



**Debora Turon Wagner**

**Caracterização de pseudopartículas  
contendo coprodutos e avaliação dos  
impactos no sínter produto**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sidnei Paciornik

Rio de Janeiro  
Março de 2024



**Debora Turon Wagner**

**Caracterização de pseudopartículas  
contendo coprodutos e avaliação dos  
impactos no sínter produto**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Sidnei Paciornik**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Dr. Marcos Henrique de Pinho Maurício**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Dr. Richard Bryan Magalhães Santos**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Dr. Otávio da Fonseca Martins Gomes**

Centro de Tecnologia Mineral

**Prof. Guilherme Liziero Ruggio da Silva**

Instituto Federal de Minas Gerais

Rio de Janeiro, 15 de março de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## **Debora Turon Wagner**

Graduada em Engenharia Metalúrgica e de Materiais na PUC-Rio em 2010. É Mestre em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos pela PUC-Rio em 2012. Foi coordenadora técnica dos laboratórios metalúrgico e de propriedades a altas temperaturas e deu suporte às plantas piloto de pelotização, sinterização e briquetagem na Vale. É especialista sênior de desenvolvimento de coprodutos na Gerdau, responsável por P&DI, assistência e marketing técnico. Principais áreas de interesse: mineração e metalurgia/siderurgia com foco em processamento, aglomeração, redução e caracterização de matérias-primas tradicionais, matérias-primas alternativas e produtos.

### Ficha Catalográfica

Wagner, Debora Turon

Caracterização de pseudopartículas contendo coprodutos e avaliação dos impactos no sinter produto / Debora Turon Wagner ; orientador: Sidnei Paciornik. – 2024.

161 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Aglomeração. 3. Economia circular. 4. Quasipartícula. 5. Micropelota. 6. Microscopia digital. I. Paciornik, Sidnei. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

## Agradecimentos

Agradeço ao meu marido por todo o carinho, pelo apoio nessa jornada, inclusive técnico, pelas palavras de conforto nos momentos de dificuldade e por vibrar ao meu lado em todos os momentos de alegria. O destino nos colocou na mesma sala para discussão dos resultados da simulação física dessa tese e a sua curiosidade sobre o tema nos uniu. Nos casamos e desse grande amor, nasceu nosso filho Arthur. Vocês dois me fizeram enxergar a vida de uma outra forma e não me deixaram desistir do meu sonho de me tornar doutora, mesmo com todos os desafios. Agradeço aos meus pais e minhas irmãs, por todo o incentivo, carinho e paciência.

Aos meus colegas acadêmicos, pela força e paciência do dia a dia, por toda a ajuda enquanto estive trabalhando remotamente, nas aquisições de imagens e rotinas, especialmente Camila no início das caracterizações e Richard nessa reta final. Ao Marcos Henrique, pela pronta disponibilidade para ajudar com tanta calma e paciência em toda a jornada acadêmica, por ter recuperado meus documentos no servidor e por todo o apoio com as tomografias. Ao professor Avillez, pela pronta disponibilidade para ajudar sempre que busquei apoio na minha jornada acadêmica e especialmente pelo desafio na interpretação dos difratogramas.

Ao meu orientador Sidnei por toda a empatia nas mudanças de trajetória, quando passei a dividir o meu tempo entre as demandas acadêmicas e corporativas, quando me movimentei para outro estado e precisei realizar a parte experimental de modo majoritariamente remoto e quando iniciei a minha jornada como mãe. Obrigada por todos os ensinamentos durante os dezessete anos de convivência, dos quais onze como orientador na minha jornada acadêmica científica, e por toda confiança depositada em mim!

Ao Otávio e ao Reiner pelo suporte técnico no CETEM, principalmente com preparo de amostras para microscopia e DRX.

Aos meus colegas de profissão, Fernando e Marques. Fernando, por defender a ideia do estudo do uso de coprodutos na sinterização e viabilizar os ensaios. Marques, por acreditar no meu potencial acadêmico e profissional, me dar liberdade

para estudar o tema que eu julgasse relevante para o meu Doutorado e para minha trajetória técnica, fora e dentro da empresa.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À todas as pessoas que não citei explicitamente, mas foram fundamentais para que eu me tornasse doutora!

## Resumo

Wagner, Debora Turon; Paciornik, Sidnei. **Caracterização de pseudopartículas contendo coprodutos e avaliação dos impactos no sinter produto**. Rio de Janeiro, 2024. 161p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cerca de 75% da produção mundial de aço ocorre pela rota integrada a coque, com a geração específica de 1t coprodutos/t aço. Coprodutos siderúrgicos são potenciais fontes de matérias-primas alternativas, com aporte de cálcio, magnésio, ferro e carbono, apesar dos desafios técnicos relativos à granulometria e à química para consumo na sinterização. A participação de cada coproduto na sinterização se baseia nos volumes disponíveis e garantia da qualidade da aglomeração a frio e a quente. Para isso, são fundamentais a caracterização integrada dos coprodutos siderúrgicos, do *blend* microaglomerado destes coprodutos, das misturas totais a sinterizar, sem e com coprodutos, e do sinter produto. Desafios de caracterização envolvem a análise microestrutural em imagens capturadas em microscópio ótico e microtomografia de raios-x, usando-se técnicas tradicionais de processamento e análise digital para avaliação de pseudopartículas em 2D e 3D, e de sinter produto. Técnicas avançadas de inteligência artificial em imagens de microscopia ótica, baseadas em *deep learning*, foram aplicadas em caráter exploratório. O *blend* microaglomerado de coprodutos apresentou a formação de pseudopartículas menores do que da mistura total a sinterizar, compostas por quasipartículas e micropelotas. A simulação física apresentou resultados similares de granulação, sem e com a adição de 6% do *blend*, composta majoritariamente por quasipartículas. A adição abarca 99% do volume de geração e estoques de lamas e pós siderúrgicos e está alinhada com a economia circular. Cerca de 45% da massa de *blend* adicionada está na forma de micropelotas e atua como partícula nucleante em quasipartículas da mistura total. Com a adição do *blend*, há ganho de produtividade no processo de sinterização. Os sínters apresentam qualidade para uso em alto-forno.

## Palavras-chave

Subprodutos; Sinterização; Economia Circular; Granulação, Quasipartícula; Micropelota.

## **Abstract**

Wagner, Debora Turon; Paciornik, Sidnei (Advisor). **Characterization of granulated mix containing co-products and evaluation of impacts in sinter product.** Rio de Janeiro, 2024. 161p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

About 75% of the world's steel production occurs through the integrated coke route, with the specific generation of 1t co-products/t steel. Steel co-products are potential sources of alternative raw materials, with the contribution of calcium, magnesium, iron and carbon, despite the technical challenges related to granulometry and chemistry for consumption in sintering. The participation of each co-product in sintering is based on the available volumes and assurance of the quality of cold and hot agglomeration. For this, the integrated characterization of the steel co-products, the micro-agglomerated blend of these co-products, the total mixtures to be sintered, without and with co-products, and the sinter product, are essential. Characterization challenges involve microstructural analysis in images captured using an optical microscope and x-ray microtomography, using traditional digital processing and analysis techniques to evaluate pseudoparticles in 2D and 3D, and product sinter. Advanced artificial intelligence techniques in optical microscopy images, based on deep learning, were applied on an exploratory basis. The micro-agglomerated blend of coproducts showed the formation of pseudoparticles smaller than the total mixture to be sintered, composed of quasiparticles and micropellets. The physical simulation showed similar granulation results, without and with the addition of 6% of the blend, mainly composed of quasiparticles. The addition covers 99% of the generation volume and stocks of steel sludge and powder and is aligned with the circular economy. About 45% of the added blend mass is in the form of micropellets and acts as a nucleating particle in quasiparticles of the total mixture. With the addition of the blend, there is a gain in productivity in the sintering process. The sinters have quality for use in blast furnaces.

## **Keywords**

By-products; Sintering; Circular Economy; Granulation; Quasiparticle; Micro-pellets.

## Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
2.1.	Objetivo Geral	3
2.2.	Objetivos Específicos	3
3	Revisão Bibliográfica	4
3.1.	Processo de Produção de aço	4
3.2.	Sinterização	8
3.2.1.	Processo de Sinterização	8
3.2.2.	Granulação	14
3.2.2.1.	Rota Tambor + Tambor	17
3.2.2.2.	Rota Misturador Intensivo	17
3.2.3.	Efeito das matérias-primas no processo de sinterização	18
3.2.4.	Matérias-primas alternativas – Coprodutos	24
3.2.5.	Efeito da adição de coprodutos no processo de sinterização	26
3.2.6.	Caracterização de matérias-primas tradicionais e alternativas, pseudopartículas e sinter produto	27
3.2.6.1.	Difração de raio-X	27
3.2.6.2.	Microscopia e análise de imagens	29
3.2.6.3.	Microtomografia computadorizada de raios-x e análise de imagens	38
4	Materiais e Métodos	39
4.1.	Amostras	39
4.1.1.	Matérias-primas tradicionais e alternativas	41
4.1.2.	Pseudopartículas em <i>Blend</i> de coprodutos obtidas em misturador	41
4.1.3.	Pseudopartículas em mistura total a sinterizar e sinteres produto	43

4.2. Métodos	44
4.2.1. Produção de pseudopartículas em <i>blend</i> de coprodutos e em mistura total a sinterizar e produção de síter produto em escala piloto	44
4.2.1.1. Produção de pseudopartículas em <i>blend</i> de coprodutos	44
4.2.1.2. Produção de pseudopartículas em mistura total a sinterizar	44
4.2.1.3. Produção de síter produto	46
4.2.2. Caracterização de pseudopartículas em <i>blend</i> de coprodutos e em mistura total a sinterizar e produção de síter produto	47
4.2.2.1. Análise física	49
4.2.2.2. Análise química	50
4.2.2.3. Análise ambiental	52
4.2.2.4. Análise microestrutural por microscopia ótica	52
4.2.2.4.1. Condições de Aquisição de Imagens	53
4.2.2.4.2. Rotinas de Processamento e Análise de Imagens	54
4.2.2.5. Análise microestrutural por microtomografia de raios-x	57
4.2.2.5.1. Condições de Aquisição de Imagens	57
4.2.2.5.2. Rotinas de Processamento e Análise de Imagens	58
4.2.2.6. Análise metalúrgica	58
4.2.2.7. Análise de processo	59
5 Resultados e Discussão	60
5.1. Matérias-primas tradicionais e alternativas	60
5.1.1. Análise ambiental	60
5.1.2. Análise física	61
5.1.3. Análise química	63
5.2. Pseudopartículas em <i>blend</i> de coprodutos	64
5.2.1. Análise física	65
5.2.2. Análise química	66
5.2.3. Análise microestrutural	69
5.2.3.1. Microscopia ótica	69
5.2.3.2. Microtomografia	79

5.3. Pseudopartículas em mistura total a sinterizar	83
5.3.1. Análise física	83
5.3.2. Análise química	85
5.3.3. Análise microestrutural	92
5.3.3.1. Microscopia ótica	92
5.3.3.2. Microtomografia	108
5.4. Sínter produto	116
5.4.1. Análise física	116
5.4.2. Análise química	117
5.4.3. Análise microestrutural	118
5.4.4. Análise metalúrgica	129
5.4.5. Análise de processo	129
5.5. Discussão integrada	130
6 Conclusões e trabalhos futuros	134
6.1. Conclusões	134
6.2. Trabalhos futuros	135
6.2.1. Microscopia Ótica	135
6.2.2. Microtomografia computadorizada	135
6.2.3. Processo	136
7 Referências bibliográficas	137

## Lista de figuras

- Figura 1: Desenho esquemático de uma usina integrada de produção de aço, adaptado de (WILEY; HO; BUSTAMANTE, 2011) 6
- Figura 2: Definição de Pseudopartícula (adaptado de (SANTOS, 2018) 9
- Figura 3: Desenho esquemático da Sinterização, adaptado de (CASTRO et al., 2013) 9
- Figura 4: Desenho esquemático das zonas do processo de sinterização, adaptado de (HONORATO, 2005) 10
- Figura 5 : Diagrama de predominância de fases em função da pressão parcial de oxigênio, adaptado de (CHEN; LU; JIAO, 2019) 12
- Figura 6: Fluxo típico de simulação do processo de sinterização em escala piloto, adaptado de (ZHOU; ZHOU, 2020) 13
- Figura 7: Distribuição granulométrica ideal, adaptado de (ISHIKAWA, 1983) 15
- Figura 8: Conceito de camada aderente em uma pseudo partícula, adaptado de (VIEIRA; ROSIÈRE; ASSIS, 2003)(ISHIKAWA, 1983) 16
- Figura 9: Desenho esquemático dos misturadores intensivos (a) MIH (misturado intensivo horizontal) e (b) MIV (misturador intensivo vertical), adaptado de (JUNIOR; ASSIS; PEREIRA, 2018) 18
- Figura 10: Desenho esquemático dos constituintes do sinter produto (adaptado de (VIEIRA; ROSIÈRE; ASSIS, 2003) 21
- Figura 11: Mecanismos de formação das ligações fracas e fortes, adaptado de (YANG et al., 2019) 23
- Figura 12: Desenho esquemático exemplificativo da geração de coprodutos siderúrgicos de uma usina integrada a coque 24
- Figura 13: Classificação das pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e não aglomerados, adaptado de (OLIVEIRA et al., 2020) 30
- Figura 14: Microestrutura do núcleo dos grãos, adaptado de (YANG et al., 2019) 31
- Figura 15: Fluxograma simplificado da rotina de classificação de pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e não aglomerados, adaptado de (SANTOS, 2018) 32

Figura 16: Exemplo de resultado da rotina de classificação de pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e não aglomerados, adaptado de (SANTOS, 2018)	33
Figura 17: Arquitetura U-Net, adaptado de (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2021)	36
Figura 18: Arquitetura U-Net++, adaptado de (ZHOU; SIDDIQUEE, 2018)	36
Figura 19: Representação de uma matriz de confusão a partir do <i>ground truth</i>	37
Figura 20: Amostras utilizadas e geradas em cada etapa dos processos piloto	40
Figura 21: Planta de coprodutos em escala piloto	42
Figura 22: Planta piloto de coprodutos para produção de pseudopartículas em blend de coprodutos	44
Figura 23: Métodos de caracterização e avaliação das matérias-primas tradicionais, alternativas, blend de coprodutos, pseudopartículas e sinter produto	48
Figura 24: Desenho esquemático do fluxo de aquisição de imagens em microscopia ótica de pseudopartículas e rotinas de processamento digital de imagens	53
Figura 25: Desenho esquemático do fluxo de aquisição de imagens em microscopia ótica de sinter e rotinas de processamento digital de imagens	53
Figura 26: Desenho esquemático do fluxo de aquisição de imagens em microscopia ótica de pseudopartículas e rotinas de processamento digital de imagens	57
Figura 27: Difratoograma do blend de coprodutos na granulometria de +1,00 mm	67
Figura 28: Difratoograma do blend de coprodutos na granulometria de +2,80 mm	67
Figura 29: Difratoograma do blend de coprodutos na granulometria de +4,75 mm	68
Figura 30: Seções polidas contendo pseudopartículas de blend de coprodutos (BC) nas granulometrias +1,00, +2,80 e +4,75 mm	70
Figura 31: Estratificação de pseudopartículas de BC em quasipartículas (QPs) e micropelotas (MPs)	71

Figura 32: Representação da classificação de pseudopartículas de BC em QP, MP e NNA	73
Figura 33: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita), a partir de pseudopartículas definidas como quasipartículas para as granulometrias +1,00 (topo) e -2,80 (baixo).	76
Figura 34: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) a partir de pseudopartículas definidas como micropelotas para as granulometrias +1,00 (topo) e -2,80 (baixo)	78
Figura 35: Reconstrução 3D da imagem obtida por microCT do blend de coprodutos na granulometria +2,80 mm	79
Figura 36: Histograma da imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando os tons de corte para determinação das estruturas camada aderente (CA), núcleo e ferro metálico	79
Figura 37: Imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando o ferro metálico em cor amarela	80
Figura 38: Imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando os núcleos em cor vermelha	81
Figura 39: Imagem 3D do BC +2,80 mm, combinando o Ferro metálico em amarelo e os núcleos em vermelha	81
Figura 40: Imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando a camada aderente em cor verde	82
Figura 41: Imagem 3D do BC +2,80 mm, combinando o Ferro metálico em amarelo, os núcleos em vermelho e a camada aderente em cor verde	83
Figura 42: Difratoograma da MT a sinterizar SCOP +1,00 mm	86
Figura 43: Difratoograma da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm	86
Figura 44: Difratoograma da MT a sinterizar SCOP +4,75 mm	87
Figura 45: Difratoograma da MT a sinterizar COP +1,00 mm	87
Figura 46: Difratoograma da MT a sinterizar COP +2,80 mm	88
Figura 47: Difratoograma da MT a sinterizar COP +4,75 mm	88
Figura 48: Seções polidas contendo pseudopartículas das MTs +1,00, +2,80 e +4,75 mm e condições SCOP e COP	93
Figura 49: Representação da classificação de pseudopartículas de MT em QP, MP e NNA	94
Figura 50: Exemplos de erros de identificação: (1) resina identificada como quasipartículas; (2) região pertencente à camada adente identificada como micropelota; (3) núcleo de quasipartículas	

identificada como micropelota; (4) parte da camada aderente faltante devido à perda de foco pontual; (5) núcleo de quasipartícula faltante (6). Quasipartícula identificada como micropelota e com região central faltante. 95

- Figura 51: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) das quasipartículas de MT +1,00mm SCOP (cima) e COP (baixo) 99
- Figura 52: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) das quasipartículas de MT +2,80mm SCOP (cima) e COP (baixo) 100
- Figura 53: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) das quasipartículas de MT +4,75mm SCOP (cima) e COP (baixo) 101
- Figura 54: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) das micropelotas de MT +1,00mm SCOP (cima) e COP (baixo) 103
- Figura 55: Imagens das quasipartículas cuja partícula nucleante é uma micropelota de BC +2,80 mm (cima) ou 1,00 mm (baixo) 105
- Figura 56: Representação da classificação por deep learning de pseudopartículas e núcleos em QP e MP e NNA para a granulometria +2,80mm 107
- Figura 57: Representação da classificação por deep learning de pseudopartículas e núcleos em QP e MP e NNA para a granulometria +4,75mm 107
- Figura 58: Reconstrução 3D da imagem obtida por microCT da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm 109
- Figura 59: Reconstrução 3D da imagem obtida por microCT da MT a sinterizar COP +2,80 mm 109
- Figura 60: Histogramas das imagens 3D da MT a sinterizar SCOP (esquerda) e COP (direita) na granulometria +2,80 mm, com indicação dos tons de corte para determinação das estruturas camada aderente (CA), núcleo e Fe Metálico. 110
- Figura 61: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm mostrando as partículas de Ferro metálico em amarelo 110
- Figura 62: Imagem 3D da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm mostrando os núcleos em vermelho 111
- Figura 63: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm mostrando os núcleos em vermelho 112
- Figura 64: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm combinando o ferro metálico em amarelo e os núcleos em vermelho 112
- Figura 65: Imagem 3D da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm mostrando a camada aderente em verde 113

Figura 66: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm mostrando a camada aderente em verde	113
Figura 67: Imagem 3D da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm combinando a camada aderente em verde e os núcleos em vermelho	114
Figura 68: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm combinando a camada aderente em verde e os núcleos em vermelho	114
Figura 69: Vista do núcleo escuro de quasipartículas nas imagens 3D (esquerda) e 2D (direita), obtidas por microCT, da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm	115
Figura 70: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm combinando a camada aderente em verde, os núcleos em vermelho e o ferro metálico em amarelo	116
Figura 71: Histograma original das imagens do sínter SCOP (à esquerda) e COP (à direita) capturadas pela metodologia de aquisição 1	118
Figura 72: Histograma ampliado das imagens SCOP (à esquerda) e COP (à direita) capturadas pela metodologia de aquisição 1	118
Figura 73: Seções polidas contendo sínter nas condições SCOP (à esquerda) e COP (à direita) – método de aquisição 1	120
Figura 74: Seções polidas contendo sínter nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP) – método de aquisição 2	121
Figura 75: Representação dos poros do sínter, para as condições SCOP (à esquerda) e COP (à direita) – método de aquisição 2	122
Figura 76: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) dos poros do sínter para SCOP (cima) e COP (baixo)	124
Figura 77: Histogramas de Roundness dos poros do sínter, para as condições SCOP (cima) e COP (baixo), segregado por faixas de área (< 1 $\mu$ m <sup>2</sup> à esquerda, > 1 $\mu$ m <sup>2</sup> à direita).	125
Figura 78: Presença de hematita secundária em sínter SCOP	127
Figura 79: Presença de hematita secundária em sínter COP	128

## Lista de tabelas

Tabela 1: Dados de proporção de finos em plantas de sinterização no ano de 2016, adaptado de (JUNIOR; ASSIS; PEREIRA, 2018)	14
Tabela 2: Identificação das matérias-primas tradicionais	41
Tabela 3: Identificação das matérias primas alternativas – coprodutos	41
Tabela 4: Composição do <i>blend</i> de coprodutos (BC)	42
Tabela 5: Balanço de massa para produção da mistura total a sinterizar	45
Tabela 6: Análises físicas por produto	49
Tabela 7: Análises químicas por produto	51
Tabela 8: Análise microestrutural por microscopia ótica	53
Tabela 9: Análises microestruturais por microtomografia computadorizada	57
Tabela 10: Condições de captura em microCT	58
Tabela 11: Classificação ambiental dos coprodutos	60
Tabela 12: Análise granulométrica das matérias-primas tradicionais	61
Tabela 13: Análise granulométrica das matérias-primas alternativas	62
Tabela 14: Análise química das matérias-primas tradicionais	63
Tabela 15: Análise química das matérias-primas alternativas	64
Tabela 16: Análise granulométrica do <i>blend</i> de coprodutos não microaglomerado	65
Tabela 17: Densidade aparente do <i>blend</i> de coprodutos, nas granulometrias +2,80 mm e +1,00 mm	66
Tabela 18: Análise química do <i>blend</i> de coprodutos	66
Tabela 19: Métricas de validação do ajuste dos difratogramas	68
Tabela 20: Percentual dos constituintes presentes no blend de coprodutos nas granulometrias +1,00 mm, +2,80 mm e 4,75 mm	69
Tabela 21: Classificação de pseudopartículas de <i>blend</i> de coprodutos (BC) em quasipartículas (QP), micropelotas (MP) e núcleos não aglomerados (NNA)	72

Tabela 22: Matriz de confusão da classificação de quasipartículas e micropelotas de BC +1,00 mm e BC +2,80 mm	73
Tabela 23: Medidas diretas e indireta de camada aderente de quasipartículas	74
Tabela 24: Medidas médias de Feret e <i>Roundness</i> a partir de pseudopartículas definidas como quasipartículas (QP Rotina 1B), pseudopartículas definidas como quasipartículas e classificadas como quasipartículas (QP Rotina 1A/1A) e pseudopartículas definidas como quasipartículas e classificadas como micropelotas (MP Rotina 1A/1B)	74
Tabela 25: Medidas médias de Feret e <i>Roundness</i> a partir de pseudopartículas definidas como micropelotas (MP Rotina 1B), pseudopartículas definidas como micropelotas e classificadas como micropelotas (MP Rotina 1A/1B)	77
Tabela 27: Análise granulométrica da mistura a sinterizar, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	84
Tabela 28: Densidade aparente da mistura total a sinterizar, no cenário com coprodutos, nas granulometrias +2,80 mm e +1,00 mm	84
Tabela 29: Análise química da mistura a sinterizar, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	85
Tabela 30: Métricas de validação do ajuste do difratograma	89
Tabela 31: Percentual dos constituintes presentes na mistura total a sinterizar, sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), nas granulometrias +1,00 mm, +2,80 mm e 4,75 mm	91
Tabela 32: Classificação de pseudopartículas da mistura total a sinterizar (MT) em quasipartículas (QP), micropelotas (MP) e núcleos não aglomerados (NNA)	92
Tabela 33: Matriz de confusão da classificação de quasipartículas e micropelotas de MT +1,00, MT +2,80 e MT +4,75 mm	96
Tabela 34: Medidas diretas e indireta de camada aderente de quasipartículas	96
Tabela 35: Medidas médias de Feret e <i>Roundness</i> por rotinas 1A e 1B a partir de pseudopartículas classificadas como quasipartículas pela rotina 1A	97
Tabela 36: Medidas médias de Feret e <i>Roundness</i> por rotinas 1A e 1B a partir de pseudopartículas classificadas como micropelotas pela rotina 1A	102

Tabela 37: Medida de área das pseudopartículas contendo micropelotas de <i>blend</i> de coprodutos como partícula nucleante e média de área dos respectivos núcleos	104
Tabela 38: Métricas do treinamento e teste da rede U-Net++ utilizada para a classificação de pseudopartículas e núcleos	107
Tabela 39: Análise granulométrica do sínter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	117
Tabela 40: Análise de tamboramento e queda, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	117
Tabela 41: Análise química do sínter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	117
Tabela 42: Análise da porosidade do sínter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	119
Tabela 43: Análise de redutibilidade (RI) e de degradação sob redução (RDI), nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	129
Tabela 44: Análise de produtividade da máquina de sinterização, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)	129
Tabela 45: Massa de matérias-primas tradicionais substituídas por coprodutos	130

# 1 Introdução

A indústria brasileira do aço, segundo o Instituto Aço Brasil, possui um parque produtor composto por trinta e uma usinas administradas por onze grupos empresariais, com capacidade instalada de 51 milhões de toneladas de aço bruto por ano, e produção em 2022 de 34,1 milhões de toneladas (IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022a).

As usinas de produção de aço podem ser classificadas segundo o processo produtivo. Usinas integradas possuem as três grandes etapas básicas – redução, refino e laminação – logo, possuem o processo completo de produção de aço (IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022b). O ferro-gusa é produzido na etapa de redução, o aço é produzido na etapa de refino, e tarugos e/ou placas de aço são produzidos na laminação. Principalmente nas duas primeiras etapas, coprodutos intrínsecos do processo, como as escórias, os pós e as lamas, são produzidos além do produto principal. As usinas integradas têm a tendência de produzir mais coprodutos do que as semi-integradas ou *Mini mills*, visto as semi-integradas não possuem todas as etapas básicas e podem utilizar tecnologias ou processos que consomem diferentes matérias-primas (CONEJO; BIRAT; DUTTA, 2020).

Pós, lamas e escórias são legalmente considerados resíduos sólidos e, desde a geração, manuseio, armazenamento, transporte, até a destinação, observam a política nacional de resíduos sólidos – PNRS (L12.305/2010, 2010). Ainda de acordo com a PNRS, as empresas geradoras devem priorizar a seguinte ordem no gerenciamento de resíduos: não geração; redução; reutilização; reciclagem; tratamento; e disposição ambientalmente correta.

Grande parte destes pós e lamas é proveniente dos sistemas de despoeiramento e de lavagem de gases do alto-forno e aciaria, com geração típica de 17 kg/t de gusa e 20 kg/t de aço (CONEJO; BIRAT; DUTTA, 2020). Desta forma, estes coprodutos são gerados devido a características intrínsecas da cadeia

de produção de aço e, como consequência, as diretrizes de não geração, redução e reciclagem tem aplicação restrita.

As lamas e pós são fontes potenciais de elementos de interesse e podem ser reutilizados na própria cadeia da indústria do aço ou por outras indústrias que necessitem de matéria-prima com características similares (CONEJO; BIRAT; DUTTA, 2020). A priorização da reutilização está alinhada com o conceito de economia circular pois promove a preservação de recursos naturais, criação de valor, geração de receita, aumento da eficiência do recurso, redução de emissão de CO<sub>2</sub> e evita disposição em aterro.

Um dos processos internos da usina integrada que comporta o emprego de coprodutos visando sua reutilização é a sinterização, que representa cerca de 65% da fonte de ferro alimentada no alto-forno. Um dos processos internos da usina integrada que comporta o emprego de coprodutos visando sua reutilização é a sinterização, que representa cerca de 75% da fonte de ferro alimentada no alto-forno (FREISLICH et al., 2012). Com a piora da qualidade química e física do *sinter feed*, o grande desafio da sinterização é manter patamares de produtividade positivos e adequada qualidade do sinter produto. Estima-se um ganho potencial de qualidade química e aumento de custos evitado ao utilizar coprodutos na mistura, quando a inserção como matéria-prima alternativa ocorre de forma estruturada, uma vez que a qualidade dos coprodutos pode ser superior à matérias-primas tradicionais de mercado.

Estudos completos acerca desses coprodutos são escassos e pouco comparáveis, uma vez que a qualidade varia de usina para usina devido às diferentes matérias-primas alimentadas no processo, diferentes tecnologias de redução e refino, diferentes sistemas de captação dos coprodutos e particularidades das sinterizações. Para isso, é necessário conhecer as características dos coprodutos, o desempenho no processo de sinterização, qualidade do sinter produto e impacto ambiental na cadeia de sinterização. Este trabalho propõe realização de simulação física em escala piloto para avaliação integrada do impacto do uso de coprodutos na rota de sinterização por meio da análise de parâmetros de processo, de análises tradicionais de rotina na cadeia de produção do sinter, bem como desenvolvimento e realização de novas metodologias de caracterização como suporte para entendimento fenomenológico e comprovação dos impactos.

## 2 Objetivos

Esse capítulo apresenta os objetivos gerais e específicos do trabalho.

### 2.1. Objetivo Geral

- Comprovar a viabilidade técnica do uso de coprodutos siderúrgicos – lamas desidratadas e pós – no processo de sinterização por meio de simulação física, técnicas tradicionais e novas metodologias de caracterização.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar as características químicas, físicas e ambientais dos coprodutos e matérias-primas tradicionais;
- Analisar as características das pseudopartículas contendo coprodutos gerados nos processos de aglomeração na rota tambor+tambor e microaglomeração em misturador vertical: mistura total a sinterizar sem e com coprodutos; *blend* de coprodutos microaglomerado;
- Desenvolver e/ou otimizar novas metodologias de caracterização de pseudopartículas como suporte às avaliações;
- Avaliar os efeitos da adição do *blend* de coprodutos no processo de sinterização e no sinter produto.

## **3**

### **Revisão Bibliográfica**

Esse capítulo apresenta o estado da arte do processo de sinterização e efeitos das matérias-primas, tradicionais e alternativas, utilizados no processo de sinterização.

#### **3.1. Processo de Produção de aço**

No Brasil, a rota integrada representa mais de 80% da produção total de aço. As usinas integradas tradicionais usualmente envolvem o processo de sinterização para aglomeração de minério de ferro e produção de sínter, o processo de coqueificação de carvão para produção de coque, o processo de redução em alto-forno para produção de ferro-gusa, o processo de refino do ferro-gusa na aciaria para produção de aço e, por fim, o processo de produção de produtos acabados, como pode ser observado na Figura 1 (WILEY; HO; BUSTAMANTE, 2011).

A etapa de preparação da carga contempla os processos de coqueificação e sinterização, a etapa de redução contempla o alto-forno, e a etapa de produção de aço contempla os refinamentos em aciaria LD. Cada um dos quatro grandes processos citados recebe matérias-primas distintas.

O coque é produto do processo de coqueificação, que consiste no aquecimento de carvões metalúrgicos de origem mineral, com especificações compatíveis com o processo, na ausência de oxigênio. As propriedades físicas resultantes do coque são fundamentais para manuseio, alimentação e descida no reator de redução. No processo de produção de ferro-gusa, o coque é a principal fonte química de carbono e atua como combustível e redutor indireto, além de ser o responsável majoritário por garantir a adequada permeabilidade do leito, principalmente na zona de amolecimento e fusão do alto-forno. Cerca de 70% da produção mundial de ferro-gusa utiliza o coque como matéria-prima (ASSOCIATION, 2020). Usualmente as coquearias se encontram instaladas dentro

das usinas integradas de produção de aço, porém plantas podem optar pela compra de coque via importação.

O minério de ferro tem características químicas, físicas e mineralógicas particulares a cada mina, podendo variar a qualidade a cada frente de lavra. O planejamento de local de extração e controle de qualidade são fundamentais para garantir a estabilidade e a previsibilidade da qualidade do minério disponibilizado para consumo.

Em Minas Gerais, as reservas de hematita do Quadrilátero Ferrífero estão se esgotando e as principais cavas presentes são compostas essencialmente por itabiritos. As fontes de ferro das formações bandadas dos itabiritos podem ser de origem compacta ou friável. Quando friável, há a tendência maior de geração de finos (MOURÃO, 2008). Apesar da qualidade física e dos possíveis impactos negativos na produtividade da sinterização, os minérios brasileiros são valorizados principalmente pela qualidade química.

Os minérios de ferro são classificados em ordem decrescente de tamanho em: granulados, ou *lump ore*; *sinter feed*; e *pellet feed*. Destes, a única granulometria adequada para alimentação direta em alto-forno é a dos granulados. Devido à baixa disponibilidade de granulados e em qualidade compatível com o processo, as frações mais finas necessitam de processos de aglomeração para que atinjam qualidade química, física e metalúrgica adequadas para alimentação no processo de redução. O uso in natura do *pellet feed* e do *sinter feed* podem acarretar problemas operacionais como por exemplo de permeabilidade.

A pelletização é a principal rota desenvolvida para aglomeração de *pellet feed*, material que apresenta granulometria abaixo de 0,150 mm. O processo consiste na produção de pelotas em disco de pelotamento e tratamento térmico em fornos do tipo *grate kiln* ou *rotary kiln* para maturação de pelotas. Devido às propriedades físicas positivas adquiridas, as pelotas podem ser produzidas fora das usinas produtoras de aço, manuseadas, estocadas e transportadas por longas distâncias até serem consumidas pelo usuário final.

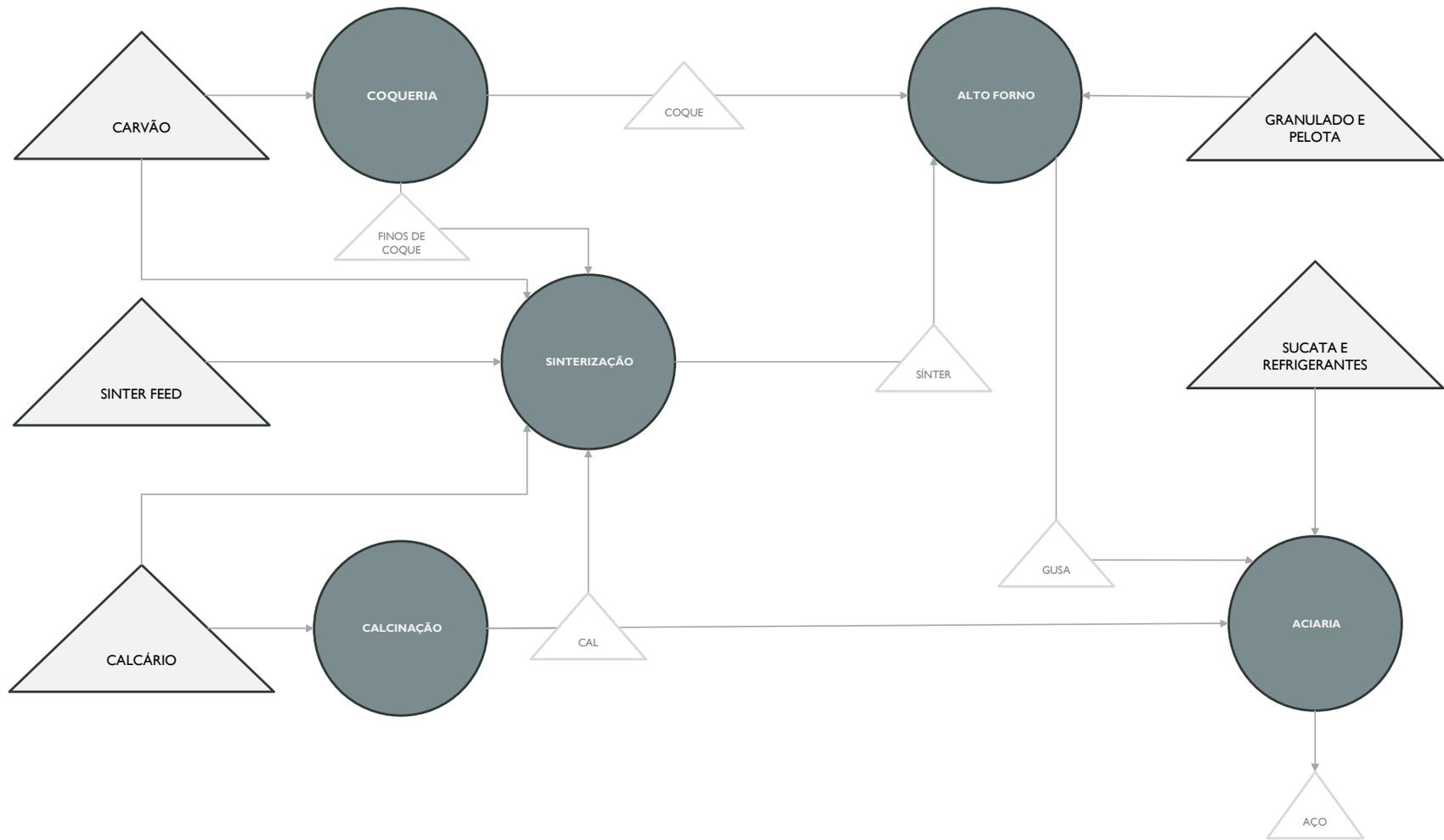


Figura 1: Desenho esquemático de uma usina integrada de produção de aço, adaptado de (WILEY; HO; BUSTAMANTE, 2011)

O processo de sinterização é a principal rota de aglomeração de *sinter feed*, material que apresenta granulometria entre 0,150 e 6,35 mm. O processo consiste essencialmente nas etapas iniciais de mistura e granulação, seguidas de sinterização do material na máquina de *sinter* e, por fim, beneficiamento e classificação do *sinter* produto. Usualmente, as sinterizações estão localizadas dentro das usinas produtoras de aço, pois as propriedades físicas adquiridas são suficientes apenas para manuseio, transporte interno, alimentação e descida da carga no reator. O processo de sinterização será descrito com mais detalhes nas próximas seções.

Os processos de aglomeração de finos permitem a adição de diferentes produtos na mistura a aglomerar, desde que o aglomerado final atinja as qualidades e requisitos necessários de processo. Desta forma, além de diferentes tipos e qualidades de minério de ferro, é possível adicionar matérias-primas alternativas, como coprodutos, nos processos de aglomeração, principalmente na sinterização.

Lamas desidratadas e pós são coprodutos siderúrgicos compatíveis com o processo de sinterização devido aos seus teores de ferro, cálcio, magnésio e carbono. No entanto, alguns destes coprodutos podem conter álcalis e zinco em sua composição e ter sua adição restrita no processo de sinterização. A maioria destes coprodutos apresenta granulometria com alto percentual de finos, devendo-se observar o limite de seu uso *in natura* nas rotas de granulação ou preparar adequadamente os coprodutos para que sejam utilizados em maior proporção na mistura total a sinterizar.

O alto-forno recebe, majoritariamente os insumos produzidos na etapa de preparação: coque e minério de ferro. No entanto, os fundentes têm papel fundamental no processo de abaixar o ponto de fusão da escória e absorver as impurezas. Sua adição tem aumentado devido à queda na qualidade dos minérios alimentados e à presença de cinzas decorrentes do consumo de coque (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017a). Nesta etapa de redução, os escorificantes alimentados são essencialmente os fundentes calcários calcíticos e dolomíticos. No entanto, fluxantes como fluorita se fazem necessários para ajuste de viscosidade da escória (SUSAKI, 2008).

A etapa de produção de aço em uma rota tradicional de Usina Integrada consiste na alimentação majoritária de ferro-gusa líquido, advindo do alto-forno, e

minoritária de sucatas e escorificantes no reator do tipo Linz-Donawitz. No refino primário, os escorificantes são compostos essencialmente por cales calcíticas e dolomíticas. No refino secundário, além das cales citadas, também é alimentado um aporte maior de fluxantes.

## **3.2.Sinterização**

### **3.2.1. Processo de Sinterização**

No início do século XX foram depositadas diversas patentes para execução do processo de sinterização, dentre elas a tecnologia desenvolvida por Dwight e Lloyd em 1906, que ainda é a mais utilizada pela indústria de produção de aço (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b).

O processo de sinterização pode ser dividido em quatro estágios: adequação das matérias primas; mistura e granulação; processo de sinterização; adequação granulométrica.

O estágio de seleção e adequação de matérias-primas consiste em conhecer a granulometria, química, mineralogia e umidade das matérias-primas tradicionais e alternativas, como diferentes minérios, coprodutos, escorificantes e coque, para selecionar o *mix* adequado para o processo.

O estágio de mistura e granulação consiste na mistura das diferentes matérias-primas em misturador tambor rotativo, para que haja homogeneidade, ajuste de umidade, e granulação em equipamentos como tambor nodulizador ou disco pelletizador. Como resultado da granulação, tem-se a formação mecânica e química das pseudopartículas, geralmente na granulometria abaixo de 8 mm, que podem ser classificadas em quasipartículas, micropelotas ou núcleo não aglomerado, de acordo com a Figura 2 (SANTOS et al., 2019). Este estágio é fundamental para que haja uma adequada permeabilidade do leito e descida da frente de queima no estágio de sinterização.

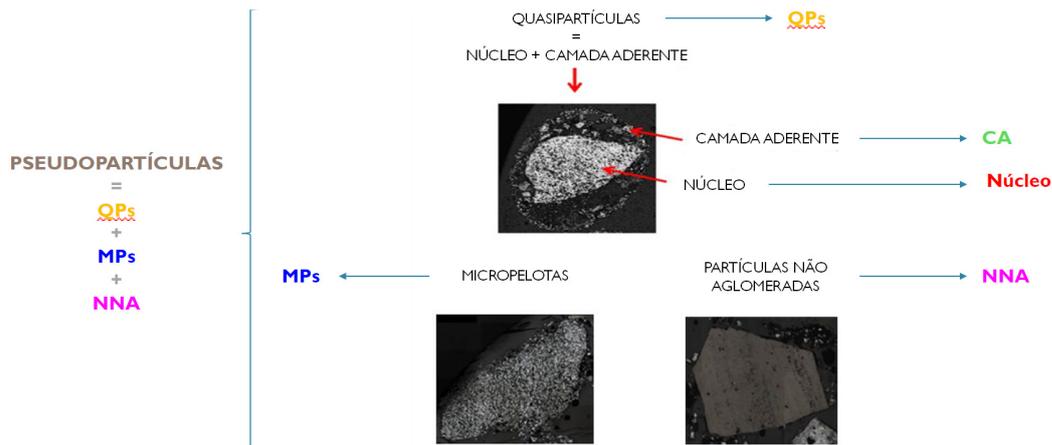


Figura 2: Definição de Pseudopartícula (adaptado de (SANTOS, 2018))

O estágio de sinterização, observado na Figura 3, consiste em um processo térmico que se inicia com a ignição da região superior do leito em esteira móvel, formando uma frente de queima que se move em direção à base do leito por diferença de pressão. A frente de queima, de alta temperatura, atua de forma rápida e local, promovendo a união, ou sinterização, de partículas adjacentes, quando favorável, por fusão parcial local e coalescência entre as pseudopartículas buscando diminuir a energia do sistema. Quando a frente de queima alcança a base, o processo de resfriamento se inicia.

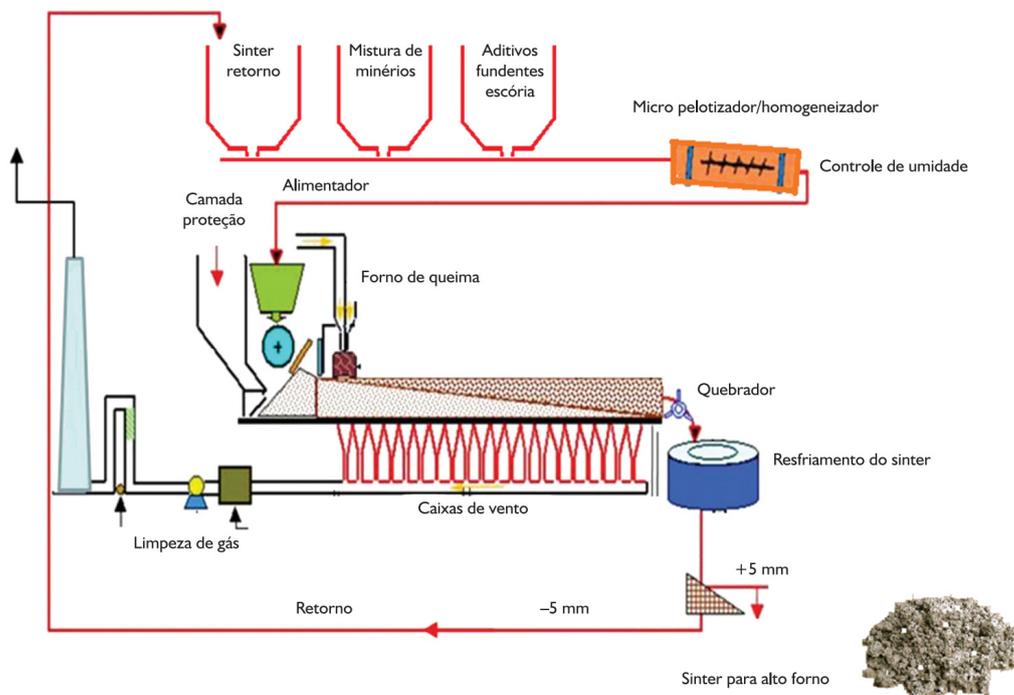


Figura 3: Desenho esquemático da Sinterização, adaptado de (CASTRO et al., 2013)

É necessário observar que a formação do leito de sinterização, antes do processo térmico iniciar, é realizada de modo estruturado em camadas. O material grosseiro, essencialmente na faixa de 10 a 20 mm, é alimentado para formação de uma camada com 3 a 6 cm de altura na base, que tem por objetivo proteger a grelha do superaquecimento. Por cima desta camada, o material restante proveniente também do segundo estágio é alimentado no leito para compor o leito total da mistura a sinterizar (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b).

É possível identificar quatro zonas na altura do leito na Figura 4: fria e úmida; de secagem; de reação; e de resfriamento. A primeira zona apresenta temperaturas abaixo de 100 °C e mistura acima do limite de saturação de água/vapor de água. A segunda zona possui temperatura entre 100 e 500 °C e é responsável pela evaporação da água livre e início da saída da água de hidratação de hidróxidos. A terceira zona apresenta temperaturas em torno de 500 °C no início da ignição do coque, 1300 a 1480°C na frente de queima e 900°C no resfriamento. A última zona ocorre imediatamente depois da zona de reação, iniciando-se com a temperatura de 900 °C (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b).

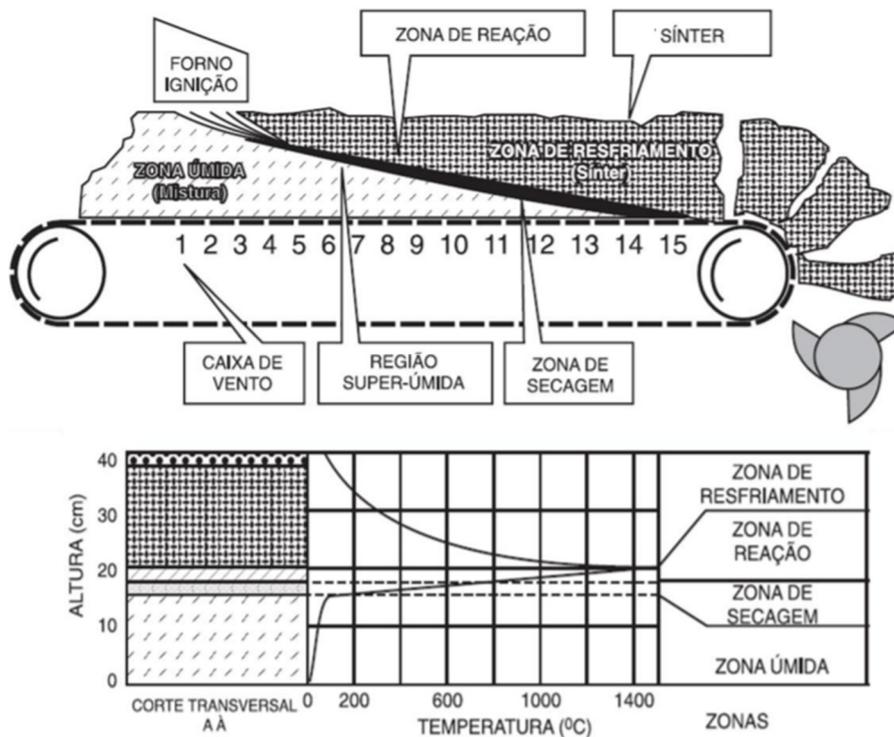


Figura 4: Desenho esquemático das zonas do processo de sinterização, adaptado de (HONORATO, 2005)

Na zona de reação ocorrem diversas reações importantes, a começar pela combustão entre o combustível sólido presente nas camadas externas das pseudopartículas e o oxigênio presente na atmosfera oxidante, promovendo uma atmosfera parcialmente e localmente redutora, além de gerar calor. Essa atmosfera favorece a redução dos óxidos de ferro. Ocorre também a decomposição dos carbonatos, ou descarbonatação, reação bastante exotérmica, produzindo óxidos de cálcio e magnésio, que podem favorecer a formação de silicatos e ferritos. As reações no estado sólido ocorrem por difusão a partir do contato entre partículas contendo óxido de ferro, cálcio, magnésio e silicatos, e são favorecidas pelo aumento da temperatura. As reações no estado líquido ocorrem na frente de queima com a formação do magma.

