0,26	0,28				0,28	0,02	0,26	0,31	0,30				0,29	0,03																		
PMMA																																				
			C1V1								C1V2										C1V1								C1V2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,47	0,28	0,29	0,30			0,34	0,09	0,28	0,34	0,34				0,32	0,03	60"	99,10	99,20	97,80	97,50	97,20	92,90	97	2	96,20	97,20	97,30	98,20	98,70	99,70	98	1
		Rq	0,60	0,36	0,36	0,37			0,42	0,12	0,35	0,43	0,43				0,40	0,05	20"	89,50	94,20	90,50	93,40	90,20	94,00	92	2	93,80	93,40	91,50	93,20	91,10	88,10	92	2
		Rz	0,29	0,18	0,19	0,16			0,20	0,06	0,16	0,20	0,22				0,19	0,03																		
		Rt	0,42	0,24	0,24	0,19			0,27	0,10	0,21	0,29	0,31				0,27	0,05																		
			C2P1								C2P2										C2P1								C2P2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,38	0,33	0,34				0,35	0,03	0,33	0,28	0,36	0,34			0,33	0,04	60"	95,60	93,10	95,10	94,50	97,20	92,30	95	2	98,80	97,80	98,60	99,00	97,80	90,70	97	3
	A1	Rq	0,48	0,41	0,42				0,44	0,04	0,41	0,37	0,47	0,44			0,42	0,04	20"	86,50	88,00	86,70	80,40	88,90	89,70	87	3	90,20	91,30	89,70	88,20	89,80	88,70	90	1
		Rz	0,21	0,19	0,20				0,20	0,01	0,20	0,19	0,21	0,21			0,20	0,01																		
		Rt	0,26	0,25	0,24				0,25	0,01	0,25	0,27	0,30	0,25			0,27	0,02																		
			C3T2								C3T1										C3T2								C3T1							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,34	0,29	0,33				0,32	0,02	0,41	0,36	0,34				0,37	0,04	60"	99,10	98,10	96,80	100,40	94,20	97,40	98	2	92,40	93,40	90,70	95,10	90,40	97,40	93	3
		Rq	0,44	0,36	0,41				0,40	0,04	0,53	0,45	0,42				0,47	0,05	20"	94,90	89,70	94,40	92,10	93,10	95,20	93	2	89,70	88,90	90,40	92,30	89,10	85,50	89	2
		Rz	0,22	0,16	0,19				0,19	0,03	0,25	0,21	0,20				0,22	0,03																		
		Rt	0,29	0,20	0,25				0,25	0,05	0,32	0,25	0,24				0,27	0,04																		

ANEXO V – Tabela dos valores obtidos de rugosidade e brilho das amostras em PC

			C1V1								C1V2									C1V1								C1V2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
PC	A3	Ra	0,27	0,59	0,56				0,48	0,17	0,18	0,92	0,87	0,14			0,53	0,43	60°	100,20	100,20	101,10	99,80	101,10	101,20	101	1	101,60	101,20	100,20	99,10	100,10	99,20	100	1
		Rq	0,42	0,82	0,69				0,64	0,21	0,23	0,12	0,12	0,18			0,17	0,05	20°	91,40	90,10	93,40	89,90	90,70	91,80	91	1	90,20	90,70	90,00	90,10	90,10	90,20	90	0
		Rz	0,23	0,34	0,29				0,29	0,05	1,02	0,69	0,67	0,79			0,79	0,16																	
		Rt	0,44	0,54	0,36				0,45	0,09	1,39	0,89	1,38	1,20			1,21	0,23																	
			C2P1								C2P2									C2P1								C2P2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,28	0,24	0,16				0,22	0,06	0,14	0,12	0,15				0,14	0,01	60°	101,70	101,90	101,40	104,40	100,50	102,10	102	1	106,80	106,50	104,40	107,60	107,80	106,30	107	1
		Rq	0,34	0,35	0,22				0,30	0,07	0,22	0,17	0,24				0,21	0,04	20°	101,60	101,80	100,80	103,10	100,10	101,90	102	1	100,10	103,20	100,20	102,10	101,00	100,40	101	1
		Rz	1,37	1,65	1,18				1,40	0,24	1,08	0,83	1,02				0,97	0,13																	
		Rt	1,90	2,90	1,72				2,17	0,63	2,19	1,37	2,54				2,03	0,60																	
			C3T2								C3T1									C3T2								C3T1							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,12	0,23	0,10	0,36			0,20	0,12	0,63	0,33	0,13	0,78			0,47	0,29	60°	107,20	104,50	105,60	102,20	103,10	105,20	105	2	99,80	100,10	100,10	101,10	100,80	100,70	100	1
		Rq	0,15	0,28	0,12	0,51			0,26	0,18	0,98	0,46	0,20	0,11			0,44	0,39	20°	105,30	103,40	104,10	102,10	99,40	102,40	103	2	89,80	88,90	89,20	89,70	89,40	89,20	89	0
		Rz	0,67	1,18	0,76	0,30			0,73	0,36	0,42	0,24	1,03	0,55			0,56	0,34																	
		Rt	0,87	1,42	1,40	0,41			1,02	0,48	0,78	0,34	1,30	0,92			0,84	0,39																	
			C1V1								C1V2									C1V1								C1V2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
	A1	Ra	0,44	0,65	0,17	0,58			0,46	0,21	0,23	0,22	0,25				0,23	0,01	60°	100,70	99,20	99,40	99,50	101,70	99,10	100	1	101,70	100,40	101,40	102,40	102,50	**101,60**	102	1
		Rq	0,66	0,81	0,24	0,10			0,45	0,33	0,30	0,29	0,44				0,34	0,08	20°	90,50	92,10	92,90	90,10	92,10	94,10	92	1	101,30	98,20	100,80	101,10	99,10	**102,50**	101	2
		Rz	0,37	0,35	1,05	0,42			0,55	0,34	1,25	1,27	1,91				1,48	0,37																	
		Rt	0,63	0,50	1,50	0,98			0,90	0,45	1,64	1,94	4,22				2,60	1,41																	
			C2P1								C2P2									C2P1								C2P2							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,27	0,35	0,18	0,27			0,27	0,07	0,17	0,15	0,11				0,14	0,03	60°	102,50	101,80	103,50	100,20	102,90	100,40	102	1	105,80	105,80	106,20	104,60	107,80	105,40	106	1
		Rq	0,34	0,47	0,25	0,36			0,35	0,09	0,21	0,28	0,14				0,21	0,07	20°	99,10	99,20	99,60	100,20	101,20	100,10	100	1	100,10	99,90	100,20	102,10	101,00	100,40	101	1
		Rz	1,40	0,23	1,16	1,62			1,10	0,61	0,94	1,57	0,72				1,08	0,44																	
		Rt	1,70	0,34	1,82	2,42			1,57	0,88	1,28	2,93	0,86				1,69	1,10																	
			C3T2								C3T1									C3T2								C3T1							
			AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padrao		AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	svio Padr	AMT1	AMT2	AMT3	AMT4	AMT5	AMT6	Med	Desvio P
		Ra	0,13	0,15	0,12				0,13	0,02	0,79	0,68	0,57				0,68	0,11	60°	101,80	105,90	105,70	104,70	108,10	104,10	105	2	100,90	101,00	99,70	101,20	100,70	101,30	101	1
		Rq	0,17	0,22	0,17				0,18	0,03	0,11	0,93	0,72				0,59	0,43	20°	103,80	103,90	105,10	103,20	107,40	103,80	105	2	90,80	92,20	90,10	89,80	90,10	89,30	90	1
		Rz	0,82	1,04	0,86				0,91	0,12	0,54	0,40	0,33				0,42	0,10																	
		Rt	1,23	1,74	1,14				1,37	0,32	0,91	0,57	0,45				0,64	0,24																	

