



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE FERREIRA LIMA

ESTUDO DA IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO CRISTAL DE C3S EM IMAGENS
MICROSCÓPICAS DE CLÍNQUER E SUA RELEVÂNCIA PARA O
MONITORAMENTO DO FUNCIONAMENTO DE FORNOS ROTATIVOS EM
PLANTAS DE CIMENTO

RUSSAS

2023

HENRIQUE FERREIRA LIMA

ESTUDO DA IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO CRISTAL DE C3S EM IMAGENS
MICROSCÓPICAS DE CLÍNQUER E SUA RELEVÂNCIA PARA O MONITORAMENTO
DO FUNCIONAMENTO DE FORNOS ROTATIVOS EM PLANTAS DE CIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Campus de Russas da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Rosineide Fer-
nando da Paz

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L698e Lima, Henrique Ferreira.
Estudo da identificação automática do cristal de C3S em imagens microscópicas de clínquer e sua relevância para o monitoramento do funcionamento de fornos rotativos em plantas de cimento / Henrique Ferreira Lima. – 2023.
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Rosineide Fernando da Paz.
1. Cimento Portland. 2. Clínquer. 3. Microscopia. 4. Automatização. 5. Condições de operação forno rotativo. I. Título.

CDD 620.1

HENRIQUE FERREIRA LIMA

ESTUDO DA IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO CRISTAL DE C3S EM IMAGENS
MICROSCÓPICAS DE CLÍNQUER E SUA RELEVÂNCIA PARA O MONITORAMENTO
DO FUNCIONAMENTO DE FORNOS ROTATIVOS EM PLANTAS DE CIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Campus de Russas da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Rosineide Fernando da Paz (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Dmontier Pinheiro Aragão Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Daiane Aparecida Zuanetti
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

À minha família, por acreditar e investir em mim. Pai, seu trabalho duro proporcionou a obtenção dessa conquista. Mãe, seu zelo e dedicação foi que deram, nos momentos mais difíceis, a esperança e confiança para seguir. Sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem abençoado minha vida pessoal me dando força física e principalmente mental, para que essa vitória fosse atingida.

Agradeço a minha mãe Germanisse, e meu pai José, por todo sacrifício feito e todo incentivo nos momentos difíceis para que essa conquista se tornasse realidade.

Agradeço a todos os familiares que de alguma forma me auxiliaram nessa caminhada.

Agradeço a Profa. Dra. Rosineide Fernando da Paz por todo o auxílio prestado ao longo da realização do trabalho, sem ele não seria viável a conclusão deste projeto.

Agradeço a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Agradeço ao professor Dr. Dmontier Pinheiro Aragão Júnior e a professora Dra. Daiane Aparecida Zuanetti por aceitarem participar da banca avaliadora.

Agradeço a Universidade Federal do Ceará bem como todos os professores que participaram da minha caminhada acadêmica, pois eles me auxiliaram na obtenção dessa conquista.

Agradeço aos colegas de longa data Daniel, Thiago e Samuel, que fizeram parte dessa jornada.

Agradeço a todos aos demais colegas que conheci ao longo desses anos, que fizeram parte desse processo, tornando essa difícil e cansativa trajetória mais leve.

“O SENHOR é o meu pastor, nada me faltará.
Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da
morte, não temeria mal algum, porque tu estás
comigo; a tua vara e o teu cajado me consolam.”

(Salmos 23)

RESUMO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), o cimento pode ser definido como um pó fino com propriedades aglomerantes ou ligantes. Por sua vez, o clínquer, principal componente do cimento Portland pode ser definido como um produto granulado, obtido através da queima da mistura adequada de calcário e argila, denominada farinha, em um forno rotativo, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. Este trabalho apresenta a utilização da microscopia de luz refletida para a identificação e agrupamento quanto ao idiomorfismo dos cristais de alita (C3S) nas imagens microscópicas de clínquer. Por meio disso propor agrupamentos manuais dos cristais, para serem utilizados no treinamento do Mask Region based Convolutional Neural Network (MRCNN), um algoritmo de aprendizado de máquinas, que tem por intuito, fazer a identificação dos cristais de forma automática. Como esperado, nas imagens analisadas, o MRCNN conseguiu realizar a identificação apenas de cristais subdiomórficos. Isso se deve a grande quantidade desse tipo de cristal presente nas imagens analisadas. Com relação aos idiomórficos e xenomórficos, devido as suas características especiais, principalmente no quesito forma, aliado a um baixo número de imagens, não foi possível realizar um treinamento adequado do algoritmo para que ele fosse capaz de identificar. Outro ponto foi a não detecção de cristais em imagens com grandes quantidades de cristais, devido a baixa quantidade de imagens. Logo, a automatização do processo de detecção dos cristais, mesmo com o baixo número de imagens disponíveis, mostrou-se uma alternativa viável, visto que tende a diminuir e facilitar bastante o trabalho humano, uma vez que após a identificação dos cristais, é possível fazer a contagem, a medição dos cristais usando outros algoritmos específicos, se treinada com um bom número de imagens.