Na ausência de reações exotérmicas, a zona de resfriamento promove a recristalização dos líquidos formados, e permite que os óxidos reduzidos na etapa anterior sejam majoritariamente reoxidados devido à atmosfera oxidante, conferindo propriedades físicas adequadas ao sinter produto.

O estágio anterior ao de sinterização – mistura e granulação – é um grande contribuinte para o desempenho da permeabilidade do leito e velocidade de descida da frente de queima. Para uma produtividade adequada no processo de sinterização, a velocidade da frente de queima deve ser monitorada e, quando necessário, ajustar a velocidade da máquina. A transferência de calor da frente de queima ocorre por convecção no leito compacto e é altamente dependente da quantidade de vazios, do tamanho médio de partícula e da natureza da partícula (porosidade, área superficial, tortuosidade etc.). (ELLIS; LOO; WITCHARD, 2007).

As temperaturas alcançadas, dentre outros fatores, estão diretamente ligadas ao consumo específico de combustível, ou *fuel-rate*, que, por sua vez, pode variar devido à umidade ótima da mistura (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b).

O estágio final é a adequação granulométrica, que consiste na quebra do bolo de sinter produzido e classificação do sinter produto na faixa de 5 a 35 mm. Os finos de retorno gerados, fração menor do que 5 mm, são contabilizados desde o primeiro estágio para adição no segundo e terceiro estágios.

O efeito da pressão parcial de oxigênio em função da temperatura no processo de sinterização pode ser observado na Figura 5. Em um ambiente com escassez de

oxigênio, indica-se que a reoxidação do óxido de ferro de magnetita para hematita secundária é termodinamicamente improvável, assim como não há o favorecimento da formação de sílico-ferrito de cálcio e alumínio (SFCA).

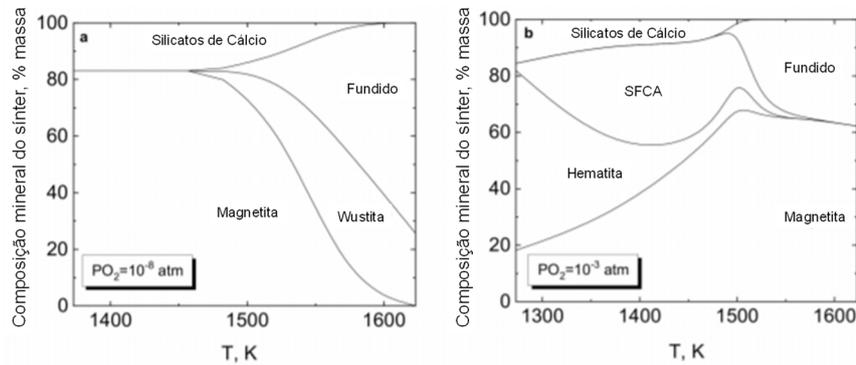


Figura 5 : Diagrama de predominância de fases em função da pressão parcial de oxigênio, adaptado de (CHEN; LU; JIAO, 2019)

O processo de sinterização pode ser simulado em escala piloto para reprodução das dinâmicas que ocorrem em escala industrial, desde a etapa de mistura e granulação, redução, até o beneficiamento e quebra do sinter piloto, como pode ser observado por exemplo na Figura 6.

Como a etapa de mistura e granulação tem papel fundamental no processo de sinterização, o assunto será abordado em mais detalhe nas próximas seções.

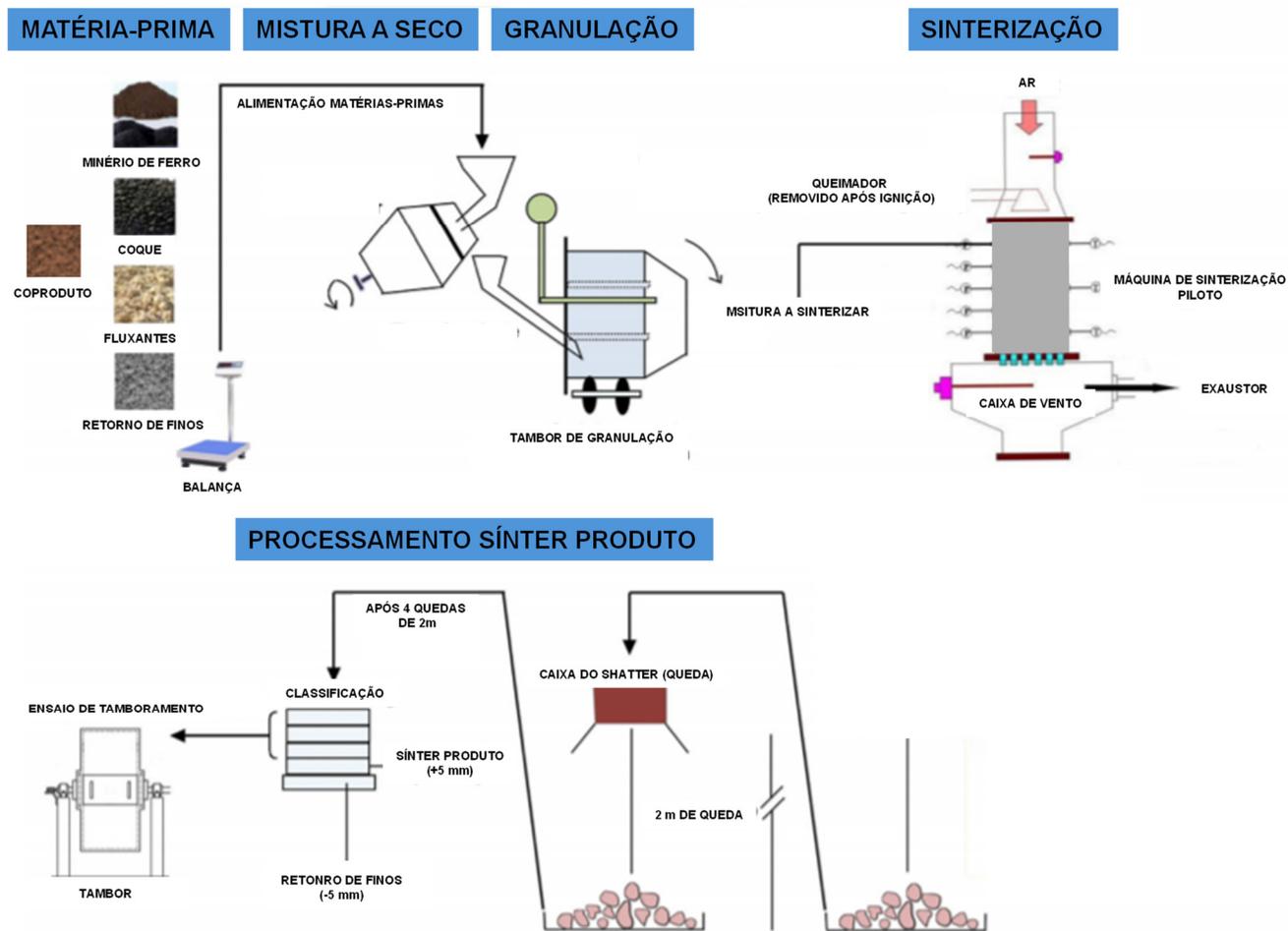


Figura 6: Fluxo típico de simulação do processo de sinterização em escala piloto, adaptado de (ZHOU; ZHOU, 2020)

### 3.2.2. Granulação

Com o aumento da proporção de finos na mistura e mudança na característica das matérias-primas, se fez necessário avaliar rotas que resultem em pequena dispersão da faixa granulométrica de pseudopartículas, pseudopartículas com fração aderente coesa, dentre outras características que garantam a adequada permeabilidade do leito de sinterização e consequente produtividade da máquina de sinterização (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017a). Diversas rotas de mistura e granulação têm sido desenvolvidas ao longo dos anos com o objetivo de solucionar impactos negativos da qualidade física no processo de sinterização.

De acordo com os dados da Tabela 1, tecnologias de preparação como HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*), tambor misturador, tambor nodulizador, misturador intensivo e nodulizador intensivo são amplamente utilizados em plantas de sinterização nacionais. Algumas das rotas utilizadas permitem a utilização de até 40% de *pellet feed* na mistura, ou seja, até 40% da carga ferrosa na granulometria abaixo de 0,150 mm.

Tabela 1: Dados de proporção de finos em plantas de sinterização no ano de 2016, adaptado de (JUNIOR; ASSIS; PEREIRA, 2018)

EMPRESA	TECNOLOGIA DE PREPARAÇÃO	% <0,150mm
ARCELORMITTAL MONLEVADE	<i>HYBRID PELLETIZED SINTER</i> (HPS)	30-35
ARCELORMITTAL TUBARÃO	MISTURADOR E NODULIZADOR TAMBOR	20-25
CSN	MISTURADOR INTENSIVO HORIZONTAL E NODULIZADOR TAMBOR	15-20
ARCELORMITTAL PECEM	MISTURADOR E NODULIZADOR TAMBOR	20-30
GERDAU AÇOMINAS 1	<i>HYBRID PELLETIZED SINTER</i> (HPS)	35-38
GERDAU AÇOMINAS 2	MISTURADOR E NODULIZADOR TAMBOR	35-38
TERNIUM BRASIL	MISTURADO INTENSIVO VERTICAL E NODULIZADOR INTENSIVO VERTICAL	20-25
USIMINAS	MISTURADOR TAMBOR/MISTURADOR INTENSIVO HORIZONTAL E NODULIZADOR TAMBOR	15-20

A curva Astier é uma referência adotada pela sinterização desde os anos 70 para nortear uma distribuição granulométrica ideal, que indica que o passante em 1 mm deve ser menor do que 50%, como pode ser observado na Figura 7. No entanto, com o afinamento das misturas, novas proporções foram estudadas com o objetivo de entender a contribuição de cada fração granulométrica na dinâmica de aglomeração.

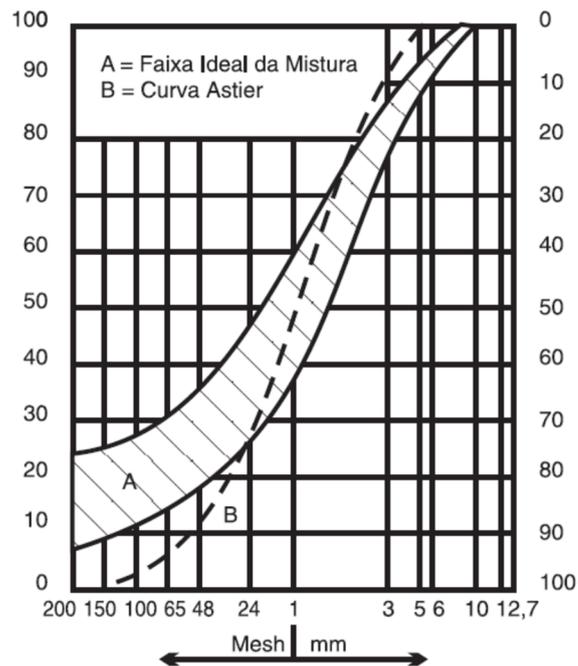


Figura 7: Distribuição granulométrica ideal, adaptado de (ISHIKAWA, 1983)

A partícula nucleante em um processo de aglomeração geralmente se mantém no estado sólido durante o processo de sinterização. Durante a aglomeração, partículas intermediárias e aderentes são adicionadas naturalmente às partículas nucleantes, promovendo a criação e o crescimento das pseudopartículas.

As partículas nucleantes apresentam tamanhos entre 0,7 e de 6,3 mm, as partículas intermediárias variam entre 0,2 e 0,7 mm e as partículas aderentes são menores do que 0,2 mm. No entanto, na prática operacional, as faixas analisadas são respectivamente:  $> 1,000$  mm;  $1,000\text{mm} > x > 0,150$  mm; e  $< 0,150$  mm. A faixa granulométrica associada às partículas intermediárias deve ser evitada, pois tem os seguintes comportamentos: quando atuam como nucleantes, produzem pseudopartículas menores do que as geradas por partículas nucleantes, aumentando a dispersão da faixa granulométrica de pseudopartículas, com consequente

diminuição da permeabilidade do leito; quando atuam como partículas aderentes, não apresentam uma boa adesividade, se separam facilmente, gerando finos e, também, diminuindo a permeabilidade do leito (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017a). A fração maior do que 6,3 mm também deve ser minimizada por não apresentar a capacidade de aderir partículas finas e formar camada aderente e já estar em tamanho adequado para alimentação no Alto-Forno, sem necessidade de aglomeração (VIEIRA; ROSIÈRE; ASSIS, 2003).

Em um processo tradicional, geralmente as partículas nucleantes são compostas de retorno por apresentar granulometria propícia. Com a adição de coprodutos, uma pequena parcela das pseudopartículas pode exercer o papel de nucleantes devido à distribuição granulométrica contendo finos em excesso.

A camada aderente, como pode ser observada na Figura 8, usualmente é constituída por uma mistura de finos de minério, sílica, e fontes de cálcio, apresentando uma alta basicidade local.

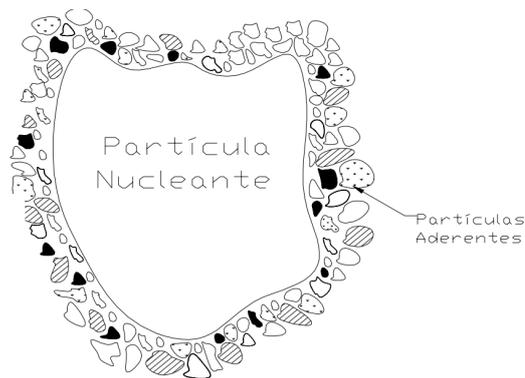


Figura 8: Conceito de camada aderente em uma pseudo partícula, adaptado de (VIEIRA; ROSIÈRE; ASSIS, 2003)(ISHIKAWA, 1983)

A estabilidade das pseudopartículas, desde a produção, passando pelo transporte, até a secagem, ocorre essencialmente pela força de capilaridade entre as partículas devido à adição de água no processo de granulação, ainda que ligantes como a cal virgem ajudem a manter a integridade do aglomerado. No entanto, a umidade é retirada já na primeira zona do processo – secagem. Desta forma, é necessário garantir uma coesividade adequada da pseudopartícula para que não sejam observados impactos negativos na etapa de sinterização.

A umidade ótima varia com as características intrínsecas das matérias-primas utilizadas de modo individual, bem como com a distribuição granulométrica da mistura, com as respectivas proporções de partículas nucleantes, intermediárias e aderentes.

As características individuais, como porosidade, forma e superfície específica das partículas afetam diretamente o desempenho da granulação (YANG et al., 2019). Como exemplo, o pré-tratamento de *pellet feed* utilizando prensa de rolo para aumento de superfície específica permite aumentar sua participação na mistura sem diminuir a permeabilidade do leito (OLIVERA et al., 2019).

A seguir, as rotas de granulação mais usuais que serão abordadas no trabalho serão apresentadas, podendo haver uma combinação entre elas para aumentar a eficiência da granulação de acordo com as necessidades específicas das matérias-primas.

#### **3.2.2.1. Rota Tambor + Tambor**

As rotas de plantas tradicionais possuem dois tambores rotativos em série: tambor misturador e tambor nodulizador. O tambor da mistura atua essencialmente na garantia da homogeneidade de todas as matérias-primas inseridas na receita e adição de umidade na mistura total. Para intensificação da homogeneização, tambores podem conter aletas. O tambor nodulizador possui menos ferramentas de homogeneização para induzir a produção das pseudopartículas.

Referências operacionais indicam que esta rota tradicional tende a apresentar perda de produtividade quando inseridos mais de 15% de *pellet feed* na mistura, ou seja, quando adicionados mais de 15% da carga ferrosa abaixo de 0,150 mm. Quando otimizados os níveis de umidade e aglomerantes, é possível trabalhar com poucos pontos percentuais adicionais de finos, como observado na Tabela 1 (JUNIOR, 2018).

#### **3.2.2.2. Rota Misturador Intensivo**

Misturadores Intensivos são misturadores de grande eficiência de homogeneização e geralmente alta velocidade. Existem quatro tipos básicos de misturador, a saber: tambor horizontal de um eixo; circulação forçada; planetário;

e tambor horizontal de dois eixos. O tambor horizontal de um eixo apresentado na Figura 9(a) é amplamente conhecido no mercado como misturador intensivo horizontal (MIH) e o misturador de circulação forçada apresentado na Figura 9(b), como misturador intensivo vertical (MIV).

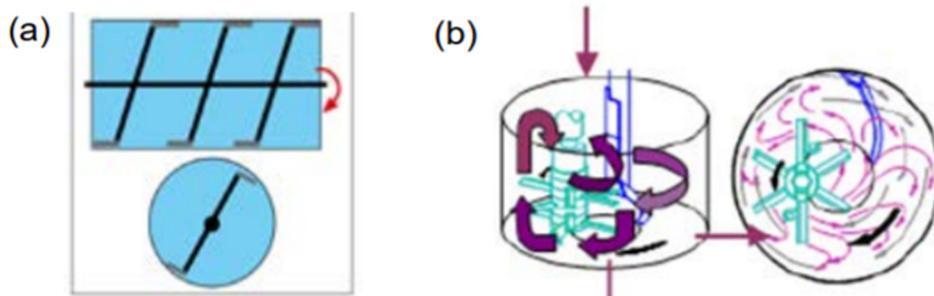


Figura 9: Desenho esquemático dos misturadores intensivos (a) MIH (misturador intensivo horizontal) e (b) MIV (misturador intensivo vertical), adaptado de (JUNIOR; ASSIS; PEREIRA, 2018)

Misturadores intensivos promovem alto nível de controle e eficiência em relação ao processo de mistura e homogeneização. Quando há uma variedade de materiais na mistura e granulometrias muito finas, esta rota se mostra eficiente tanto do ponto de vista de mistura quanto de microgranulação.

### 3.2.3. Efeito das matérias-primas no processo de sinterização

Nas atuais frentes de lavras das jazidas brasileiras nota-se um aumento de impurezas, principalmente no minério de ferro, como álcalis (Na e K), enxofre (S), fósforo (P) e manganês (Mn) (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017a). Os escorificantes, usualmente calcários e cales, têm papel fundamental na retirada dessas e outras impurezas no alto-forno e podem ser adicionados já na etapa de sinterização.

Durante o processo de sinterização, a zona de redução é responsável pela combustão do coque com uma reação exotérmica, decomposição dos carbonatos com reações endotérmicas, reações em estado sólido, redução e reoxidação de óxidos de ferro e reações de formação da massa sinterizada. Já a zona de secagem é responsável pela recristalização da massa sinterizada. (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b).

A decomposição dos carbonatos de cálcio e magnésio presentes nos calcários tem um impacto ambiental negativo, com o aumento do *fuel-rate* e emissão de CO<sub>2</sub>.

Coques e antracitos são utilizados em larga escala como combustíveis sólidos no processo de sinterização e devem ser otimizados, não apenas por questões de processo – aumento de temperatura e dificuldade de reoxidação do óxido de ferro – mas também por questões econômicas e ambientais – emissão de CO<sub>2</sub> (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b).

Algumas das funções das fontes de cálcio são abaixar o ponto de fusão local e promover a basicidade binária local adequada. A cal virgem pode atuar como ligante nas etapas a frio, e fornece calor para a mistura já no início do processo com a liberação de calor na reação de hidratação. Tanto calcário quanto a cal virgem podem contribuir para a formação de ferritos que aumentam a resistência no sinter produto.

A umidade da mistura é fundamental para diversas etapas do processo. A escassez de água nas etapas de mistura e granulação pode acarretar a coesão inadequada das pseudopartículas. Como consequência, tendem a liberar mais finos no leito, impactando negativamente o processo de sinterização em si e a qualidade do sinter final. O excesso de umidade promove a condensação na base do leito, preenchendo os vazios que deveriam estar disponíveis para o fluxo de ar, podendo colapsar a estrutura do leito (BHAGAT, 1999).

As temperaturas alcançadas, dentre outros fatores, estão diretamente ligadas ao consumo específico de combustível, ou *fuel-rate*, que, por sua vez, pode variar devido à umidade ótima da mistura. A etapa e o modo de adição do combustível podem influenciar o *fuel-rate*, a energia local e o desempenho do sinter produto, como por exemplo a adição de *coke breeze*, fração fina do coque, como *coating* na superfície das pseudopartículas (LU; ISHIYAMA, 2016).

Os parâmetros que norteiam a avaliação da qualidade do sinter produto para alto forno a coque e suas respectivas referências de qualidade são (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017b):

- Basicidade binária:  $1,55 \pm 0,12$ ;
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%):  $1,80 \pm 0,20$ ,  $< 2,0$ ;

- FeO (%): 5,5 – 8,5;
- MgO (%): sem referência;
- Ferritos: sem referência;
- Hematita total: sem referência;
- Hematita reoxidada de magnetita ou hematita secundária: sem referência;
- Índice de redutibilidade (RI) > 65%;
- Índice de degradação sob redução (RDI): < 33%;
- Índice de tamboramento e de abrasão (TI e AI): TI > 63% e AI < 10%;
- Porosidade: sem referência;
- *Coke rate/fuel rate*: 50 kg/t sinter;
- *Shatter Test*: > 80%.

O RI mede a retirada de oxigênio do minério de ferro pelo gás redutor CO por meio da redução indireta. O RDI mede a resistência mecânica do sinter após redução parcial do material e indica o grau de degradação do sinter na região seca do alto-forno. TI/AI medem a resistência mecânica a frio do sinter e indicam a tendência de geração de finos durante transporte e manuseio do material. O *Shatter Test* é o teste de quedas realizado para avaliar a geração de finos durante manuseio e alimentação da carga no reator.

A distribuição local de macro poros no bolo influencia no tamanho do sinter produzido e consequentemente na proporção de finos gerados. Não obstante, cada partícula de sinter apresenta uma distribuição de poros, variando entre micro poros e macro poros intra-sinter, que impacta diretamente as propriedades físicas e metalúrgicas. Sínters com alta porosidade, porém com pouca estrutura sólida para garantir as propriedades físicas e mecânicas do sinter, podem impactar negativamente o TI e o RDI, mas favorecer o RI.

O sinter produto é constituído majoritariamente por:

- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na forma de hematita primária, secundária ou recristalizada de magnetita;
- Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> na forma de magnetita primária, magnetita decorrente da redução da hematita ou magnetita recristalizada de FeO;

- FeO na forma de wustita proveniente da precipitação da fase líquida em regiões com baixo potencial de oxigênio ou da redução da magnetita em estado sólido;
- Cálcio-ferritas diversas, em formato colunar, agulha ou dendrítico; Magnésio-ferritas; e
- Silicatos na forma de olivinas, faialita e silicatos de cálcio.

Cada componente e microestrutura no sinter produto tem um papel no desempenho no alto-forno (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017c). O desenho esquemático do sinter produto com alguns dos constituintes podem ser observados Figura 10.

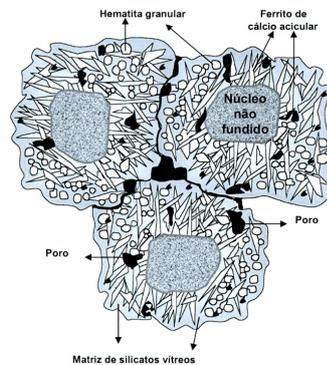


Figura 10: Desenho esquemático dos constituintes do sinter produto (adaptado de (VIEIRA; ROSIÈRE; ASSIS, 2003))

Com o aumento da basicidade, a concentração de hematita reoxidada tende a diminuir. O aumento da disponibilidade de Mg pode retardar a formação da hematita reoxidada na zona de resfriamento (HSIEH, 2005). Em situações mais críticas, o aumento de MgO pode aumentar a formação de FeO, diminuir a produtividade da máquina, assim como diminuir os índices de RI, RDI e TI do sinter (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017c).

A alumina aumenta a viscosidade do primeiro líquido fundido formado no sinter, contribuindo para a formação de uma estrutura física mais fraca, com poros irregulares, interconectados e não estruturados (LOO; LEUNG, 2003). A diminuição do teor de alumina também impacta positivamente as propriedades de amolecimento e fusão do sinter e permeabilidade na zona coesiva do alto-forno (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017c).

O tamanho médio de partículas das matérias-primas tem relação direta com o desempenho nas diferentes etapas do processo. Como exemplo, um pequeno tamanho médio das partículas nucleantes, acarreta o maior tempo de crescimento das pseudopartículas. O tamanho médio das pseudopartículas é um dos parâmetros que influenciam a permeabilidade do leito de sinterização.

A disponibilidade de Fe, Al, Ca e C, na presença de oxigênio, pode favorecer a formação de sílico-ferrito de cálcio e alumínio (SFCA), que contribui positivamente nas propriedades físicas do sinter produto. Existem dois tipos de SFCA mais disseminados na literatura, denominados SFCA e SFCA-I. SFCA I, também conhecido como ferrita acicular, ocorre em forma de agulhas ou fibroso quando observado na seção transversal. SFCA, também conhecido como ferrita colunar, se apresenta na forma colunar ou de blocos, acarretando propriedades físicas inferiores ao sinter. Altas concentrações locais de alumina e sílica, associadas à baixa disponibilidade de óxido de ferro, favorecem a formação de SFCA como fase ligante. SFCA I, ou ferrita acicular (<10  $\mu\text{m}$ ), formada em temperaturas abaixo de 1300°C, apresenta resultados melhores de RI do que a ferrita colunar (>10 $\mu\text{m}$ ), formada em temperaturas acima de 1300°C. De forma geral, a alta concentração de SFCA favorece TI, mas não necessariamente RDI. Propriedades físicas adequadas podem ser alcançadas quando a proporção alumina/sílica é inferior a 0,50 (UMADEVI et al., 2016). Alguns mecanismos de formação de ligações fortes e fracas podem ser visualizados na Figura 11.

A adição de finos de retorno na mistura a sinterizar tende a impactar positivamente a geração de finos do próximo ciclo medido por *Shatter Test*, uma vez que a granulometria associada à presença de escorificantes diminui o ponto de fusão localmente, aumentando a capacidade de ligação à quente entre as partículas (BHAGAT, 1999).

A disponibilidade de  $\text{Fe}^{2+}$  em determinadas condições locais, na presença de Si, pode propiciar a formação de faialita ( $2\text{FeO}.\text{SiO}_2$ ) e, na presença também de Ca, pode favorecer a formação de olivina de cálcio ( $\text{CaO}.\text{FeO}.\text{SiO}_2$ ), que são estruturas estáveis, impactando negativamente o RI e propriedades de amolecimento e fusão. Estudos indicam que basicidade binária acima de 1,5 tende a impactar positivamente o RI do sinter (MALYSHEVA et al., 2007). O espinélio, composto por  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}^{2+}$ , impacta positivamente o RI.

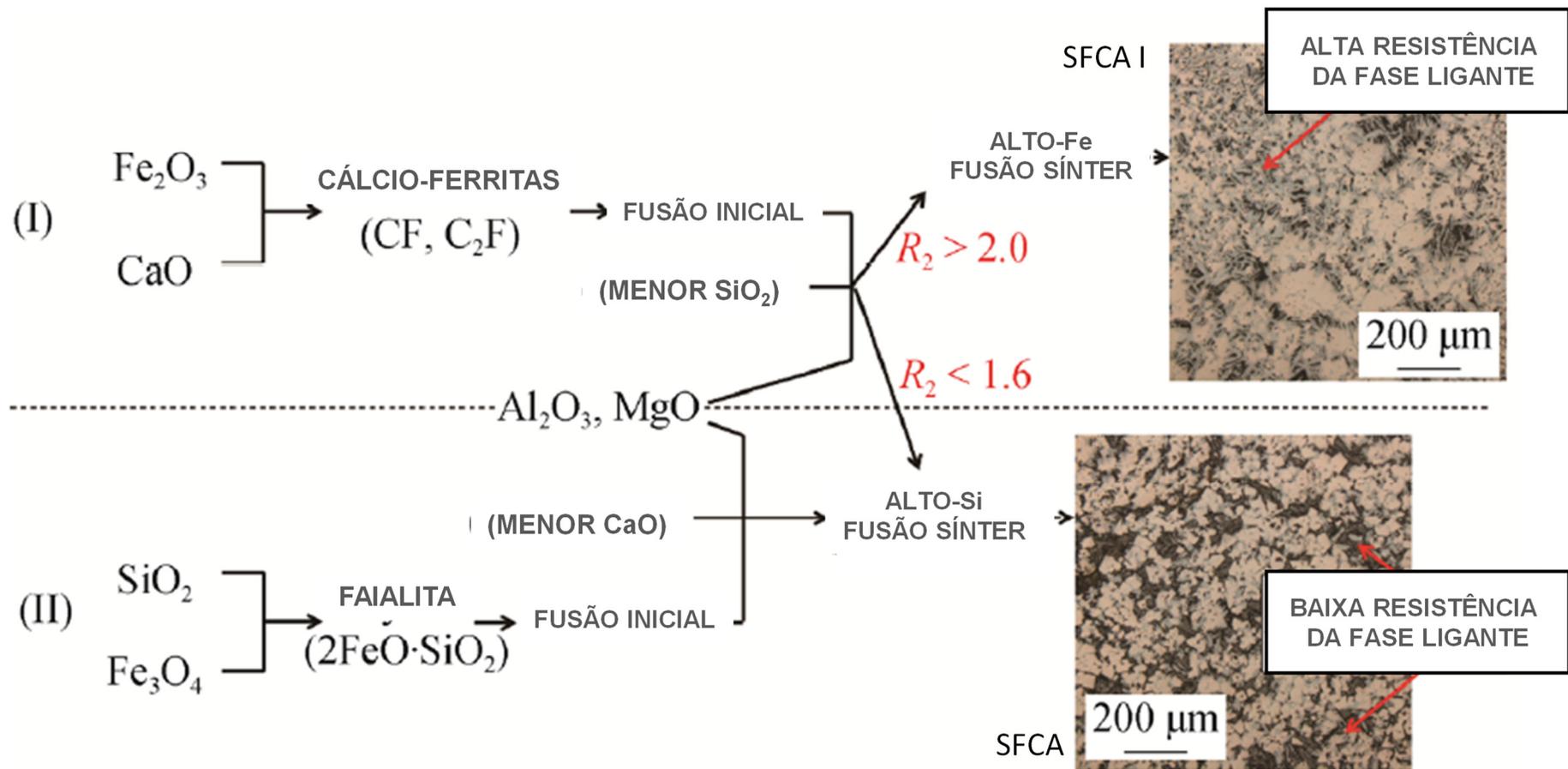


Figura 11: Mecanismos de formação das ligações fracas e fortes, adaptado de (YANG et al., 2019)

Previsões de qualidade de minério futuro indicam a tendência de disponibilidade de minério de ferro com cerca de 70% de *pellet feed* para utilização na sinterização nos próximos anos, podendo diminuir o tamanho médio de pseudopartículas e aumentando o empacotamento do leito (JUNIOR, 2018). Matérias-primas alternativas, como coprodutos siderúrgicos, também costumam apresentar grande percentual de finos em sua composição. Sua aplicação no processo de sinterização sem tratamento prévio pode apresentar impactos negativos de processo e qualidade similares à aplicação de *sinter feed* com maior percentual de finos.

### 3.2.4. Matérias-primas alternativas – Coprodutos

Cerca de 75% da produção mundial de aço ocorre pela rota integrada à coque. Durante todas as etapas contidas no processo de produção de aço são produzidos resíduos industriais, com a geração específica de 1 tonelada de resíduos para cada tonelada de aço produzida.

Esses resíduos industriais possuem características físico-químicas compatíveis com muitos processos industriais, até mesmo dentro da própria cadeia de produção do aço, sendo promovidos, portanto, a coprodutos. O desenho esquemático exemplificativo dos coprodutos siderúrgicos de uma usina integrada a coque pode ser observado na Figura 12.

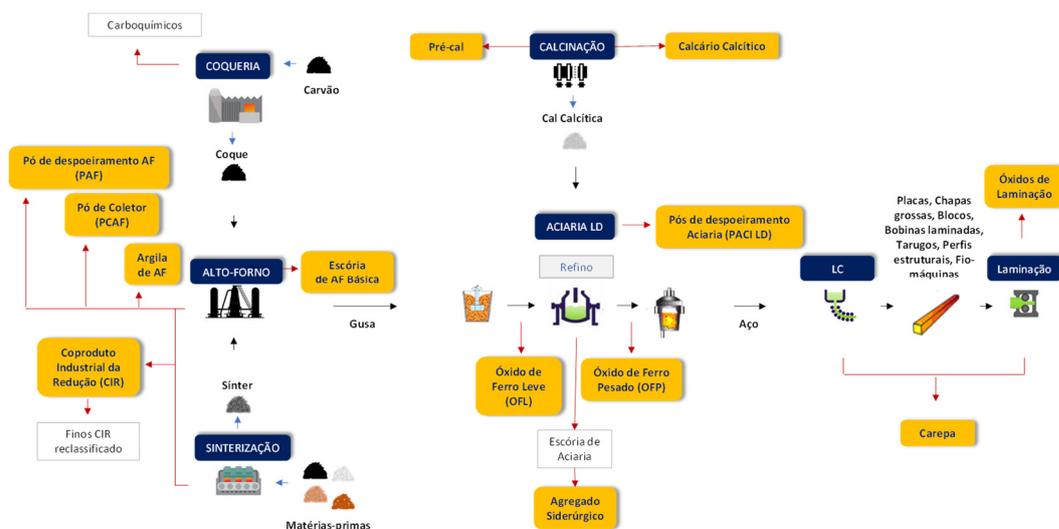


Figura 12: Desenho esquemático exemplificativo da geração de coprodutos siderúrgicos de uma usina integrada a coque

Comparando-se volume de geração, as escórias provenientes do alto-forno e aciaria são as mais representativas, seguidas do grande conjunto que engloba as lamas e pós provenientes, principalmente, dos sistemas de despoeiramento e lavagem dos gases presentes nos processos (DAS et al., 2007). As lamas e pós são finos capturados em diferentes etapas do processo que, por apresentar qualidade química compatível, podem ser realimentadas desde que sejam aglomerados para adquirir a qualidade física necessária para reuso em processos metalúrgicos e siderúrgicos (DAS et al., 2007). Além do reuso na própria cadeia do aço, autores fazem referência da aplicação destes coprodutos em agricultura, construção civil e outros mercados (GRÖFF et al., 2016).

Coprodutos siderúrgicos são potenciais fontes de matérias-primas alternativas, com aporte de cálcio, magnésio ferro e carbono, apesar dos desafios técnicos relativos à granulometria e química para consumo na sinterização.

Do ponto de vista químico, apesar de não atrativo à primeira vista quando analisado o ferro total mais baixo, nota-se que os coprodutos apresentam percentuais de outros compostos interessantes para o processo, como alto cálcio e baixa sílica, permitindo a retirada de matérias primas tradicionais de fonte não renovável ao utilizar a matéria-prima alternativa por exemplo na sinterização. Alguns coprodutos, principalmente o pó de aciaria LD pode apresentar percentuais mais elevados de álcalis, devendo-se realizar uma análise cuidadosa sobre a sua utilização.

Do ponto de vista físico, uso de coprodutos pode ser desafiador devido a granulometria com grande percentual de finos. É sabido que a permeabilidade do leito está diretamente relacionada com velocidade de propagação da frente de queima, conseqüentemente com o perfil térmico e velocidade da máquina de sinterização (LOO, 2005). Se coprodutos forem adicionados sem tratamento prévio, os finos contidos podem contribuir para diminuição da permeabilidade do leito, com conseqüente perda de produtividade da máquina de sinterização (TAKANO et al., 2000).

Ao preparar adequadamente os coprodutos, é possível consumir lamas desidratadas e de pós no processo de sinterização em quantidades superiores às suas gerações em massa. Esta prática favorece a economia circular por meio de reuso

interno, promovendo ganhos ambientais e financeiros com a substituição de matérias-primas tradicionais.

### **3.2.5. Efeito da adição de coprodutos no processo de sinterização**

O sínter alimentado no alto-forno não deve conter mais do que 0,1% de zinco na carga, pois a volatilização, condensação, oxidação e circulação do zinco podem promover seu acúmulo no reator, aumentando o consumo específico de coque (*coke-rate*), desperdiçando energia com a recirculação do zinco, diminuindo a vida útil dos refratários, impactando na qualidade do ferro-gusa, aumentando a concentração de zinco na escória produzida, pós de despoeiramento e lamas de lavadores de gases (ESEZOBOR; BALOGUN, 2006), (DAS et al., 2007).

Desta forma, quando as lamas e pós são destinadas para reuso na sinterização, seu teor de zinco deve ser observado para que o sínter produto não supere os limites estabelecidos de alimentação no alto-forno. No entanto, não é evidente qual é o limite de alimentação de zinco na sinterização para obter o sínter produto adequado. Como o processo de sinterização consiste em um aquecimento local acima da temperatura de volatilização do zinco, não é possível afirmar que todo zinco segue para a caixa de vento.

Sucatas sólidas eventualmente e não intencionalmente contendo zinco são adicionadas à aciaria LD para controle de temperatura do banho. Mesmo que sua participação seja minoritária, o zinco contido na sucata é direcionado majoritariamente para os pós de aciaria. (TELLES; ESPINOSA; TENÓRIO, 2013).

A alimentação e consequente recirculação de álcalis, como sódio e potássio, no alto-forno impactam negativamente as propriedades de amolecimento e fusão da carga metálica, diminuem a permeabilidade do leito, danificam refratários, entre outras consequências (DAS et al., 2007). De modo análogo ao zinco, o controle de álcalis deve ser realizado na alimentação das matérias-primas tradicionais e alternativas no processo de sinterização, e avaliada a concentração no sínter produto e caixa de vento. Infere-se que o sínter produto não deve conter teores maiores do que 0,11% de álcalis (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ et al., 2017a).

Estudos indicam que finos de retorno da sinterização tendem a se assimilar menos facilmente do que as lamas e pós de alto-forno devido à menor quantidade

de cálcio ferrita, sendo sugerida uma proporção máxima em massa de 20% de finos de retorno para 30% de lamaz e pós de alto-forno (WU et al., 2013).

Previsões de qualidade de minério futuro indicam a tendência do aumento de partículas abaixo de 0,150 mm. Em geral, a maioria dos coprodutos apresentam granulometria fina. Ainda que em baixa participação, a dosagem de alguns coprodutos de maior granulometria pode contribuir para a correção granulométrica parcial e atuar positivamente no processo. Dependendo da forma de preparação da mistura, pode-se adicionar inclusive coprodutos mais finos.

### **3.2.6. Caracterização de matérias-primas tradicionais e alternativas, pseudopartículas e sinter produto**

Alguns ensaios são realizados com o objetivo de indicar tendências de comportamento e parâmetros de processo determinados. Técnicas tradicionais de análise química, como fluorescência de raios-x, ICP, umidade e perda por calcinação ou perda ao fogo, e física, como distribuição granulométrica, são os principais parâmetros avaliados para matérias-primas tradicionais e alternativas. Para coprodutos, são realizadas adicionalmente as análises ambientais.

Na produção industrial, a umidade é um parâmetro de processo controlado, mas nenhum ensaio químico e físico adicional é realizado para as pseudopartículas. Já para o sinter produto, são realizadas como rotina na indústria análises químicas, como ICP ou fluorescência de raios-x, análises físicas, como distribuição granulométrica, queda, tamboramento e abrasão, e análises metalúrgicas, como degradação sob redução (RDI) e redutibilidade (RI).

Para fins de pesquisa e desenvolvimento, diversas técnicas podem ser utilizadas para a caracterização desses materiais, como difração de raio-X, microscopia, microtomografia, dentre outras.

#### **3.2.6.1. Difração de raio-X**

As técnicas de difração de raio-X e análise dos difratogramas são bastante utilizadas em diversas áreas para avaliações qualitativas e quantitativas, contribuindo com informações como, por exemplo, acerca da cristalinidade do material e seus constituintes químicos.

Os difratogramas obtidos a partir do ensaio laboratorial necessitam ser interpretados. Uma base de dados contendo as cartas cristalográficas de constituintes cristalinos pode ser consultada para obtenção da posição dos picos característicos de cada um dos possíveis materiais que compõem a amostra. A altura, largura e posição dos picos direcionam a inferência sobre a estrutura cristalina do material.

Técnicas de identificação dos compostos químicos de acordo com os picos característicos e técnicas de quantificação a partir do difratograma podem ser aplicadas, com base na metodologia de Rietveld (GUALTIERI et al., 2019). Ajustes matemáticos entre as curvas do difratograma e dos constituintes são realizados para validação das identificações e realização de avaliações quantitativas.

O resultado do processo matemático de convergência das curvas pode ser avaliado por meio das seguintes variáveis:  $R_{wp}$  (*weighted residual error* ou erro ponderado) e  $R_{exp}$  (*expected error* ou erro esperado) (DOBELIN, 2017). A Equação 1 a seguir que apresenta a divisão de  $R_{wp}$  por  $R_{exp}$  resulta no parâmetro GoF (*Goodness-of-fit*), que mede o erro do processo de refinamento. O objetivo é minimizar seu valor dentro da faixa de 1 a 2 (AZZAZA et al., 2016).

Equação 1: Medida de erro do processo de refinamento

$$GoF = \frac{R_{wp}}{R_{exp}}$$

Valores típicos de  $R_{wp}$  e GoF são sugeridos para auxiliar na avaliação do ajuste adequado das curvas:

- $R_{wp}$  deve ter valores abaixo de 10 para ser considerado adequado e ter valores abaixo de 6 para ser considerado muito bom;
- GoF deve ter valores entre 1 e 2 para ser considerado adequado e ter valores entre 1 e 1,7 para ser considerado muito bom.

Os compostos cristalinos identificados e quantificados pela técnica podem ser utilizados para cálculos estequiométricos de conversão dos resultados dos constituintes em análise química elementar. Erros associados à quantificação podem ocorrer, principalmente nos casos em que os constituintes apresentam fração de massa inferior a 8%. Valores inferiores a 5% apresentam menos confiabilidade ainda quanto a quantificação do respectivo constituinte.

A complexidade do material e sua variabilidade podem dificultar a identificação adequada dos constituintes. O conhecimento prévio dos possíveis compostos a partir de informações das matérias-primas originárias e do processo pelo qual os constituintes sofreram interferências, além do acesso ou desenvolvimento de base de dados com parâmetros associados adequados, são fundamentais para uma boa convergência entre as curvas.

Coprodutos são materiais complexos do ponto de vista das distintas características devido às variações de processo no qual são gerados. No entanto, algumas dessas matérias-primas alternativas podem guardar, parcialmente, características das matérias-primas originárias tradicionais. Há uma carência de conhecimento sobre os compostos químicos na forma cristalina contidos nesses materiais, que pode ser suprida pelo uso da técnica de difração de raio-X e análise do difratograma, apesar dos desafios contidos na aplicação da técnica.

### **3.2.6.2. Microscopia e análise de imagens**

A microscopia ótica, associada ao processamento digital de imagens, é uma técnica amplamente utilizada para estudar qualitativamente e quantitativamente matérias-primas, microaglomerados e aglomerados de minério de ferro por meio da visualização, classificação e extração de atributos quantitativos. Metodologias diversas podem ser aplicadas ou desenvolvidas para estas avaliações.

A microscopia ótica auxilia na avaliação microestrutural qualitativa e quantitativa de sínters, a partir da medição de fases e porosidade por métodos de segmentação de faixas tonais específicas por limiarização. Desta forma, é possível escolher tons de cinza referentes à cada fase presente na imagem do sínter.

Em pseudopartículas, ou seja, microaglomerados a frio, pode ser realizada uma classificação para identificação de quasipartículas, micropelotas e partículas não aglomeradas, como pode ser observado na Figura 13 (SANTOS et al., 2019). As quasipartículas são compostas por um núcleo circundado por partículas aderentes e as micropelotas são compostas por partículas aderentes aglomeradas. Para a realização da avaliação, as pseudopartículas são classificadas em três faixas granulométricas (+4,76 mm, -4,76 mm +2,83 mm, -2,83 mm +1,00 mm) e, então, preparadas as respectivas seções polidas. (OLIVEIRA et al., 2020)

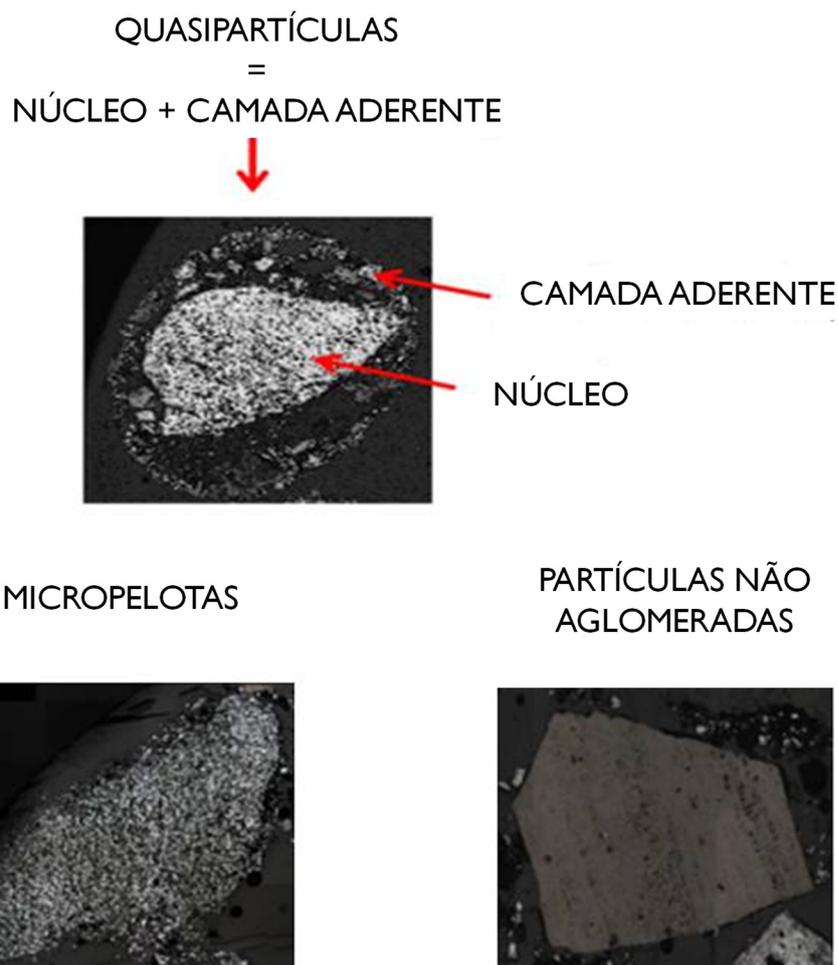


Figura 13: Classificação das pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e não aglomerados, adaptado de (OLIVEIRA et al., 2020)

Utilizando microscópio ótico de luz refletida automatizado, imagens parcialmente sobrepostas da seção polida são capturadas e ajustadas de modo a obter um mosaico completo do embutimento, contendo as pseudopartículas a serem analisadas. Avaliações podem ser realizadas por métodos manuais ou métodos mais automatizados.

Utilizando-se a contagem de pontos manual, aplicado nas imagens da Figura 14, é possível extrair informações qualitativas do núcleo e da camada aderente e, em alguns casos, informações semiquantitativas (YANG et al., 2019). Já por métodos avançados de análise de imagens, que apresentam resultados mais assertivos, pode-se realizar a classificação das pseudopartículas, identificação de núcleo, identificação de camada aderente de quasipartículas, para então extração de atributos quantitativos. Como exemplo, pode-se utilizar rotinas que tem por base a

segmentação por limiarização e/ou o uso de *deep learning*, associado ao pós-processamento das imagens.

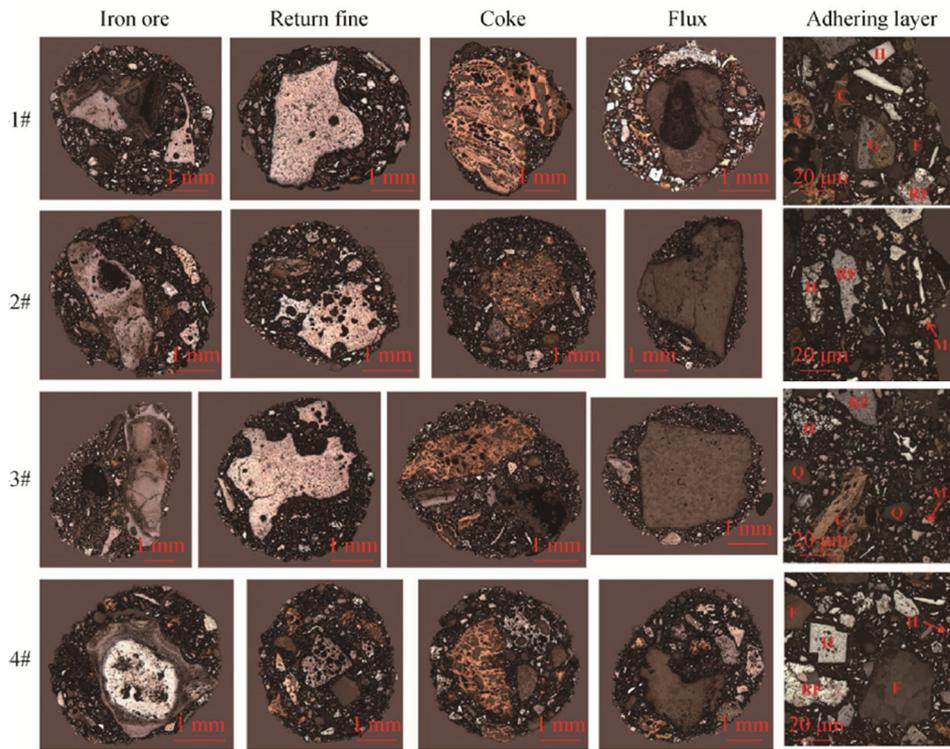


Figura 14: Microestrutura do núcleo dos grãos, adaptado de (YANG et al., 2019)

Um exemplo de rotina automática de classificação de pseudopartículas que foi desenvolvido pela PUC-Rio em parceria com a Vale pode ser observado no desenho esquemático da Figura 15, será detalhado a seguir e resultados apresentados na Figura 16.