ANEXO VI – Desvios de rugosidade dos acabamentos e polímeros

			Molde	V1	Desvio	%	V2	Desvio	%	P1	Desvio	%	P2	Desvio	%	T2	Desvio	%	T1	Desvio	%
PMMA	A3	Ra	0,055	0,31	0,260	464	0,305	0,250	446	0,410	0,355	646	0,412	0,357	646	0,339	0,284	518	0,369	0,314	573
		Rq	0,068	0,40	0,328	483	0,390	0,322	473	0,522	0,454	667	0,518	0,450	661	0,434	0,366	538	0,472	0,404	595
		Rz	0,292	0,18	-0,107	-37	0,179	-0,113	-39	0,259	-0,033	-11	0,240	-0,052	-18	0,210	-0,082	-28	0,218	-0,074	-25
		Rt	0,392	0,23	-0,161	-41	0,234	-0,158	-40	0,298	-0,094	-24	0,300	-0,092	-23	0,278	-0,114	-29	0,290	-0,102	-26
	A1	Ra	0,034	0,34	0,301	900	0,318	0,284	835	0,349	0,315	925	0,328	0,294	864	0,321	0,287	844	0,371	0,337	992
		Rq	0,044	0,42	0,379	862	0,404	0,360	817	0,435	0,391	890	0,422	0,378	859	0,405	0,361	820	0,468	0,424	963
		Rz	0,197	0,20	0,006	3	0,191	-0,006	-3	0,199	0,002	1	0,203	0,006	3	0,185	-0,012	-6	0,219	0,022	11
		Rt	0,253	0,27	0,017	7	0,268	0,015	6	0,249	-0,004	-1	0,268	0,015	6	0,248	-0,005	-2	0,270	0,017	7
PC	A3	Ra	0,055	0,48	0,420	764	0,531	0,476	865	0,224	0,169	307	0,137	0,082	148	0,202	0,147	268	0,469	0,414	753
		Rq	0,068	0,64	0,575	846	0,167	0,099	145	0,302	0,234	344	0,210	0,142	208	0,265	0,197	289	0,438	0,370	544
		Rz	0,292	0,29	-0,007	-2	0,791	0,499	171	1,399	1,107	379	0,974	0,682	234	0,728	0,436	149	0,562	0,270	92
		Rt	0,392	0,45	0,055	14	1,215	0,823	210	2,172	1,780	454	2,033	1,641	419	1,023	0,631	161	0,837	0,445	113
	A1	Ra	0,034	0,46	0,428	1253	0,233	0,199	584	0,270	0,236	694	0,141	0,107	315	0,131	0,097	284	0,679	0,645	1897
		Rq	0,044	0,45	0,408	927	0,343	0,299	680	0,352	0,308	701	0,213	0,169	385	0,184	0,140	319	0,586	0,542	1231
		Rz	0,197	0,55	0,351	178	1,477	1,280	650	1,101	0,904	459	1,079	0,882	447	0,906	0,709	360	0,421	0,224	114
		Rt	0,253	0,90	0,648	256	2,597	2,344	926	1,568	1,315	520	1,690	1,437	568	1,369	1,116	441	0,643	0,390	154