Palavras-chave: cimento Portland; clínquer; microscopia; alita; agrupamento; automatização; condições de operação forno rotativo.

ABSTRACT

According to the Brazilian Portland Cement Association, cement can be defined as a fine powder with binding properties. In turn, clinker, the main component of Portland cement, can be defined as a granulated product, obtained by burning a suitable mixture of limestone and clay, called flour, in a rotary kiln, whose internal temperature reaches 1450°C. This work presents the use of reflected light microscopy for identification and grouping according to idiomorphism of alite crystals (C3S) in the microscopic images of clinker. Through this, propose manual groupings of crystals, to be used in the training of Mask Region based Convolutional Neural Network (MRCNN), a machine learning algorithm, which has, by intuition, to identify crystals automatically. As expected, in the analyzed images, the MRCNN managed to identify only of subdiomorphic crystals. This is due to the large amount of this type of crystal present in the analyzed images. With regard to idiomorphic and xenomorphic, due to their characteristics specials, mainly in terms of form, combined with a low number of images, it was not possible to carry out a proper training of the algorithm so that it would be able to identify. Another point was the non-detection of crystals in images with large amounts of crystals, due to low number of images. Therefore, the automation of the detection process of crystals, even with the low number of images available, it proved to be a viable alternative, since it tends to reduce and greatly facilitate human work, since after the identification of the crystals, it is possible to do the counting, the measurement of the crystals using other specific algorithms, if trained with a good number of images.

Keywords: Portland cement; clinker; microscopy; alita; grouping; automation; operating conditions rotary kiln.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Plantas de cimento no Brasil	18
Figura 2 – Volume de venda de materiais de construção - % acumulado no ano de 2020	19
Figura 3 – Consumo aparente no Brasil(em milhões de toneladas)	20
Figura 4 – Maiores produtores de cimento(em milhões de toneladas)	21
Figura 5 – Maiores consumidores de cimento(em milhões de toneladas)	21
Figura 6 – Esquema simplificado da produção de cimento Portland.	22
Figura 7 – Depósitos de extração de materias primas.	23
Figura 8 – Processo de obtenção do calcário	24
Figura 9 – Pré-aquecedor e forno rotativo	25
Figura 10 – Nódulos de clínquer após resfriamento	25
Figura 11 – Moinho de bolas	26
Figura 12 – Cimento Portland	26
Figura 13 – Forno empregado na produção de clínquer.	27
Figura 14 – Interior do forno rotativo de clínquerização.	28
Figura 15 – Reversibilidade das reações dentro do forno	30
Figura 16 – Amostra de clínquer pronto para visualização	35
Figura 17 – Exemplo imagem microscópica do clínquer	35
Figura 18 – Exemplo cristal de alita alongado	36
Figura 19 – Exemplo cristal de alita equidimensional	37
Figura 20 – Exemplo cristal de alita idiomórfico	37
Figura 21 – Exemplo cristal de alita subdiomórfico	38
Figura 22 – Exemplo cristal de alita xenomórfico	38
Figura 23 – Marcação e agrupamento dos cristais de alita segundo suas características .	42
Figura 24 – Exemplo de marcação e agrupamento dos cristais	43
Figura 25 – Marcação e agrupamento de cristais subdiomórficos	43
Figura 26 – Marcação e agrupamento de cristais idiomórficos	44
Figura 27 – Marcação e agrupamento de cristais xenomórficos	45
Figura 28 – Resultado imagem microscópica 1	45
Figura 29 – Resultado imagem microscópica 2	46
Figura 30 – Resultado imagem microscópica 3	46
Figura 31 – Resultado imagem microscópica 4	47