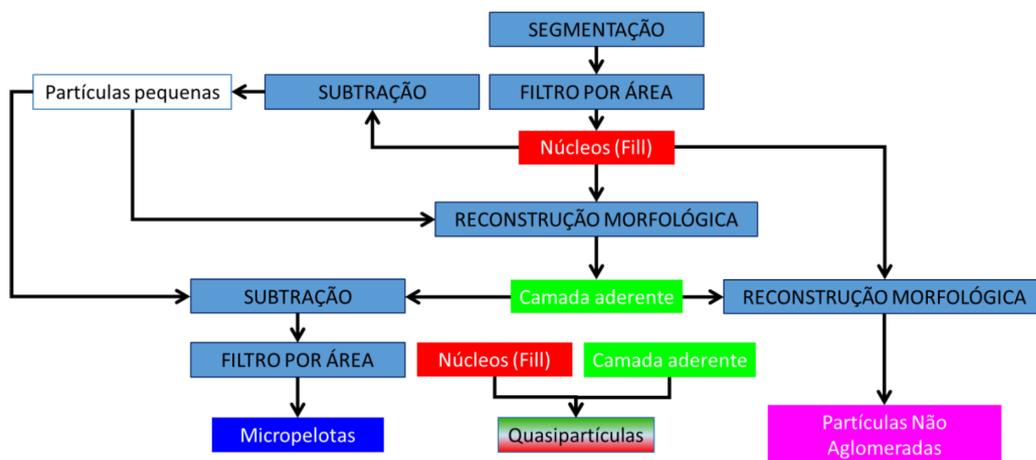


Figura 15: Fluxograma simplificado da rotina de classificação de pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e não aglomerados, adaptado de (SANTOS, 2018)

A imagem do mosaico é convertida para tons de cinza, uma vez que para as análises a serem realizadas não há perda de informação relevante nessa operação e a etapa seguinte é simplificada graças à redução no número de canais. Em seguida, a segmentação é realizada para exclusão da resina de embutimento da seção polida e obtenção apenas de pseudopartículas.

Sabe-se que a camada aderente é composta por partículas de tamanho pequeno. Os núcleos das quasipartículas apresentam tamanhos maiores do que as partículas da camada aderente e do que os finos que compõem as micropelotas. Desta forma, aplica-se um filtro por área para exclusão das partículas finas. Como consequência, obtém-se núcleos, que podem apresentar falhas por descontinuidade devido à porosidade intrínseca ou por falhas de segmentação associadas, por exemplo, à refletância. Para preenchimento e adequação das falhas dos núcleos, é realizada a operação de fechamento, que consiste em ciclos de dilatação seguida de erosão (PACIORNIK; MAURICIO, 2004).

Para obtenção da quasipartículas, micropelotas e núcleos não aglomerados, subtrai-se o núcleo da imagem binária das pseudopartículas. Os finos resultantes passam pela operação de dilatação para tornar os objetos contínuos e atenderem aos requisitos para identificação pela técnica de reconstrução morfológica (“MorphoLibJ”, 2023). Após subtrair a imagem da dilatação pela reconstrução morfológica, aplicar a operação de preenchimento e filtrar objetos espúrios, obtém-se as micropelotas.

Com o objetivo de obter a camada aderente e garantir a manutenção da área dos objetos, realiza-se erosão com menos ciclos do que dilatação. Uma nova reconstrução morfológica é realizada para eliminar pixels que se desconectaram durante o ajuste de área pela erosão. Como resultado da extração apenas das partículas que tocam os núcleos, tem-se a camada aderente. Como núcleo e camada aderente podem estar superpostos devido às operações anteriores, as operações de interseção entre camada aderente e núcleo e consequente subtração da camada aderente são necessárias para eliminar a superposição.

A medida da camada aderente é o critério avaliado para definir se a pseudopartícula é uma quasipartícula ou um núcleo não aglomerado com pouca ou ausência de camada aderente por meio da operação de filtragem. Em seguida, é realizada uma reconstrução morfológica entre camada aderente e núcleo para obtenção de pseudopartículas, que podem ser subtraídas da imagem original de núcleos para obtenção dos núcleos não aglomerados. As quasipartículas são definidas pela operação de interseção entre camada aderente e núcleos aderidos, além de um filtro para eliminação de resquícios de camada aderente de núcleos não aglomerados e preenchimento.

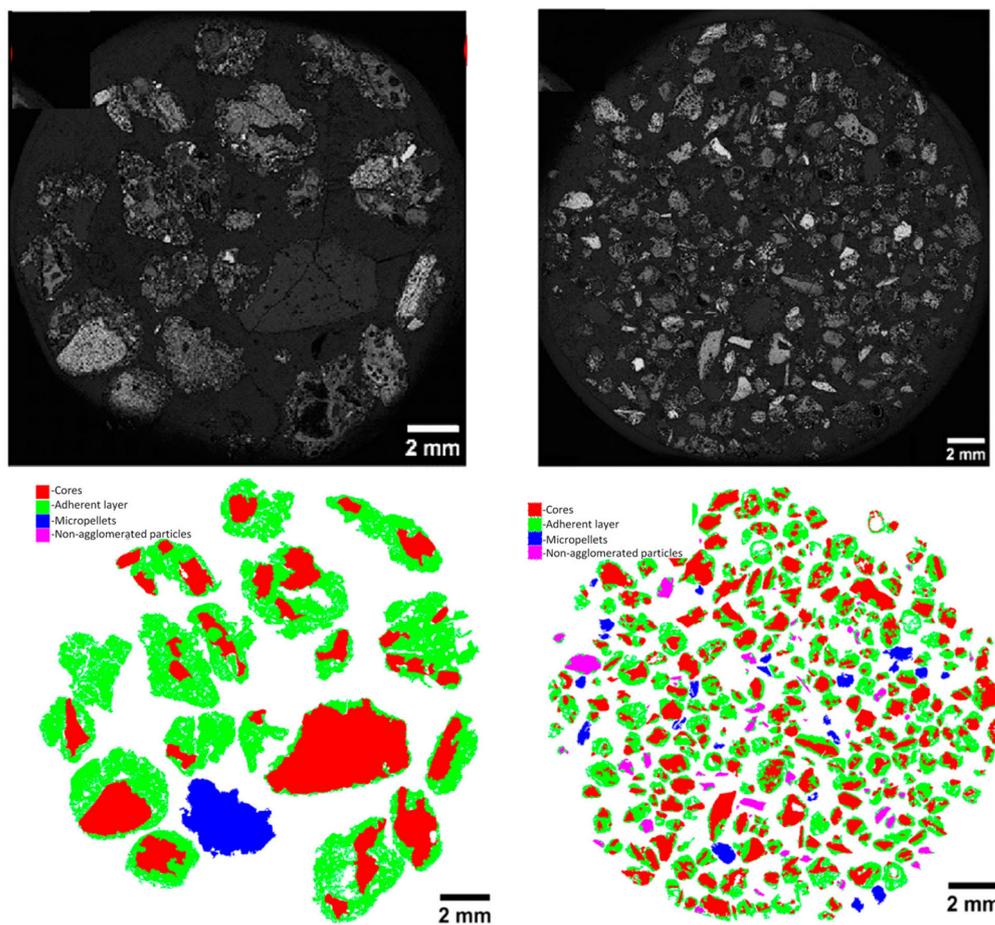


Figura 16: Exemplo de resultado da rotina de classificação de pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e não aglomerados, adaptado de (SANTOS, 2018)

Os seguintes parâmetros de medida obtidos na rotina fornecem informações quantitativas relevantes para análise microestrutural:

- Área (A): obtida pela contagem de pixels, calibrados em função do aumento do microscópio;

- Fração de área (%A): proporção entre a área de cada fase de interesse e a área total de imagem ou da área total de todas as partículas da imagem;
- Feret (ou Feret Máximo): medida linear de tamanho obtida como a maior distância entre dois pontos da borda de uma partícula;
- *Roundness*: medida de circularidade<sup>1</sup> que varia entre 0 e 1, obtida pela fórmula

$$Roundness = \frac{4.A}{\pi.Feret^2};$$

No caso particular das quasipartículas, compostas por núcleo e camada aderente, as seguintes medidas indiretas (SANTOS, 2018) permitem análise qualitativa:

- $\sum A_{CA} / \sum A_{QP}$ : Proporção relativa entre as áreas de camada aderente e quasipartículas;
- $\sum(A_{QP} \times I M_{CA}) / \sum A_{QP}$  [mm]: uniformidade da espessura da camada aderente obtida pelo mapa de distâncias euclidianas (PACIORNIK; MAURICIO, 2004) da camada aderente;
- $\sum I M_{CA} / n$  [mm]: Espessura média da camada aderente.

Existem desafios já mapeados ao se utilizar a microscopia ótica e análise de imagens para avaliar matérias-primas, microaglomerados e aglomerados de minério de ferro. Como exemplo de estudo, a sílica contida na mistura geralmente possui refletância similar à da resina, sendo difícil distingui-la. Desta forma, técnicas tradicionais de processamento de imagens não costumam ser suficientes para realizar a correta identificação, classificação ou quantificação. A utilização de técnicas de aprendizado de máquina, ou *machine learning*, tem sido fundamental para a realização da distinção entre resina e quartzo (IGLESIAS; SANTOS; PACIORNIK, 2019).

Coprodutos são materiais que já sofreram a interferência de temperatura e atmosferas redutoras e/ou oxidantes, portanto, não é esperado que apresentem as

---

<sup>1</sup> Vamos utilizar o termo circularidade porque o parâmetro *Roundness* mede a similaridade de um objeto com um círculo. No entanto, não se deve confundir com o parâmetro conhecido como *Circularity*, que também mede similaridade com um círculo, mas que é sensível à irregularidade dos contornos do objeto. No contexto deste trabalho, a circularidade medida por *Roundness* representa melhor a variação do alongamento das partículas com relação a um círculo perfeito.

mesmas características das matérias-primas tradicionais alimentadas nos processos dos quais foram gerados, apesar de guardar relação. Devido à alta variabilidade presente nessas matérias-primas alternativas e complexidade, outros tipos de desafios podem surgir nas avaliações destes materiais. A avaliação de pseudopartículas contendo coprodutos tende a apresentar maior grau de complexidade se comparado com os matérias-primas tradicionais. Técnicas de *machine learning* podem se fazer necessárias para resolução de problemas de alta complexidade, como os possivelmente apresentados na avaliação de pseudopartículas contendo coprodutos.

*Deep learning*, ou aprendizado profundo, é uma subcategoria de *machine-learning*, ou aprendizado de máquina, que utiliza redes neurais artificiais para aprendizado a partir de uma base de dados e/ou imagens, com o objetivo de prever ou classificar alguma informação (SANTOS, 2022). Para casos de reconhecimento de macerais em carvões e caracterização de fases em pellet feed, variações das chamadas Redes Neurais Convolucionais (*Convolutional Neural Networks – CNN*) foram utilizadas com sucesso (CALDAS, 2023; CALDAS et al., 2023; SANTOS, 2022).

A CNN de arquitetura U-net, de formato U, que pode ser observada na Figura 17, foi desenvolvida inicialmente para segmentação de imagens. Ao utilizar essa arquitetura, a imagem passa essencialmente por duas macro etapas de processamento, que consistem em uma contração e *downsampling* para extrair informações relevantes por meio de etapas de convolução, funções de ativação e *maxpooling*, seguida de uma expansão e *upsampling* para reconstrução da imagem e associação das informações, por meio de etapas de concatenação dos mapas de atributos correspondentes da etapa de contração, convolução e funções de ativação (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2021). A etapa de convolução consiste em carregar as informações relevantes extraídas pelos filtros (*kernels*) gerados a partir da imagem de entrada para a próxima camada da rede (AZIMI et al., 2018). A função de ativação tem papel relevante nos cálculos de uma rede neural, pois determina a saída de um neurônio, após operações de somatório de estímulos e multiplicação por pesos (AMER, 2016). A etapa de *maxpooling* consiste no agrupamento de valores de uma região baseado no valor máximo, geralmente associado a variação de dimensão. Esta arquitetura pode aprender tarefas complexas

a partir de imagens e tem potencial de resolver problemas de reconhecimento e classificação.

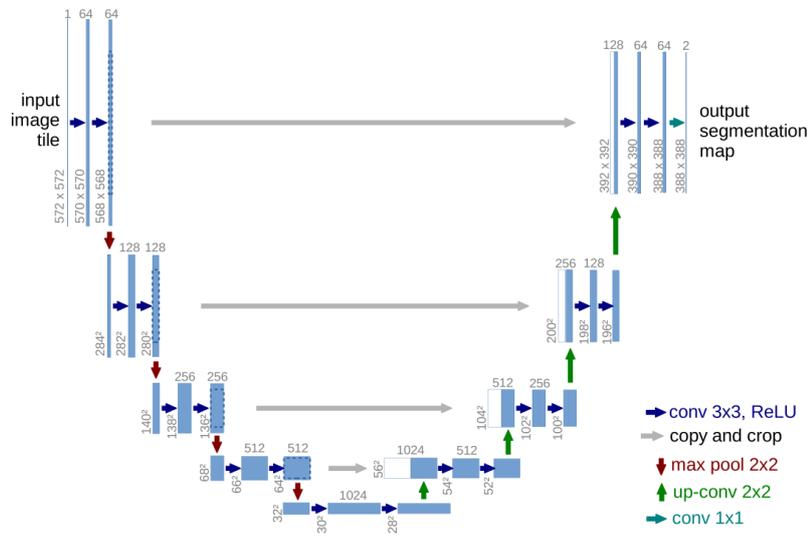


Figura 17: Arquitetura U-Net, adaptado de (RONNEBERGER; FISCHER; BROX, 2021)

A rede U-Net sofreu evoluções, como por exemplo a U-Net++ (ZHOU; SIDDIQUEE, 2018) observada na Figura 18, que pode apresentar melhores resultados em alguns tipos de análise. Algumas das grandes mudanças estão na adição dos blocos densos convolucionais e uma supervisão profunda. Esses blocos apresentam uma função que combina normalização, ativação por ReLU e convolução 3x3. As camadas adicionadas recebem não apenas informações do seu nível, mas também do anterior. A supervisão profunda ajuda a melhorar a precisão e a rapidez do modelo, uma vez que a média final é composta por todos os resultados do nível 0 e nem toda a ramificação é selecionada para *output*.

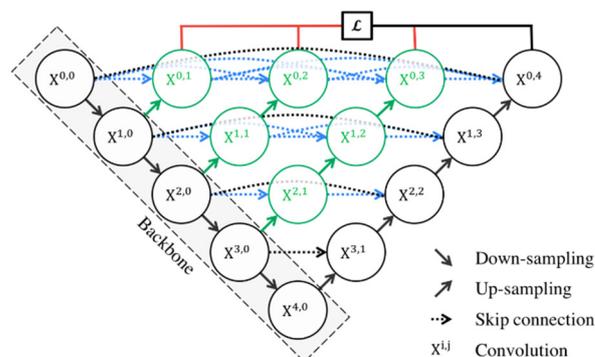


Figura 18: Arquitetura U-Net++, adaptado de (ZHOU; SIDDIQUEE, 2018)

Para utilização de uma rede neural, é necessário um conjunto de amostras representativo da classe selecionada, de modo a direcionar 75% para treinamento e 25% para teste. Para formação dessa amostra, busca-se realizar a seleção manual delineando objetos pertencentes a cada classe. Para isso, utiliza-se interfaces de desenho que permitem associar classes a cada fronteira fechada. Uma das interfaces mais utilizadas é a do programa VGG Image Annotator (DUTTA; ZISSERMAN, 2019), utilizado em algumas etapas do presente trabalho.

De acordo com o *ground truth* apresentado na Figura 19:

- Verdadeiro positivo (VP): o valor predito é igual ao valor real, definido no treinamento. Logo, a rede classificou corretamente como positivo;
- Falso positivo (FP): o valor predito é positivo, porém o valor real é negativo. Desta forma, a rede classificou incorretamente como positivo;
- Verdadeiro negativo (VN): a valor predito é igual ao valor real, definido no treinamento. Logo, a rede classificou corretamente como negativo;
- Falso negativo (FN): o valor predito é negativo, porém o valor real é positivo. Desta forma, a rede classificou incorretamente como negativo.

		Valor Real	
		Positivo	Negativo
Valor Predito	Positivo	VP	FP
	Negativo	FN	VN

Figura 19: Representação de uma matriz de confusão a partir do *ground truth*

Algumas das métricas que podem avaliar o sucesso do treinamento de uma rede neural são (SANTOS et al., 2022):

- *Precision*: mede os verdadeiros positivos em relação à soma de verdadeiros e falsos positivos, ou seja, todo o universo detectado como positivo no teste;
- *Recall*: mede os verdadeiros positivos em relação à soma de verdadeiros positivos e falsos negativos, ou seja, todo o universo determinado como positivo no treinamento;

- *F1-Score*: média harmônica entre *precision* e *recall*, calculada de acordo com a fórmula  $2 * ((precision * recall) / (precision + recall))$ .

Por meio dessa metodologia é possível realizar o treinamento e teste das classes pseudopartícula e núcleo. Caso os resultados apresentados pelas métricas e matriz de confusão sejam adequados, pode-se realizar pós processamento das pseudopartículas e núcleos reconstituídos em uma única imagem para reclassificá-las em quasipartículas, micropelotas e núcleo não aglomerado por meio de rotina similar à descrita no fluxograma da Figura 15. Desta forma, análises quantitativas e qualitativas podem ser obtidas.

### **3.2.6.3. Microtomografia computadorizada de raios-x e análise de imagens**

A microtomografia computadorizada de raios-x (MicroCT) pode ser considerada um tipo de microscopia, na qual é possível observar a estrutura 3D de materiais sólidos. Esta técnica é não destrutiva e requer pouca preparação de amostras. O processo de aquisição de imagem por MicroCT consiste na obtenção de diversas projeções em pequenos intervalos angulares por rotação da amostra dentro do tomógrafo e uma etapa de reconstrução da imagem 3D. O feixe incidente de raio-X sofre uma atenuação quando interage com a matéria, que é função da energia do feixe de raios-x e número atômico do material. A atenuação total pode ser definida pela soma dos coeficientes de atenuação por espalhamento, produção de pares e absorção. (AUGUSTO, 2016)

A partir dessa técnica, trabalhos complexos de caracterização de porosidade em pelotas de minério de ferro (AUGUSTO, 2016; AUGUSTO; PACIORNIK, 2018; SOUZA, 2018), de avaliação de danos na microestrutura de pasta de cimento (LORENZONI, 2017) e de avaliação de endurecimento de compósitos a base de cimentos utilizando *deep learning* (LORENZONI, 2021) foram realizados. Essa técnica, ainda pouco explorada pelo setor minero-metalúrgico, tem a capacidade de extrair informações relevantes, principalmente devido a tridimensionalidade de visualização.

## **4**

### **Materiais e Métodos**

Esse capítulo apresenta os materiais utilizados, as técnicas de caracterização utilizadas, a simulação da produção de sinter em escala piloto e a metodologia para avaliação de pseudopartículas e do sinter produto.

#### **4.1. Amostras**

As amostras das matérias-primas tradicionais e alternativas foram coletadas de uma usina integrada a coque para produção em escala piloto das amostras de *blend* de coprodutos e realização de simulação física da rota tambor+tambor em duas condições – sem e com coprodutos – com a consequente produção de pseudopartículas com e sem coprodutos e sinteres com e sem coprodutos, de acordo com a Figura 20.

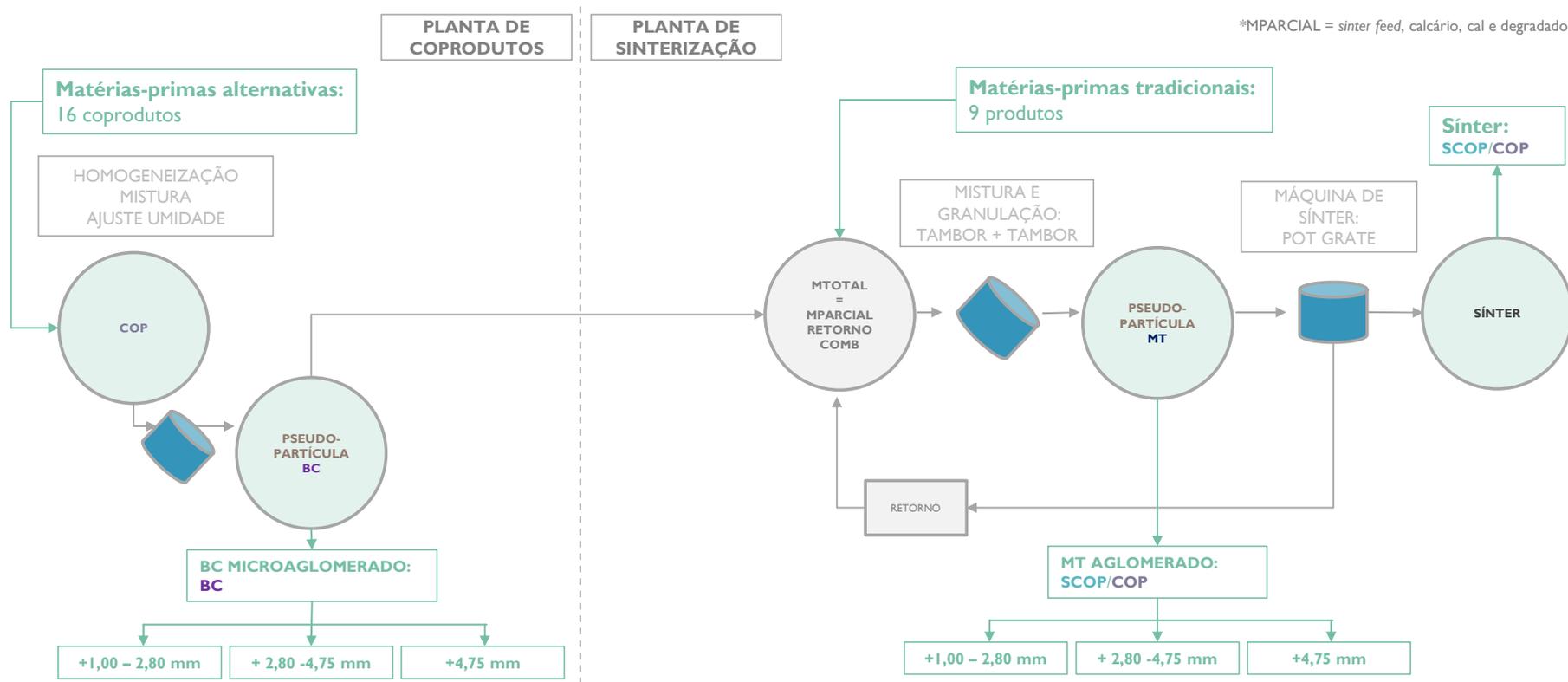


Figura 20: Amostras utilizadas e geradas em cada etapa dos processos piloto

#### 4.1.1. Matérias-primas tradicionais e alternativas

As matérias-primas tradicionais que compõem a mistura total a sinterizar, observadas na Tabela 2, foram cedidas e coletadas por uma usina integrada a coque.

Tabela 2: Identificação das matérias-primas tradicionais

MATÉRIAS-PRIMAS
SINTER FEED
CALCÁRIO
DOLOMITA
DEGRADADO 06/20
CAL VIRGEM
ANTRACITO BRITADO
COQUE FINO BRITADO
RETORNO

As amostras de coprodutos, matérias-primas alternativas, foram coletadas e cedidas pela mesma usina integrada de produção de aço. A Tabela 3, a seguir, identifica os coprodutos – pós e lamas.

Tabela 3: Identificação das matérias primas alternativas – coprodutos

COPRODUTOS
ÓXIDO DE FERRO LEVE (OFL)
ÓXIDO DE FERRO PESADO (OFP)
PRÉ-CAL (PC)
PÓ DE COLETOR DE AF (PCAF)
FM CASA DE ESTOCAGEM E AUX AF1 (FM1A)
FM CASA DE CORRIDA E TOPO AF1 (FM1B)
FM CASA DE ESTOCAGEM AF2 (FM2A)
FM CASA DE CORRIDA E TOPO AF2 (FM2B)
ÓXIDO DE FERRO DE LAMINAÇÃO PRIMÁRIA (OFLAM)
ÓXIDO DE FERRO PLATE (OFPLATE)
ÓXIDO DE FERRO STECKEL (OFSTECKEL)
ARGILA DE AF (ARGILAAF)
CAREPA DE SUCATA B (CAREPAB)
COPRODUTO INDUSTRIAL DA REDUÇÃO (CIR)

#### 4.1.2. Pseudopartículas em *Blend* de coprodutos obtidas em misturador

Os quinze coprodutos da Tabela 3 compõem uma mistura, *blend* de coprodutos (BC), produzida em misturador vertical de planta de coprodutos piloto,

de acordo com a Figura 21. Este *blend*, apresentado na Tabela 4, possui proporção fixa que foi definida em função de:

- Qualidade química e física dos coprodutos individuais;
- Qualidade química e física das matérias-primas tradicionais;
- Disponibilidade de volume das matérias-primas alternativas para alocação no blend, objetivando pelo menos 100% da geração;
- Qualidade final do blend de modo a maximizar o seu uso na mistura total a sinterizar.

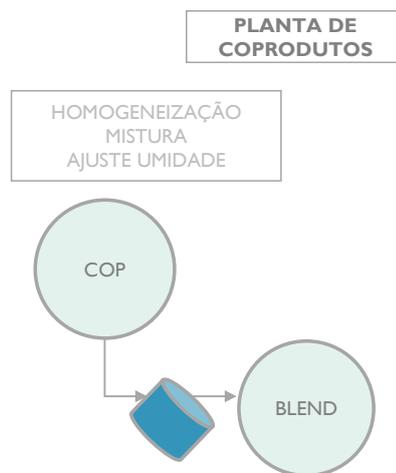


Figura 21: Planta de coprodutos em escala piloto

Tabela 4: Composição do *blend* de coprodutos (BC)

COPRODUTOS	PARTICIPAÇÃO (%)
OFL	42
OFP	10
PC	2
PCAF	6
FM 1A	2
FM 1B	1
FM 2A	2
FM 2B	1
OFLAM	1
OFPLATE	1
OFSTECKEL	1
ARGILA.AF	3
CAREPAB	7
CIR	21

O *blend* de coprodutos foi classificado em três faixas granulométricas, gerando as amostras com nomenclatura simplificada: BC +1,00, BC +2,80 e BC +4,75.

#### **4.1.3.Pseudopartículas em mistura total a sinterizar e sínteres produto**

Para produção das pseudopartículas e sínter produto, foi utilizada a rota de granulação tambor + tambor em escala piloto para produção de sínter.

Foram utilizadas as matérias-primas tradicionais da Tabela 2 e matérias-primas alternativas da Tabela 3 para produção em escala piloto de pseudopartículas com e sem adição do *blend* de coprodutos e consequentes sínteres produtos.

As pseudopartículas, sem e com adição de coprodutos, SCOP e COP, foram classificadas em três faixas granulométricas, gerando as amostras com nomenclatura simplificada:

- MT +1,00 SCOP, MT +2,80 SCOP e MT+4,75 SCOP;
- MT +1,00 COP, MT +2,80 COP e MT +4,75 COP.

Foi utilizada a rota de mistura e granulação HPS em escala piloto para produção de pseudopartículas que irão compor o banco de imagens de treinamento para avaliação microestrutural por redes neurais da rota de mistura e granulação tambor+tambor. As pseudopartículas, sem e com adição de coprodutos, SCOP e COP, foram classificadas em três faixas granulométricas, gerando as amostras com nomenclatura simplificada:

- HPS MT +1,00 SCOP, HPS MT +2,80 SCOP e HPS MT+4,75 SCOP;
- HPS MT +1,00 COP, HPS MT +2,80 COP e HPS MT +4,75 COP.

Os sínteres sem e com coprodutos, SÍNTER SCOP e SÍNTER COP, foram produzidos a partir da sinterização da mistura total composta pelas pseudopartículas MT SCOP e MT COP.

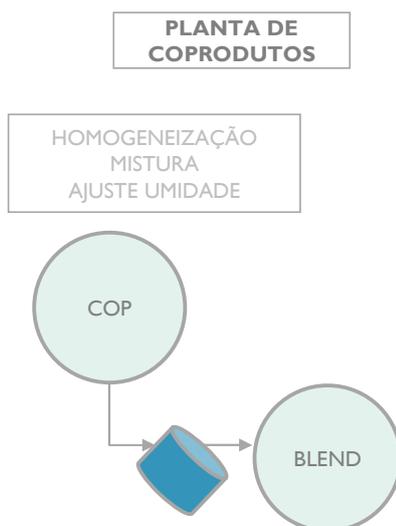
## 4.2. Métodos

### 4.2.1. Produção de pseudopartículas em *blend* de coprodutos e em mistura total a sinterizar e produção de síter produto em escala piloto

A produção das pseudopartículas foi realizada em duas plantas pilotos diferentes, sendo a do *blend* de coprodutos em planta de coprodutos e a da mistura total a sinterizar em planta de sinterização. A produção de síter produto também ocorreu na planta de sinterização.

#### 4.2.1.1. Produção de pseudopartículas em *blend* de coprodutos

Para a produção do *blend* de coprodutos utilizou-se um misturador vertical com ajuste de velocidade, umidade e tempo de mistura para a produção de pseudopartículas com P80 de 1,00 mm.



**Figura 22:** Planta piloto de coprodutos para produção de pseudopartículas em *blend* de coprodutos

#### 4.2.1.2. Produção de pseudopartículas em mistura total a sinterizar

Os materiais utilizados para compor a mistura total a sinterizar, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5: Balanço de massa para produção da mistura total a sinterizar

MATÉRIAS-PRIMAS (%)	SCOP	COP
SINTER FEED	50	47
CALCÁRIO	4	3
DOLOMITA	4	3
DEGRADADO 06/20	8	9
CAL VIRGEM	2	2
ANTRACITO BRITADO	2	1
COQUE FINO	2	1
<b>BLEND DE COPRODUTOS</b>	<b>0</b>	<b>6</b>
RETORNO	28	28

Para a queima em escala piloto, foram utilizadas as mesmas matérias-primas tradicionais da produção industrial e mesmo balanço de massa para fins comparativos. A adição do *blend* de coprodutos foi maximizada por substituição de matérias-primas tradicionais de modo apresentar qualidade química e física semelhante ao cenário SCOP e atender aos requisitos de qualidade da mistura total a sinterizar. Como a cal virgem atua como aglomerante no processo de sinterização, optou-se por manter no caso COP pelo menos o percentual utilizado em SCOP ao realizar o ajuste fino de CaO no balanço de massa.

Desta forma, o degradado 06/20 produzido em escala industrial foi utilizado como retorno dos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP) em escala piloto.

Para a produção da pseudopartícula a partir da mistura total, utilizou-se a rota de mistura e granulação tambor + tambor. Essa rota consiste na mistura em tambor misturador tipo betoneira a seco por 30 segundos e mistura a úmido por 4 minutos. Em seguida aguarda-se a hidratação da cal por 30 minutos com misturador parado. Por fim, é realizada mistura em tambor nodulizador tipo betoneira a seco por 30 segundos e a úmido por 4 minutos.

#### 4.2.1.3. Produção de síter produto

A mistura total a sinterizar, após passar por rota tambor + tambor foi carregada em panela para a produção de síter, de acordo com Figura 20.

O procedimento de queima prevê o atendimento das seguintes condições de processo:

- Depressão de ignição: 900 mmH<sub>2</sub>O;
- Depressão de sinterização: 1.450 mmH<sub>2</sub>O;
- Depressão de resfriamento: 700 mmH<sub>2</sub>O;
- Tempo de ignição: 1 min.;
- Massa de falsa grelha: 4,50 kg;
- Temperatura final de resfriamento: 90° C;
- Umidade da mistura a sinterizar: 8,00%.

Queimas comparativas são realizadas e aceitas quando os seguintes critérios de repetibilidade são atendidos:

- Umidade da mistura:  $\pm 0,2$  pontos percentuais em relação à umidade definida;
- Diferença entre o tempo de sinterização:  $\leq 5,0\%$ ;
- Balanço de síter retorno: 95,0% a 105%;
- Diferença entre a massa de mistura total seca carregada:  $\leq 2,0\%$

#### **4.2.2. Caracterização de pseudopartículas em *blend* de coprodutos e em mistura total a sinterizar e produção de sínter produto**

Para avaliação de forma integrada, as matérias-primas tradicionais, alternativas, *blend* de coprodutos, pseudopartículas e sínter produto foram caracterizados físico-quimicamente de modo individual, de acordo com a Figura 23.

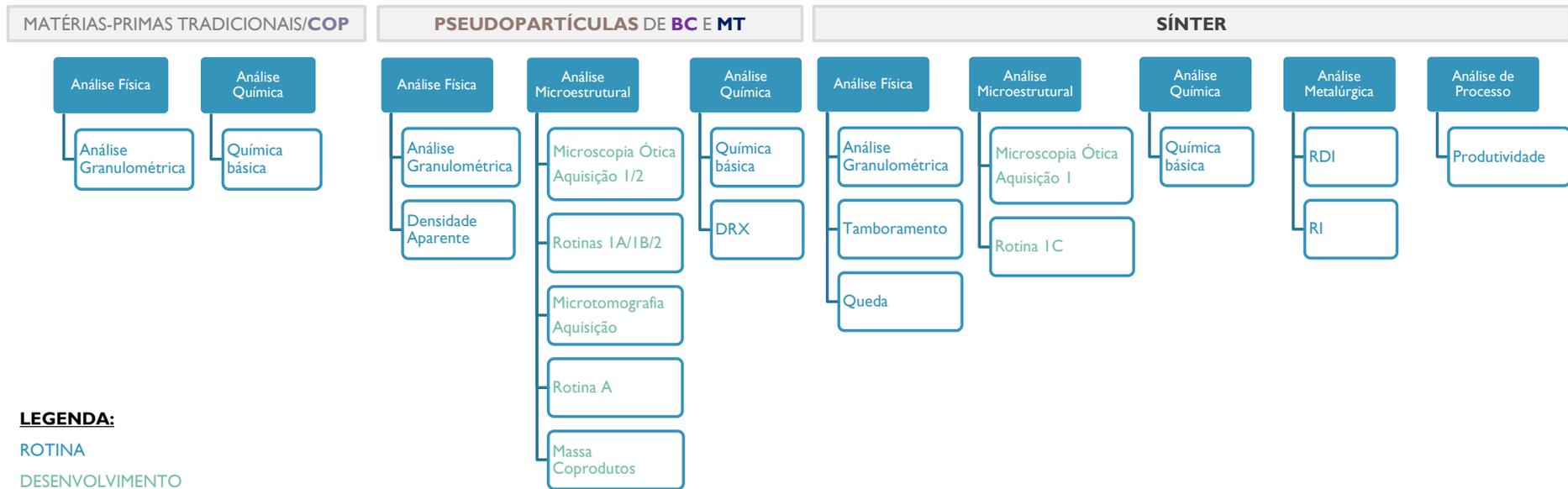


Figura 23: Métodos de caracterização e avaliação das matérias-primas tradicionais, alternativas, *blend* de coprodutos, pseudopartículas e sínter produto

#### 4.2.2.1. Análise física

Foram realizadas análises físicas nas amostras de matéria-prima tradicional, de matéria-prima alternativa, pseudopartículas de *blend* de coprodutos, pseudopartículas de mistura total a sinterizar e de sínter produto, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6: Análises físicas por produto

PRODUTOS	GRAN 1	GRAN 2	TAMBORAMENTO	QUEDA	DENSIDADE APARENTE
MATÉRIA-PRIMA TRADICIONAL	X				
MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA	X				
PSEUDOPARTÍCULAS DE <i>BLEND</i> DE COPRODUTOS	X				X
PSEUDOPARTÍCULAS DE MISTURA TOTAL A SINTERIZAR	X				X
SÍNTER		X	X	X	

Gran 1: ensaio de granulometria por peneiramento manual nas malhas de 9,51 mm, 8,00 mm, 6,35 mm, 4,76 mm, 2,83 mm, 2,00 mm, 1,00 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,149 mm, 0,125 mm, 0,105 mm, 0,063 mm, 0,044 mm e fundo.

Gran 2: ensaio de granulometria por peneiramento manual nas malhas de 50 mm, 25 mm, 10 mm, 5 mm e fundo.

Tamboramento: ensaio de acordo com a norma ISO3271:2007: *Iron ore for blast furnace and direct reduction feedstocks – Determination of the tumble and abrasion indices*. Este teste tem por objetivo prover uma medida relativa da resistência do sínter em relação à degradação por impacto e abrasão. Tem-se como resultado o índice de tamboramento ( $IT_{>6,3\text{mm}}$ ), que determina a fração que se mantém acima de 6,3 mm e o índice de abrasão ( $IA_{<0,5\text{mm}}$ ) que representa o ultrafino gerado.

Queda: ensaio de acordo com a norma JIS M 8711 – 1971: *Method for measuring the Shatter Strength of iron ore sinter*. Este teste tem por objetivo avaliar a resistência mecânica por queda em manuseio e transporte. Tem-se como resultado o índice de queda ( $ST_{>10\text{mm}}$ ) que apresenta a fração que se mantém acima de 10 mm.

Densidade aparente: ensaio por picnometria a hélio, modelo AccuPyc II 1340/Micromeritics, com 10 ciclos de purga, nas amostras BC +1,00 mm, BC +2,80 mm, MT +1,00 e MT +2,80, para a conversão de área de micropelotas de *blend* de coprodutos em massa de *blend* de coprodutos, de acordo como princípio da estereologia representado na Equação 22.

Equação 2: Percentual em massa do *blend* de coprodutos contido em micropelotas nucleantes de quasipartículas em mistura total a sinterizar

$$\%m_{MP} = \frac{\rho_{MP}}{\rho_{QP\&MP}} \times \frac{A_{MP}}{A_{QP\&MP}}$$

Onde,

$\%m_{MP}$ : Porcentagem em massa do *blend* de coprodutos contido em micropelotas, expresso em g;

$\rho_{MP}$ : Densidade aparente do *blend* de coprodutos que compõe as micropelotas, medida em  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho_{QP\&MP}$ : Densidade aparente das quasipartículas da mistura total a sinterizar, medida em  $\text{g/cm}^3$ ;

$A_{MP}$ : Área da micropelota de *blend* de coprodutos, medido em pixels;

$A_{QP\&MP}$ : Área das quasipartículas da mistura total a sinterizar, medido em pixels e calibrado para  $\text{cm}^2$ .

Somando-se os resultados de porcentagem em massa das granulometrias de +1,00 e +2,80 tem-se o percentual de adição de *blend* de coprodutos em forma de micropelotas visualizado e quantificado nas pseudopartículas da mistura a sinterizar MT +1,00 mm e MT +2,80 mm, como pode ser observado Equação 3.

Equação 3: Percentual em massa total das duas granulometrias avaliadas

$$\%m_{total} = \%m_{+1,00} + \%m_{+2,80}$$

#### 4.2.2.2. Análise química

Foram realizadas análises químicas nas amostras de matéria-prima tradicional, de matéria-prima alternativa, pseudopartículas de *blend* de coprodutos, pseudopartículas de mistura total a sinterizar e de sinter produto, de acordo com a

Tabela 7. Como critério de aceitação, o fechamento químico objetivado é de 100%  $\pm$  0,5%. Apenas os resultados válidos foram reportados.

Tabela 7: Análises químicas por produto

PRODUTOS	FeT	FeO	CaO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, MnT, P, TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O e ZnO	PPC	C	DRX
MATÉRIA-PRIMA TRADICIONAL	X		X		X		
MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA	X		X	X	X		
PSEUDOPARTÍCULAS DE BLEND DE COPRODUTOS	X		X	X	X	X	X
PSEUDOPARTÍCULAS DE MISTURA TOTAL A SINTERIZAR	X	X	X	X	X	X	X
SÍNTER	X	X	X	X	X		

Ferro total: ensaio por via úmida (ISO 2597-2:2006: *Iron ores — Determination of total iron content — Part 2: Titrimetric method after tin (II) chloride reduction*).

FeO: ensaio por via úmida (ISO 9035:1989: *Iron ores — Determination of acid-soluble iron (II) content — Titrimetric method*).

CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnT, P, TiO<sub>2</sub>: ensaio por ICP-OES 5100 DV Agilent (ISO 11535:2006: *Iron ores – Determination of various element – Inductively coupled plasma atomic emission spectrometric method*).

K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O e ZnO: ensaio por ICP-OES 5100 DV Agilent (ISO 11535:2006: *Iron ores – Determination of various element – Inductively coupled plasma atomic emission spectrometric method*).

PPC: ensaio em mufla (Avaliação de perda de massa após 60 minutos em temperatura de 1000°C).

C: ensaio por diferença C = 100 – Matéria volátil – Cinzas (Matéria volátil adaptada de NBR 8290/1983: Carvão Mineral – Determinação do teor de matérias voláteis; Cinzas adaptada de NBR 8289/1983: Carvão Mineral – Determinação do teor de cinzas), realizado em mufla.

Difração de raios-x (DRx): Os difratogramas foram obtidos pelo equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor, radiação de Cobalto K $\alpha$  a partir de pastilhas de pó prensadas. O software utilizado para análise dos difratogramas foi o Profex, versão

5.2, e aplicou-se o método de Rietveld para análises quantitativas. Essas análises foram necessárias para conhecimento dos compostos presentes nas pseudopartículas do *blend* de coprodutos e mistura total a sinterizar, sem e com coprodutos.

#### **4.2.2.3. Análise ambiental**

A análise ambiental segundo ABNT NBR 10004:2004 foi realizada nas amostras de matérias-primas alternativas – coprodutos – com o objetivo de obter a classificação dos coprodutos quanto a sua periculosidade;

- Classe IIA – não perigoso, não inerte;
- Classe IIB – não perigoso, inerte;
- Classe I – perigoso.

É necessário salientar que a definição de inerte para fins ambientais se restringe à avaliação de potabilidade da água, excetuando os parâmetros de cor e turbidez.

#### **4.2.2.4. Análise microestrutural por microscopia ótica**

Foram realizadas análises microestruturais nas amostras de pseudopartículas de *blend* de coprodutos, pseudopartículas de mistura total a sinterizar e de sinter produto. Foram realizadas capturas de imagens por microscopia ótica. As imagens foram analisadas utilizando rotinas que serão detalhadas a seguir.

Para a análise microestrutural por microscopia ótica, as pseudopartículas de *blend* de coprodutos classificados, as pseudopartículas de mistura total a sinterizar classificadas e o sinter produto foram embutidos em resina EpoFix/Struers. Os embutimentos foram desbastados e polidos em politriz automática Struers Tegramin 20 para permitir a observação e a aquisição de imagens em microscópio ótico Axio Imager.M2, em campo claro de luz refletida, câmera AxioCamMR5. As metodologias utilizadas estão indicadas na Tabela 8.

Tabela 8: Análise microestrutural por microscopia ótica

PRODUTOS	Aquisição 1	Rotina 1A	Rotina 1B	Rotina 1C	Aquisição 2	Rotina 2A
PSEUDOPARTÍCULAS DE BLEND DE COPRODUTOS		X	X		X	
PSEUDOPARTÍCULAS DE MISTURA TOTAL A SINTERIZAR	X	X	X		X	X
SÍNTER	X			X		

Os fluxos de aquisição de imagens em microscopia ótica de pseudopartículas e de sinter e rotinas de processamento digital de imagens estão representados nas Figura 24 e Figura 25.

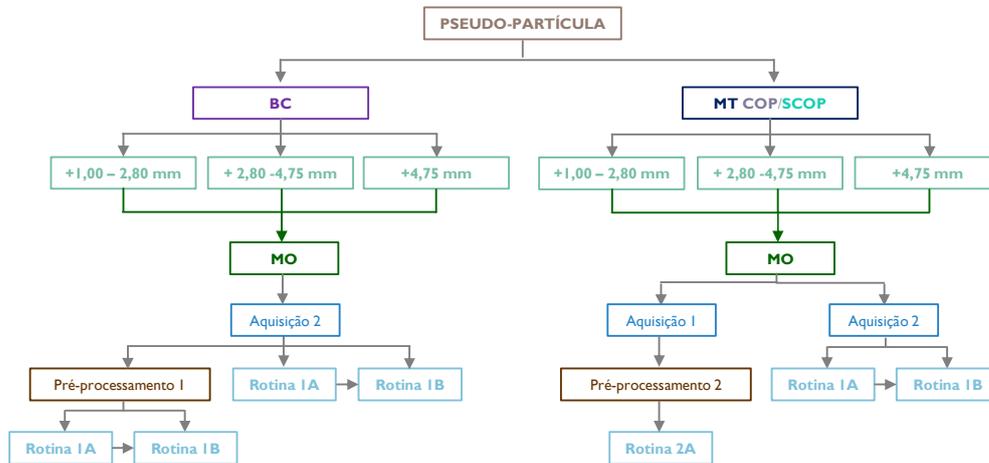


Figura 24: Desenho esquemático do fluxo de aquisição de imagens em microscopia ótica de pseudopartículas e rotinas de processamento digital de imagens



Figura 25: Desenho esquemático do fluxo de aquisição de imagens em microscopia ótica de sinter e rotinas de processamento digital de imagens

#### 4.2.2.4.1. Condições de Aquisição de Imagens

- Aquisição 1:

A lente objetiva EC Epiplan-Neofluar de 10x/0.2 HD M27, abertura numérica de 0,2, foi utilizada para aquisição e posteriormente a concatenação de imagens foi

realizada em forma de mosaico de dimensões 27.442 x 27.685 pixels, resolução espacial de 1  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$  e resolução digital de 759, 73 megapixels.

- Aquisição 2:

A lente objetiva EC Epiplan-Neofluar de 20x/0.5 DIC M27, abertura numérica de 0,9 foi utilizada para aquisição e posteriormente a concatenação de imagens foi realizada em forma de mosaico de dimensões 55.039 x 55.176 pixels, resolução espacial de 0,52  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$  e resolução digital de 3.036, 83 megapixels.

#### 4.2.2.4.2. Rotinas de Processamento e Análise de Imagens

- Pré-processamento 1:

Foi realizada a identificação manual das pseudopartículas provenientes do *blend* de coprodutos, identificando e classificando-as em quasipartículas, micropelotas e núcleo não aglomerado.

- Rotina 1A:

A rotina automática foi elaborada pela PUC-Rio em parceria com Vale (SANTOS, 2018) em FIJI/ImageJ, versão 1.53 t, e adaptada para a condição da atual pesquisa para a identificação de quasipartículas, micropelotas e núcleo não aderido.

Para as pseudopartículas provenientes da mistura total a sinterizar e *blend* de coprodutos foram realizadas medidas a partir das amostras sem e com coprodutos, para as três faixas granulométricas. Os resultados foram avaliados qualitativamente e quantitativamente.

Adicionalmente, para o *blend* de coprodutos foram utilizadas as pseudopartículas classificadas na etapa de pré-processamento, nas três faixas granulométricas. Desta forma, avaliou-se o comportamento da rotina para cada classe isoladamente e comparou-se os resultados.

Os principais parâmetros avaliados na rotina automática foram:

- Classificação de pseudopartículas em micropelotas, quasipartículas e núcleo não aglomerado;
- A, Feret e *Roundness* das quasipartículas;

- Medidas diretas e indireta de camada aderente em quasipartículas:
- Apresentação visual de quasipartículas, micropelotas e núcleos não aglomerados.
- Avaliação qualitativa subjetiva em quasipartículas, micropelotas e núcleos não aglomerados.

- Rotina 1B:

Esta rotina foi necessária para complementar e comparar resultados que foram obtidos via rotina 1A, também em FIJI/ImageJ, versão 1.53 t. Para avaliação das micropelotas, foram utilizadas as imagens das partículas de micropelotas geradas pela rotina 1A para medição dos seguintes parâmetros:

- A, %A, Feret, *Roundness* das micropelotas;

Adicionalmente, para o *blend* de coprodutos foram utilizadas as imagens de micropelotas geradas na etapa de pré-processamento 1 para medição dos seguintes parâmetros:

- A, Feret e *Roundness* das quasipartículas e micropelotas;
- Avaliação qualitativa subjetiva em quasipartículas e micropelotas.

- Rotina 1C:

Foi desenvolvida uma rotina para avaliação da porosidade do sínter utilizando segmentação por limiarização, operações morfológicas e matemáticas, além da extração de atributos. Foram necessárias as seguintes etapas:

- Segmentação por limiarização da região sólida do sínter, excluindo pixels correspondentes ao fundo externo e resina para obtenção de uma imagem binária;
- Utilização de ferramenta manual para fechamento de poros internos, porém abertos na periferia do sínter;
- Operação de fechamento de buracos (*Fill Holes*) para obter o sínter sólido e poros internos fechados em uma única imagem binária;
- Operação de diferença para obtenção de uma imagem binária contendo todos os poros internos do sínter.

Foram realizadas medições dos seguintes parâmetros a partir da imagem binária contendo os poros internos do síter:

- A, Feret e *Roundness* dos poros.

Desta forma, foi possível realizar uma análise qualitativa e quantitativa da distribuição de tamanho e forma dos macroporos e microporos do síter.

- Pré-processamento 2:

Foi realizada a identificação manual das pseudopartículas e dos núcleos em VGG Image Annotator, versão 2.0.12, para três faixas granulométricas, +1,00 mm, +2,80 mm e +4,75 mm, das amostras de mistura total a sinterizar, sem e com coprodutos, das rotas HPS e tambor+tambor.

- Rotina 2A:

A rotina de classificação foi elaborada pela equipe do Grupo de Microscopia Digital e Análise de Imagens do Deqm PUC-Rio de modo exploratório. Consiste em três macro etapas:

- Pré-processamento 2;
- Etapas de treinamento e teste da rede utilizando a arquitetura U-Net++ no software Dragonfly Pro Workstation, build 1399. Parte do grupo de imagens da rota de mistura HPS (SCOP + COP) e da rota tambor + tambor (SCOP + COP) foi utilizado para compor o banco de imagens para treinamento, representando 75% das imagens. A outra parte do grupo de imagens da rota de mistura HPS (SCOP + COP) e da rota tambor + tambor (SCOP + COP) foi utilizado para compor o banco de imagens para teste, representando 25% das imagens.
- Pós processamento em FIJI/ImageJ, para classificação de pseudopartículas e núcleos em quasipartículas, micropelotas e núcleos não aglomerados.

Essa metodologia avaliou a classificação em pseudopartícula e núcleo. As métricas que avaliam o sucesso do treinamento são: *Precision*; *Recall*; *F1-Score*. Foi realizado pós processamento em FIJI/ImageJ, versão 1.53 t, para classificação

de pseudopartículas e núcleos em quasipartículas, micropelotas e núcleo não aglomerado.

#### 4.2.2.5. Análise microestrutural por microtomografia de raios-x

Para a análise microestrutural de imagens de microtomografia computadorizada, foi realizado um exploratório apenas nas amostras de *blend* de coprodutos (BC), mistura total sem coprodutos (MT SCOP) e mistura total com coprodutos (MT COP) na granulometria +2,80 mm. As metodologias utilizadas estão indicadas na Tabela 9.

Tabela 9: Análises microestruturais por microtomografia computadorizada

PRODUTOS	Aquisição	Rotina A
PSEUDOPARTÍCULAS DE BLEND DE COPRODUTOS	X	X
PSEUDOPARTÍCULAS DE MISTURA TOTAL A SINTERIZAR (SCOP/COP)	X	X

Os fluxos de aquisição de imagens em microtomografia de pseudopartículas e rotinas de processamento digital de imagens estão representados na Figura 26.

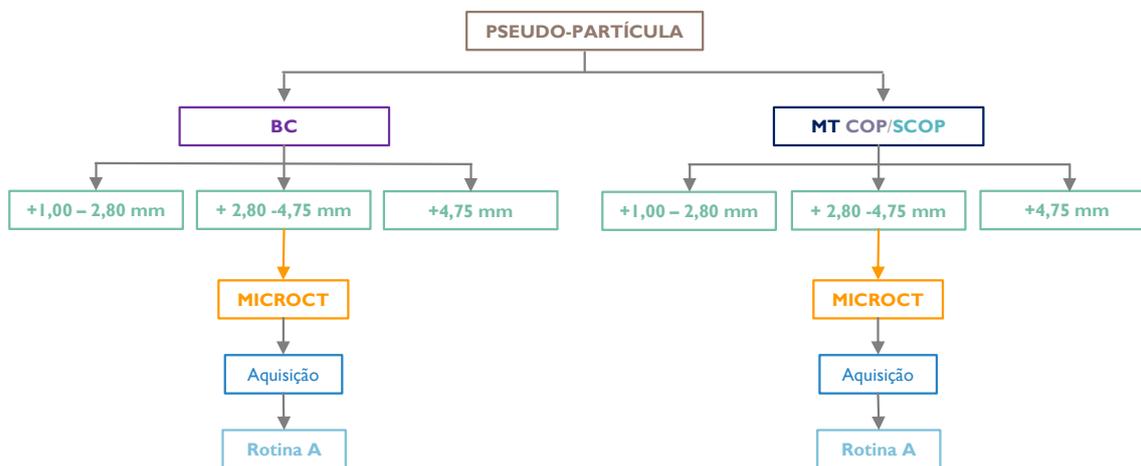


Figura 26: Desenho esquemático do fluxo de aquisição de imagens em microscopia ótica de pseudopartículas e rotinas de processamento digital de imagens

##### 4.2.2.5.1. Condições de Aquisição de Imagens

Foi utilizado o software Scout&Scan™ Control System 16.0 para controle do microtomógrafo (microCT) VERSA 510 XRadia, da Zeiss. O módulo de

reconstrução foi o Scout&Scan™ Control System Reconstructor 16.0. As condições de captura de todas as amostras avaliadas seguem o padrão apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Condições de captura em microCT

TEMPO DE CAPTURA (h)	LENTE MACRO (X)	VOLTAGEM (kV)   POTÊNCIA (W)	NÚMERO DE PROJEÇÕES	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (s) / PROJEÇÃO	ÂNGULO DE VARREDURA (°)	FILTRO	CAMERA BINNING	TAMANHO DO PIXEL (µm)
1,50	0,4	140 10	1441	2,00	360	HE2	2	10

#### 4.2.2.5.2. Rotinas de Processamento e Análise de Imagens

- Rotina A:

As imagens foram processadas no software Dragonfly Pro Workstation, build 1399 para avaliação qualitativa. Foi realizado processo de segmentação por limiarização para separação das seguintes estruturas:

- Ferro metálico: correspondente aos pixels mais brilhantes da imagem;
- Núcleos: correspondente aos tons intermediários da faixa tonal;
- Camada aderente/micropelota: correspondente aos pixels mais escuros, excetuando os pixels de fundo.

Os histogramas foram visualizados em escala logarítmica para facilitar a visualização dos picos e vales para escolha dos melhores tons de corte para cada imagem. Foram utilizados os recursos de tabela de cor para representação visual das fases segmentadas, sendo o ferro metálico apresentado em amarelo, núcleos em vermelho e camada aderente/micropelotas em verde.

Por definição, as micropelotas não possuem núcleos em seu interior. Desta forma, as micropelotas e quasipartículas podem ser diferenciadas quando apresentadas as representações gráficas simultâneas de núcleos e camada aderente/micropelotas.

#### 4.2.2.6. Análise metalúrgica

Foram realizadas análises metalúrgicas de RDI e RI do sínter, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP).

RI: ensaio de acordo com a norma ISO7215:2007: Iron ores for blast furnace feedstocks – Determination of the reducibility by the final degree of reduction index. Este teste tem por objetivo mensurar a quantidade de oxigênio removido do sinter quando reduzido em condições semelhantes à da zona seca do alto-forno. O índice RI mede o grau de redução após 180 minutos em atmosfera redutora.

RDI: ensaio de acordo com a norma ISO4696-2:2007: Iron ores for blast furnace feedstocks – Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method – Part 2: Reduction with CO and N<sub>2</sub>. Este teste tem por objetivo avaliar o grau de degradação do sinter quando submetido à atmosfera redutora simulando a zona seca do alto-forno. O índice RDI (RDI <2,8mm) mede a quantidade de finos gerado na fração menor do que 2,8 mm.

#### **4.2.2.7. Análise de processo**

Além dos critérios de aceitação para validação de queima, a produtividade, medida em t.m<sup>3</sup>/dia, é uma informação relevante que pode ser extraída da simulação física em escala piloto. Este parâmetro indica o desempenho da máquina de sinterização em escala piloto nas condições sem e com coprodutos. Como a condição sem coprodutos reproduz as condições industriais de uma máquina de sinterização em escala piloto, é possível aplicar um fator de escala para simular também o desempenho em escala industrial da condição com coprodutos.

## 5 Resultados e Discussão

Esse capítulo apresenta os resultados e discussão das caracterizações das matérias-primas tradicionais e alternativas, do processo de produção e caracterizações das pseudopartículas do *blend* de coprodutos, mistura total a sinterizar e sínter produto.

### 5.1. Matérias-primas tradicionais e alternativas

Foram realizadas análises física e química das matérias-primas tradicionais e análises física, química e ambiental das matérias-primas alternativas.

#### 5.1.1. Análise ambiental

Para fins legais, é necessária a realização da análise ambiental para armazenamento, manuseio e utilização dos coprodutos. Desta forma, foram realizadas as análises ambientais de todos as matérias-primas alternativas que avaliadas no trabalho, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11: Classificação ambiental dos coprodutos

COPRODUTOS	CLASSIFICAÇÃO
OFL	IIA
OFP	IIA
PC	IIA
PCAF	IIA
FM1A	IIA
FM1B	IIA
FM2A	IIA
FM2B	IIA
OFLAM	IIA
OFPLATE	IIA
OFSTECKEL	IIA
ARGILAAF	IIA
CAREPAB	IIA
CIR	IIA

A análise ambiental indicou que todos os coprodutos são não perigosos e não inertes. Como consequência, qualquer processo de sinterização licenciado para uso de resíduos classe II pode absorver o *blend* de coprodutos em sua operação. Desta forma, foi possível realizar os testes em escala piloto da mistura total a sinterizar com coprodutos (COP) e em trabalhos futuros poderá ser realizado também um *trial* industrial.

### 5.1.2. Análise física

Foram realizadas análises físicas das matérias-primas tradicionais e alternativas. A análise granulométrica das matérias-primas tradicionais pode ser visualizada na Tabela 12.

Tabela 12: Análise granulométrica das matérias-primas tradicionais

TRADICIONAIS \ (%)	> 6,30mm	> 1,00mm	< 1,00 > 0,150	< 0,150mm
SINTER FEED	6,81	37,73	32,67	29,60
CALCÁRIO	0,52	23,84	67,61	8,56
DOLOMITA	0,17	47,49	12,98	39,53
DEGRADADO 06/20	13,80	47,13	14,20	38,66
CAL VIRGEM	0,00	4,36	21,74	73,89
ANTRACITO BRITADO	0,00	1,90	79,09	19,01
COQUE FINO BRITADO	0,00	1,51	77,20	21,29
SIMULAÇÃO SCOP	8,45	38,90	28,12	32,98
SIMULAÇÃO COP (SEM MICROAGLOMERAÇÃO)	8,33	38,14	27,29	34,57
SIMULAÇÃO COP (COM MICROAGLOMERAÇÃO)	8,36	39,98	28,14	31,88

A rota de granulação usualmente admite cerca de 30% a 40% finos na faixa <0,150m, portanto, as matérias-primas individuais são avaliadas para que seja realizado balanço de finos da mistura total a partir do balanço químico. De acordo com a caracterização granulométrica, percebe-se o afinamento do *sinter feed*. No entanto, a simulação de SCOP indica que as matérias-primas tradicionais possuem distribuição granulométrica compatível com o processo de sinterização.

A análise granulométrica das matérias-primas alternativas pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13: Análise granulométrica das matérias-primas alternativas

COPRODUTOS \ (%)	> 6,30mm	> 1,00mm	< 1,00 > 0,150mm	< 0,150mm
OFL	0,00	13,83	17,43	68,74
OFP	0,00	2,50	64,60	32,90
PC	0,00	0,10	43,00	56,90
PCAF	0,00	3,80	41,80	54,40
FM1A	0,00	0,00	8,22	91,78
FM1B	0,00	0,00	14,90	85,11
FM2A	0,00	0,17	16,35	83,47
FM2B	0,00	0,90	11,71	87,39
OFLAM	0,00	71,95	28,04	0,00
OFPLATE	0,00	11,86	62,41	25,72
OFSTECKEL	0,00	5,08	94,66	0,24
ARGILAAF	0,00	2,40	6,20	91,40
CAREPAB	6,40	47,40	41,30	11,30
CIR	0,00	46,25	30,32	23,43
<b>SIMULAÇÃO BC (SEM MICROAGLOMERAÇÃO)</b>	<b>2,44</b>	<b>20,00</b>	<b>28,28</b>	<b>51,72</b>

Em geral, as matérias-primas alternativas possuem maior percentual de finos na granulometria < 0,150 mm, se comparado com as matérias-primas tradicionais. A distribuição granulométrica das matérias-primas alternativas que compõem o *blend* de coprodutos apresenta 51,72% < 0,150 mm e 20,00% > 1,00 mm. Essa quantidade de finos pode impactar negativamente o processo de sinterização na rota tambor+tambor, uma vez que não admite um alto percentual de finos na mistura total a sinterizar.

Simulando-se e comparando as análises granulométricas para os cenários SCOP, COP sem microaglomeração e COP com microaglomeração, pode-se avaliar também o impacto dos finos com a inserção de coprodutos, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 12.

O percentual de finos <0,150 mm esperado das matérias-primas do cenário SCOP é cerca de 32,98%, do cenário COP sem microaglomeração é cerca de 34,57% e do cenário COP com microaglomeração é cerca de 31,88%, com potencial de atuação como camada aderente no processo de granulação. Cerca de 38,90% das partículas provavelmente atuam como nucleantes no cenário SCOP, 38,14% no cenário COP sem microaglomeração e 39,98% no cenário COP com aglomeração por estarem na fração >1,00mm e <6,3 mm.

Nota-se que a distribuição granulométrica de ambos os cenários SCOP e COP com microaglomeração é similar, com tendência de comportamento parecido no processo de granulação. No entanto, observa-se que a adição de apenas cerca de 6% de coprodutos sem microaglomeração impacta principalmente no aumento de finos destinados a formação da camada aderente.

Portanto, o *blend* passou por um processo de homogeneização, ajuste de umidade e microgranulação para adição no processo de sinterização, de modo a minimizar os impactos no processo de aglomeração a quente causados pela granulometria.

### 5.1.3. Análise química

Foram realizadas análises químicas das matérias-primas tradicionais, de acordo com a Tabela 14. A análise individual é fundamental para realizar o balanço químico com o objetivo de atender aos requisitos de qualidade do sinter produto.

Tabela 14: Análise química das matérias-primas tradicionais

TRADICIONAIS\(\%)	FeT	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O	MgO	Mn	P	TiO <sub>2</sub>	FeO	PPC	CF
SINTER FEED	63,87	0,03	7,01	0,40	0,08	0,32	0,027	0,025	5,03	1,08	NA
CALCÁRIO	0,48	52,70	2,43	0,51	0,49	0,03	0,026	NA	NA	43,09	NA
DOLOMITA	2,79	29,10	3,36	0,22	19,44	0,38	0,000	NA	NA	43,02	NA
DEGRADADO 6/20	55,75	9,15	6,78	2,09	1,48	0,77	0,062	NA	NA	NA	NA
CAL VIRGEM	NA	86,01	1,61	0,41	0,49	NA	0,115	NA	NA	8,45	NA
ANTRACITO BRITADO	0,00	0,34	5,01	1,58	0,16	NA	NA	0,152	NA	NA	87,92
COQUE FINO BRITADO	0,80	0,18	3,82	2,27	0,16	NA	0,068	0,083	NA	NA	88,27
SIMULAÇÃO SCOP	52,38	8,70	6,38	1,06	1,29	0,45	0,041	0,016	-	4,18	2,91
SIMULAÇÃO COP	52,80	8,56	6,27	1,09	1,32	0,50	0,043	0,019	-	4,05	2,52

Como as matérias-primas definidas para uso em escala piloto foram coletadas de pilhas destinadas ao processo industrial de sinterização, as análises químicas das matérias-primas tradicionais foram realizadas apenas para verificação se a amostragem foi representativa do lote.

Foram realizadas análises químicas das matérias-primas alternativas, de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15: Análise química das matérias-primas alternativas

COPRODUTOS \ (%)	FeT	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnT	P	TiO <sub>2</sub>	FeO	PPC	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO
OFL	50,36	12,26	1,46	0,14	2,69	1,53	0,080	0,020	4,75	9,13	0,053	0,001	0,024
OFP	44,28	22,00	6,05	0,77	4,24	1,64	0,062	0,060	NA	0,00	0,09	0,02	0,04
PC	0,28	58,00	1,04	0,40	0,31	0,01	0,268	0,000	NA	36,70	0,010	0,100	0,010
PCAF	28,05	2,39	6,43	2,70	0,30	0,18	0,040	0,150	NA	45,60	0,050	0,280	0,260
FM1A	51,38	10,51	7,74	2,07	1,61	0,97	0,058	0,108	3,20	2,61	0,026	0,001	0,013
FM1B	63,46	0,32	0,74	0,01	0,12	0,80	0,063	0,029	13,78	5,01	0,001	0,001	0,162
FM2A	51,79	10,01	7,63	1,80	1,68	0,99	0,053	0,103	3,16	2,84	0,001	0,630	0,014
FM2B	59,95	1,00	3,96	0,75	0,30	0,80	0,065	0,051	11,71	4,94	0,001	0,630	0,070
OFLAM	60,85	0,30	0,87	0,47	0,15	0,72	0,110	0,015	39,25	5,43	0,001	0,001	0,140
OFPLATE	61,57	2,22	1,38	0,13	0,11	0,62	0,077	0,033	51,80	1,29	0,001	0,001	0,021
OFSTECKEL	63,17	0,31	0,48	0,02	0,12	0,49	0,047	0,003	71,67	0,01	0,001	0,001	0,017
ARGILAAF	29,03	1,86	8,39	3,69	0,41	0,00	0,066	0,180	NA	38,50	0,250	0,390	1,170
CAREPAB	66,31	1,57	1,57	0,42	0,51	0,53	0,031	0,030	NA	0,00	0,070	0,020	0,010
CIR	50,64	6,66	6,02	1,87	1,29	0,57	0,046	0,123	4,19	10,02	NA	NA	NA
<b>SIMULAÇÃO BC</b>	<b>48,57</b>	<b>10,65</b>	<b>3,70</b>	<b>0,95</b>	<b>1,99</b>	<b>1,05</b>	<b>0,066</b>	<b>0,067</b>	<b>-</b>	<b>10,84</b>	<b>0,042</b>	<b>0,053</b>	<b>0,075</b>

A composição química das matérias-primas alternativas foi avaliada para definir a composição do *blend* de coprodutos, de acordo com a disponibilidade de volume e aderência aos requisitos de qualidade, e também a proporção do *blend* a ser testado na mistura total com granulação por rota piloto tambor + tambor. Os coprodutos de maior disponibilidade de volume, OFL, OFP e CIR, foram priorizados no balanço de massa. Estes, apesar de conter ferro total inferior a outros coprodutos, apresentam teores de MgO e CaO mais elevados, permitindo a retirada de matérias-primas tradicionais como calcário calcítico e dolomita do balanço da mistura total a sinterizar.

Nota-se que os altos valores de PPC na amostra de PCAF e ArgilaAF podem estar associados à presença de carbono fixo e matéria volátil, que não foram mensuradas pelas técnicas analíticas utilizadas na avaliação das matérias-primas. No entanto, o carbono fixo foi mensurado no *blend* de coprodutos microaglomerado, pois a sua presença nos coprodutos permite a retirada parcial de combustíveis da mistura total, para que não cause sobrequeima na etapa de aglomeração a quente.

## 5.2. Pseudopartículas em *blend* de coprodutos

Foram realizadas análises física, química e microestrutural do *blend* de coprodutos.

### 5.2.1. Análise física

A composição do *blend* de coprodutos produzido a partir das matérias-primas alternativas pode ser visualizada na Tabela 4.

O percentual foi definido a partir dos volumes disponíveis de cada um dos coprodutos, realizando os ajustes finos por balanço de massa de acordo com o convênio de qualidade estabelecido pelo alto-forno para consumo de sinter.

Foram realizadas análises físicas do *blend* de coprodutos granulado: análise granulométrica e densidade aparente. A análise granulométrica pode ser observada na Tabela 16.

Tabela 16: Análise granulométrica do *blend* de coprodutos não microaglomerado

PRODUTO \ (%)	> 6,30mm	> 1,00mm	< 1,00 > 0,150mm	< 0,150mm
BC	3,07	51,09	42,71	6,20

Nota-se que o processo de granulação do *blend* de coprodutos ocorreu com sucesso, uma vez que apresenta 93,80% > 0,150 mm. Cerca de 51,09% das partículas do *blend* de coprodutos tendem a atuar como partículas nucleantes durante o processo de granulação da mistura total com coprodutos (MT COP).

Ao ser inserido na rota de homogeneização e granulação tambor + tambor, o *blend* de coprodutos microaglomerado, na forma de micropelota, pode atuar como partícula nucleante para crescimento de uma quasipartícula ou ser destruído e passar a compor finos destinados à camada aderente de quasipartículas da mistura total a sinterizar. Já as quasipartículas do *blend* de coprodutos podem ter a camada aderente aumentada na rota de homogeneização e granulação tambor + tambor ou serem destruídas. Neste último caso, seus núcleos podem atuar como partículas nucleantes e seus finos podem atuar como camada aderente.

Apesar de conter um grande percentual de partículas na faixa intermediária, por se tratar de um microaglomerado e não partículas isoladas, o *blend* de coprodutos nessa faixa pode ter comportamento similar ao de uma partícula nucleante no processo de granulação da mistura total a sinterizar.

Para estimar a proporção em massa de micropelotas no *blend* de coprodutos que atuaram como partículas nucleantes de quasipartículas na mistura total a

sinterizar, foi realizado o ensaio de densidade aparente nas granulometrias +2,80 mm e +1,00 mm, de acordo com a Tabela 17.

Tabela 17: Densidade aparente do *blend* de coprodutos, nas granulometrias +2,80 mm e +1,00 mm

MT	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
BC +2,80 mm	3,9983
BC +1,00 mm	4,0097

As densidades de ambas as granulometrias apresentaram resultados próximos, não indicando concentração de algum coproduto em uma determinada granulometria. Os resultados de percentual em massa de micropelotas que atuam como partículas nucleantes de quasipartículas serão apresentados na seção 5.3.3.1.

## 5.2.2. Análise química

Foram realizadas análises química e de DRX do *blend* de coprodutos. A análise química do *blend* de coprodutos pode ser observada na Tabela 18.

Tabela 18: Análise química do *blend* de coprodutos

BC \ (%)	FeT	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O	MgO	Mn	P	TiO <sub>2</sub>	PPC	C	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO
BC	52,39	8,5	3,48	0,95	1,46	0,98	0,076	0,08	7,0	2,6	0,07	0,11	0,08

A química do *blend* apresenta resultados de qualidade ligeiramente superiores aos calculados por balanço de massa teórico programado para teste piloto, seguindo as maximizações das contribuições por volume disponível de cada matéria-prima alternativa e sinter produto, atendendo aos convênios de qualidade química do consumidor. Apesar de carbono fixo, cinzas e matéria volátil não terem sido avaliados para os coprodutos individuais, foi realizada a análise para o *blend* de coprodutos, uma vez que o carbono fixo contido contribui para o processo de queima, sendo necessário ajustar os combustíveis adicionados via matéria-prima tradicional para evitar sobre queima.

As análises de DRx do *blend* de coprodutos nas granulometrias de +1,00, +2,80 e +4,75 mm podem ser visualizadas na Figura 27, na Figura 28 e na Figura 29.

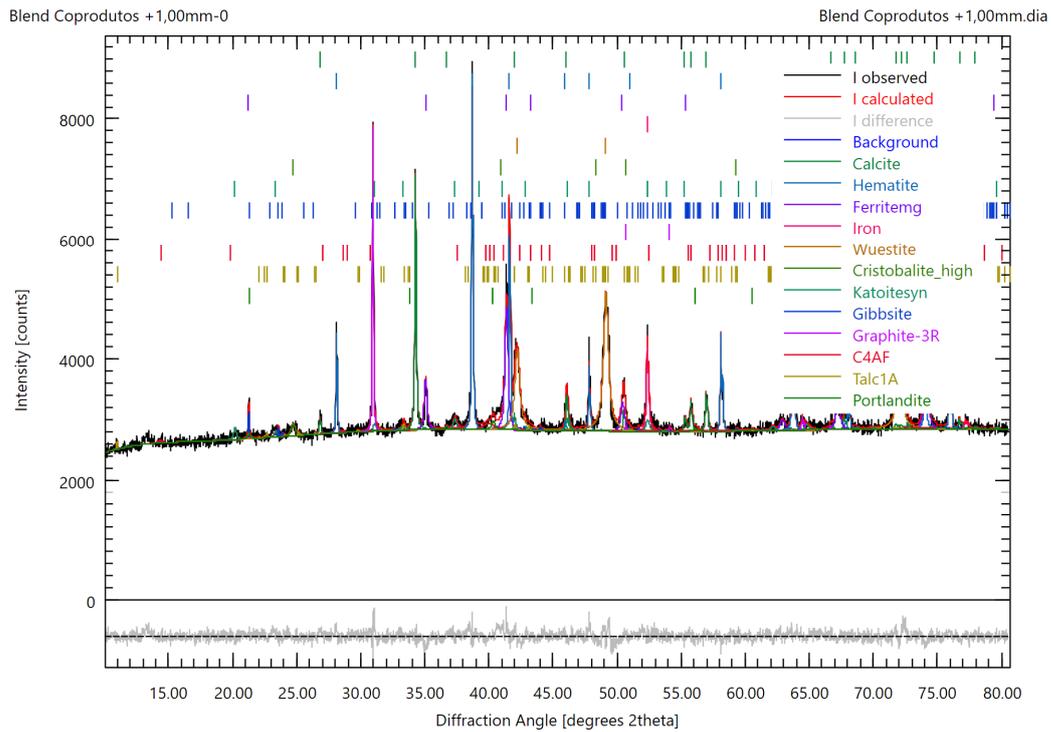


Figura 27: Difratoograma do *blend* de coprodutos na granulometria de +1,00 mm

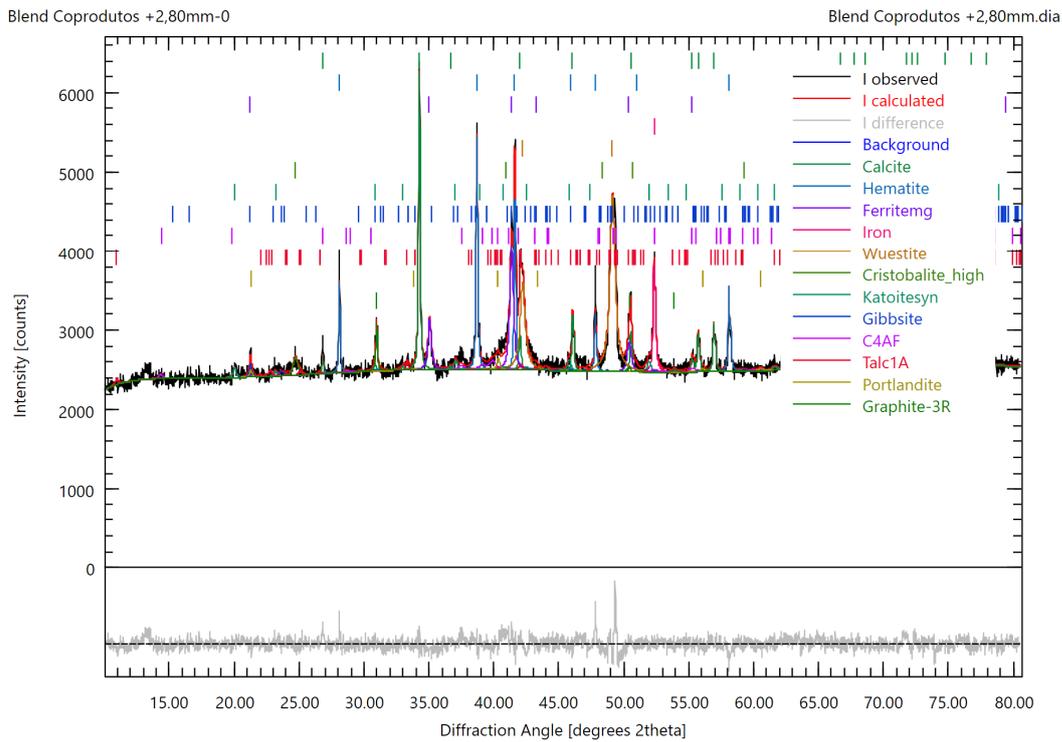


Figura 28: Difratoograma do *blend* de coprodutos na granulometria de +2,80 mm

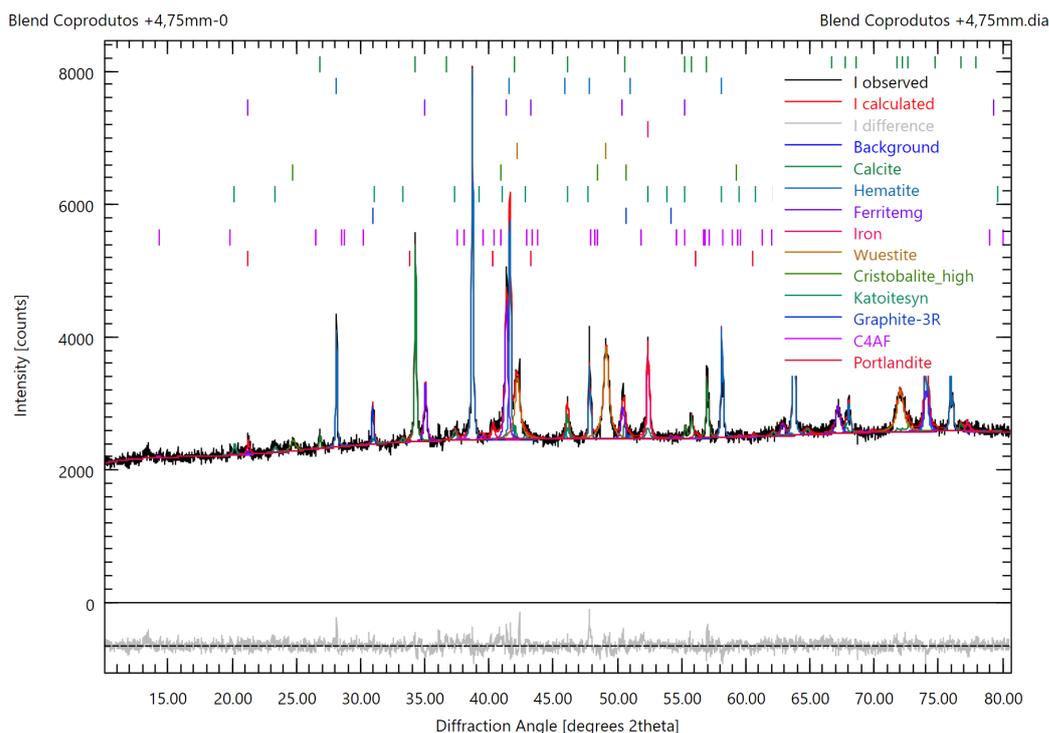


Figura 29: Difratoograma do *blend* de coprodutos na granulometria de +4,75 mm

Análises complementares podem ser realizadas para avaliar se o ajuste do difratograma foi adequado: barra de erro localizadas na região inferior de cada gráfico sem grandes desvios da linha de base e métricas de avaliação  $R_{wp} < 4$  e  $GoF < 1,7$  para considerar que foi realizado um bom ajuste. As barras de erro dos 3 difratogramas indicam que os ajustes não foram perfeitos, mas não se observa desvios relevantes. As métricas apresentadas na Tabela 19 indicam que os ajustes estão adequados. Desta forma, a análise quantitativa foi realizada a partir dos compostos identificados e suas respectivas proporções.

Tabela 19: Métricas de validação do ajuste dos difratogramas

BC	$R_{wp}$	GoF
+1,00 mm	2,41	1,3315
+2,80 mm	2,63	1,3770
+4,75 mm	2,54	1,3093

De acordo com a quantificação realizada a partir dos difratogramas da Figura 27, da Figura 28 e da Figura 29 apresentada na Tabela 19, a soma dos constituintes majoritários hematita ( $Fe_2O_3$ ), wustita ( $FeO$ ), calcita ( $CaCO_3$ ) e magnésio-ferrita ( $MgFe_2O_4$ ) respondem por cerca de 73 a 82% do total para as três granulometrias avaliadas. Observa-se a presença de constituintes de menor

proporção, como a C4AF ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), gibsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), grafite (C), ferro (Fe), Katoita ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_{1,5}(\text{OH})_6$ ), talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) e portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Tabela 20: Percentual dos constituintes presentes no blend de coprodutos nas granulometrias +1,00 mm, +2,80 mm e 4,75 mm

FASE	FÓRMULA	% em +1,00 mm	% em +2,80 mm	% em +4,75 mm
CALCITA	$\text{CaCO}_3$	15,50	20,29	19,26
MAGNÉSIO FERRITA	$\text{MgFe}_2\text{O}_4$	17,88	17,89	18,75
HEMATITA	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	19,39	14,38	26,27
WUSTITA	$\text{FeO}$	20,88	21,15	17,24
C4AF	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,04	3,73	1,51
CRISTOBALITA	$\text{SiO}_2$	1,89	2,47	2,03
GIBSITA	$\text{Al}(\text{OH})_3$	2,45	2,90	0,00
GRAFITE	C	7,27	4,30	3,54
FERRO	Fe	2,23	2,70	2,58
KATOITA	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_{1,5}(\text{OH})_6$	6,42	4,83	6,61
TALCO	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	1,78	4,17	0,00
PORTLANDITA	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	1,29	1,23	2,20

Ao realizar a quantificação elementar a partir da proporção entre os constituintes, nota-se que o percentual de ferro total varia de 39 a 44% de acordo com a granulometria, resultado inferior ao encontrado nos resultados anteriores de análise química encontrados na Tabela 18. Limitações como a de preparação adequada da pastilha para não ocorrer orientação preferencial, a cristalinidade do material que sofreu influência de atmosfera redutora, atmosfera oxidante e variação de temperatura, a heterogeneidade do material e a pequena proporção de alguns constituintes podem contribuir para falhas de quantificação.

### 5.2.3. Análise microestrutural

Foram realizadas análises microestruturais nas amostras de pseudopartículas de *blend* de coprodutos, nas granulometrias +1,00 e +2,80 mm. Foram realizadas capturas de imagens por microscopia ótica e por microtomografia de raios-x (microCT).

#### 5.2.3.1. Microscopia ótica

Imagens foram capturadas de acordo com a metodologia de aquisição 2 (vide Seção 4.2.2.4.1) e podem ser visualizadas na Figura 30.

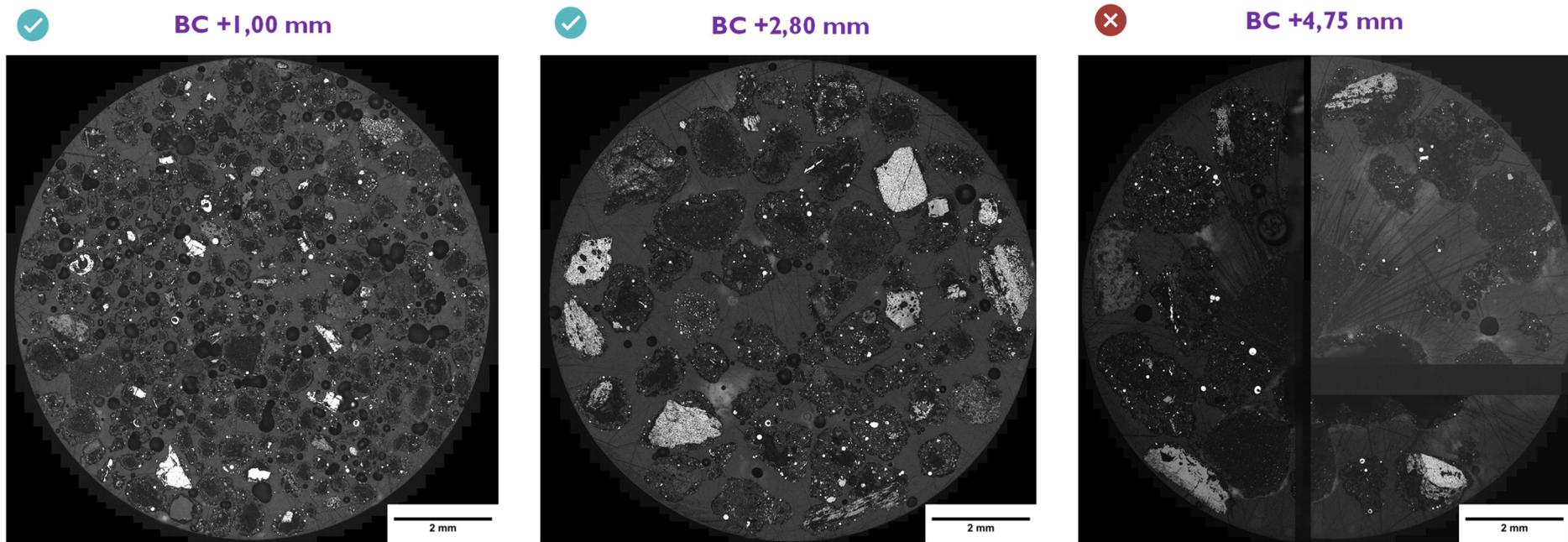
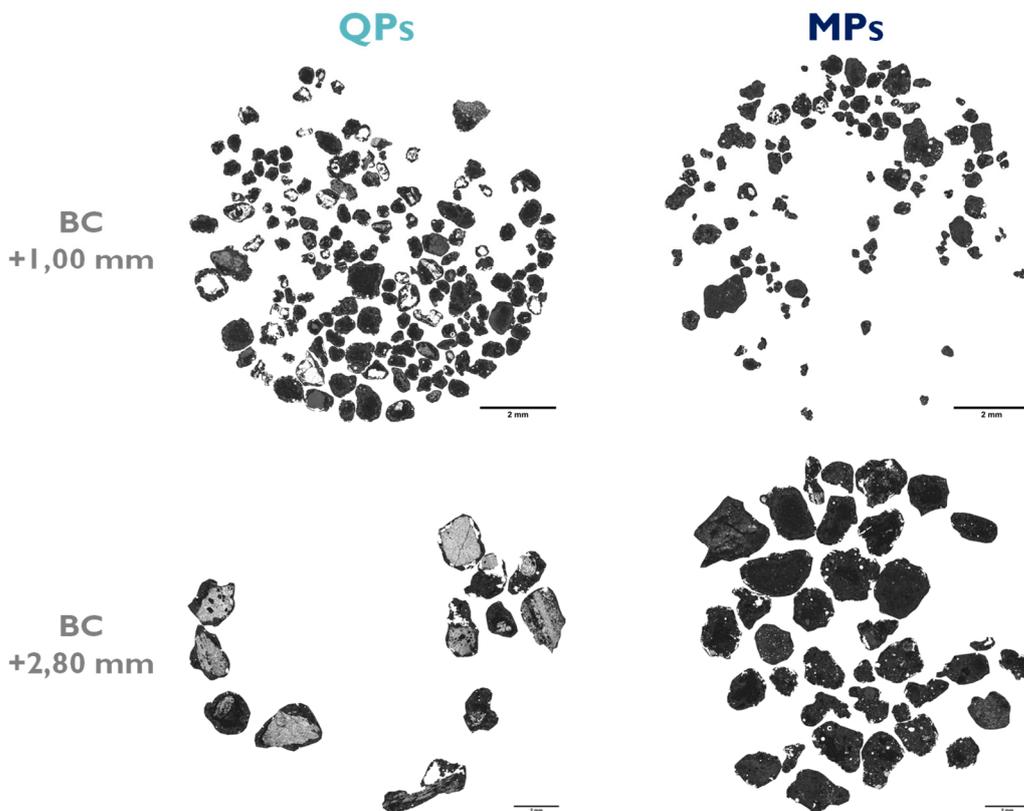


Figura 30: Seções polidas contendo pseudopartículas de *blend* de coprodutos (BC) nas granulometrias +1,00, +2,80 e +4,75 mm

Encontrou-se dificuldade na preparação de todas as sessões polidas de *blend* de coprodutos, com a formação de bolhas na resina e tendência de arrancamento de superfinos no centro de micropelotas. Desta forma, foi difícil discriminar quasipartículas de micropelotas com núcleo ausente ou mal polido. A seção polida de BC +4,75 mm foi a mais impactada, não sendo possível, realizar a aquisição do mosaico completo e aplicar as rotinas 1A e 1B.

Além disso, visando aumentar a população amostral no embutimento, as pseudopartículas ficaram muito próximas umas das outras, impactando negativamente nos resultados das rotinas de análise de imagens. A refletância dos finos do *blend* de coprodutos, exceto pelos pontos brilhantes de ferro metálico, é similar à refletância da resina, dificultando a análise de imagens realizada.

Foi realizado o pré-processamento 1 (Seção 4.2.2.4.2), com a classificação manual para definição de quasipartículas e micropelotas. Como resultado, a Figura 31 apresenta a estratificação de pseudopartículas de *BC* em quasipartículas (QPs) e micropelotas (MPs).



**Figura 31:** Estratificação de pseudopartículas de BC em quasipartículas (QPs) e micropelotas (MPs)

As imagens que compõem a Figura 31 estão apresentadas em tons de cinza. Nota-se uma concentração de tons escuros nas micropelotas e camadas aderentes de quasipartículas, que pode ser atribuído às características intrínsecas dos materiais de granulometria mais fina. Nota-se também a presença de pixels bastante brilhantes nessas mesmas regiões, características do ferro metálico concentrado em granulometrias menores. Os núcleos das quasipartículas são compostos de materiais de maior granulometria, com tons intermediários de cinza, associados possivelmente ao CIR e aos óxidos de ferro.

Em seguida, foi realizada a classificação automática, por meio da rotina 1A de análise de imagens (Seção 4.2.2.4.2), de cada classe obtida no pré-processamento 1 – quasipartículas e micropelotas. Desta forma, as pseudopartículas de *blend* de coprodutos (BC) definidas separadamente como quasipartículas (QP) e micropelotas (MP) foram classificadas em quasipartículas (QP), micropelotas (MP) e núcleos não aglomerados (NNA). Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Classificação de pseudopartículas de *blend* de coprodutos (BC) em quasipartículas (QP), micropelotas (MP) e núcleos não aglomerados (NNA)

BC	PSEUDOPARTÍCULA	QP	MP	NNA
+1,00 mm	QP	78,48	20,96	0,56
	MP	0,00	100,00	0,00
+2,80 mm	QP	100,00	0,00	0,00
	MP	0,00	100,00	0,00

Nota-se pela representação da classificação de pseudopartículas da Figura 32 que algumas pseudopartículas foram identificadas incorretamente como quasipartículas sem núcleo ou pouco núcleo. Algumas das micropelotas identificadas apresentam falhas em seus núcleos.

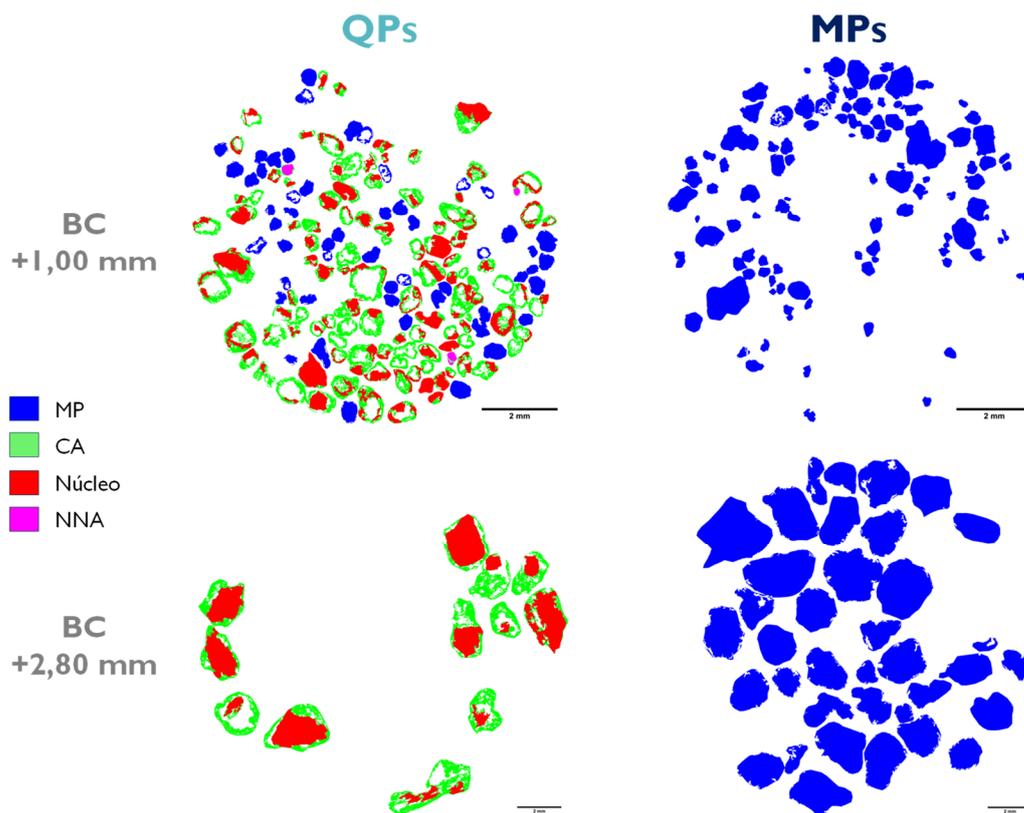


Figura 32: Representação da classificação de pseudopartículas de BC em QP, MP e NNA

Observa-se pela matriz de confusão da Tabela 22 que 45 das 116 pseudopartículas BC +1,00 classificadas manualmente como quasipartículas, ou seja, 39%, foram identificadas pela rotina equivocadamente como micropelotas. Já as pseudopartículas de BC+2,80 foram classificadas corretamente entre quasipartículas e micropelotas. Desta forma, o percentual de quasipartículas da Tabela 21 para BC +1,00 mm deveria ser de 100%.

Tabela 22: Matriz de confusão da classificação de quasipartículas e micropelotas de BC +1,00 mm e BC +2,80 mm

BC ID	+1,00 mm				+2,80 mm			
	QP		MP		QP		MP	
GT\T	QP	MP	QP	MP	QP	MP	QP	MP
QP	71	45	0	0	10	0	0	0
MP	0	0	0	91	0	0	0	34

O *blend* de coprodutos apresentou tendência à circularidade em ambas as granulometrias analisadas, o que pode ser explicado pela maior formação de micropelotas em relação à rota de granulação tambor + tambor da mistura total a

sinterizar. A tendência de maior formação de micropelotas se deve à distribuição granulométrica mais fina das matérias-primas alternativas, com cerca de 50% de finos <0,150 mm. A granulometria fina dos coprodutos também propicia o direcionamento destas partículas finas para a camada aderente das quasipartículas formadas a partir das partículas nucleantes disponíveis. No entanto, o percentual em massa de partículas nucleantes da mistura é de apenas 20%.

Parâmetros referentes à camada aderente das quasipartículas foram medidos pela rotina 1A (Seção 4.2.2.4.2) e são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Medidas diretas e indireta de camada aderente de quasipartículas

BC	PSEUDOPARTÍCULA	$\Sigma A_{CA} / \Sigma A_{QP}$	$\Sigma (A_{QP} \times l_{M_{CA}}) / \Sigma A_{QP}$ (mm)	$\Sigma l_{M_{CA}} / n$ (mm)
+1,00 mm	QP	0,66	1,63	0,09
+2,80 mm	QP	0,54	1,24	0,40

De acordo com os resultados, BC +1,00 apresenta a maior proporção em área entre CA e núcleo, apresenta grande quantidade de partículas pequenas com pouca CA, mas também a maior concentração de CA em partículas maiores. BC +2,80 apresenta distribuição mais uniforme de espessura de CA nas partículas, se comparada à BC +1,00. No entanto, a análise das medidas diretas e indireta de CA para ambas as granulometrias se tornou imprecisa devido à quantidade de erros associados à identificação e classificação de núcleos e CA das quasipartículas.

Foram realizadas medidas de Feret e *Roundness* em pseudopartículas definidas como quasipartículas pelo pré-processamento 1 (Seção 4.2.2.4.2). Para comparação, utilizou-se as rotinas 1A e 1B (Seção 4.2.2.4.2) para avaliá-las e os resultados se encontram na Tabela 24.

Tabela 24: Medidas médias de Feret e *Roundness* a partir de pseudopartículas definidas como quasipartículas (QP Rotina 1B), pseudopartículas definidas como quasipartículas e classificadas como quasipartículas (QP Rotina 1A/1A) e pseudopartículas definidas como quasipartículas e classificadas como micropelotas (MP Rotina 1A/1B)

BC	PSEUDOPARTÍCULA	FERET ( $\mu\text{m}$ )	ROUNDNESS
+1,00 mm	QP Rotina 1B	0,55	0,73
	QP Rotina 1A/1A	1,50	0,66
	MP Rotina 1A/1B	0,98	0,73
+2,80 mm	QP Rotina 1B	2,64	0,66
	QP Rotina 1A/1A	5,70	0,57

A medida de feret é inferior para as pseudopartículas definidas como quasipartículas, apresentando valores menores do que a abertura da peneira de corte

da granulometria. Nota-se que os valores da circularidade, ou *Roundness*, das pseudopartículas em imagens definidas como quasipartículas são maiores do que das classificadas pela rotina 1A.

De acordo com a matriz de confusão, as micropelotas identificadas na granulometria BC +1,00 mm são quasipartículas. Portanto, os valores individuais deveriam ser incorporados ao banco de dados das quasipartículas para atualizar medida de Feret e *Roundness*.

Os histogramas da Figura 33 consideram as medidas das pseudopartículas definidas como quasipartículas (QP Rotina 1B) sem passar pela rotina 1A de classificação. Nota-se uma distribuição mais uniforme de circularidade para BC +1,00 do que para BC +2,80 mm. As distribuições de feret apresentam características similares, porém, abaixo do esperado para as faixas granulométricas de corte.

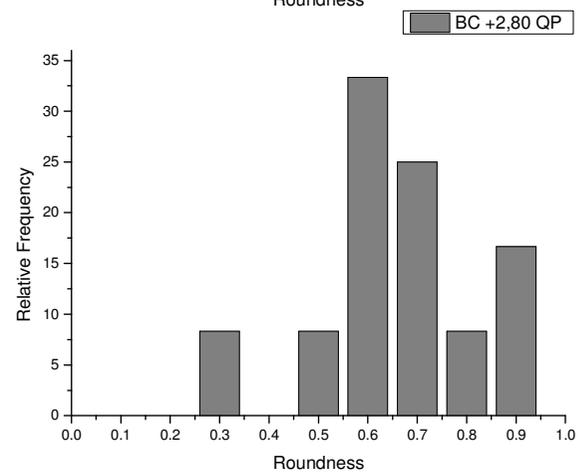
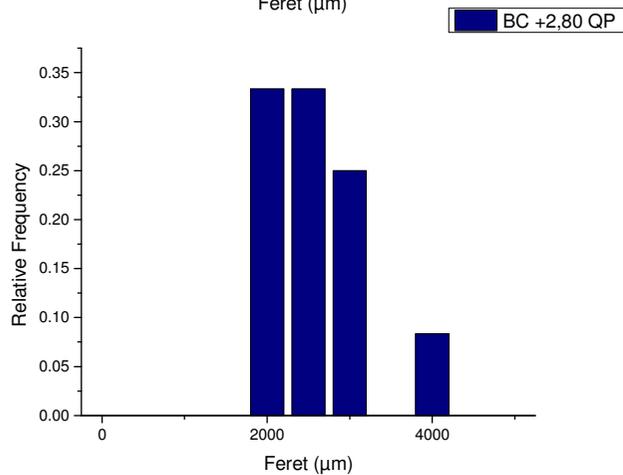
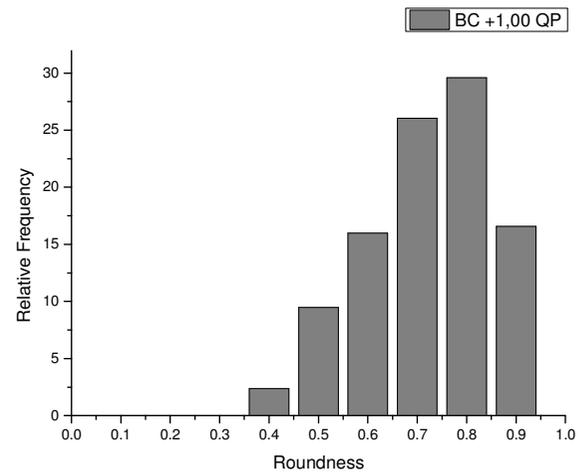
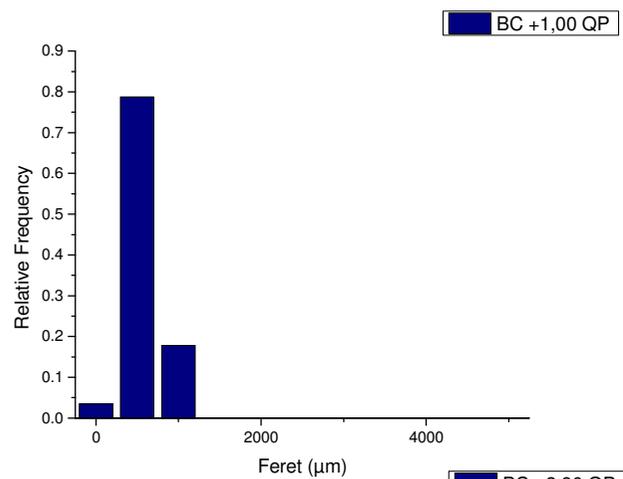


Figura 33: Histogramas de Feret (esquerda) e *Roundness* (direita), a partir de pseudopartículas definidas como quasipartículas para as granulometrias +1,00 (topo) e -2,80 (baixo).

De modo análogo, foram realizadas medidas de feret e *Roundness* em pseudopartículas definidas como micropelotas. Para comparação, utilizou-se as rotinas 1A e 1B para avaliá-las e os resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25: Medidas médias de Feret e *Roundness* a partir de pseudopartículas definidas como micropelotas (MP Rotina 1B), pseudopartículas definidas como micropelotas e classificadas como micropelotas (MP Rotina 1A/1B)

BC	PSEUDOPARTÍCULA	FERET ( $\mu\text{m}$ )	ROUNDNESS
+1,00 mm	MP Rotina 1B	0,45	0,73
	MP Rotina 1A/1B	0,96	0,70
+2,80 mm	MP Rotina 1B	2,19	0,72
	MP Rotina 1A/1B	4,45	0,70

A medida de feret é inferior para as imagens definidas como micropelotas, apresentando valores inferiores a peneira de corte da granulometria. Nota-se que os valores de *Roundness* das pseudopartículas definidas como micropelotas são similares aos valores das pseudopartículas classificadas como micropelotas pela rotina 1A. É necessário ressaltar que uma quantidade significativa de pseudopartículas de BC +1,00 pertencentes à classe quasipartículas foram identificadas como micropelotas, distorcendo resultados de MP Rotina 1A/1B.

Os histogramas da Figura 34 consideram as medidas das pseudopartículas definidas como micropelotas (MP Rotina 1B) sem passar pela rotina 1A de classificação. As distribuições de feret apresentam características abaixo do esperado para as faixas granulométricas de corte e menores do que para quasipartículas. Nota-se uma distribuição ligeiramente mais uniforme de *Roundness* para BC +1,00 do que para BC +2,80 mm para as micropelotas.

O *blend* de coprodutos apresentou tendência de formação de pseudopartículas pequenas em ambas as granulometrias. Isto se deve às condições de processo que foram definidas para alcançar a granulometria adequada para inserção das pseudopartículas na mistura a sinterizar para granulação na rota tambor +tambor. Nota-se que há percentual relevante tanto de micropelotas quanto de quasipartículas no *blend* de coprodutos microaglomerado. O desenvolvimento e a otimização das rotinas de processamento digital de imagens permitiram a inspeção visual, avaliação qualitativa e quantitativa das pseudopartículas do *blend* de coprodutos. A técnica se mostrou fundamental para a análise integrada do uso de coprodutos na sinterização.

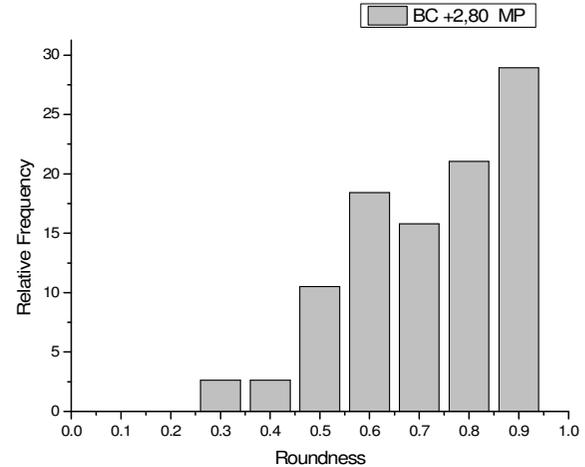
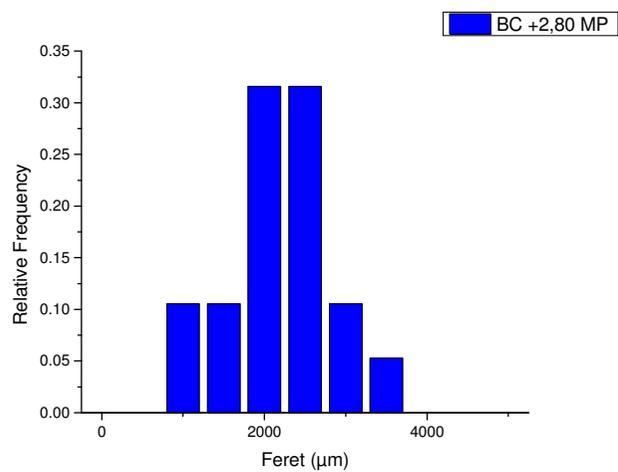
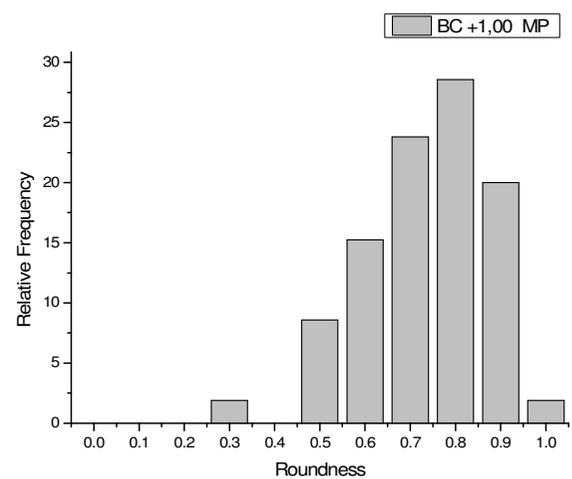
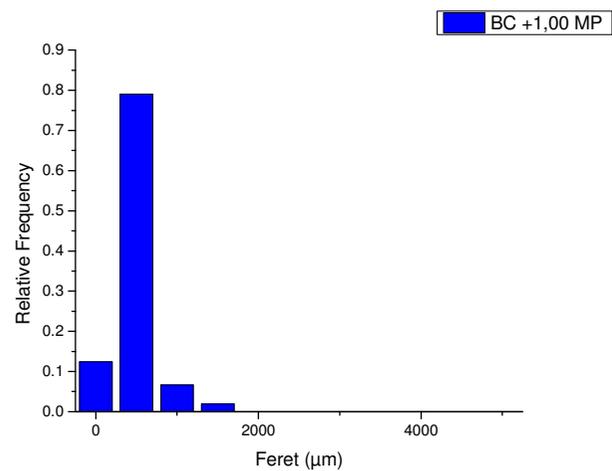


Figura 34: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) a partir de pseudopartículas definidas como micropelotas para as granulometrias +1,00 (topo) e -2,80 (baixo)

### 5.2.3.2. Microtomografia

Um conjunto de pseudopartículas foi escolhido ao acaso, sem realizar processo de homogeneização e quarteamento desta subamostra, para captura de imagens de acordo com a metodologia de aquisição (vide Seção 4.2.2.5.1). A imagem da reconstrução 3D pode ser visualizada na Figura 35.

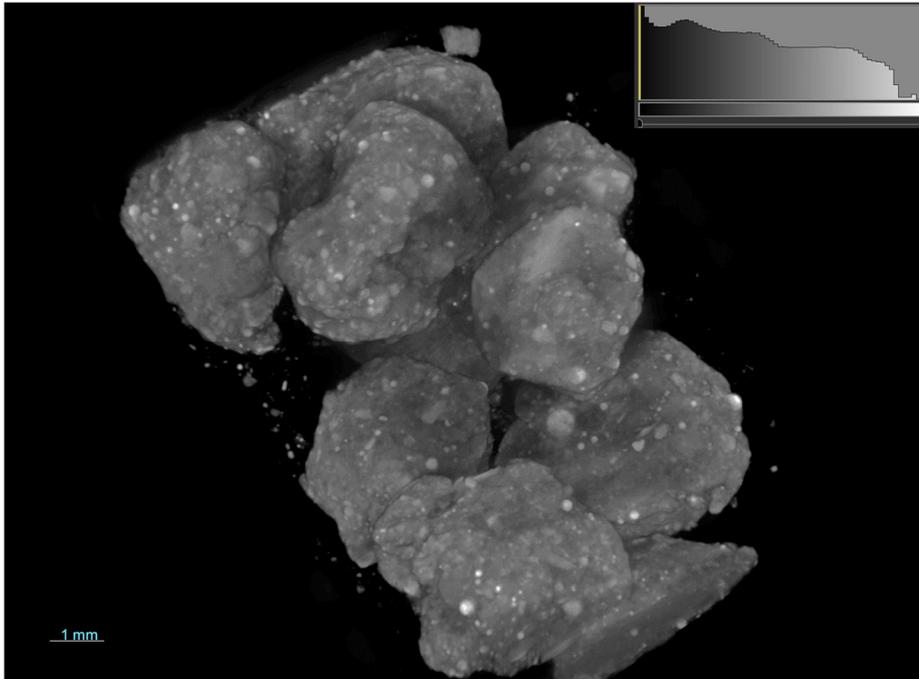


Figura 35: Reconstrução 3D da imagem obtida por microCT do *blend* de coprodutos na granulometria +2,80 mm

A avaliação qualitativa foi realizada de acordo com a rotina A (seção 4.2.2.5.2). Desta forma, as 11 partículas da população amostral segmentadas por limiarização de acordo com os picos e vales da Figura 36. Os histogramas estão apresentados em escala logarítmica para facilitar a visualização. As seguintes estruturas foram representadas em escala de cores: ferro metálico (amarelo); núcleo (vermelho); e camada aderente/micropelotas (verde).

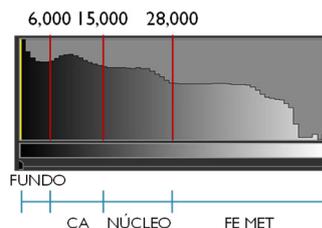


Figura 36: Histograma da imagem 3D do *BC* +2,80 mm, mostrando os tons de corte para determinação das estruturas camada aderente (CA), núcleo e ferro metálico

Como alguns dos pós finos que compõem o *blend* de coprodutos apresentam ferro metálico em sua composição, espera-se encontrar essa fase dispersa na camada aderente de quasipartículas e em micropelotas. A densidade mais alta do ferro metálico em relação às demais fases presentes permite a sua discriminação ao realizar a segmentação por limiarização e aplicação de escala de cor, de acordo com a Figura 37.

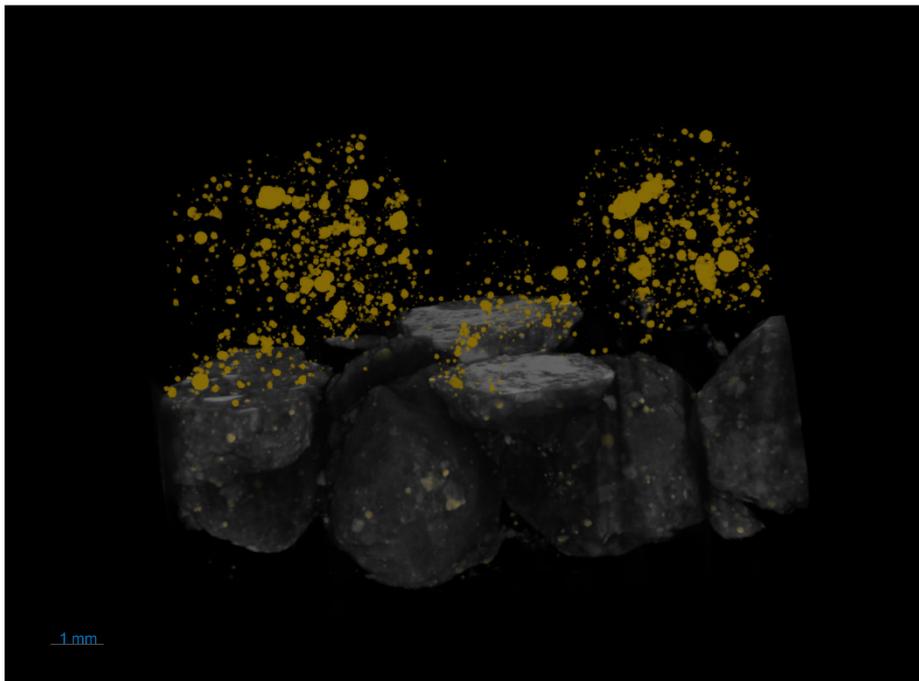


Figura 37: Imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando o ferro metálico em cor amarela

Quasipartículas necessariamente possuem uma partícula nucleante no seu interior, mas, por questões técnicas da microtomografia, caso haja uma homogeneidade da intensidade devido à absorvência de raios-x considerando-se a densidade e espessura das partículas, a partícula nucleante poderá não ser visualmente discriminada. No entanto, especificamente para a amostra de *blend* de coprodutos, devido à homogeneidade da dispersão do ferro metálico na camada aderente e da micropelota, notar-se-ia a ausência de ferro metálico no interior das quasipartículas por presença de partícula nucleante. Para inspeção visual utilizando escala de cor, os núcleos das quasipartículas foram segmentados por limiarização, de acordo com a Figura 38. A Figura 39, união das representações gráficas do núcleo e ferro metálico, apresenta uma sub-região de exemplo que sugere a classificação das pseudopartículas em quasipartículas e micropelotas.

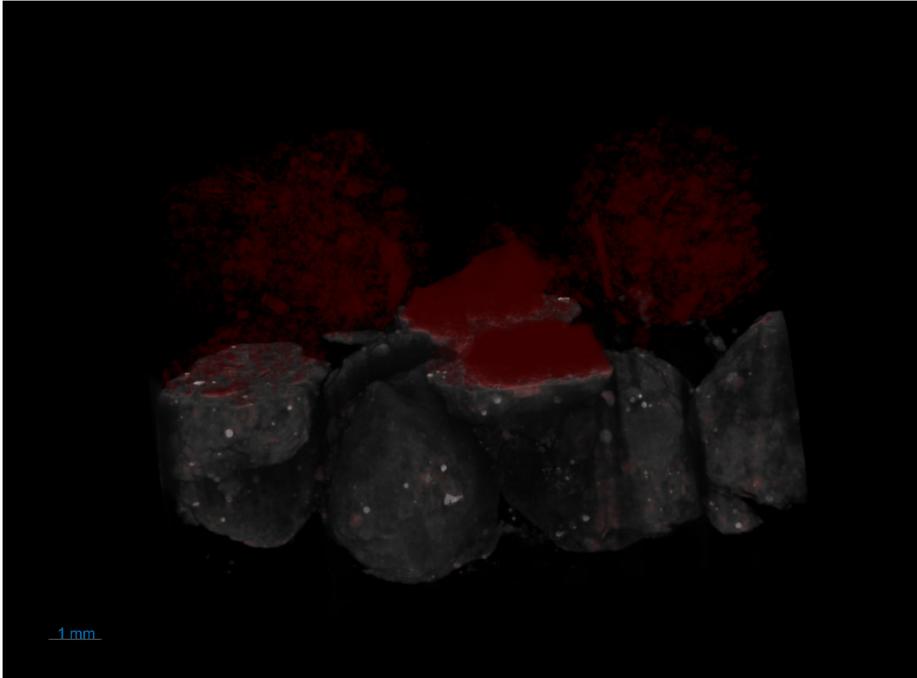


Figura 38: Imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando os núcleos em cor vermelha

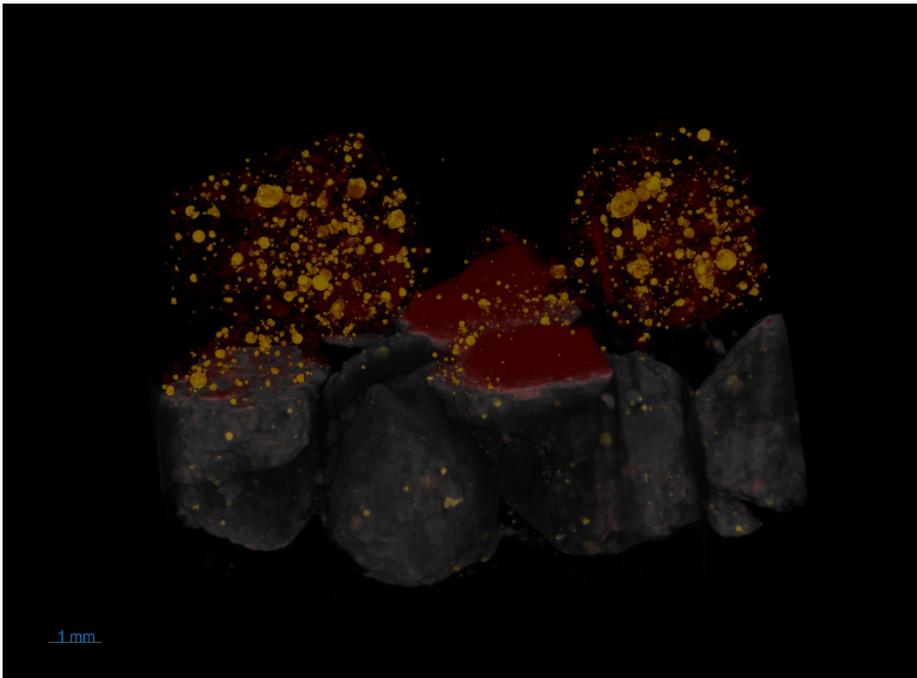


Figura 39: Imagem 3D do BC +2,80 mm, combinando o Ferro metálico em amarelo e os núcleos em vermelha

A camada aderente, excetuando os pixels referentes ao ferro metálico, também foi segmentada por limiarização, de acordo com a Figura 40. Caso haja a presença de micropelotas na população amostral, estas serão segmentadas junto da camada aderente das quasipartículas. Visualmente é possível discriminá-las na Figura 41, pois micropelotas não possuem partículas nucleantes no seu interior.

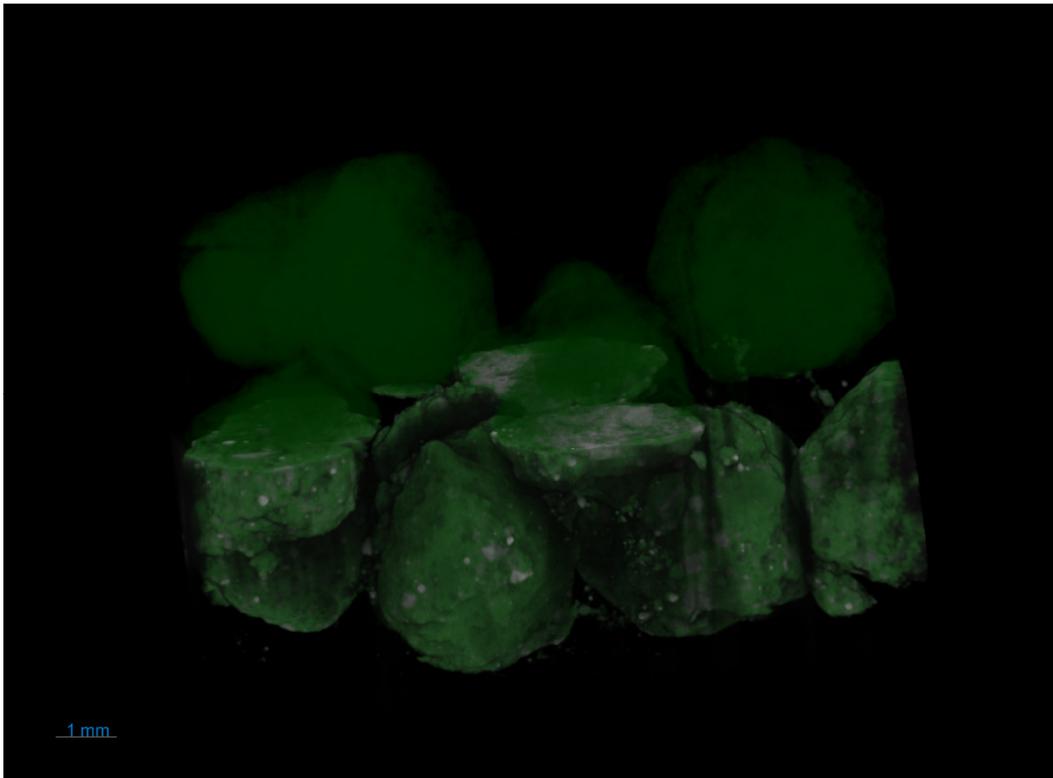


Figura 40: Imagem 3D do BC +2,80 mm, mostrando a camada aderente em cor verde

Nota-se que as pseudopartículas se comportaram da seguinte forma:

- A fase correspondente ao ferro metálico se encontra de forma dispersa na camada aderente das quasipartículas e nas micropelotas;
- Os núcleos das quasipartículas puderam ser segmentados e visualizados;
- A camada aderente das quasipartículas e as micropelotas foram segmentadas como uma estrutura única, mas visualmente foi possível diferenciar as classes das pseudopartículas ao unir as escalas de cores e diminuir a opacidade da camada aderente, de acordo com a Figura 41.

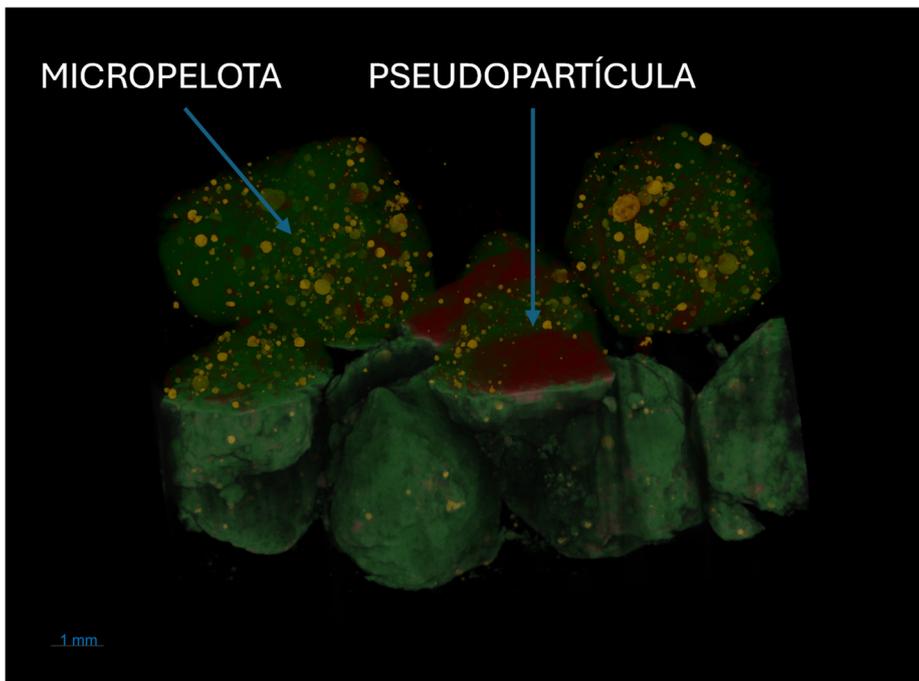


Figura 41: Imagem 3D do BC +2,80 mm, combinando o Ferro metálico em amarelo, os núcleos em vermelho e a camada aderente em cor verde

Das 11 pseudopartículas avaliadas, 3 foram classificadas como quasipartículas e 8 como micropelotas. Visto a pequena população amostral e dificuldade de representatividade, a sugestão para trabalhos futuros é de trabalhar com um número maior de pseudopartículas obtidas por processo de homogeneização e quarteamento.

### 5.3. Pseudopartículas em mistura total a sinterizar

Foram realizadas análises física, química e microestrutural da mistura total a sinterizar, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP).

#### 5.3.1. Análise física

Foi realizado um balanço de massa para definição da composição da mistura total a sinterizar de acordo com o convênio de qualidade industrial, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), como pode ser observado na Tabela 5.

O cenário SCOP apresenta o balanço de massa similar à produção industrial da rota de granulação tambor + tambor. Com a inserção de coprodutos no cenário

COP, houve a necessidade de redução de massa de algumas matérias-primas tradicionais, como *sinter feed*, calcário, dolomita e combustíveis.

Foram realizadas análises granulométrica e de densidade aparente da mistura total a sinterizar. A análise granulométrica da Tabela 26, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), foi realizada para confirmar se a distribuição está de acordo com os requisitos de qualidade da rota de sinterização industrial.

Tabela 26: Análise granulométrica da mistura a sinterizar, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

MT \ (%)	> 6,30mm	> 1,00mm	< 1,00 > 0,150mm	< 0,150mm
SCOP	8,90	40,04	25,41	34,55
COP	8,71	40,76	25,73	33,51

Nota-se que a distribuição granulométrica das misturas com e sem coprodutos é similar. Cerca de 34,55% da massa de MT SCOP e 33,51% da massa de MT COP se encontram na fração abaixo de 0,150 mm, indicando a tendência da contribuição como camada aderente. Cerca de 25,41% da massa de MT SCOP e 25,73% da massa de MT COP se encontram na fração abaixo de 1,00 mm e acima de 0,150 mm, indicando a tendência da contribuição como camada intermediária. Cerca de 40,04% da massa de MT SCOP e 40,76% da massa de MT COP se encontram na fração acima de 1,00 mm, indicando a tendência da contribuição como partícula nucleante. Na análise microestrutural realizada, assumiu-se camada intermediária e aderente como camada aderente.

Para estimar a proporção em massa de micropelotas de *blend* de coprodutos que atuaram como partículas nucleantes de quasipartículas na mistura total a sinterizar, foi realizado o ensaio de densidade aparente nas granulometrias +2,80 mm e +1,00 mm, de acordo com a Tabela 27.

Tabela 27: Densidade aparente da mistura total a sinterizar, no cenário com coprodutos, nas granulometrias +2,80 mm e +1,00 mm

MT	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
COP +2,80 mm	4,0580
COP +1,00 mm	4,0190

As densidades de ambas as granulometrias apresentaram resultados próximos, não indicando concentração de alguma matéria-prima tradicional ou alternativa em uma determinada granulometria. Os resultados de percentual em

massa de micropelotas que atuam como partículas nucleantes de quasipartículas serão apresentados na seção 5.3.3.1.

### 5.3.2. Análise química

Foram realizadas análises química e de DRX da mistura total a sinterizar. A análise química, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), pode ser observada na Tabela 28.

Tabela 28: Análise química da mistura a sinterizar, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

MT \ (%)	FeT	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Mn	P	TiO <sub>2</sub>	FeO	PPC	C	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO
SCOP	51,57	8,82	7,19	2,51	1,35	0,50	0,063	0,11	0,33	1,72	1,44	0,02	0,05	0,01
COP	52,26	8,61	6,91	2,40	1,34	0,54	0,063	0,10	0,30	2,07	1,42	0,02	0,07	0,02

As análises químicas das misturas totais, SCOP e COP, apresentam resultados compatíveis com os balanços de massa teóricos, portanto, com qualidade química para produção de sínter na escala piloto. Nota-se que as químicas referentes a ambos os cenários são similares.

Os teores de álcalis (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) e óxido de zinco (ZnO) não apresentam diferenças significativas entre cenários, são compatíveis com o processo de sinterização e representam no máximo 32% e 30% do limite de massa a ser adicionado no alto-forno respectivamente. A composição de carga do alto-forno para os dois cenários atingiu apenas 69% e 31% dos limites operacionais relativos às massas de álcalis e óxido de zinco. Também existe margem para a adição de maiores teores de álcalis e óxido de zinco na sinterização. Os resultados demonstram que é possível estudar a adição de outros coprodutos mais ricos em álcalis e óxido de zinco que não foram avaliados no presente trabalho.

As análises de DRx, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), nas granulometrias de +1,00, +2,80 e +4,75 mm, podem ser visualizadas na Figura 42, na Figura 43, na Figura 44, na Figura 45, na Figura 46 e na Figura 47.

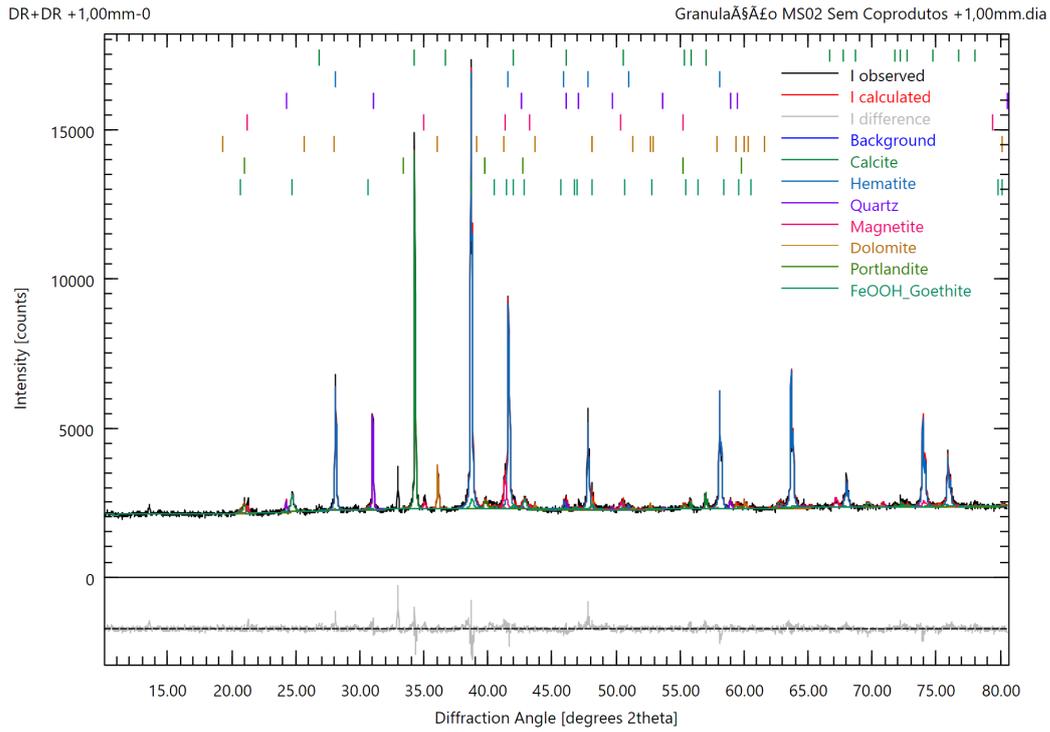


Figura 42: Difratoograma da MT a sinterizar SCOP +1,00 mm

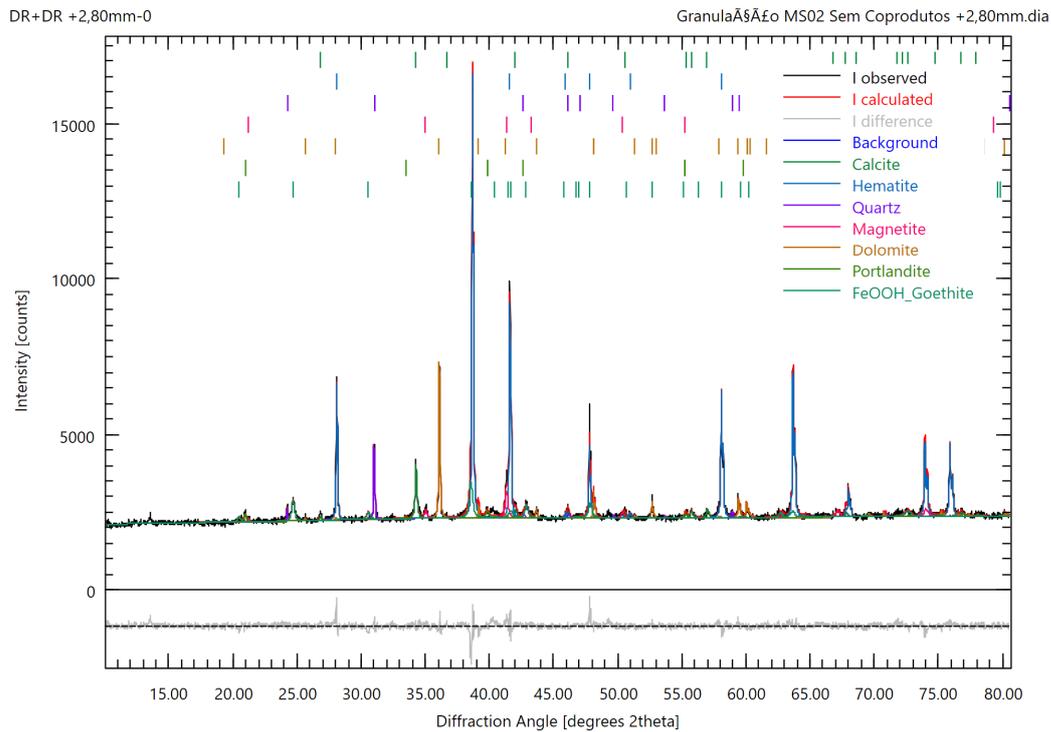


Figura 43: Difratoograma da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm

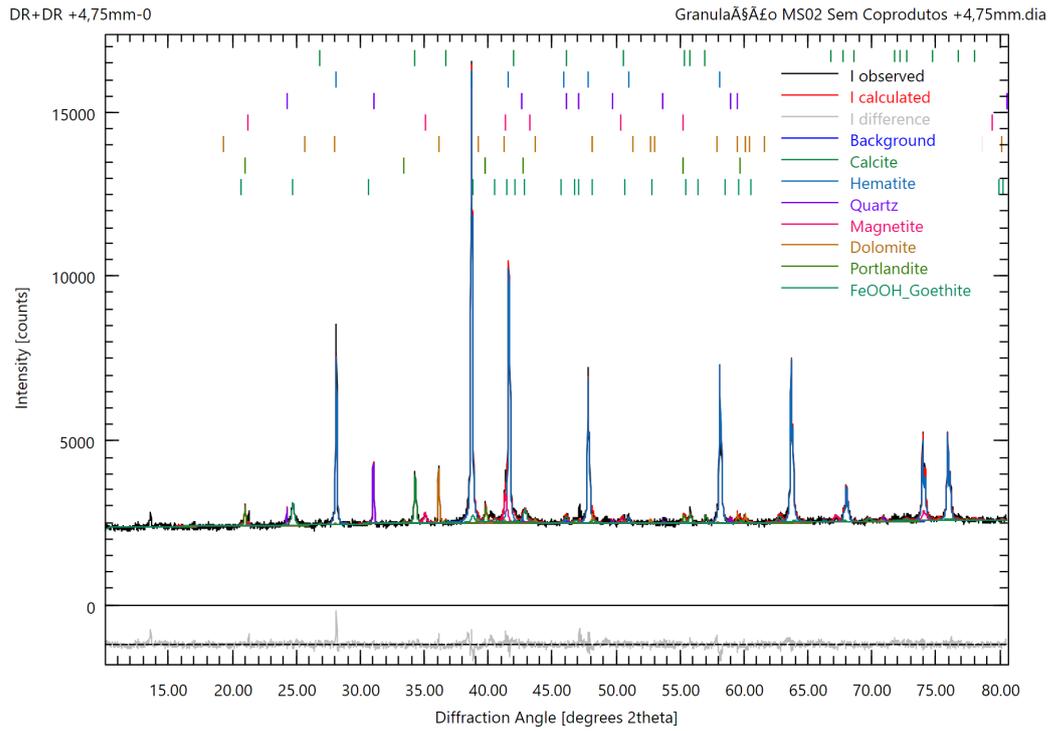


Figura 44: Difratoograma da MT a sinterizar SCOP +4,75 mm

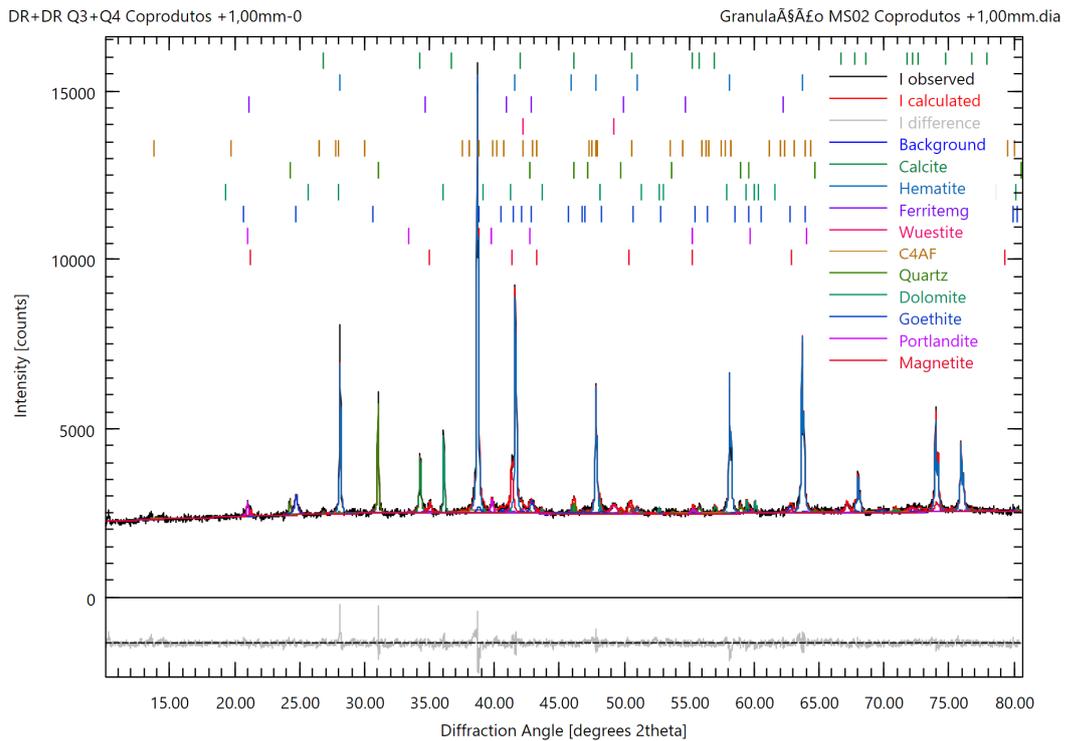


Figura 45: Difratoograma da MT a sinterizar COP +1,00 mm

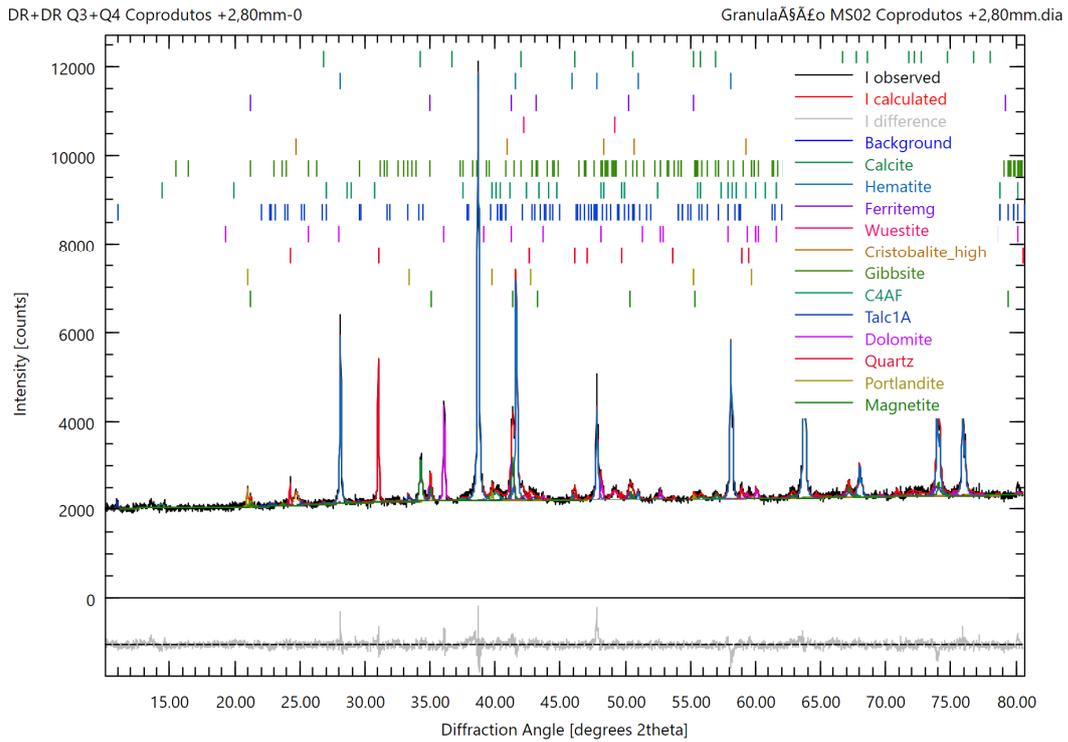


Figura 46: Difratoograma da MT a sinterizar COP +2,80 mm

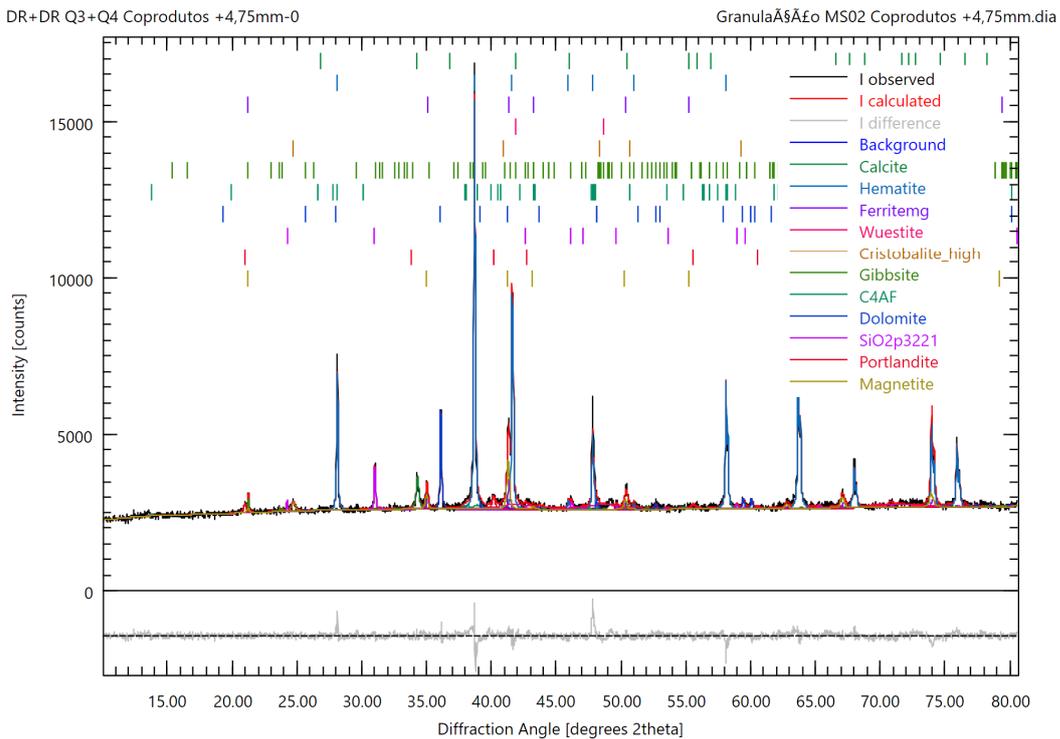


Figura 47: Difratoograma da MT a sinterizar COP +4,75 mm

Análises complementares podem ser realizadas para avaliar se o ajuste do difratograma foi adequado:

- barra de erro localizada na região inferior de cada gráfico sem grandes desvios da linha de base e
- métricas de avaliação  $R_{wp} < 4$  e  $GoF < 1,7$  para considerar que foi realizado um bom ajuste.

As barras de erro dos 6 difratogramas indicam que os ajustes não foram perfeitos, mas não se observa desvios relevantes. As métricas apresentadas na Tabela 29 indicam que os ajustes estão adequados. No entanto, os ajustes são ligeiramente piores do que para o blend de coprodutos. Desta forma, a análise quantitativa foi realizada a partir dos compostos identificados e suas respectivas proporções.

Tabela 29: Métricas de validação do ajuste do difratograma

CENÁRIO	GRANULOMETRIA	Rwp	GoF
SCOP	+1,00 mm	3,24	1,5728
	+2,80 mm	2,92	1,4384
	+4,75 mm	2,63	1,3418
COP	+1,00 mm	2,65	1,3660
	+2,80 mm	2,84	1,3922
	+4,75 mm	2,87	1,5105

De acordo com a quantificação realizada a partir dos difratogramas apresentada na Tabela 30, é possível realizar a comparação entre cenários, sem e com coprodutos, granulometrias e com os resultados do *blend* de coprodutos, apresentados na Tabela 20.

No *blend* de coprodutos, a sílica ( $SiO_2$ ) identificada se encontra apenas na forma de cristobalita. Já na mistura total a sinterizar sem coprodutos, a sílica foi identificada na forma de quartzo. Na mistura total a sinterizar com coprodutos, além da cristobalita, foram identificados óxido de silício também na forma de quartzo e p3221. Os percentuais de  $SiO_2$  encontrados nos cenários sem e com coprodutos, na média por granulometria, não são tão diferentes dos valores encontrados na Tabela 28, porém COP apresenta resultado ligeiramente superior pela técnica de DRx.

As outras três fases presentes em todos os cenários e granulometrias são hematita ( $Fe_2O_3$ ), calcita ( $CaCO_3$ ), portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) e dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ), sendo as duas primeiras consideradas majoritárias também no *blend* de coprodutos. A matéria-prima de maior percentual de adição nas misturas totais

é o *sinter feed*, responsável majoritariamente pelas fontes de hematita e sílica. Os fundentes adicionados na mistura total, portlandita, calcita e dolomita, foram corretamente identificados. No entanto, a quantificação dos fundentes apresenta percentuais mais elevados do que o esperado. A portlandita provavelmente foi formada durante o processo de hidratação da cal adicionada na mistura total, de acordo com o esperado.

A fase magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) foi identificada nas misturas totais a sinterizar sem e com coprodutos. Espera-se cerca de 1,6% de magnetita teórica a partir do teor de FeO obtido por via úmida em torno de 3,3%, apresentado na Tabela 28, assumindo-se que todo  $\text{Fe}^{2+}$  está na forma de magnetita para o cenário sem coprodutos. Realizando a mesma consideração para a amostra com coprodutos, para um FeO de 3,00%, apresentado na Tabela 28, estima-se cerca de 1,4% de magnetita. No entanto, devido a presença de ferro em outros estados de oxidação compatíveis com  $\text{Fe}^{2+}$  na mistura total a sinterizar com coprodutos, provenientes provavelmente do *blend* de coprodutos, presume-se que o teor de magnetita seria ainda inferior ao estimado. Comparando os resultados entre técnicas de análise química, nota-se valores mais elevados a partir da quantificação por DRx. As diferenças encontradas se devem às limitações das técnicas experimentais e seus erros associados.

As fases magnésio-ferrita ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ) e wustita (FeO), majoritárias no *blend* de coprodutos, e as fases C4AF ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e gibsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), minoritárias no *blend* de coprodutos, foram identificadas apenas na mistura total a sinterizar com coprodutos.

Possivelmente proveniente da participação majoritária do *sinter feed* na mistura total COP e SCOP, se espera encontrar a goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) em ambos os cenários e granulometrias. No entanto, a goethita foi identificada em todas as granulometrias do cenário SCOP e apenas em uma granulometria do cenário COP.

O talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), presente em todas as granulometrias do *blend* de coprodutos, foi identificado apenas em uma das granulometrias do cenário com coprodutos. As fases minoritárias presentes no *blend* de coprodutos, como grafite (C), Katoita ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_{1,5}(\text{OH})_6$ ) e ferro (Fe) não foram identificadas em nenhum dos dois cenários.

Tabela 30: Percentual dos constituintes presentes na mistura total a sinterizar, sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), nas granulometrias +1,00 mm, +2,80 mm e 4,75 mm

FASE	FÓRMULA	SCOP			COP		
		+1,00mm	+2,80mm	+4,75mm	+1,00mm	+2,80mm	+4,75mm
HEMATITA	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57,86	49,72	69,68	54,00	47,61	48,85
CALCITA	CaCO <sub>3</sub>	8,07	10,59	6,38	6,88	5,42	2,91
DOLOMITA	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	8,79	18,81	6,43	8,59	8,75	8,29
CRISTOBALITA	SiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	2,73	1,88
QUARTZO	SiO <sub>2</sub>	8,73	6,44	4,36	8,60	7,68	0,00
SÍLICA (SiO <sub>2</sub> p3221)	SiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,93
MAGNETITA	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,40	4,29	4,57	5,73	3,67	6,30
PORTLANDITA	Ca(OH) <sub>2</sub>	3,35	2,24	2,76	2,18	1,00	2,73
GOETHITA	FeO(OH)	7,79	7,90	5,83	5,14	0,00	0,00
WUSTITA	FeO	0,00	0,00	0,00	2,60	2,79	11,70
C4AF	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	3,65	5,55	3,37
GIBSITA	Al(OH) <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	2,36
MAGNÉSIO FERRITA	MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,00	0,00	0,00	2,98	6,44	4,09
TALCO	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	5,43	0,00

Cerca de 28% da massa das misturas totais a sinterizar são compostos por sínter retorno e parte dos coprodutos podem ser finos de sínter na composição. Uma fase importante na formação do sínter é o SFCA (Sílico-ferrito de cálcio e alumínio), não identificado pela técnica de DRx. Porém, seu percentual pode ser pequeno, inferior aos limites da técnica utilizada.

Ao realizar a quantificação elementar a partir da proporção entre os constituintes, nota-se que o percentual de ferro total varia de 45 a 60% de acordo com a granulometria, com média de 55% para SCOP e 53% para COP. Apesar da alta variabilidade do teor de ferro por granulometria, a média está ligeiramente superior às análises químicas da Tabela 28 para o cenário SCOP e similar para COP.

Limitações como a de preparação adequada da pastilha para não ocorrer orientação preferencial ou baixa estatística, a cristalinidade e a heterogeneidade do material, bem como a pequena proporção de alguns constituintes, podem contribuir para falhas de quantificação.

### 5.3.3. Análise microestrutural

Foram realizadas análises microestruturais nas amostras de pseudopartículas de mistura total a sinterizar, nas granulometrias +1,00, +2,80 e +4,75 mm, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP). Foram realizadas capturas de imagens por microscopia ótica para todas as granulometrias e microtomografia apenas para a granulometria +2,80 mm.

#### 5.3.3.1. Microscopia ótica

Imagens de acordo com a metodologia de aquisição 2 (Seção 4.2.2.4.1) podem ser visualizadas na Figura 48.

Encontrou-se dificuldade na preparação de todas as sessões polidas de mistura total a sinterizar, com a formação de bolhas na resina e tendência de arrancamento, principalmente na granulometria +4,75 mm. De toda forma, os resultados da preparação foram superiores à do *blend* de coprodutos. Visando aumentar a população amostral no embutimento, as pseudopartículas ficaram muito próximas umas das outras, impactando negativamente nos resultados das rotinas de análise de imagens aplicadas.

As pseudopartículas foram classificadas em quasipartículas (QP), micropelotas (MP) e núcleos não aglomerados (NNA) pela rotina 1A (Seção 4.2.2.4.2) e os resultados são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31: Classificação de pseudopartículas da mistura total a sinterizar (MT) em quasipartículas (QP), micropelotas (MP) e núcleos não aglomerados (NNA)

MT	CENÁRIO	QP	MP	NNA
+1,00 mm	SCOP	92,89	6,86	0,25
	COP	96,54	2,91	0,55
+2,80 mm	SCOP	100,00	0,00	0,00
	COP	90,81	9,19	0,00
+4,75 mm	SCOP	78,42	21,58	0,00
	COP	99,38	0,62	0,00

Apenas na granulometria +1,00 observou-se a presença de núcleos não aglomerados, que se deve às quasipartículas com pouca camada aderente. Observa-se a predominância de quasipartículas em relação às micropelotas em todas as condições. A representação da classificação de pseudopartículas pode ser visualizada na Figura 49.

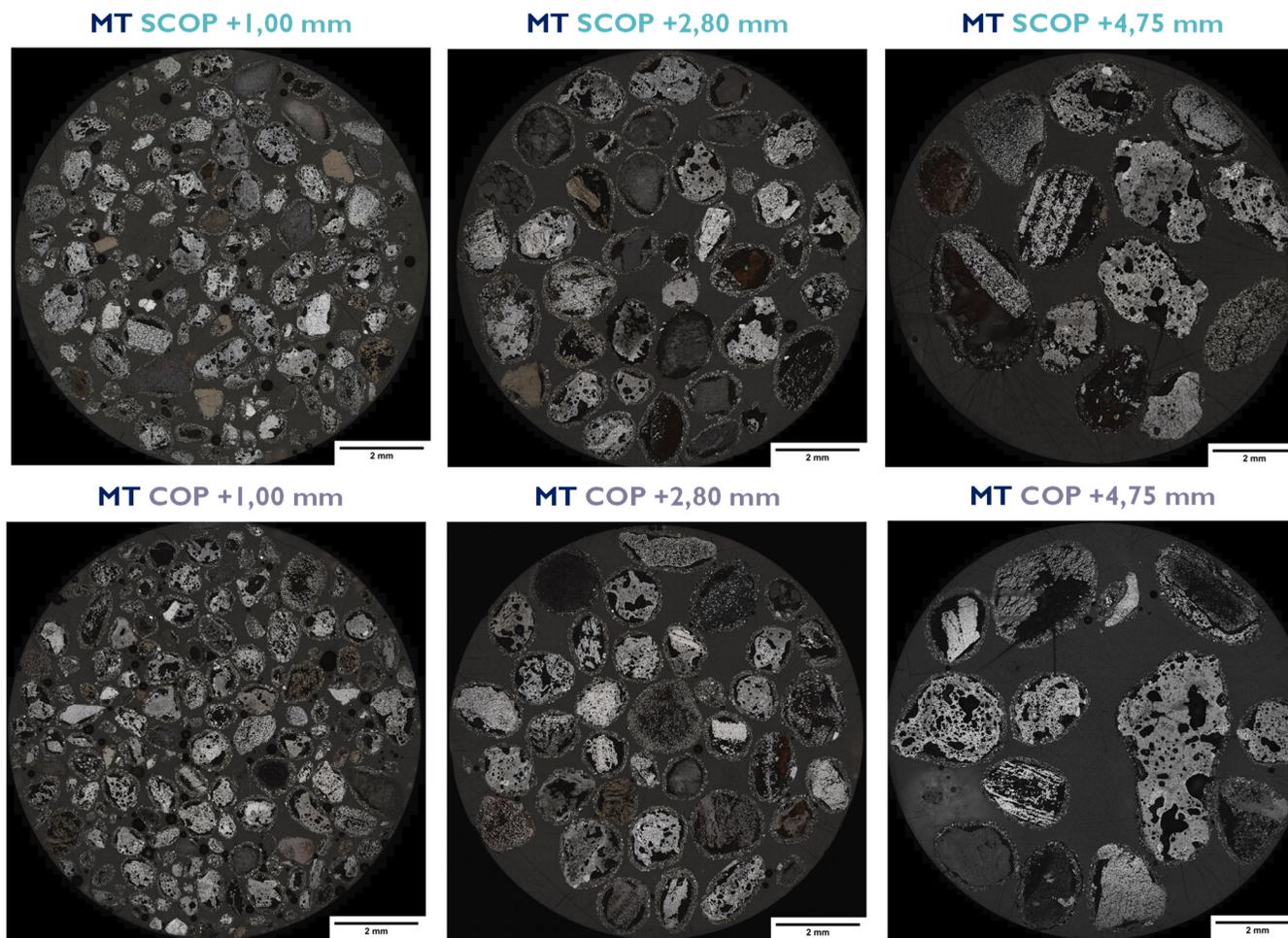


Figura 48: Seções polidas contendo pseudopartículas das MTs +1,00, +2,80 e +4,75 mm e condições SCOP e COP

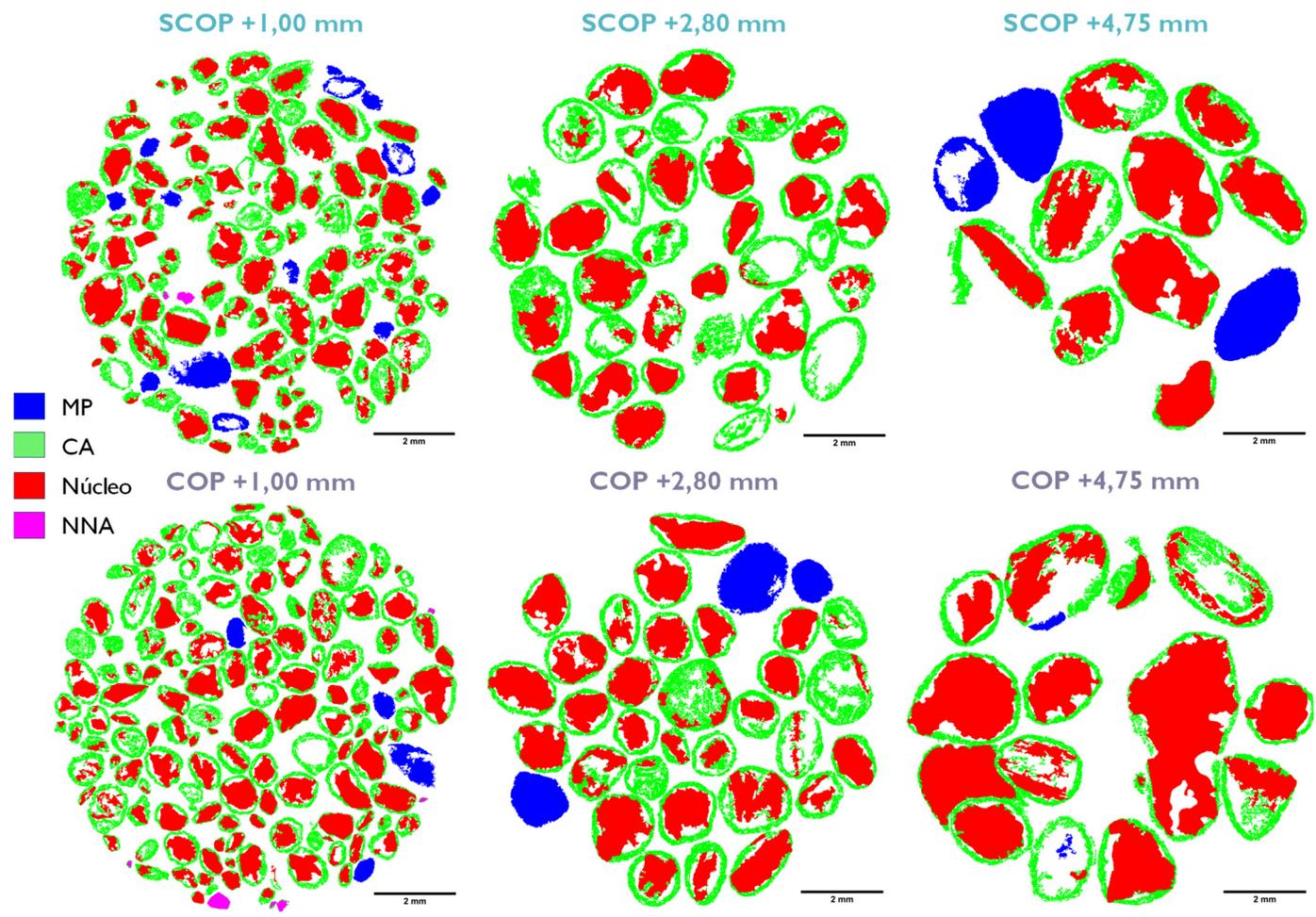


Figura 49: Representação da classificação de pseudopartículas de MT em QP, MP e NNA

Nota-se pela representação da classificação de pseudopartículas que alguns erros ocorreram, exemplificados na Figura 50. Algumas pseudopartículas foram identificadas como quasipartículas sem núcleo ou pouco núcleo. Algumas das micropelotas identificadas apresentam falhas em seus centros. Nota-se também, na amostra MT COP +4,75 que a resina foi detectada como uma quasipartícula devido a uma pseudopartícula próxima à superfície externa da resina que gerou sombra, uma quasipartícula teve parte de sua camada aderente identificada como micropelota de forma equivocada e uma quasipartícula teve parte do seu núcleo identificado equivocadamente como micropelota.

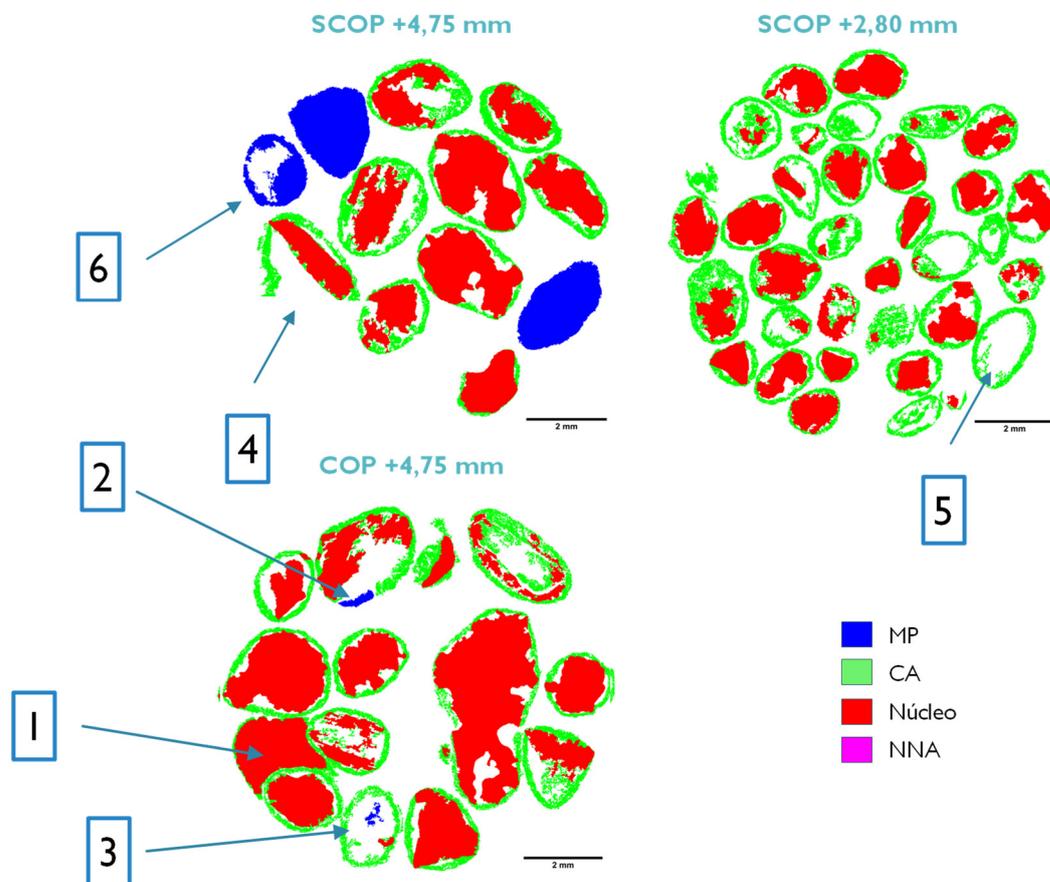


Figura 50: Exemplos de erros de identificação: (1) resina identificada como quasipartículas; (2) região pertencente à camada adente identificada como micropelota; (3) núcleo de quasipartículas identificada como micropelota; (4) parte da camada aderente faltante devido à perda de foco pontual; (5) núcleo de quasipartícula faltante (6). Quasipartícula identificada como micropelota e com região central faltante.

Observa-se pela matriz de confusão da Tabela 32 que em todas as granulometrias e cenários, exceto MT +2,80 SCOP, algumas quasipartículas foram classificadas equivocadamente pela rotina como micropelotas. Todas as micropelotas foram identificadas corretamente pela rotina e estão concentradas em

MT +1,00 SCOP. Desta forma, o percentual de quasipartículas da Tabela 31 é ligeiramente superior do que o apontado para todos os cenários, exceto MT +2,80 SCOP.

Tabela 32: Matriz de confusão da classificação de quasipartículas e micropelotas de MT +1,00, MT +2,80 e MT +4,75 mm

MT CENÁRIO	+1,00 mm				+2,80 mm				+4,75 mm			
	SCOP		COP		SCOP		COP		SCOP		COP	
GT\T	QP	MP	QP	MP	QP	MP	QP	MP	QP	MP	QP	MP
QP	80	4	91	4	26	0	21	3	9	3	10	2
MP	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Parâmetros referentes à camada aderente das quasipartículas foram medidos pela rotina 1A e apresentados na Tabela 33.

Tabela 33: Medidas diretas e indireta de camada aderente de quasipartículas

MT	CENÁRIO	$\Sigma A_{CA} / \Sigma A_{QP}$	$\Sigma (A_{QP} \times l_{MCA}) / \Sigma A_{QP}$ (mm)	$\Sigma l_{MCA} / n$ (mm)
+1,00 mm	SCOP	0,53	1,49	0,11
	COP	0,59	1,47	0,11
+2,80 mm	SCOP	0,61	1,26	0,24
	COP	0,54	1,20	0,17
+4,75 mm	SCOP	0,40	1,16	0,16
	COP	0,38	1,06	0,26

Os comportamentos da camada aderente para MT +1,00 SCOP e COP são similares. Ambas as amostras MT +1,00 SCOP e COP, se comparadas com BC +1,00, apresentam menor proporção em área entre camada aderente e núcleo, menor concentração de camada aderente em núcleos maiores e proporção similar de partículas pequenas com pouca camada aderente. Qualitativamente por inspeção visual, notam-se núcleos menores em BC+1,00. É necessário ressaltar que ocorreram mais erros de identificação de camada aderente e núcleo nesta granulometria, principalmente no *blend* de coprodutos, e que uma grande quantidade de pseudopartículas de BC +1,00 que deveriam ser identificadas como quasipartículas foram classificadas como micropelotas, comprometendo resultados estatísticos.

MT +2,80 SCOP apresenta menor uniformidade na espessura da camada aderente em relação à MT +1,00 e BC +2,80. A proporção em área entre camada aderente e núcleo é ligeiramente maior em MT +2,80 SCOP se comparado com BC +2,80 e similar a MT +2,80 COP, e apresenta maior quantidade de partículas com

mais camada aderente. Nota-se qualitativamente por inspeção visual que ocorreram mais erros associados a identificação de núcleos das quasipartículas em SCOP do que COP e BC. Desta forma, a falsa uniformidade da espessura da camada aderente e maior proporção em área entre camada aderente e núcleo de SCOP pode ser justificada, uma vez que todas as amostras parecem similares.

MT +4,75 SCOP e COP apresentam proporção em área entre camada aderente e núcleo similares. No entanto, SCOP apresenta maior quantidade de partículas menores com pouca camada aderente. Apesar dos números indicarem maior uniformidade na espessura da camada aderente para SCOP, infere-se por inspeção qualitativa visual que há uma maior dispersão de tamanhos de núcleos para espessuras de camada aderente similares. A população amostral nesta granulometria é pequena e erros associados à classificação de pseudopartículas como micropelotas em SCOP reduziram mais a quantidade de partículas para medição. Em COP, uma região da resina foi identificada de forma inadequada como quasipartículas e as medições foram incorporados aos resultados.

Os erros associados à identificação, classificação e medição direta e indireta de camada aderente dificultam a análise global acerca do tema, porém, a análise qualitativa visual indica que os cenários SCOP e COP não apresentam diferenças expressivas.

Foram realizadas medidas de Feret e *Roundness* em pseudopartículas classificadas como quasipartículas pela rotina 1A, utilizando as rotinas 1A e 1B, como apresentado na Tabela 34.

Tabela 34: Medidas médias de Feret e *Roundness* por rotinas 1A e 1B a partir de pseudopartículas classificadas como quasipartículas pela rotina 1A

MT	PSEUDOPARTÍCULA	CENÁRIO	FERET ( $\mu\text{m}$ )	ROUNDNESS
+1,00 mm	QP Rotina 1A/1A	SCOP	1,85	0,67
	QP Rotina 1A/1A	COP	1,86	0,66
+2,80 mm	QP Rotina 1A/1A	SCOP	3,52	0,72
	QP Rotina 1A/1A	COP	3,75	0,74
+4,75 mm	QP Rotina 1A/1A	SCOP	4,94	0,65
	QP Rotina 1A/1A	COP	9,45	0,68

Comparando-se os cenários SCOP e COP para cada granulometria, verifica-se que a *Roundness* é semelhante. A fração +2,80, que provavelmente possui uma

maior camada aderente relativa ao núcleo, apresentou aspecto mais circular do que as demais granulometrias.

Comparando-se os cenários SCOP e COP para cada granulometria, verifica-se que os resultados de Feret são semelhantes, exceto para a granulometria +4,75 mm. A amostra MT +4,75 COP apresenta uma quasipartícula com aspecto mais alongado, justificando a diferença com relação à MT +4,75 SCOP.

Os histogramas da Figura 51, da Figura 52 e da Figura 53 apresentam os resultados de Feret e *Roundness* das quasipartículas nas granulometrias +1,00 mm, +2,80 mm e +4,75mm respectivamente.

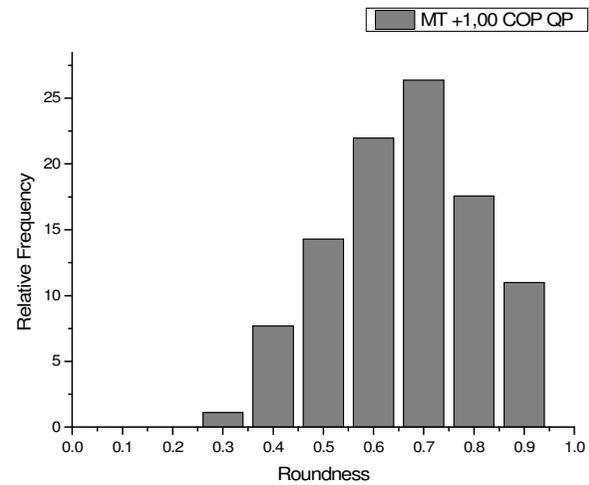
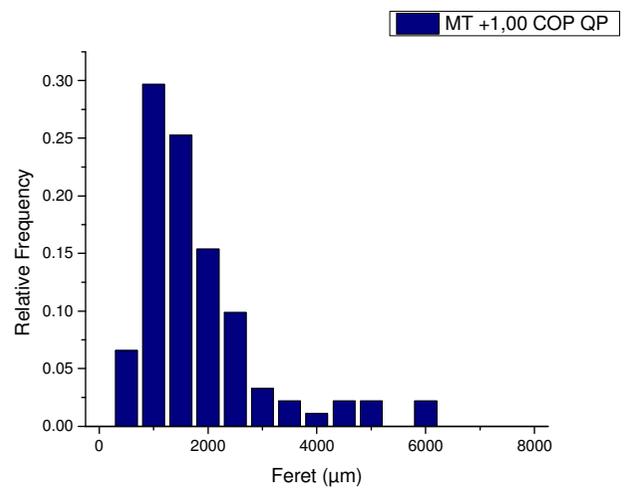
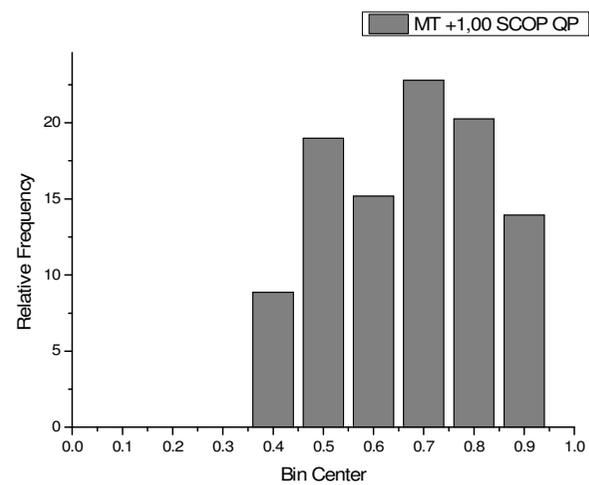
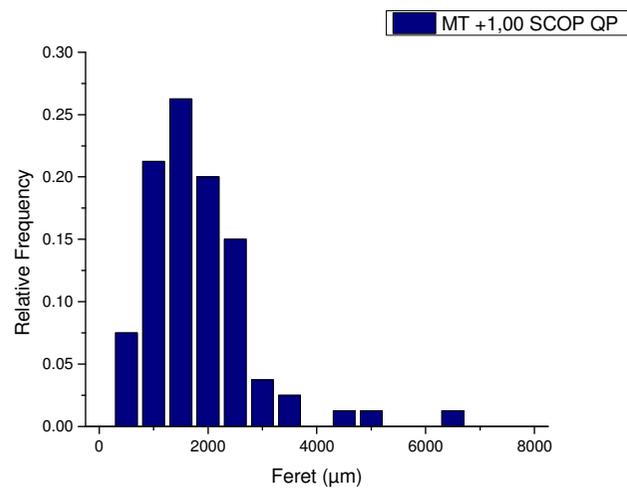


Figura 51: Histogramas de Feret (esquerda) e *Roundness* (direita) das quasipartículas de MT +1,00mm SCOP (cima) e COP (baixo)

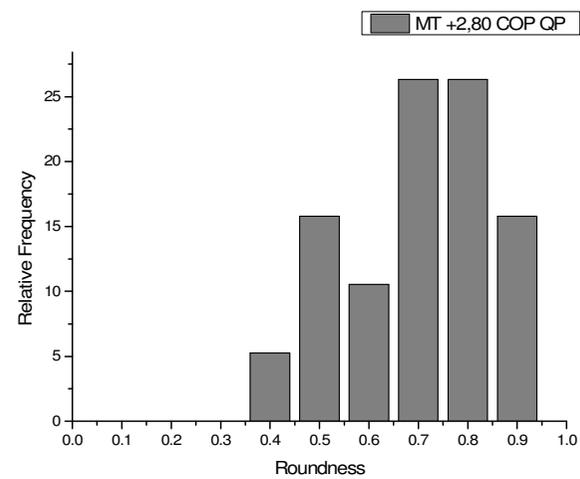
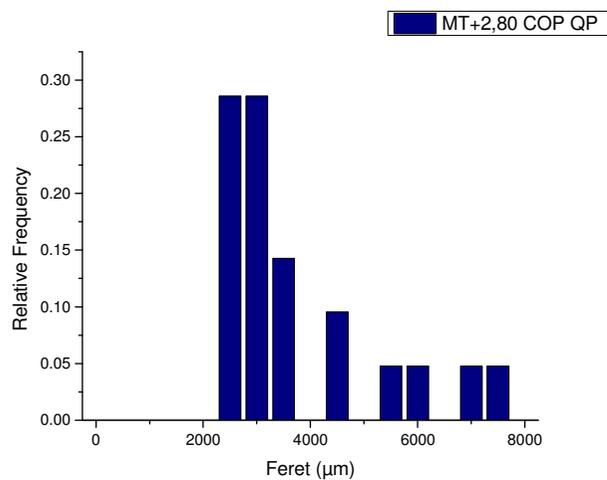
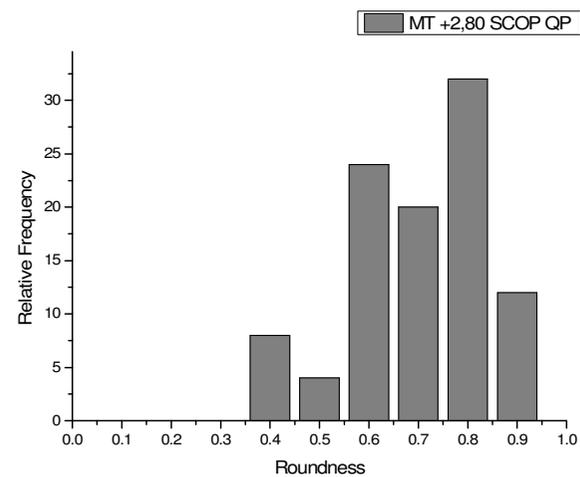
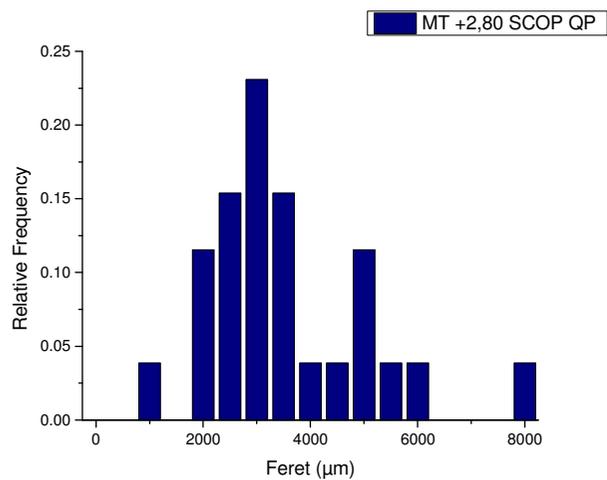


Figura 52: Histogramas de Feret (esquerda) e *Roundness* (direita) das quasipartículas de MT +2,80mm SCOP (cima) e COP (baixo)

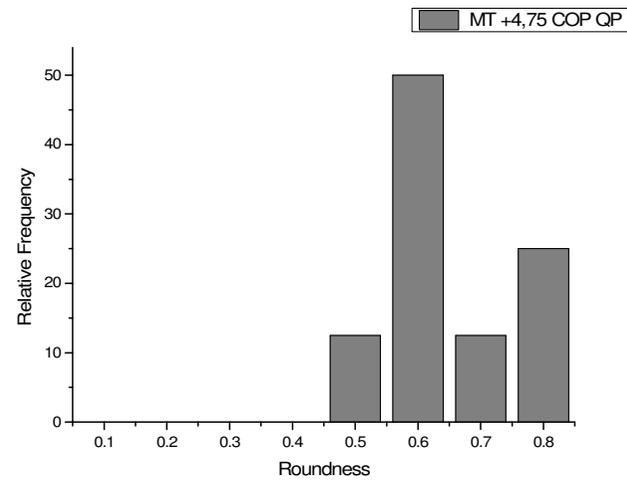
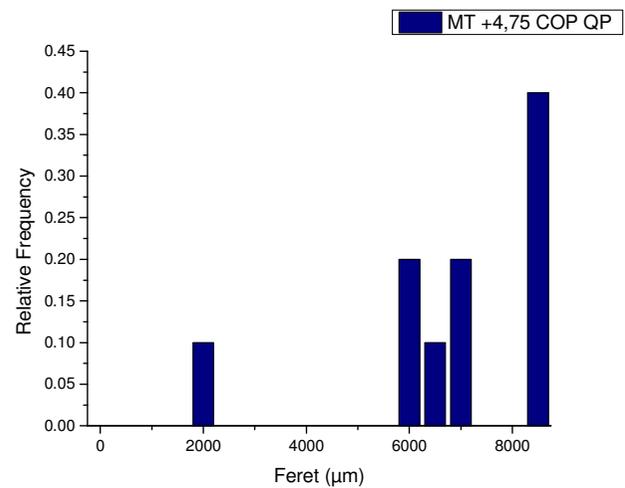
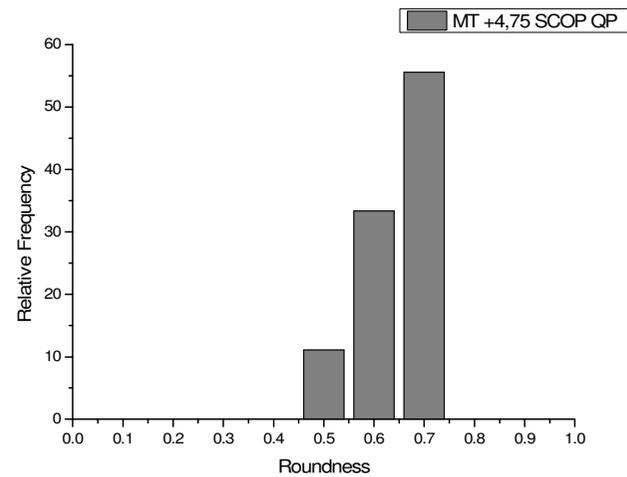
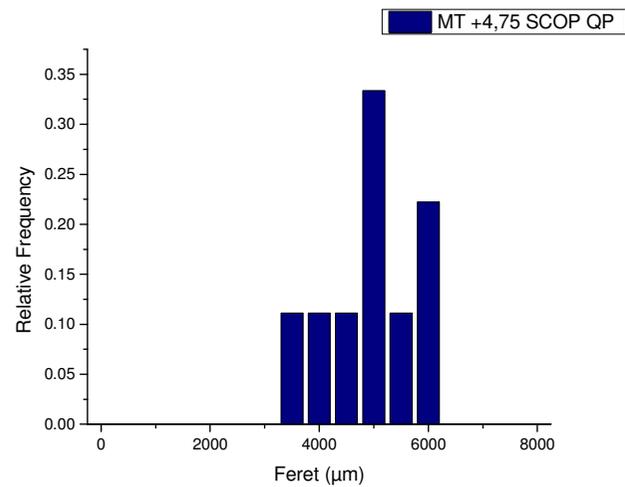


Figura 53: Histogramas de Feret (esquerda) e *Roundness* (direita) das quasipartículas de MT +4,75mm SCOP (cima) e COP (baixo)

Nas granulometrias +1,00 mm e +2,80 mm, as distribuições de Feret e *Roundness* são semelhantes para as condições SCOP e COP. A amostra MT +4,75 COP apresenta mais quasipartículas com aspecto mais alongado do que MT +4,75 SCOP. No entanto, essa característica relativa à forma pode ocorrer ao acaso em ambos os cenários. É necessário ressaltar que a população amostral nesta granulometria é pequena, afetando a representatividade dos resultados e análises.

Foram realizadas medidas de Feret e *Roundness* em pseudopartículas classificadas como micropelotas pela rotina 1A, utilizando as rotinas 1A e 1B, que se encontram na Tabela 35.

Tabela 35: Medidas médias de Feret e *Roundness* por rotinas 1A e 1B a partir de pseudopartículas classificadas como micropelotas pela rotina 1A

MT	PSEUDOPARTÍCULA	CENÁRIO	FERET ( $\mu\text{m}$ )	ROUNDNESS
+1,00 mm	MP Rotina 1A/1B	SCOP	1,45	0,71
	MP Rotina 1A/1B	COP	1,77	0,61

Como todas as pseudopartículas identificadas como micropelotas nas amostras MT +2,80 e MT +4,75 são quasipartículas ou pequenas regiões de quasipartículas, não serão discutidos os resultados referentes às micropelotas destas granulometrias. É necessário que ressaltar erros similares também ocorrem na granulometria MT +1,00, mas há pseudopartículas verdadeiramente classificadas como micropelotas na avaliação.

Comparando-se os cenários SCOP e COP para cada granulometria, verifica-se que MT +1,00 COP apresenta maior Feret em relação a MT +1,00 SCOP e a *Roundness* é maior para SCOP.

Os histogramas da Figura 54 apresentam os resultados de Feret e *Roundness* das micropelotas na granulometria +1,00 mm.

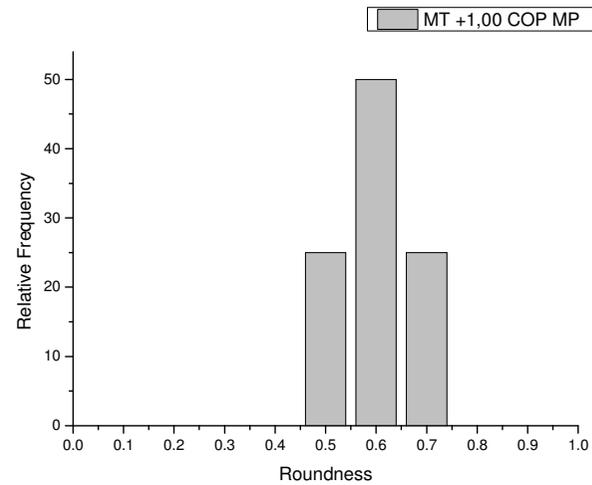
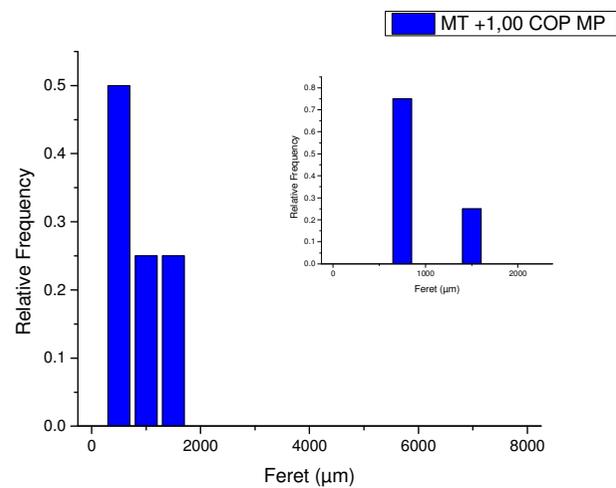
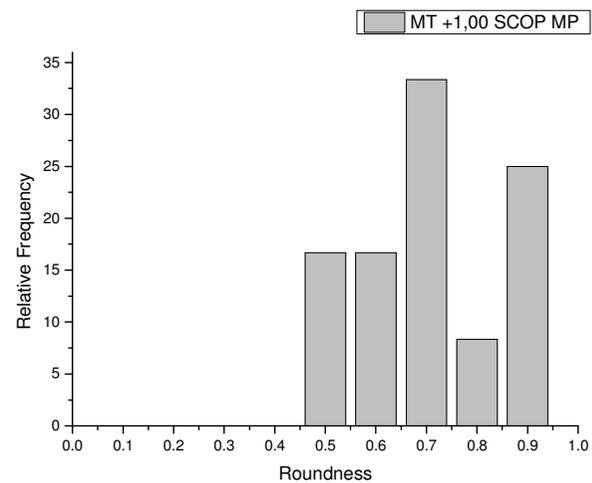
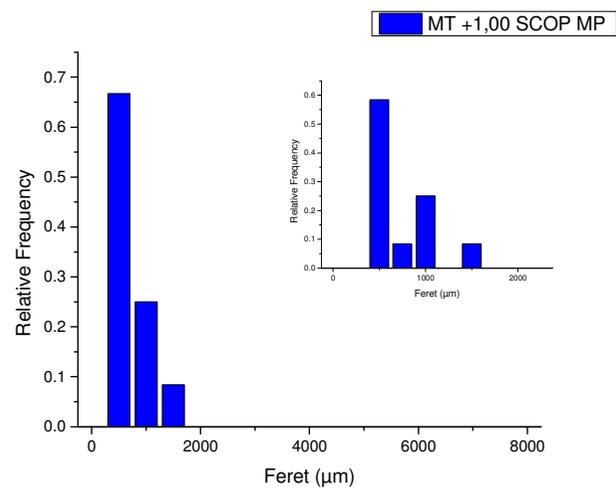


Figura 54: Histogramas de Feret (esquerda) e Roundness (direita) das micropelotas de MT +1,00mm SCOP (cima) e COP (baixo)

Apesar de MT +1,00 COP apresentar média ligeiramente superior para feret, as distribuições são semelhantes. Foi realizado um ajuste de escala (0-2.000  $\mu\text{m}$ ) do gráfico de feret para permitir melhor visualização do comportamento. No entanto, como a população amostral é pequena, 12 micropelotas para SCOP e 4 micropelotas para COP, não se pode determinar o tipo de distribuição. Observa-se que SCOP apresenta uma distribuição com média de *Roundness* maior do que COP, que tem micropelotas com *Roundness* em uma faixa mais concentrada de valores.

Nota-se que houve uma predominância na formação de quasipartículas em relação às micropelotas na mistura total a sinterizar, com distribuição de tamanho maior do que a apresentada no *blend* de coprodutos para as mesmas granulometrias e tendência à circularidade, apesar de menor do que micropelotas. De modo geral, o comportamento de camada aderente nas quasipartículas foi similar para as condições SCOP e COP.

Para cálculo do percentual em massa visualizado em quasipartículas cuja partícula nucleante é uma micropelota de *blend* de coprodutos, foi medida a área do núcleo da quasipartículas, ou seja, a área da micropelota de *blend* de coprodutos e a área de todas as pseudopartículas. Os resultados encontram-se na Tabela 36.

Tabela 36: Medida de área das pseudopartículas contendo micropelotas de *blend* de coprodutos como partícula nucleante e média de área dos respectivos núcleos

MT	PARTÍCULA	ÁREA (cm <sup>2</sup> )
+1,00 mm	PSEUDOPARTÍCULA	1,351
	NÚCLEO	0,015
+2,80 mm	PSEUDOPARTÍCULA	1,369
	NÚCLEO	0,021

De acordo com a Equação 2, foi adicionado 1,10% em massa de *blend* de coprodutos na forma de micropelotas como núcleo de quasipartículas para a granulometria +1,00 mm e 1,54% para a granulometria +2,80 mm. De acordo com a Equação 3, foram adicionados 2,64% em massa de *blend* de coprodutos na forma de micropelotas como núcleo de quasipartículas, somando-se as granulometrias +1,00, +2,80 e +4,75 mm.

As quasipartículas cuja partícula nucleante é uma micropelota de *blend* de coprodutos podem ser visualizadas na Figura 55.

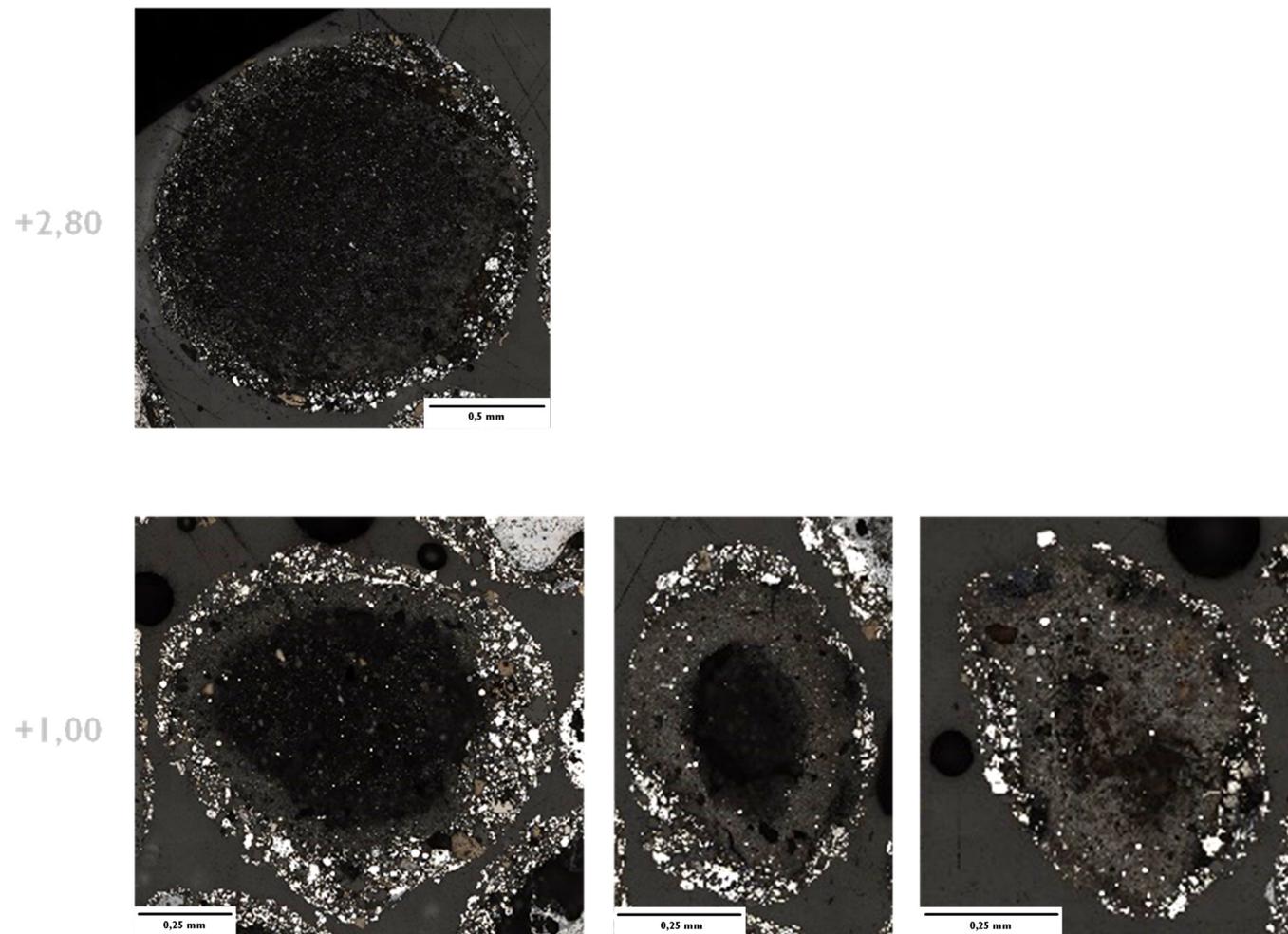


Figura 55: Imagens das quasipartículas cuja partícula nucleante é uma micropelota de *BC* +2,80 mm (cima) ou 1,00 mm (baixo)

Desta forma, cerca de 44,96 % da massa adicionada de coprodutos atuou como micropelotas nucleantes para formação de quasipartículas nas granulometrias +1,00 e +2,80. Cerca de 44% das partículas de BC +1,00 são micropelotas e cerca de 77% das partículas de BC +2,80 são micropelotas. Não se tem o percentual de micropelotas em BC -1,00. A adição em massa do *blend* de coprodutos em MT COP foi de 5,88%.

Não se pode fazer relação direta entre micropelotas existentes em BC+1,00 e as quasipartículas a partir de micropelotas de *blend* de coprodutos existentes na MT +1,00 mm, pois o processo de granulação promove o crescimento de quasipartículas e/ou micropelotas e a pseudopartícula pode ser encontrada na granulometria maior da mistura total a sinterizar. Logo, micropelotas de BC -1,00 podem aparecer em MT +1,00 e micropelotas de BC+1,00 podem aparecer em MT +2,80.

Os outros 55,04% de massa de coprodutos adicionada, que não estão em forma de micropelotas, podem ter contribuído para o processo de aumento de espessura de camada aderente de quasipartículas originárias do *blend* de coprodutos microaglomerado ou aumento de camada aderente de quasipartículas da mistura total a sinterizar, mas não se consegue mensurar.

Nota-se que a fração em massa de 44,96% medida como micropelotas que atuaram como micropelotas nucleantes para formação de quasipartículas no cenário COP está muito próxima da estimativa da análise granulométrica do *blend* de coprodutos que previa que cerca de 50% em massa das pseudopartículas adicionadas atuariam como partículas nucleantes.

Com o objetivo de buscar outra metodologia de classificação mais eficiente do que a rotina 1A, outro método de aquisição e outra rotina de processamento digital de imagens foram utilizados. Imagens das amostras das rotas tambor+tambor e HPS foram capturadas de acordo com a metodologia de aquisição 1 (Seção 4.2.2.4.1). Estas imagens têm aspecto visual semelhante às da Figura 30 que foram capturadas com a metodologia de aquisição 2, porém com menor resolução. As pseudopartículas e núcleos das amostras, definidos manualmente, foram utilizados na rotina 2B para treinamento e teste da rede, que é baseada em *deep learning*.

Como resultado, tem-se as métricas *precision*, *recall* e *F1-score*, apresentados na Tabela 37 a seguir.

Tabela 37: Métricas do treinamento e teste da rede U-Net++ utilizada para a classificação de pseudopartículas e núcleos

PARTÍCULA	PRECISION	RECALL	F1-SCORE
PSEUDOPARTÍCULA	95,2457	97,5671	96,3924
NÚCLEO	88,3513	71,0299	78,7493

A rotina 2B foi capaz de classificar as pseudopartículas e núcleos em quasipartículas, micropelotas e núcleos não aderidos. Como resultado exploratório da metodologia, tem-se as imagens comparativas da Figura 56 e da Figura 57.

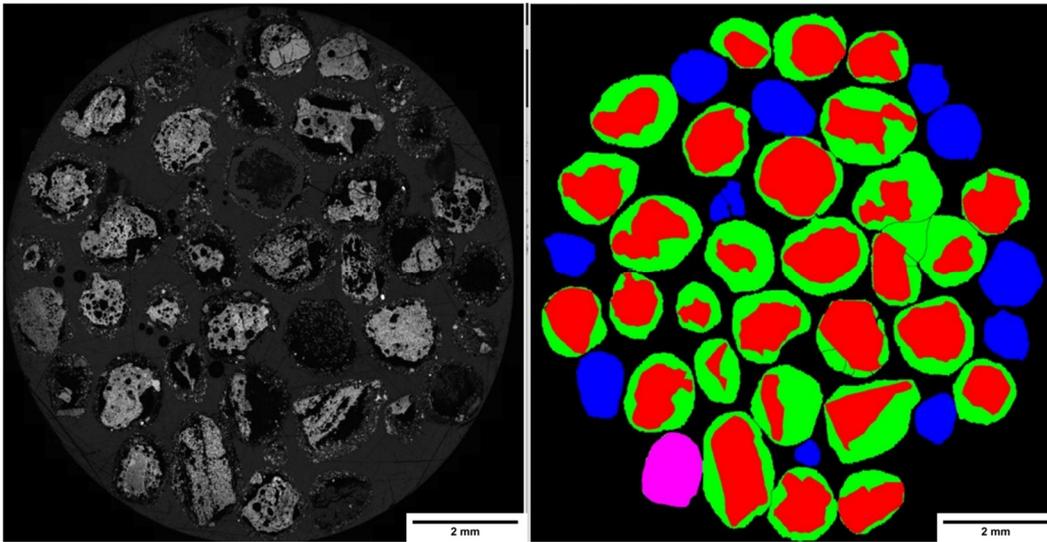


Figura 56: Representação da classificação por *deep learning* de pseudopartículas e núcleos em QP e MP e NNA para a granulometria +2,80mm

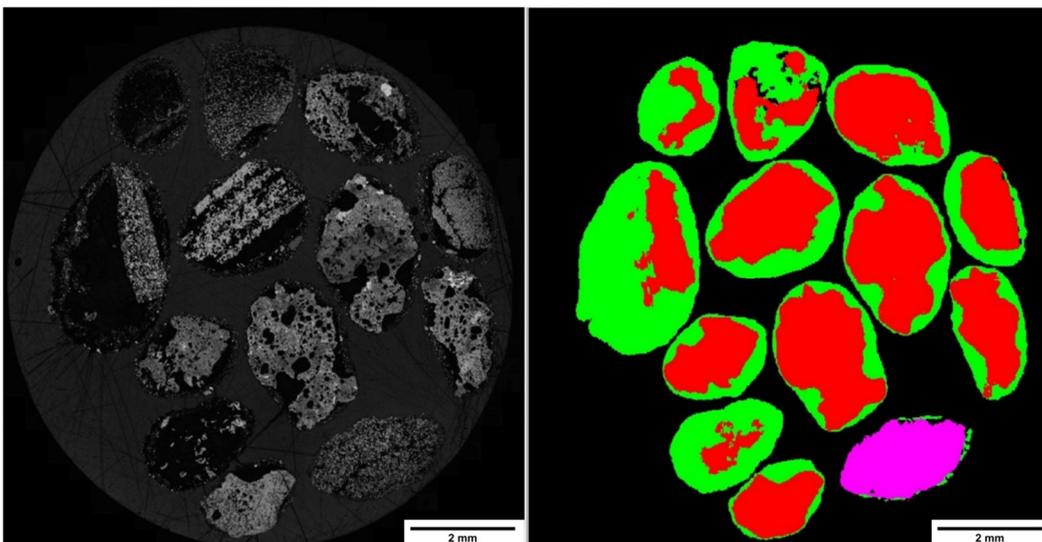


Figura 57: Representação da classificação por *deep learning* de pseudopartículas e núcleos em QP e MP e NNA para a granulometria +4,75mm

Pode-se comparar os resultados da Figura 49 e da Figura 57, ambas representações gráficas são referentes à SCOP +4,75. Nota-se que a técnica tradicional apresentou uma maior confusão em relação à classificação entre micropelotas e quasipartículas. Na técnica avançada houve a identificação de um núcleo não aglomerado, por apresentar uma camada aderente de espessura bem pequena, compatível com a definição da bibliografia. Apesar da pseudopartícula que apresenta perda de foco ter sido identificada corretamente como quasipartícula pela técnica avançada, o tamanho de sua camada foi superdimensionado. Nota-se uma tendência de representação mais orgânica das estruturas pela técnica avançada, havendo uma perda de característica da forma original. Já a técnica tradicional apresenta marcações com excesso de angulações, havendo também perda de informações confiáveis, como por exemplo, do perímetro.

Os resultados obtidos por essa metodologia são bastante promissores para classificação das pseudopartículas em quasipartículas, micropelotas e núcleos não aderidos e, como sugestão de trabalhos futuros, deve-se refinar o treinamento da rede com mais amostras e realizar as medidas diretas e indireta de camada aderente, de Feret e *Roundness*.

### **5.3.3.2. Microtomografia**

Um conjunto de pseudopartículas foi escolhido ao acaso, sem realizar processo de homogeneização e quarteamento desta subamostra, para captura de imagens de acordo com a metodologia de aquisição 1 (vide Seção 4.2.2.5.1). As imagens da reconstrução 3D, sem e com coprodutos, podem ser visualizadas na Figura 58 e na Figura 59.

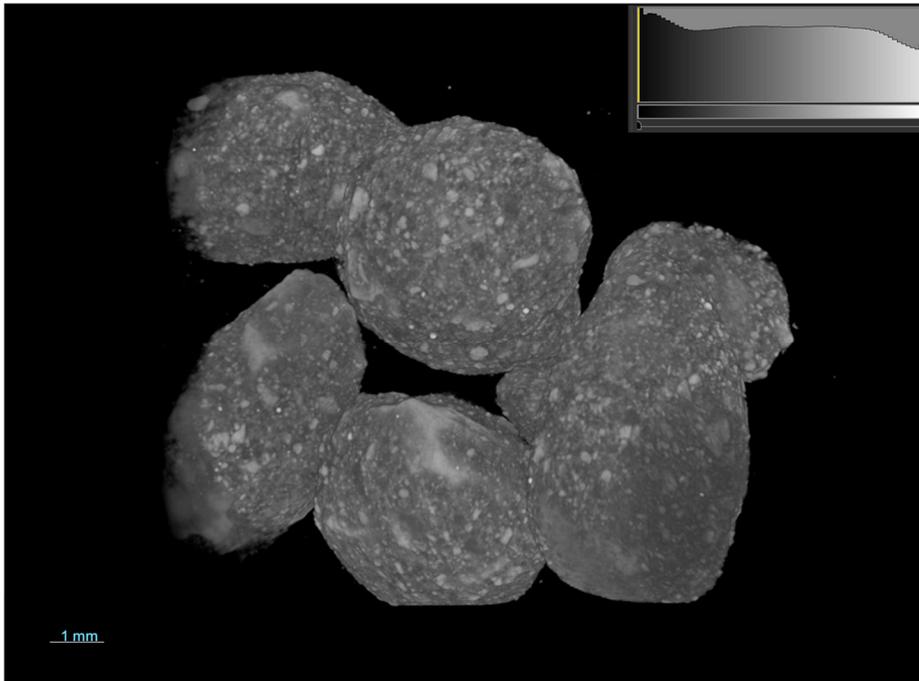


Figura 58: Reconstrução 3D da imagem obtida por microCT da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm

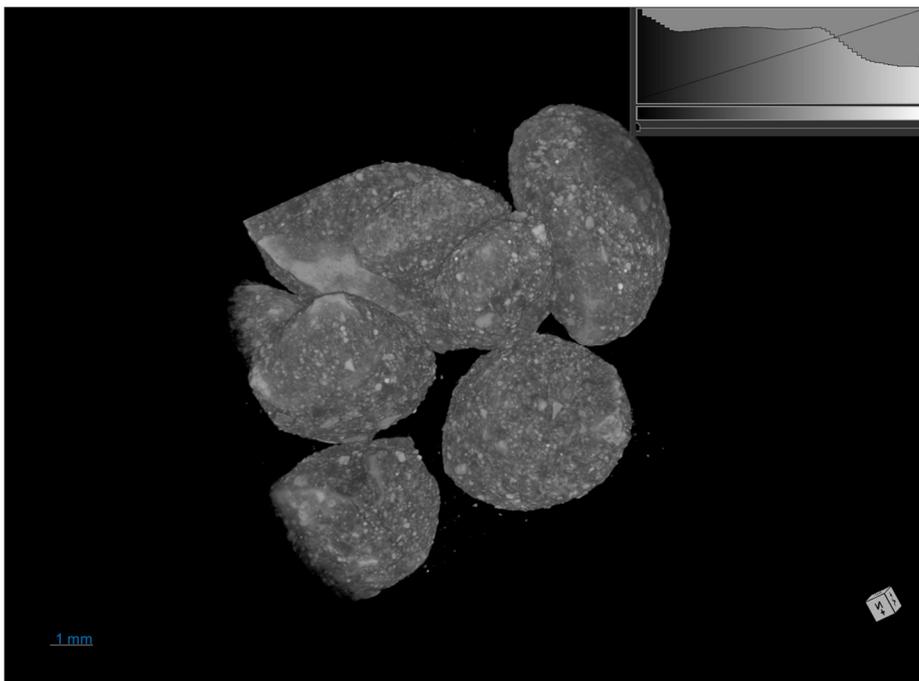


Figura 59: Reconstrução 3D da imagem obtida por microCT da MT a sinterizar COP +2,80 mm

A avaliação qualitativa foi realizada de acordo com a rotina A (seção 4.2.2.5.2). Desta forma, as 8 partículas da população amostral foram segmentadas por limiarização de acordo com os picos e vales da Figura 60. Os histogramas estão apresentados em escala logarítmica para facilitar a visualização. As seguintes

estruturas foram representadas em escala de cores: ferro metálico (amarelo) quando couber; núcleo (vermelho); e camada aderente/micropelotas (verde).

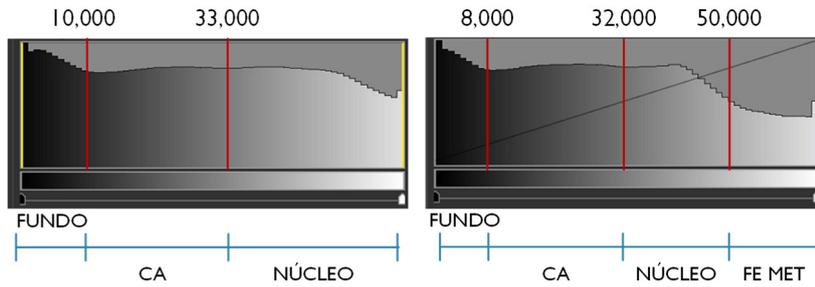


Figura 60: Histogramas das imagens 3D da MT a sinterizar SCOP (esquerda) e COP (direita) na granulometria +2,80 mm, com indicação dos tons de corte para determinação das estruturas camada aderente (CA), núcleo e Fe Metálico.

Como apenas os pós finos que compõem o *blend* de coprodutos apresentam ferro metálico em sua composição, espera-se encontrar essa fase de duas formas e em pequena proporção:

- Dispersa na camada aderente de quasipartículas da mistura total com coprodutos, de acordo com a Figura 61;
- Em micropelotas de *blend* de coprodutos que atuam como partículas nucleantes de quasipartículas na mistura total com coprodutos, porém não presente na população amostral analisada.

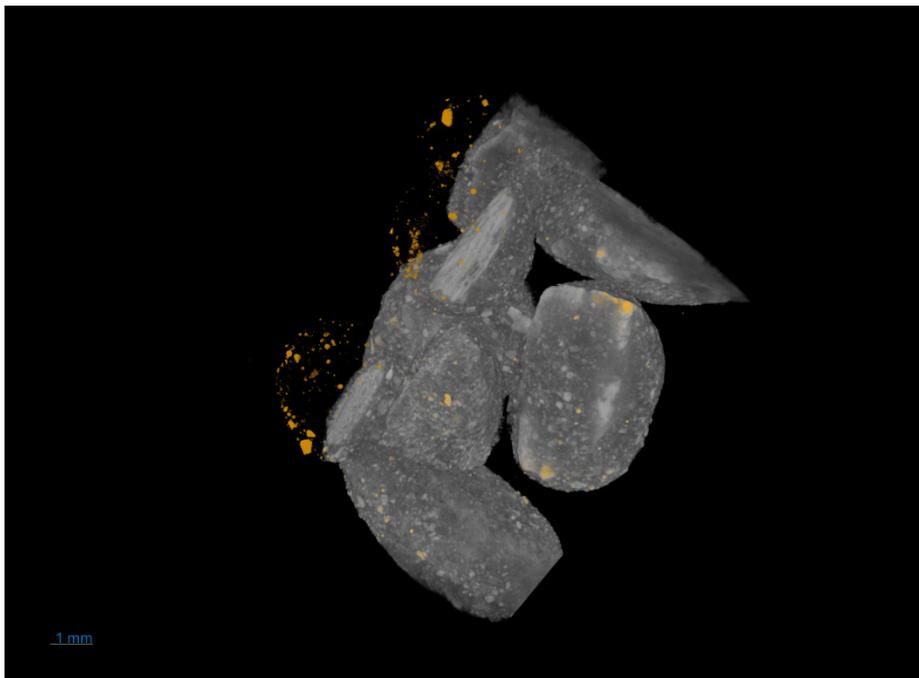


Figura 61: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm mostrando as partículas de Ferro metálico em amarelo

Quasipartículas necessariamente possuem uma partícula nucleante no seu interior, mas, por questões técnicas da microtomografia, caso haja uma homogeneidade da intensidade devido à absorbância considerando-se a densidade e espessura das partículas, a partícula nucleante poderá não ser visualmente discriminada. No entanto, devido à pequena população amostral e à dificuldade com a representatividade, foram visualizadas apenas pseudopartículas na forma de quasipartículas.

Para inspeção visual utilizando escala de cor, os núcleos e a camada aderente das quasipartículas foram segmentados separadamente por limiarização. Caso houvesse a presença de micropelotas na população amostral, estas seriam segmentadas junto da camada aderente das quasipartículas, o que não ocorreu para essa imagem. Visualmente seria possível discriminá-las, pois micropelotas não possuem partículas nucleantes no seu interior. Para inspeção visual utilizando escala de cor, os núcleos das quasipartículas foram segmentados de acordo com a Figura 62 e a Figura 63. A Figura 64, união das representações gráficas do núcleo e ferro metálico, apresenta uma sub-região de exemplo que sugere a classificação das pseudopartículas em quasipartículas da mistura total a sinterizar com coprodutos.

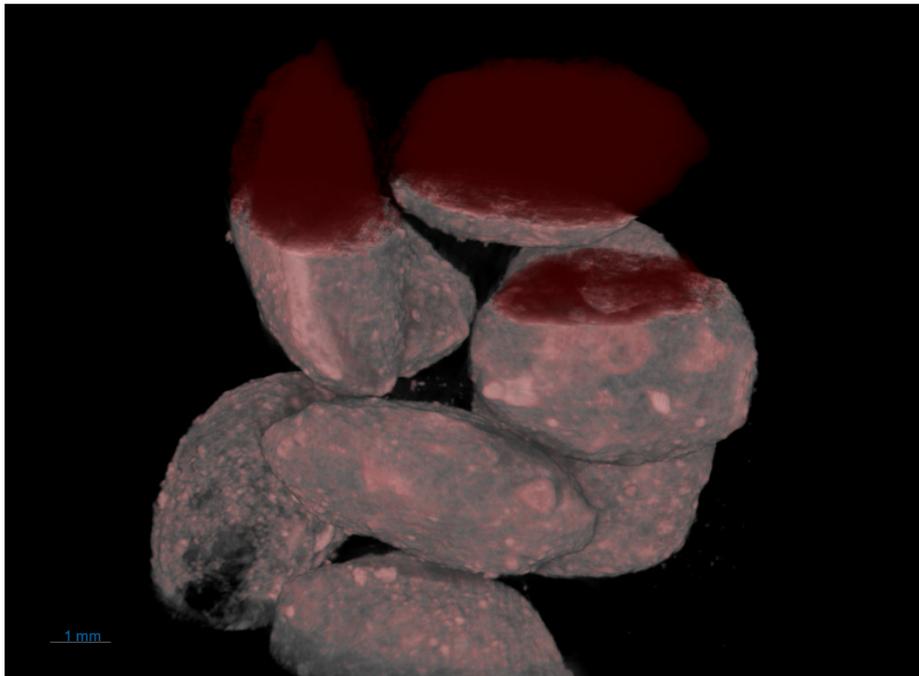


Figura 62: Imagem 3D da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm mostrando os núcleos em vermelho

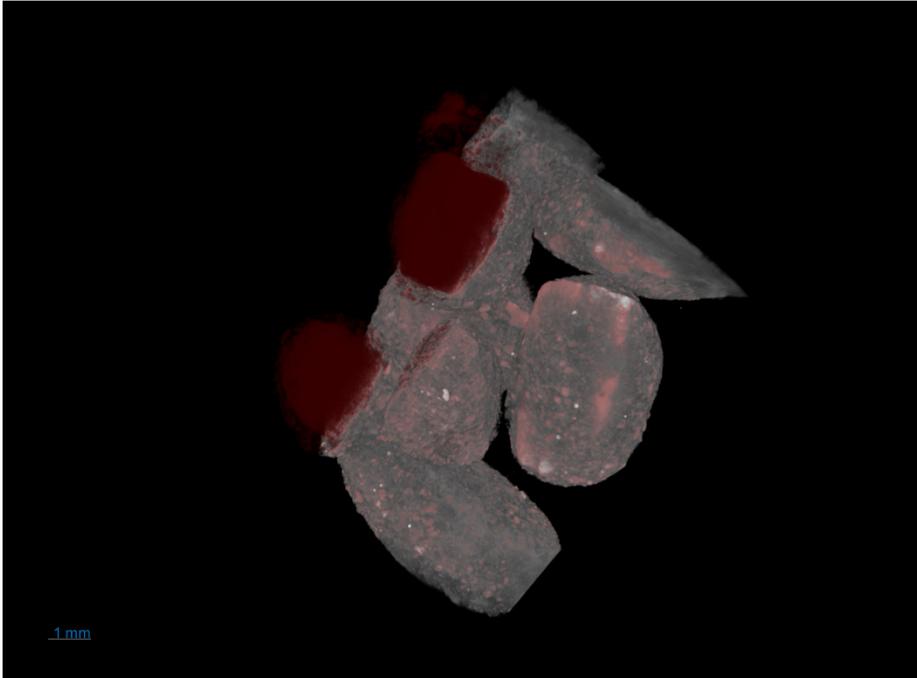


Figura 63: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm mostrando os núcleos em vermelho

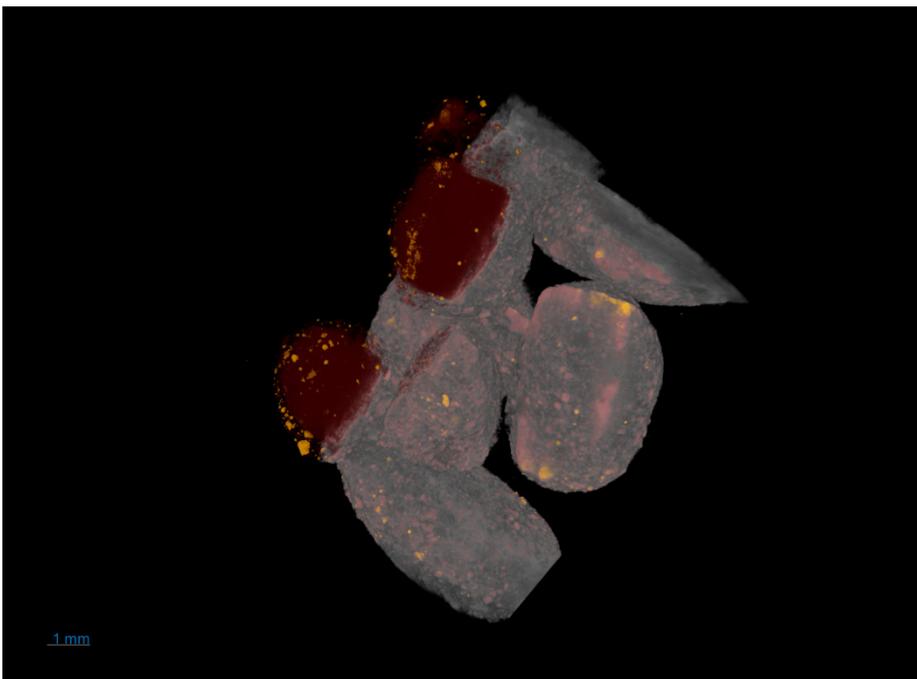


Figura 64: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm combinando o ferro metálico em amarelo e os núcleos em vermelho

A camada aderente também foi segmentada por limiarização, de acordo com a Figura 65 e a Figura 66. No cenário com coprodutos, os pixels referentes à pequena parcela de ferro metálico foram excetuados da segmentação da camada aderente.

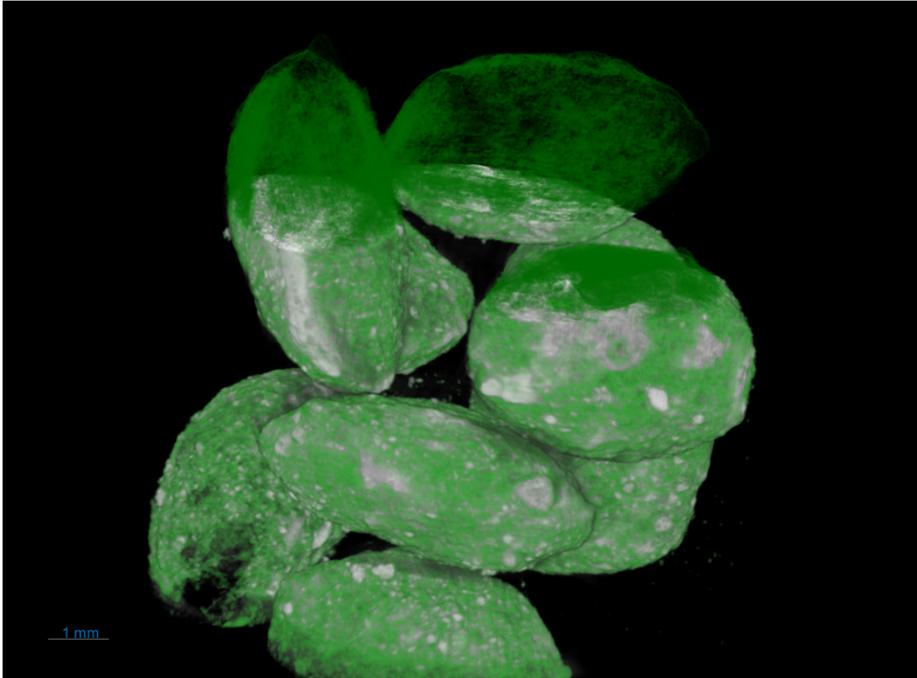


Figura 65: Imagem 3D da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm mostrando a camada aderente em verde



Figura 66: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm mostrando a camada aderente em verde

A Figura 67 e a Figura 68, união das representações gráficas do núcleo e camada aderente, apresentam as pseudopartículas classificadas em quasipartículas.

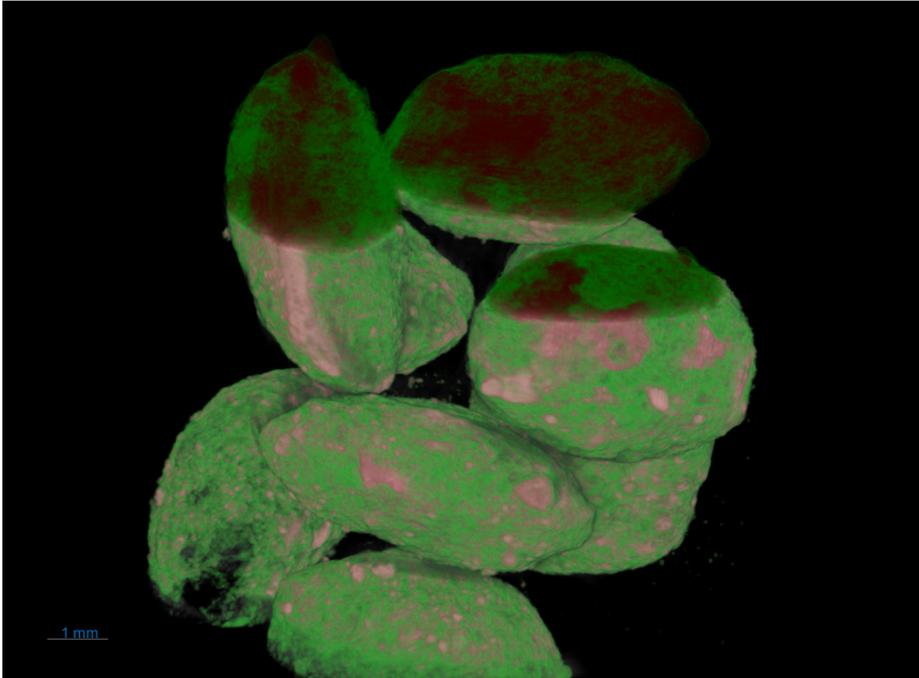


Figura 67: Imagem 3D da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm combinando a camada aderente em verde e os núcleos em vermelho

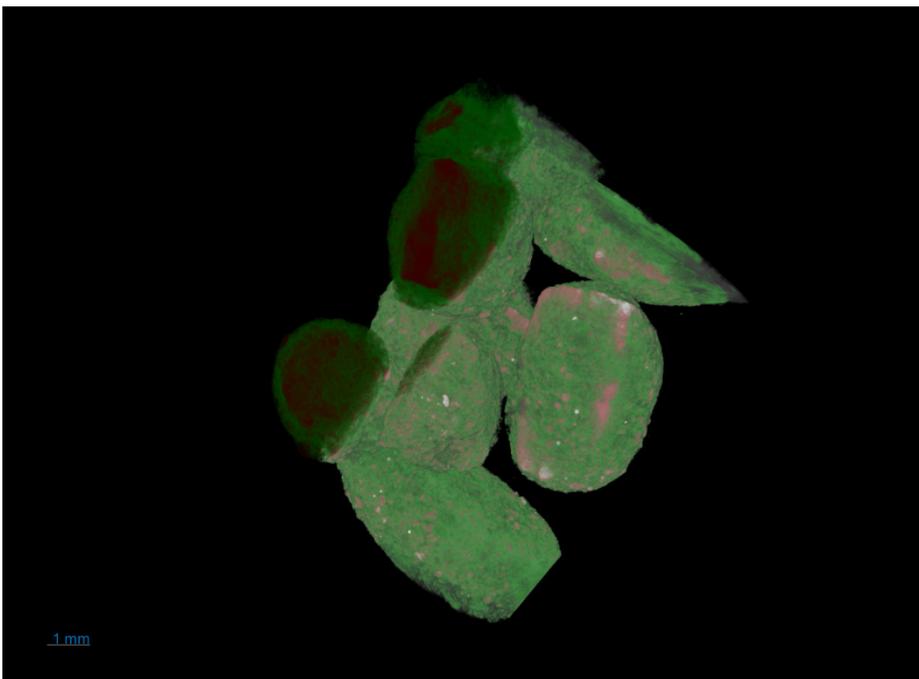


Figura 68: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm combinando a camada aderente em verde e os núcleos em vermelho

Na amostra da MT COP foi identificada uma partícula nucleante escura, diferente do padrão visualizado nos demais cenários, de acordo com a Figura 69. Infere-se, devido à baixa absorvância, que a origem deste núcleo seja de

combustíveis adicionados na mistura total, que poderia ser encontrado ao acaso, em ambos os cenários, SCOP e COP.

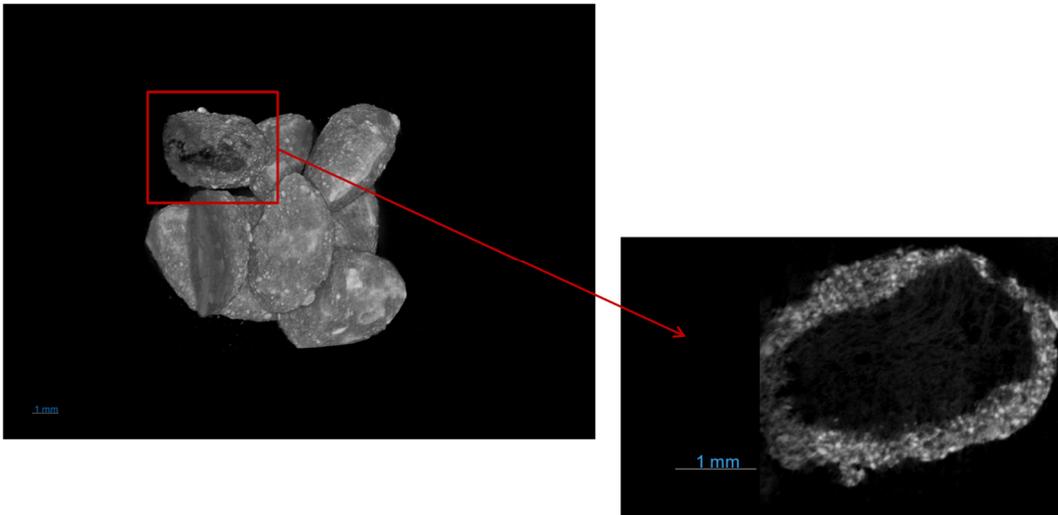


Figura 69: Vista do núcleo escuro de quasipartículas nas imagens 3D (esquerda) e 2D (direita), obtidas por microCT, da MT a sinterizar SCOP +2,80 mm

Nota-se que as quasipartículas identificadas se comportaram da seguinte forma:

- A camada aderente, o ferro metálico disperso na camada aderente e o núcleo das quasipartículas foram segmentados para a amostra com coprodutos, de acordo com a Figura 70;
- A camada aderente homogênea e os núcleos das quasipartículas foram segmentados para a amostra sem coprodutos, de acordo com a Figura 67;
- Dada a pequena população amostral e limitada representatividade, não foi possível visualizar as micropelotas.

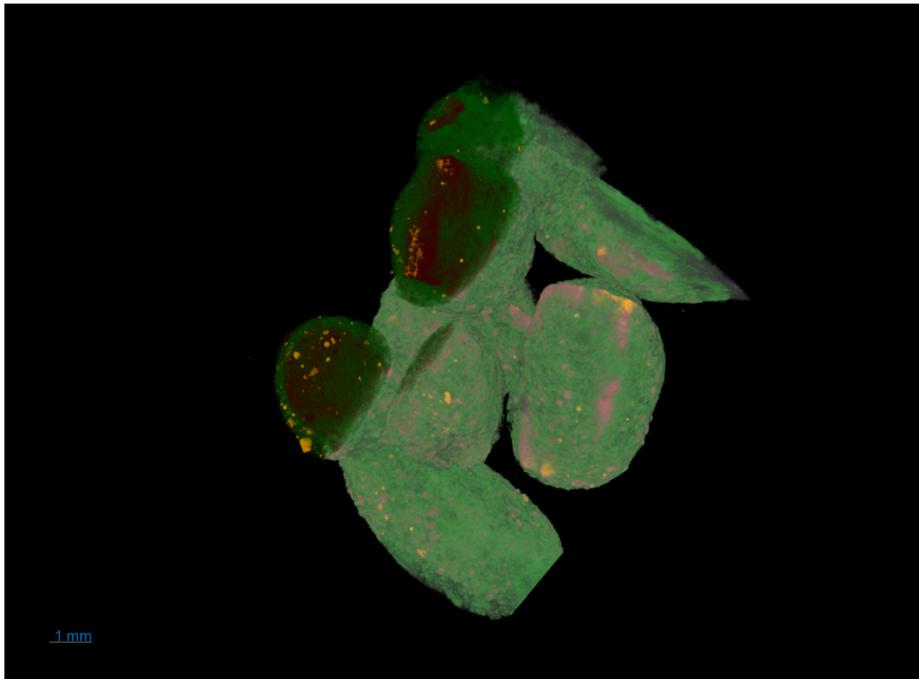


Figura 70: Imagem 3D da MT a sinterizar COP +2,80 mm combinando a camada aderente em verde, os núcleos em vermelho e o ferro metálico em amarelo

Das 8 pseudopartículas avaliadas em ambos os cenários, todas as partículas foram classificadas como quasipartículas. Visto a pequena população amostral e dificuldade de representatividade, a sugestão para trabalhos futuros é de trabalhar com um número maior de pseudopartículas obtidas por processo de homogeneização e quarteamento.

#### **5.4. Sínter produto**

Foram realizadas análises física, química, microestrutural e metalúrgica do sínter produto e análise de processo de produção do sínter, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP).

##### **5.4.1. Análise física**

Foram realizadas análises granulométrica, de tamboramento e de queda. A análise granulométrica pode ser visualizada na Tabela 38. Observa-se que ambos os sínters produzidos apresentam distribuição granulométrica homogênea nas condições SCOP e COP, com tamanho médio de sínter também similar.

Tabela 38: Análise granulométrica do sinter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

SP \ (%)	50mm	25mm	10mm	5mm	< 5mm	TM (mm)
SCOP	14,08	39,68	21,62	23,05	1,57	29,23
COP	13,59	36,05	21,55	26,02	2,78	27,80

As análises de tamboramento e queda podem ser visualizadas na Tabela 39. O teste de queda para ambas as condições indica que o sinter possui condições adequadas para manuseio e transporte até o reator. O índice de tamboramento foi muito similar para ambas as condições.

Tabela 39: Análise de tamboramento e queda, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

SP	TAMBORAMENTO (IT % > 6,3mm)	QUEDA (ST % > 10mm)
SCOP	60,83	87,30
COP	60,94	83,50

#### 5.4.2. Análise química

Foram realizadas análises químicas do sinter, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP), que pode ser observada na Tabela 40.

Tabela 40: Análise química do sinter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

SP \ (%)	FeT	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnT	P	TiO <sub>2</sub>	FeO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZnO	BB
SCOP	56,73	9,39	6,09	1,91	1,45	0,47	0,053	0,075	5,51	0,01	0,03	0,01	1,54
COP	57,15	8,91	5,84	1,81	1,40	0,52	0,054	0,119	4,37	0,01	0,03	0,01	1,53

A análise química prevista por balanço de massa da mistura total, considerando-se o rendimento químico, foi similar aos resultados mensurados em laboratório do sinter produto. O rendimento químico é calculado pelo desconto do PPC no fechamento da análise química. A química do sinter final foi similar para ambas as condições – SCOP e COP.

A partir das análises de ferro total e FeO é possível inferir que, para SCOP, 62,8% se encontram na forma de hematita e 26,5% na forma de magnetita. De modo análogo, para COP, infere-se que 67,2% se encontram na forma de hematita e 21,0% na forma de magnetita. Assumiu-se que não há a presença das fases ferro metálico e wustita para realização dos cálculos acima.

### 5.4.3. Análise microestrutural

Foram realizadas análises microestruturais por microscopia ótica nas amostras de sínter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP).

Imagens foram capturadas de acordo com as metodologias de aquisição 1 e 2 (Seção 4.2.2.4.1). Utilizou-se a imagem da primeira metodologia para avaliação qualitativa microestrutural do sínter, Figura 73, e a imagem da segunda metodologia para avaliação qualitativa e quantitativa de porosidade, Figura 74. Como as aquisições foram realizadas em etapas diferentes do trabalho, não se guardou a orientação da seção polida para correlação espacial das imagens.

Devido às dificuldades com a visualização dos histogramas devido ao intenso pico de pixels escuros referentes ao fundo externo à seção polida e resina, de acordo com a Figura 71, foi realizado um ajuste de escala para definição dos tons de corte para as segmentações realizadas.

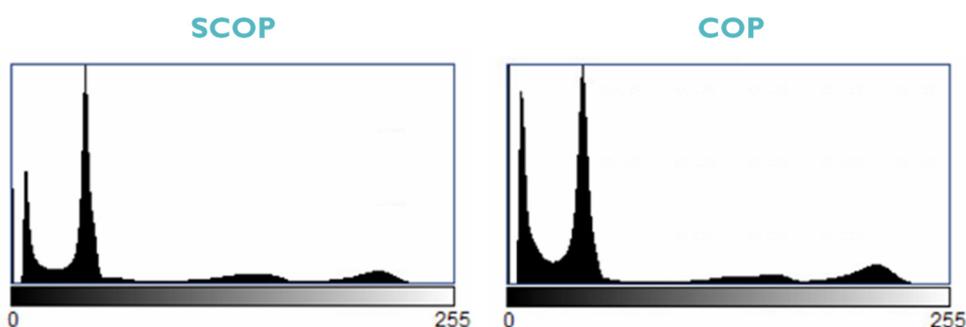


Figura 71: Histograma original das imagens do sínter SCOP (à esquerda) e COP (à direita) capturadas pela metodologia de aquisição 1

Como as imagens foram capturadas nas mesmas condições operacionais, foi definido um tom de corte único a partir do vale do histograma para segmentação do sínter, de acordo com a Figura 72, para avaliação da porosidade.

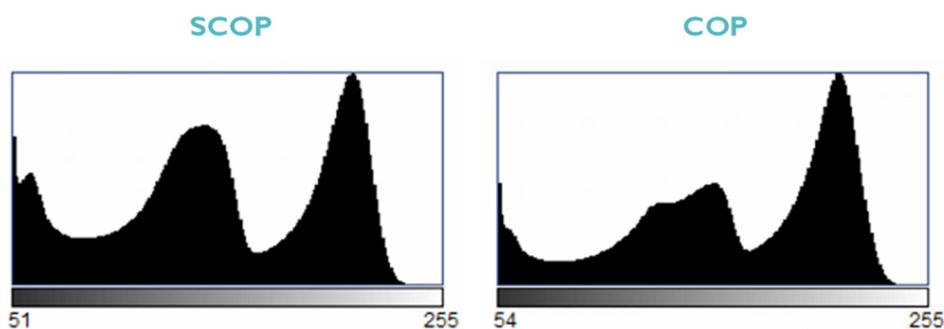


Figura 72: Histograma ampliado das imagens SCOP (à esquerda) e COP (à direita) capturadas pela metodologia de aquisição 1

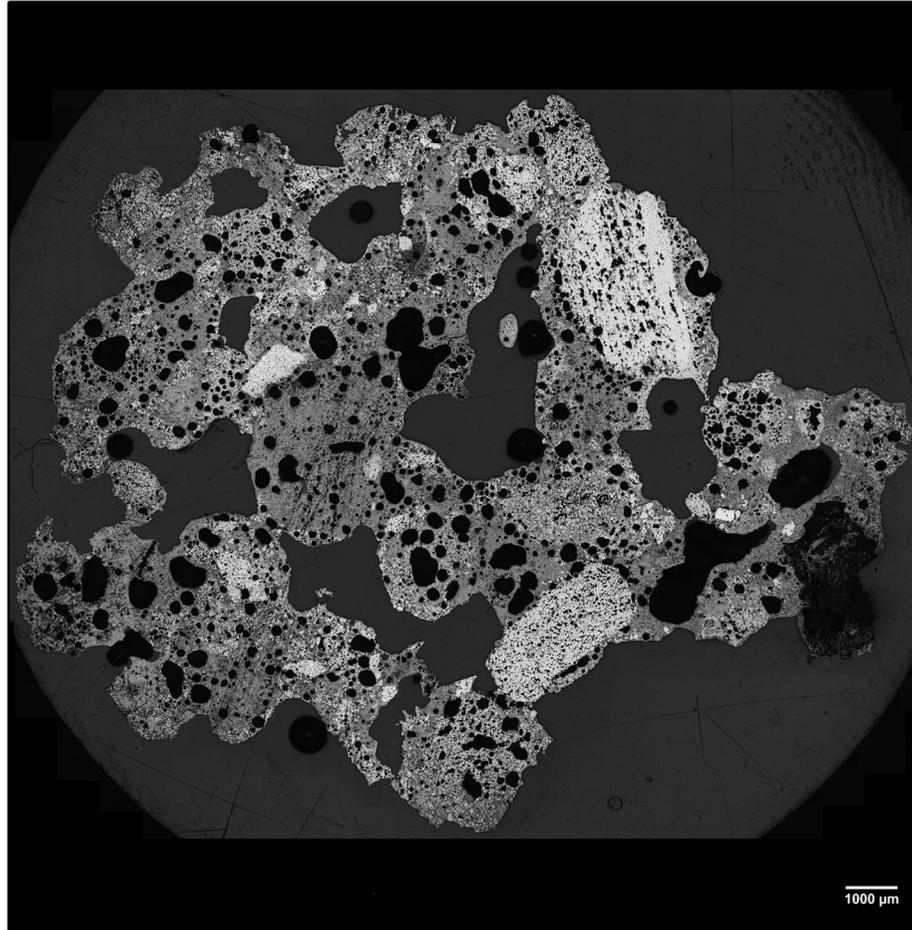
De acordo com a rotina 1C (seção 4.2.2.5.2), foi gerado o mapa de poros que pode ser visualizado na Figura 75. A partir dos atributos extraídos, foram avaliados os parâmetros feret, *Roundness*, número de poros, percentual em área e tamanho médio dos poros. Os três últimos parâmetros podem ser visualizados na e as demais análises dos histogramas anteriores, a porosidade do sínter SCOP aparenta ser distribuída em poros médios fechados e macro poros grandes abertos. Já o sínter COP, apresenta poros menores fechados mais bem distribuídos e em maior quantidade, com macro poros abertos menores. Essa análise de porosidade é fundamental para entendimento do comportamento metalúrgico do sínter, a ser discutido posteriormente.

Tabela 41: Análise da porosidade do sínter, nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

SP	POROS (und)	A (%)	TAMANHO MÉDIO ( $\mu\text{m}^2$ )
SCOP	34.828	33,01	1.129,49
COP	960.385	49,74	66,35

O Sínter COP apresenta uma quantidade de poros mais elevada, com tamanho médio inferior, se comparado ao sínter SCOP. A fração em área de poros também é superior para o sínter COP.

SCOP



COP

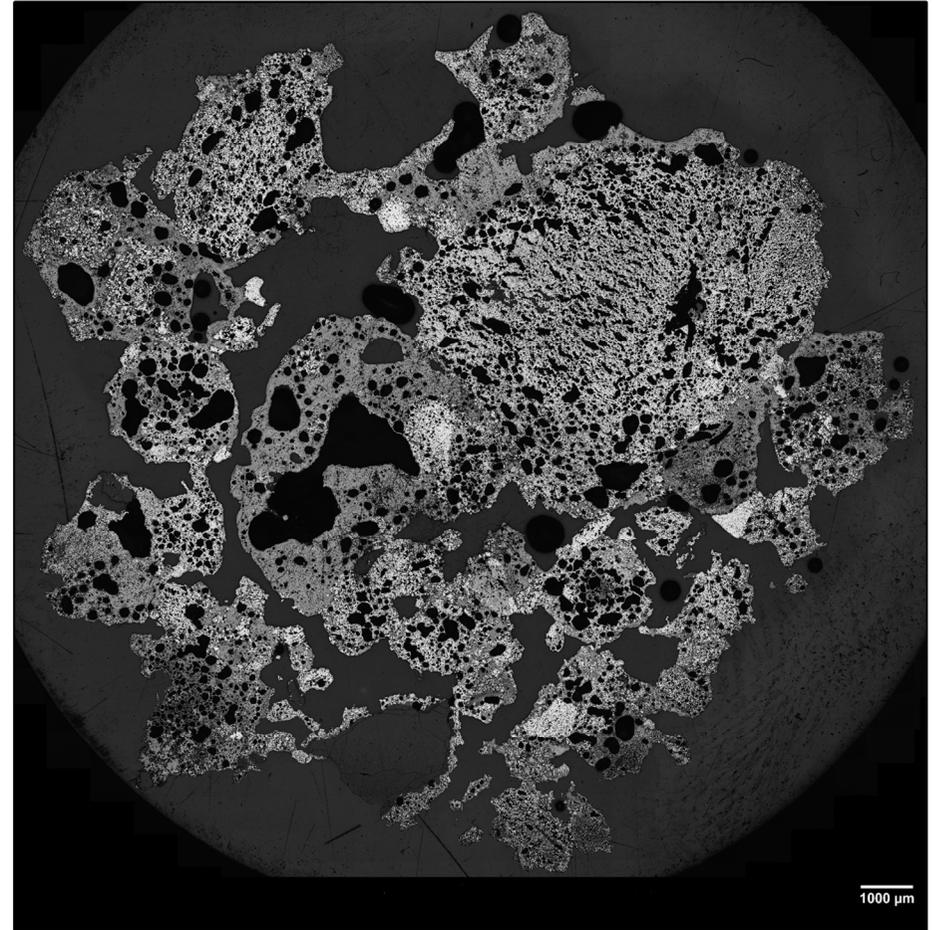
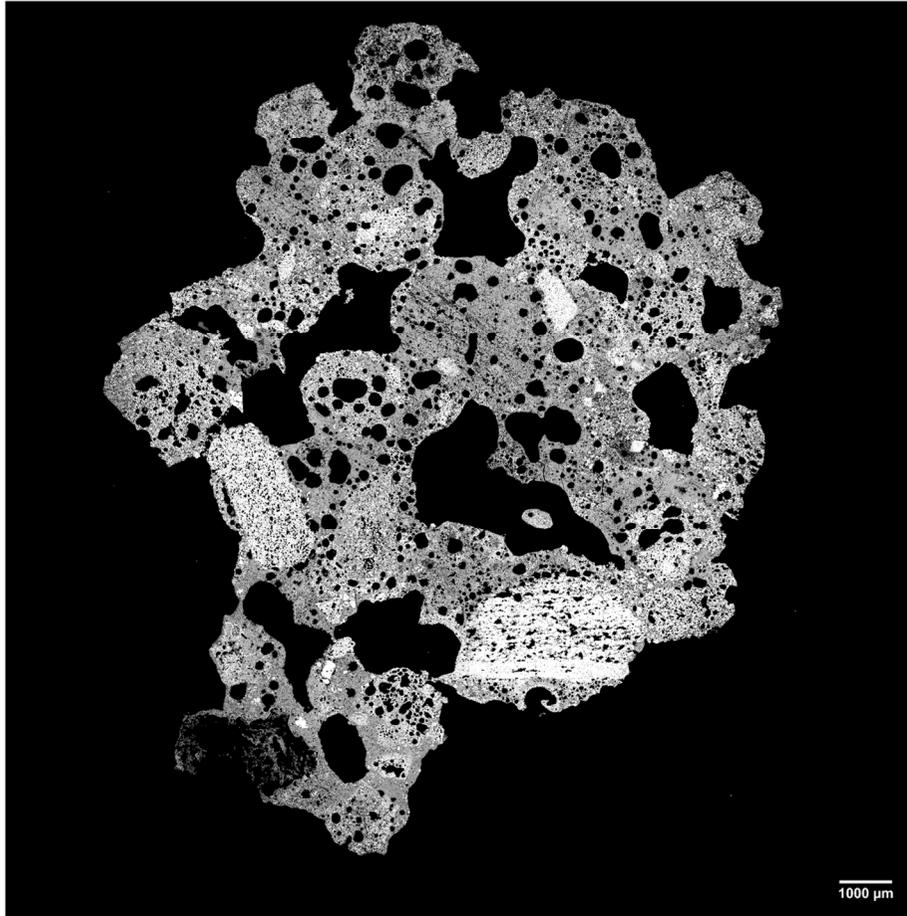


Figura 73: Seções polidas contendo síter nas condições SCOP (à esquerda) e COP (à direita) – método de aquisição 1

SCOP



COP

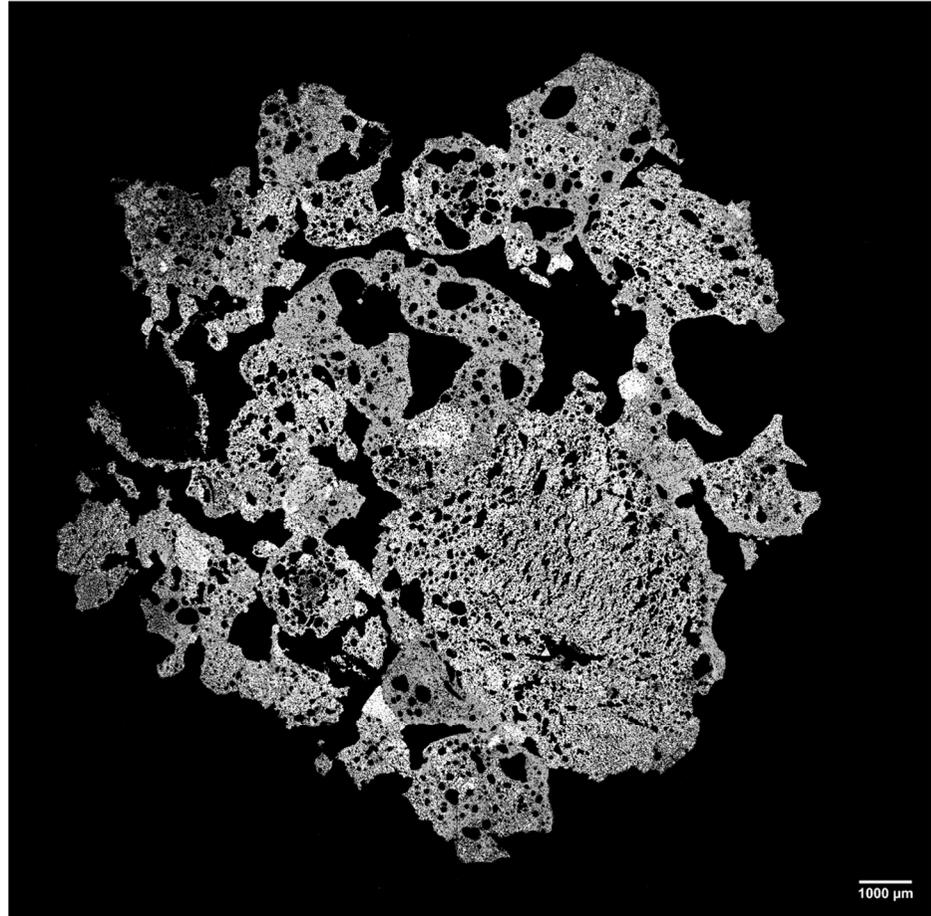
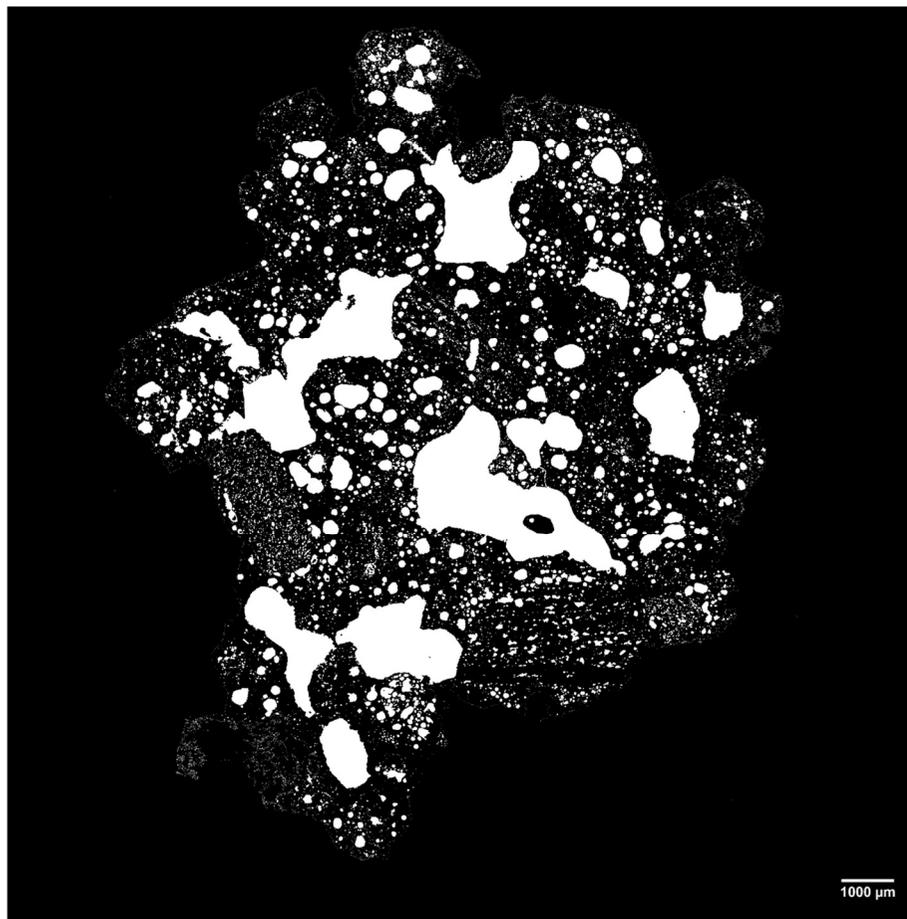


Figura 74: Seções polidas contendo sinter nas condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP) – método de aquisição 2

SCOP



COP

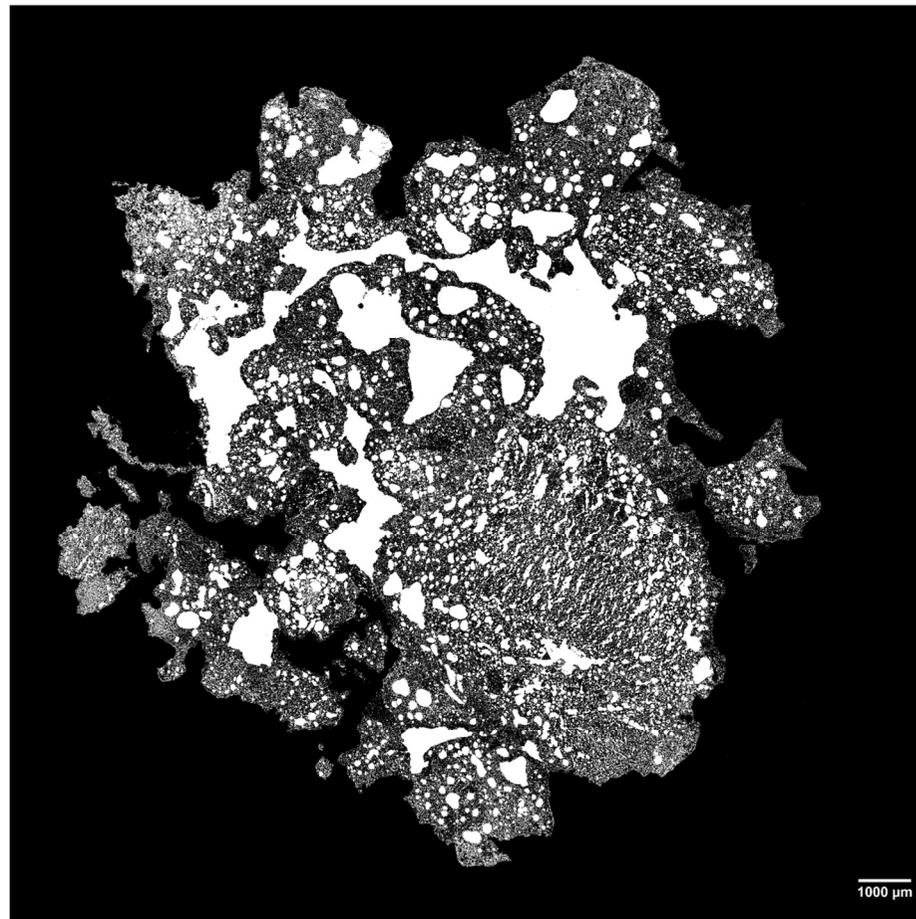


Figura 75: Representação dos poros do sínter, para as condições SCOP (à esquerda) e COP (à direita) – método de aquisição 2

Os histogramas da Figura 76 apresentam os resultados de Feret e *Roundness* dos poros do sínter para as condições sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP).

A frequência relativa do Feret indica que COP apresenta mais poros com máxima dimensão pequena do que SCOP. Nota-se que os histogramas não apresentam uma curva normal, com tendência de frequência relativa alta para *Roundness* de 1,0, principalmente para COP. Desta forma, optou-se por segregar poros muito pequenos, com área de até  $1\mu\text{m}^2$ , para avaliar melhor a distribuição na Figura 77.

Os histogramas indicam que, para ambos os casos, há uma tendência maior de circularidade para poros com áreas pequenas. Poros maiores do que  $1\mu\text{m}^2$  tendem a apresentar uma distribuição normal de *Roundness*. Nota-se que SCOP apresenta uma tendência a ter maior grau de *Roundness* para poros de áreas maiores do que  $1\mu\text{m}^2$ , se comparado com COP. De acordo com as medidas de Feret, COP apresenta maior quantidade de poros menores.

Visualmente, corroborando com os dados das demais análises dos histogramas anteriores, a porosidade do sínter SCOP aparenta ser distribuída em poros médios fechados e macro poros grandes abertos. Já o sínter COP, apresenta poros menores fechados mais bem distribuídos e em maior quantidade, com macro poros abertos menores. Não foi possível identificar o motivo pelo qual a porosidade de SCOP e COP é diferente. Essa análise de porosidade é fundamental para entendimento do comportamento metalúrgico do sínter, a ser discutido posteriormente. No entanto, é preciso ressaltar que para confirmação da tendência será preciso aumentar a população amostral em trabalhos futuros.

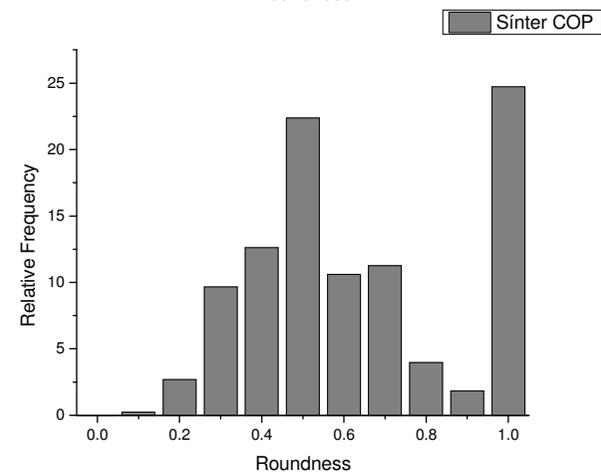
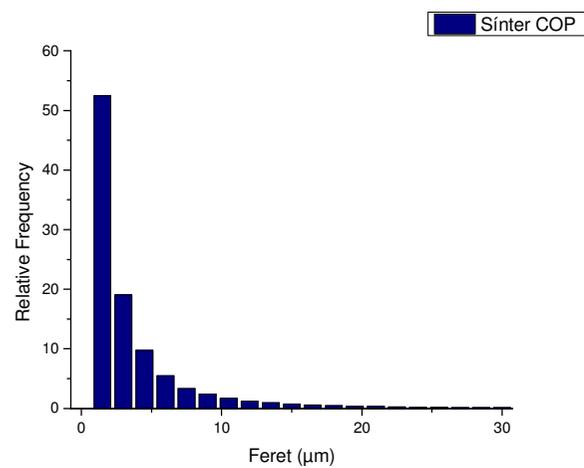
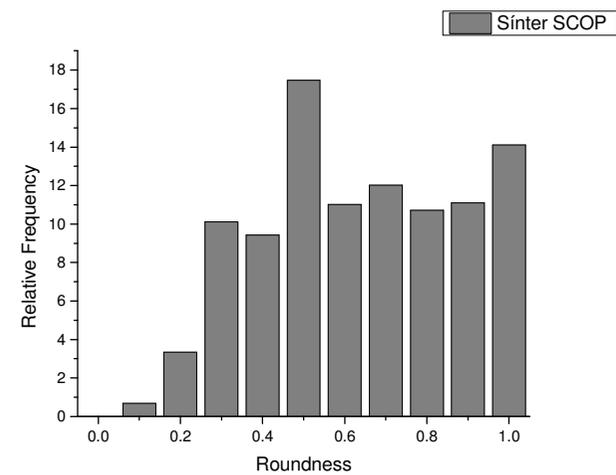
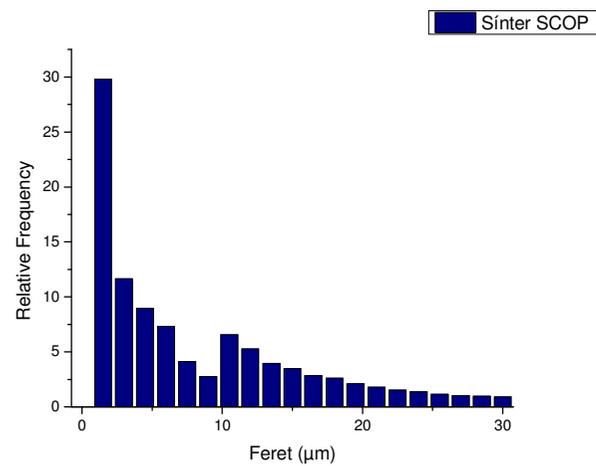


Figura 76: Histogramas de Feret (esquerda) e *Roundness* (direita) dos poros do sínter para SCOP (cima) e COP (baixo)

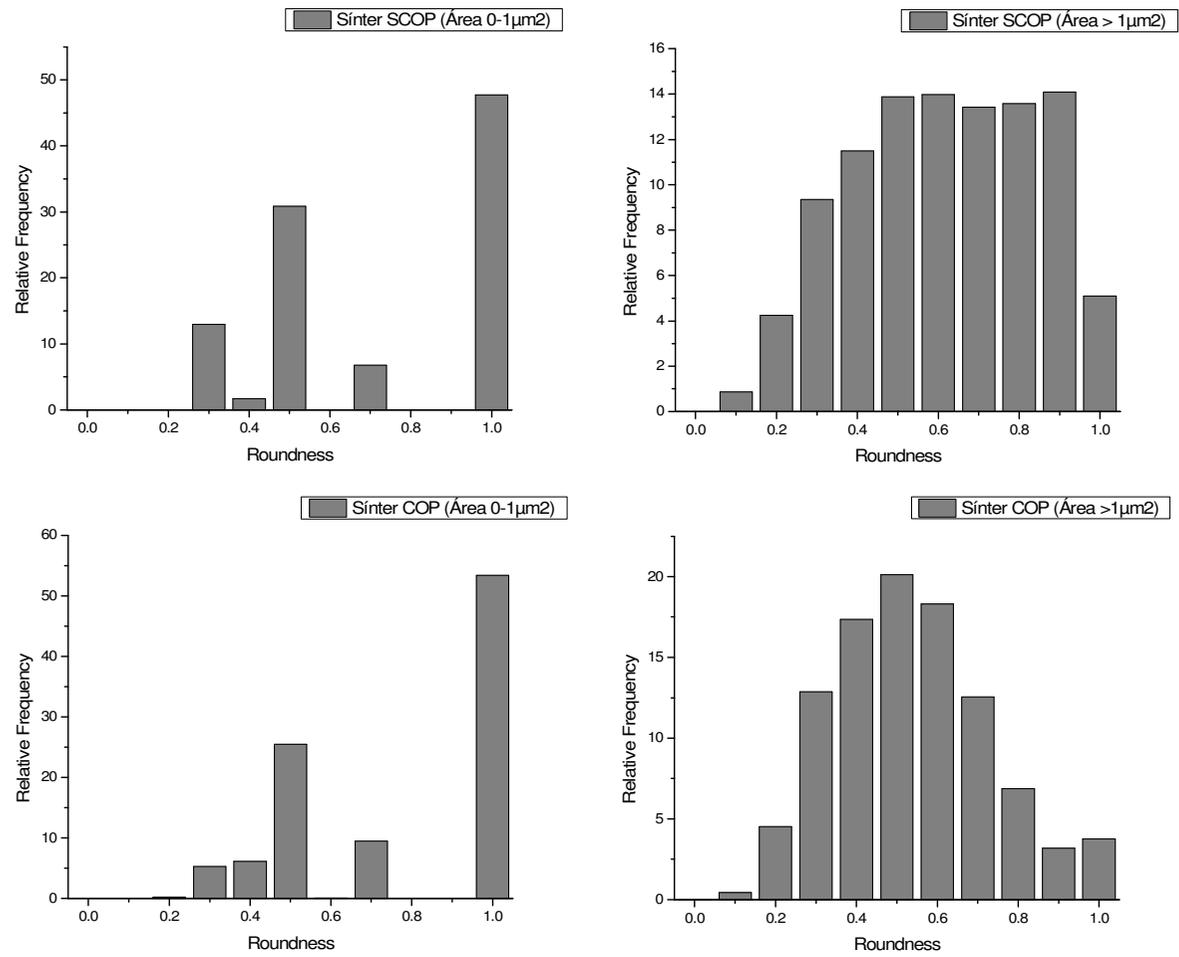


Figura 77: Histogramas de *Roundness* dos poros do sinter, para as condições SCOP (cima) e COP (baixo), segregado por faixas de área (< 1 μm² à esquerda, > 1 μm² à direita).

Tentou-se realizar a medida de fração em área das principais fases contidas no sinter produto (hematita, magnetita, magnésio-ferritas, cálcio-ferritas e silicatos) a partir de imagens capturadas de acordo com as metodologias 1 e 2 de aquisição. O ajuste da escala do histograma permitiu uma melhor visualização para ajudar na identificação das fases. No entanto, os histogramas apresentaram um grau de complexidade elevado, com vales e picos não definidos. Tentou-se realizar subamostragens de regiões típicas em imagens com resoluções diferentes, mas os resultados não se mostraram confiáveis. Desta forma, foi realizada apenas uma avaliação qualitativa a partir da inspeção visual das microestruturas existentes no sinter produto, sem e com coprodutos, a partir da imagem capturada de acordo com a metodologia de aquisição 2.

Em ambos os cenários, SCOP e COP, foi identificada a presença de hematita secundária, indicando que houve a reoxidação de magnetita de forma adequada de acordo com o processo de sinterização. Exemplos de regiões podem ser observadas na Figura 78 e na Figura 79. No entanto, de acordo com os cálculos teóricos a partir da análise química, ainda espera-se encontrar cerca de 21 a 26% em massa de magnetita no sinter, teores aceitáveis de acordo com os requisitos de qualidade.

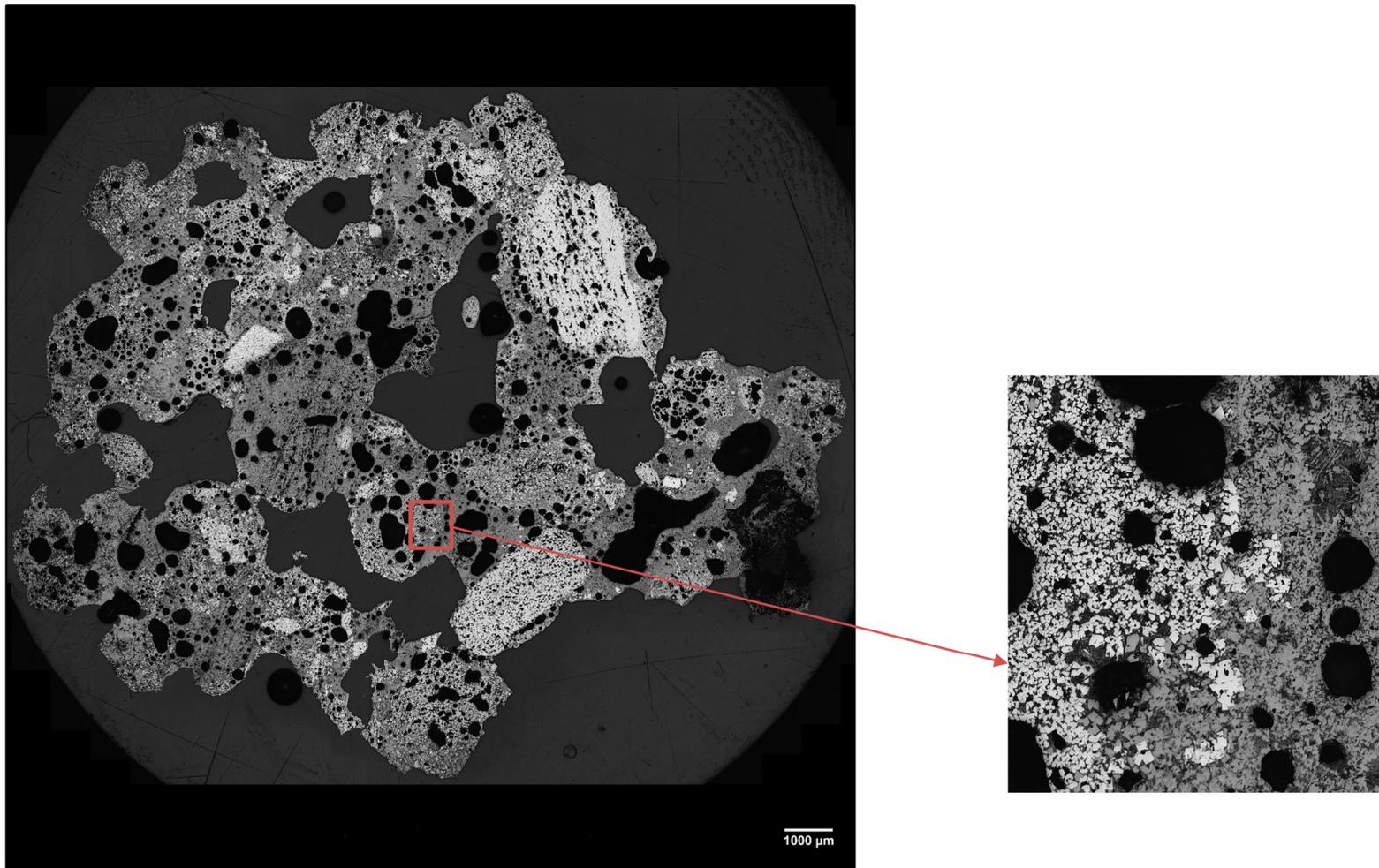


Figura 78: Presença de hematita secundária em sínter SCOP

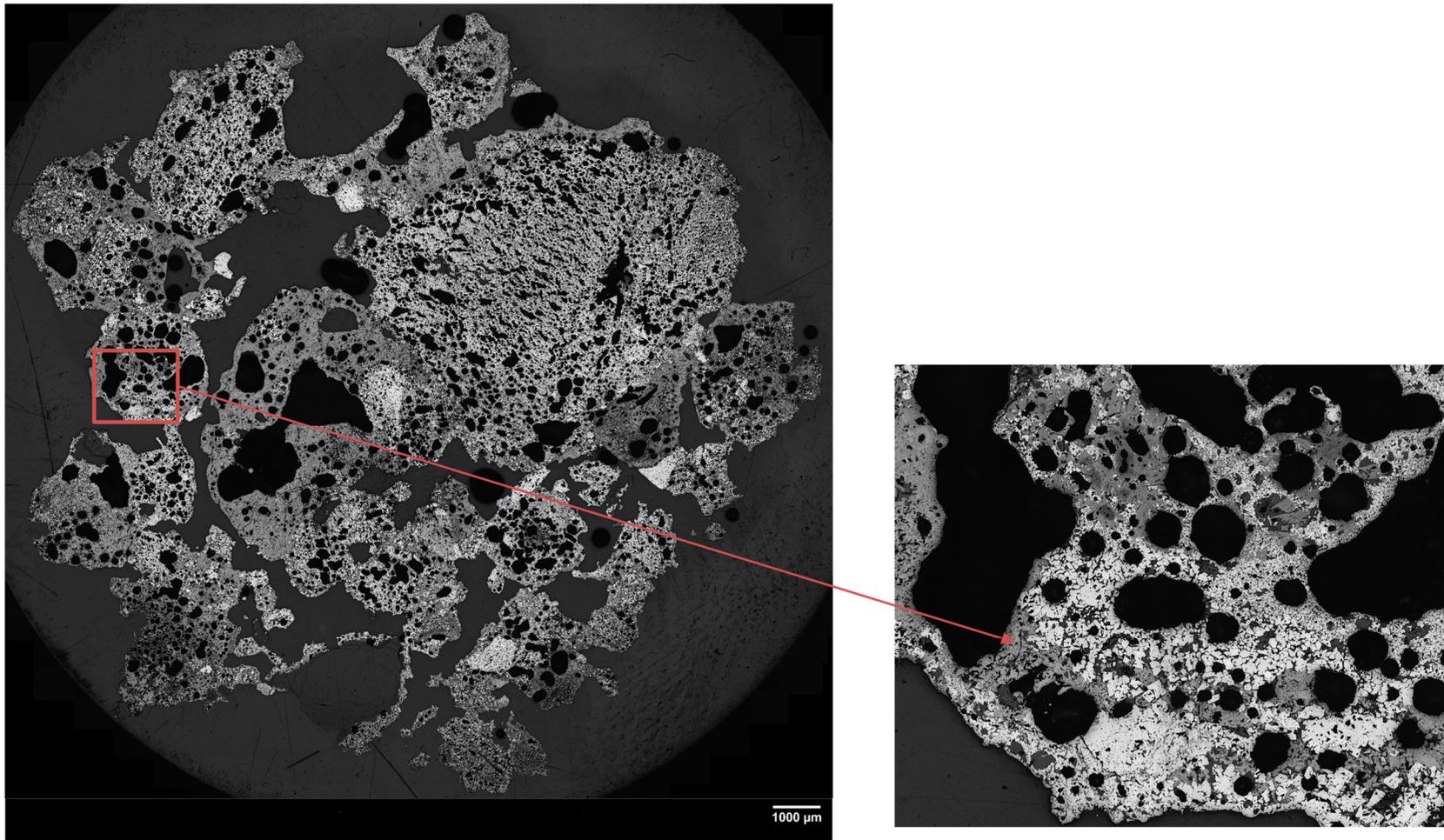


Figura 79: Presença de hematita secundária em sínter COP

#### 5.4.4. Análise metalúrgica

Foram realizadas as análises metalúrgicas de redutibilidade e de degradação sob redução, que podem ser observadas na Tabela 42.

Tabela 42: Análise de redutibilidade (RI) e de degradação sob redução (RDI), nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

SP \ (%)	RI	RDI (< 2,8 mm)
SCOP	86,10	30,45
COP	74,47	27,92

O teste de RDI apresentou resultados similares para ambos os casos, apesar de qualidade ligeiramente inferior para SCOP. O teste de RI apresentou uma maior redutibilidade para a condição SCOP, que pode ser explicada pela adição de coprodutos com estado de oxidação mais avançados do que as matérias-primas tradicionais. De acordo com as análises de DRx, o *blend* de coprodutos apresenta cerca de 15 a 20% de wustita e 2 a 3% de ferro metálico em sua composição. No entanto, o percentual de adição de *blend* de coprodutos no cenário COP foi de apenas 5,92%. Outra possível contribuição para a maior redutibilidade é o perfil de porosidade de SCOP.

#### 5.4.5. Análise de processo

Foram medidos parâmetros de processo durante a produção em escala piloto do sinter produto, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP). A produtividade da máquina de sinter para ambos os cenários pode ser observada na Tabela 43.

Tabela 43: Análise de produtividade da máquina de sinterização, nos cenários sem coprodutos (SCOP) e com coprodutos (COP)

SP \ (t.m <sup>3</sup> /dia)	PRODUTIVIDADE
SCOP	24,36
COP	26,40

Apesar de os testes pilotos terem por objetivo simular condições industriais, os resultados não podem ser comparados diretamente por meio dos valores absolutos. No entanto, pode-se realizar uma correlação com a produção industrial para os principais parâmetros de processo. Desta forma, pode ser aplicado um fator de escala em relação ao resultado de produtividade do cenário SCOP ao ser

comparado com o resultado da produtividade da escala industrial. Para fins comparativos, se o cenário COP for multiplicado pelo mesmo fator de escala SCOP, tem-se o impacto entre os cenários, convertido para referência de produtividade industrial.

Nota-se que o cenário SCOP, com produtividade em escala piloto de 24,36 t.m<sup>3</sup>/dia possui a referência industrial de 27,56 t.m<sup>3</sup>/dia. Já o cenário COP, apresenta produtividade em escala piloto de 26,40 t.m<sup>3</sup>/dia e referência industrial de 29,87 t.m<sup>3</sup>/dia. Desta forma, conclui-se que a inserção de coprodutos na forma de *blend* microaglomerado não apresenta demérito ao processo, uma vez que apresenta produtividade ligeiramente superior.

A inserção de coprodutos da mistura total indicou uma tendência de economia de matérias-primas tradicionais como minério de ferro, combustível, calcários e cal. Como consequência, tem-se uma destinação ambientalmente correta para as matérias-primas alternativas e um elevado custo evitado potencial devido à substituição, como pode ser observado na Tabela 44.

Tabela 44: Massa de matérias-primas tradicionais substituídas por coprodutos

MATÉRIAS-PRIMAS	$\Delta$ (kt/ano)
MINÉRIO DE FERRO	- 152,58
COMBUSTÍVEL	- 15,46
CALCÁRIO CALCÍFICO	- 46,58
DOLOMITA	- 16,39
CAL	- 0,23
DEGRADADO	- 0,64
RETORNO	7,43
COPRODUTOS	213,52

## 5.5. Discussão integrada

O desenvolvimento e a otimização das técnicas de caracterização microestruturais foram fundamentais para a realização de avaliações qualitativas e quantitativas, além da inspeção visual. Os resultados obtidos balizaram as discussões integradas acerca do uso de coprodutos no processo de sinterização.

O *blend* de coprodutos abarcou pelo menos o volume de geração dos coprodutos siderúrgicos de modo a atender aos requisitos químicos para inserção no processo de sinterização. O processo de produção do *blend* de coprodutos foi adequado, promovendo a homogeneização, ajuste de umidade e granulação das

matérias-primas alternativas. O *blend* de coprodutos apresentou tendência à circularidade em ambas as granulometrias analisadas, o que pode ser explicado pela maior formação de micropelotas em relação à rota de granulação tambor + tambor da mistura a sinterizar. A tendência de maior formação de micropelotas se deve à distribuição granulométrica mais fina das matérias-primas alternativas, com cerca de 50% de finos < 0,150 mm.

O *blend* de coprodutos apresentou tendência de formação de pseudopartículas menores em ambas as granulometrias, se comparado com a rota de granulação da mistura a sinterizar. Isto se deve às condições de processo que foram definidas para alcançar a granulometria adequada para inserção das pseudopartículas na mistura a sinterizar para granulação na rota tambor +tambor.

Na fração +1,00 mm, as quasipartículas do *blend* de coprodutos tendem a ter maior camada aderente relativa ao núcleo, com camada aderente distribuída em núcleos pequenos ou inexistentes por falhas de identificação de núcleo. Na fração +2,80 mm, houve uma maior formação de micropelotas em relação às quasipartículas. As camadas aderentes identificadas estão concentradas em poucas quasipartículas.

Houve uma predominância na formação de quasipartículas em relação às micropelotas na mistura total a sinterizar, com distribuição de tamanho maior do que a apresentada no *blend* de coprodutos para as mesmas granulometrias e tendência à circularidade, apesar de apresentar circularidade menor do que a circularidade das micropelotas. O comportamento da camada aderente nas quasipartículas foi similar para as condições SCOP e COP.

As dificuldades na preparação da seção polida do *blend* de coprodutos e da mistura total a sinterizar acarretaram dificuldades de aquisição das imagens e processamento digital. Como consequência, ocorreram impactos negativos de identificação, classificação e extração de atributos. O aperfeiçoamento dessa etapa em trabalhos futuros pode trazer resultados mais precisos. A rotina de caracterização utilizando *deep learning* apresentou resultados promissores devido ao menor impacto da preparação de amostras, aquisição, refletância similar de resina e algumas fases contidas nas matérias-primas na metodologia aplicada. Portanto, sugere-se em trabalhos futuros refinar o treinamento da rede neural

convolucional utilizadas com mais amostras e realizar as medidas diretas e indiretas de camada aderente, de *Roundness*, de Feret e de área, para comparação.

Superado o desafio técnico, do ponto de vista químico e físico, para inserção de coprodutos na sinterização em uma proporção de aproximadamente 6%, o *blend* de coprodutos produzido em misturador vertical atuou de forma positiva no processo de aglomeração a frio da mistura a sinterizar, com reaproveitamento de cerca de 44,96% da massa adicionada na forma de micropelotas de *blend* de coprodutos, que atuaram como partículas nucleantes para formação de quasipartículas. Não foi possível medir a contribuição das quasipartículas de *blend* de coprodutos, mas acredita-se que também atuam positivamente para o crescimento da camada aderente durante o processo de granulação da mistura total contendo coprodutos. Como consequência, não houve redução de produtividade do processo de produção do sínter e as qualidades químicas, físicas e metalúrgicas foram atendidas.

A distribuição granulométrica das partículas de sínter se mostrou homogênea em ambas as condições, SCOP e COP, com tamanho médio de sínter também similar. A análise química prevista por balanço de massa foi similar à medida da mistura total, bem como a análise química do sínter foi similar à prevista. A química do sínter final foi similar para ambas as condições – COP e SCOP.

O teste de queda para ambas as condições indica que o sínter possui condições adequadas para manuseio e transporte até o reator. O índice de tamboramento foi muito similar para ambas as condições.

A porosidade do sínter SCOP aparenta ser distribuída em poros médios fechados e macro poros grandes abertos. Já o sínter COP, apresenta poros menores fechados mais bem distribuídos em maior quantidade e mais alongados, com macro poros abertos menores. No entanto, para confirmação de tendência será necessário aumentar a população em trabalhos futuros. Não foi possível afirmar o motivo pelo qual a porosidade de SCOP e de COP seria diferente.

O teste de RDI apresentou resultados também similares para ambos os casos, apesar de ligeiramente inferior para SCOP, o que pode ser explicado pelos impactos negativos da porosidade na resistência mecânica. O teste de RI apresentou uma maior redutibilidade para a condição SCOP. Um dos fatores que podem ter

contribuído ligeiramente para RI menor em COP foi a adição de coprodutos com estado de oxidação mais avançados do que as matérias-primas tradicionais. Outro fator pode estar relacionado com a porosidade, cujos resultados de SCOP apontam a tendência de impacto positivo no RI.

A presença de hematita secundária, proveniente do processo de reoxidação da magnetita, associados aos resultados físicos, químicos e metalúrgicos, indica que as condições de processo das queimas foram adequadas.

A inserção de coprodutos na mistura total indicou uma tendência de economia de matérias-primas tradicionais como minério de ferro, combustível, calcários e cal, causando impactos ambientais e financeiros positivos. A possibilidade de substituir matéria-prima tradicional por matéria-prima alternativa está alinhada com a economia circular, uma vez que há a destinação ambientalmente correta por reaproveitamento interno de coprodutos na própria cadeia siderúrgica, evitando a extração de recursos naturais.

## 6

# Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1. Conclusões

- Os coprodutos apresentam características químicas e ambientais compatíveis com o processo de sinterização;
- Para adequação física dos coprodutos, se fez necessária uma microaglomeração do *blend* de coprodutos antes da adição na mistura total a sinterizar;
- As pseudopartículas das misturas totais a sinterizar são majoritariamente formadas por quasipartículas, enquanto o *blend* de coprodutos microaglomerado resulta na presença de quasipartículas e micropelotas;
- As micropelotas presentes no *blend* de coprodutos microaglomerado atuam como partículas nucleantes no processo de aglomeração da mistura total a sinterizar;
- Cerca de 45% da massa do *blend* de coprodutos microaglomerado adicionada na mistura total a sinterizar foi identificada na forma de micropelotas atuando como partículas nucleantes;
- O uso de coprodutos na forma microaglomerada apresenta melhores resultados de produtividade do que na condição sem coprodutos;
- A substituição de matérias-primas tradicionais por alternativas promove ganhos financeiros relevantes para o processo e ganhos ambientais por destinação sustentável;
- As qualidades química, física e metalúrgica do sinter apresentaram resultados similares entre cenários sem coprodutos e com coprodutos, com ligeiras diferenças de redutibilidade, degradação sob redução e porosidade.

- O desenvolvimento e a otimização de novas metodologias de caracterização microestrutural foram realizados com sucesso e se mostraram fundamentais para realizar a análise integrada visando a comprovação do efeito do uso de coprodutos na sinterização e impactos no sinter produto.;
- O trabalho comprovou a viabilidade técnica do uso de coprodutos siderúrgicos – lamas desidratadas e pós – no processo de sinterização por meio de simulação física, técnicas tradicionais e novas metodologias de caracterização.

## **6.2. Trabalhos futuros**

O dimensionamento da população amostral é um requisito fundamental para garantia da qualidade estatística do trabalho, que deve ser observada em trabalhos futuros com o objetivo de confirmar tendências.

Foram observadas diversas oportunidades durante a execução do trabalho, que serão abordadas de forma segmentada a seguir.

### **6.2.1. Microscopia Ótica**

A preparação da seção polida contendo a população amostral deve ser cuidadosamente realizada de modo a obter pseudopartículas bem espaçadas entre si, evitar a formação de bolhas, de arrancamento de finos e de marcas das etapas de desbaste. Esses pontos de atenção na preparação visam a não descaracterização das amostras, evitar problemas relativos à perda de foco durante a aquisição das imagens e garantir maior assertividade das rotinas de processamento digital de imagens.

Técnicas avançadas de análise de imagens utilizando *deep learning* foram realizadas em caráter exploratório nesta tese e apresentaram resultados promissores. Recomenda-se aumentar população para otimizar treinamento, realizar medidas quantitativas de camada aderente, Roundness e feret.

### **6.2.2. Microtomografia computadorizada**

Nesta tese, foram realizados ensaios exploratórios utilizando a técnica de microtomografia. A segmentação das principais estruturas para inspeção visual em

3D foi muito importante para a avaliação qualitativa. Recomenda-se aumentar a população amostral e realizar as análises nas outras granulometrias discutidas nas demais técnicas de caracterização. Sugere-se avaliar a possibilidade de aplicar técnicas avançadas, como por exemplo *deep learning*, para extração de atributos, bem como realizar análises quantitativas.

### **6.2.3. Processo**

A simulação física, as caracterizações e validações realizadas na tese se restringiram à rota de mistura e granulação tambor+tambor. Sugere-se ampliar o conhecimento sobre o uso de coprodutos no processo de sinterização nas rotas HPS, misturador intensivo associado à rota tambor+tambor e misturador intensivo associado à rota HPS.

## 7

### Referências bibliográficas

AMER, M. **A Visual Introduction to Deep Learning**. [s.l.: s.n.].

ASSOCIATION, W. C. **How steel is produced**. Disponível em: <<https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/how-steel-produced>>. Acesso em: 28 nov. 2020.

AUGUSTO, K. S. **Microtomografia Computadorizada de Raios X Aplicada à Caracterização de Porosidade em Pelotas de Minério de Ferro**. [s.l.: s.n.].

AUGUSTO, K. S.; PACIORNIK, S. Porosity Characterization of Iron Ore Pellets by X-Ray Microtomography 2 Materials and Methods. **Materials Research**, v. 21, n. 2, 2018.

AZIMI, S. M. et al. Advanced steel microstructural classification by deep learning methods. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2018.

AZZAZA, S. et al. Structural and Magnetic Properties of Mechanically Alloyed and Oxidized Fe-Based Powder Mixtures. **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, v. 29, n. 6, p. 1583–1592, 2016.

BHAGAT, R. P. Factors affecting return sinter Iron ore sintering fines regimed and strand productivity in iron ore sintering. **ISIJ International**, v. 39, n. 9, p. 889–895, 1999.

CALDAS, T. D. P. **Desenvolvimento de uma metodologia para caracterização de fases no pellet feed utilizando microscopia digital e aprendizagem profunda**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2023.

CALDAS, T. D. P. et al. **Instance Segmentation for Identification of Hematite Types in Circularly Polarized Light Images of Pellet Feed**. 29º CSBMM and XVII CIASEM. **Anais...Olinda, PE/ Brazil: 2023**

CASTRO, J. A. DE et al. ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES DE AMOLECIMENTO E FUSÃO NA CINÉTICA DE FORMAÇÃO DE (CAFE<sub>2</sub> O<sub>4</sub>-CA<sub>2</sub> FE<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ) NA SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 10, n. 1, p. 16–27, 2013.

CHEN, C.; LU, L.; JIAO, K. Thermodynamic modelling of iron ore sintering reactions. **Minerals**, v. 9, n. 6, p. 1–13, 2019.

CONEJO, A. N.; BIRAT, J. P.; DUTTA, A. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. **Journal**

of **Environmental Management**, v. 259, n. December 2019, p. 109782, 2020.

DAS, B. et al. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 40–57, 2007.

DOBELIN, N. **Profex User Manual Version 3.11**, 2017. Disponível em: <<https://www.profex-xrd.org/wp-content/uploads/2019/08/Profex-BGMN-Part-3-UI-Reference-EN.pdf>>

DUTTA, A.; ZISSERMAN, A. The VIA annotation software for images, audio and video. **MM 2019 - Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia**, p. 2276–2279, 2019.

ELLIS, B. G.; LOO, C. E.; WITCHARD, D. Effect of ore properties on sinter bed permeability and strength. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 34, n. 2, p. 99–108, 2007.

ESEZOBOR, D. E.; BALOGUN, S. A. Zinc accumulation during recycling of iron oxide wastes in the blast furnace. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 33, n. 5, p. 419–425, 2006.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 38, n. 1, p. 36–46, 2017a.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Iron Ore Sintering: Process. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 38, n. 4, p. 215–227, 2017b.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Iron Ore Sintering: Quality Indices. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 38, n. 4, p. 254–264, 2017c.

FREISLICH, M. et al. **Blast furnace value in use model and its application for iron ore processing**. ICSTI - International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. **Anais...2012**

GRÖFF, N. et al. Reutilização e reciclagem de resíduos siderúrgico: oportunidades de pesquisa e desafios do setor. **Resíduos Sólidos E Mudanças Climáticas**, v. 1, n. 1, p. 10, 2016.

GUALTIERI, A. F. et al. Quantitative phase analysis using the Rietveld method: Towards a procedure for checking the reliability and quality of the results. **Periodico di Mineralogia**, v. 88, n. 2, p. 147–151, 2019.

HONORATO, E. P. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.F.S.) para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para altos-fornos**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2005.

HSIEH, L. H. Effect of raw material composition on the sintering properties. **ISIJ International**, v. 45, n. 4, p. 551–559, 2005.

IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do setor**. Disponível em:

- <<https://acobrasil.org.br/site/dados-do-setor/>>. Acesso em: 23 nov. 2023a.
- IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo siderúrgico**. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>>. Acesso em: 23 nov. 2023b.
- IGLESIAS, J. C. Á.; SANTOS, R. B. M.; PACIORNIK, S. Deep learning discrimination of quartz and resin in optical microscopy images of minerals. **Minerals Engineering**, v. 138, n. December 2018, p. 79–85, 2019.
- ISHIKAWA, C. T. Improvement of sinter quality based on mineralogical properties of ores. **Ironmaking Conference Proceedings**, v. 42, p. 17–29, 1983.
- JUNIOR, F. L. C. C. **Dissertação de Mestrado “Caracterização Tecnológica de Misturas de “Sinter-feed” e “Pellet-feed” Empregando Diferentes Rotas de Sinterização em Escala Piloto”**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- JUNIOR, F. L. C. C.; ASSIS, P. S.; PEREIRA, G. G. **Desenvolvimento conceitual de rota para viabilização de elevadas participações de pellet feed na mistura de minérios**. 48o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 6o Simpósio Brasileiro de Aglomeração De Minério de Ferro - ABM Week. **Anais...2018**
- L12.305/2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- LOO, C. E. A perspective of goethitic ore sintering fundamentals. **ISIJ International**, v. 45, n. 4, p. 436–448, 2005.
- LOO, C. E.; LEUNG, W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters. **ISIJ International**, v. 43, n. 9, p. 1393–1402, 2003.
- LORENZONI, R. **Uso da microtomografia computadorizada para avaliação de danos na microestrutura de pasta de cimento submetida a carregamento cíclico e a temperaturas elevadas**. [s.l.: s.n.].
- LORENZONI, R. **Characterization of strain-hardening cement-based composites : Deep Learning , in-situ X-ray microCT and Digital Volume Correlation**. [s.l.: s.n.].
- LU, L.; ISHIYAMA, O. Recent advances in iron ore sintering. **Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v. 125, n. 3, p. 132–139, 2016.
- MALYSHEVA, T. Y. et al. Mechanism of mineral formation and metallurgical properties of sinter of basicity 1.1-3.1 at OAO MMK. **Steel in Translation**, v. 37, n. 2, p. 126–130, 2007.
- MorphoLibJ**. Disponível em: <<https://imagej.net/plugins/morpholibj>>. Acesso em: 19 jan. 2024.
- MOURÃO, J. M. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: NT Minério de Ferro e Pelotas Situação Atual e Tendências - 2025** Centro de

**Gestão e Estudos Estratégicos.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Nota+Tecnica+TR02+MINERIO+DE+FERRO+E+PELOTAS\\_rev\\_04\\_4766.pdf/e4611287-faa1-4244-b9a2-931c42385229?version=1.0](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Nota+Tecnica+TR02+MINERIO+DE+FERRO+E+PELOTAS_rev_04_4766.pdf/e4611287-faa1-4244-b9a2-931c42385229?version=1.0)>.

OLIVEIRA, V. M. et al. Granulation Behavior of an Iron Ore Sintering Mixture Containing High Grade Pellet Feed with Different Specific Surface. **ISIJ International**, v. 60, n. 11, p. 2376–2384, 2020.

OLIVERA, V. M. et al. Alternative to deal with high level of fine materials in iron ore sintering process. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, 2019.

PACIORNIK, S.; MAURICIO, M. H. P. Metallography and Microstructures. In: **ASM International**. [s.l: s.n.]. v. 9p. 368–402.

RONNEBERGER, O. .; FISCHER, P. .; BROX, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. **IEEE Access**, v. 9, p. 16591–16603, 2021.

SANTOS, R. B. M. **Um sistema de análise de imagens para caracterização automática de microaglomerados de sinter feed.** [s.l: s.n.].

SANTOS, R. B. M. et al. An image analysis system for automatic characterisation of iron ore sintering quasiparticles. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2019.

SANTOS, R. B. M. **Use of Deep Convolutional Neural Networks in Automatic Recognition and Classification of Coal Macerals.** [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2022.

SANTOS, R. B. M. et al. A deep learning system for collotelinite segmentation and coal reflectance determination. **International Journal of Coal Geology**, v. 263, n. September, 2022.

SOUZA, C. G. P. **Otimização da caracterização tridimensional de pelotas de minério de ferro.** [s.l: s.n.].

SUSAKI, K. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: NT Fundentes e escorificantes – situação atual com tendências 2025** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. [s.l: s.n.].

TAKANO, C. et al. **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos (2000).** (S. do M. A. do E. de S. Paulo, Ed.)Resíduos Industriais. **Anais...**São Paulo: 2000Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001121501>>

TELLES, V. B.; ESPINOSA, D. C. RO.; TENÓRIO, J. A. S. Produção de sínter de minério de ferro utilizando poeira de aciaria elétrica como matéria-prima. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 10, n. 1, p. 72–77, 2013.

UMADEVI, T. et al. Studies on parameters affecting sinter strength and prediction through artificial neural network model. **Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing**

**and Extractive Metallurgy**, v. 125, n. 1, p. 32–38, 2016.

VIEIRA, C. B.; ROSIÈRE, C. A.; ASSIS, P. S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras : uma análise crítica. **Metalurgia e Materiais**, v. 56, n. 2, p. 97–102, 2003.

WILEY, D. E.; HO, M. T.; BUSTAMANTE, A. Assessment of opportunities for CO<sub>2</sub> capture at iron and steel mills: An Australian perspective. **Energy Procedia**, v. 4, p. 2654–2661, 2011.

WU, S. et al. Sintering behavior of return fines and their effective utilization method. **ISIJ International**, v. 53, n. 9, p. 1561–1570, 2013.

YANG, C. CONG et al. Some basic properties of granules from ore blends consisting of ultrafine magnetite and hematite ores. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 26, n. 8, p. 953–962, 2019.

ZHOU, M.; ZHOU, H. Flame front propagation and sinter strength properties of permeable sintering bed prepared via enhanced granulation with hydrated lime. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, n. August, p. 1–15, 2020.

ZHOU, Z.; SIDDIQUEE, M. R. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. 2018.

## Glossário

**BC:** *Blend* de Coprodutos

**MT:** Mistura total a sinterizar

**MP:** Micropelotas

**QP:** Quasipartículas

**SP:** Sínter produto

**COP:** Testes com adição de coprodutos

**SCOP:** Testes sem adição de coprodutos

**CA:** Camada aderente

**NNA:** Núcleo não aderido

**%A:** Fração em área

**A:** Fração em área

**AF:** Alto forno

**AF1:** Alto forno 1

**AF2:** Alto forno 2

**MIH:** Misturador intensivo horizontal

**MIV:** Misturador intensivo vertical

**HPS:** *Hybrid Pelletized Sinter*

**RI:** Índice de redutibilidade

**RDI:** Índice de degradação sob redução

**TI:** Índice de tamboramento

**AI:** Índice de abrasão

**SFCA:** Sílico-ferrito de cálcio e alumínio

**OFL:** Óxido de ferro leve

**OFP:** Óxido de ferro pesado

**PC:** Pré-cal

**OFP:** Óxido de ferro pesado

**PCAF:** Pó de coletor do AF

**FM1A:** Pó de despoejamento do filtro manga da casa de estocagem auxiliar do AF1

**FM1B:** Pó de despoejamento do filtro manga da casa de corrida e topo do AF1

**FM2A:** Pó de despoejamento do filtro manga da casa de estocagem do AF2

**FM2B:** Pó de despoejamento do filtro manga da casa de corrida e topo do AF2

**OFLAM:** Óxido de ferro da laminação primária

**OFPLATE:** Óxido de ferro Plate

**OFSTECKEL:** Óxido de ferro Steckel

**ARGILAAF:** Argila de AF

**CAREPAB:** Carepa ade sucata B

**CIR:** Coproduto industrial da redução