Figura 32 – Resultado imagem microscópica 5	47
Figura 33 – Resultado imagem microscópica 6	48
Figura 34 – Resultado imagem microscópica 7	48
Figura 35 – Resultado imagem microscópica 8	49
Figura 36 – Resultado imagem microscópica 9	49
Figura 37 – Resultado imagem microscópica 10	50
Figura 38 – Resultado imagem microscópica 11	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição típica Cimento Portland Comum	23
Tabela 2 – Reações no forno durante a clínquerização	29
Tabela 3 – Principais fases cristalinas do clínquer Portland	29
Tabela 4 – Composição das fases mineralógicas principais do clínquer	31
Tabela 5 – Características gerais da alita	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MRCNN	Mask Region based Convolutional Neural Network
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
PIB	Produto interno bruto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
C3S	Alita
RPM	Rotações por minuto
C2S	Belita
C3A	Aluminato cálcico
C4AF	Ferrita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Indústria brasileira de cimento Portland	18
2.2	Processo de fabricação do cimento e formação do clínquer	22
2.3	Fornos rotativos de clínquerização	27
2.4	Reações químicas no forno rotativo	28
2.5	Justificativa	32
2.6	Objetivos	32
2.6.1	Objetivo geral	32
2.6.2	Objetivos específicos	33
3	METODOLOGIA	34
3.1	Utilização da microscopia no estudo do clínquer de cimento Portland	34
3.2	Realização da microscopia	35
4	RESULTADOS	42
4.1	Identificação e marcação manual dos cristais	42
4.2	Identificação automatizada dos cristais	45
5	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXOS	54
	ANEXO A – PLANTAS CIMENTEIRAS AO LONGO DO TERRITÓ- RIO BRASILEIRO	55

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), o cimento pode ser definido como um pó fino com propriedades aglomerantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Esse material aglomerante é obtido pela moagem do clínquer Portland. O clínquer por sua vez é o principal componente do cimento Portland tendo como matérias-primas o calcário e a argila. A mistura e a moagem desses materiais dá origem a um insumo do cimento, denominado farinha. Para a transformação dessa mistura em clínquer, a farinha atravessa um forno rotativo, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a farinha em clínquer. Quando analisado microscopicamente, o clínquer se apresenta na forma de cristais, onde os principais deles são os de alita (C3S). Contudo essa análise ainda é realizada de forma manual, tornando-a demorada e atrasando a obtenção das informações necessárias para o monitoramento.

Tendo em vista que a ocorrência da fase e o aparecimento do cristal de alita (C3S), é a parte mais importante da microscopia do clínquer, o presente estudo tem como objetivo propor agrupamentos manuais de imagens de cristais de alita segundo sua forma (idiomorfismo), para serem utilizados no treinamento do Mask Region based Convolutional Neural Network (MRCNN), um algoritmo de aprendizado de máquinas, que tem por intuito de fazer a identificação dos cristais de forma automática. Por meio disso facilitar e agilizar o monitoramento a cerca da condição de operação do forno rotativo em uma planta de cimento.

Os cristais foram divididos em: Idiomórficos, caracterizados por possuir faces bem desenvolvidas, geralmente se apresentam na forma de hexágonos. Subdiomórficos, possuem algumas faces desenvolvidas e outras um tanto quanto arredondadas. E os xenomórficos, que não se é possível identificar suas faces.

Para obter conhecimentos a cerca da microestrutura do clínquer, é utilizada a microscopia de luz refletida, técnica indispensável como forma de investigação do processo de clinquerização. Com sua aplicação, é possível realizar de forma visual, uma avaliação do tempo, da temperatura e de outros aspectos do forno ao longo da clinquerização. Esses são fatores do processo de queima que influenciam diretamente no grau de desenvolvimento dos cristais. Para a identificação e agrupamento dos cristais, utilizou-se o software de anotação de imagens Roboflow. Com relação a quantidade de imagens disponíveis, foram analisadas 121 (cento e vinte e uma), disponibilizadas de um banco de dados de uma cimenteira.

Com os agrupamentos, foi possível descrever e fornecer indicações gerais da con-

dição de queima, levando em consideração os cristais vistos nas imagens analisadas. Quanto aos subdiomórficos seu aspecto com faces semi-desenvolvidas refletem uma certa variação de tempo no processo de primeiro resfriamento. Os idiomórficos, caracterizados por suas faces bem desenvolvidas, são mais difíceis de serem encontrados pois dependem de condições de fabricação relativamente ideais e otimizadas durante a operação do forno. Já os xenomórficos mostram que fatores importantes podem não terem sido corretamente avaliados. Por exemplo, a temperatura no interior do forno, estava abaixo do necessário no momento da clinquerização.

Com relação a proposta identificação automatizada dos cristais, em todas as imagens analisadas, o MRCNN conseguiu realizar a detecção apenas de cristais subdiomórficos. Isso se deve a grande quantidade desse tipo de cristal presente nas imagens analisadas. Já para os idiomórficos e xenomórficos, devido as suas características especiais, e o baixo número de imagens, não foi possível realizar um treinamento adequado do algoritmo para que ele fosse capaz de detectar, assim como feito para os subdiomórficos.

Mediante ao estudo realizado é possível concluir que a utilização da microscopia como forma de análise e investigação é de grande valia para saber o que se passa na clinquerização. Com a microscopia permitiu-se a instauração dos agrupamentos e com isso visualizar melhor as características desenvolvidas pelos cristais. Se valendo dos agrupamentos feitos, foi possível inferir indicativos a respeito das classes de cristais criadas (subdiomórficos, idiomórficos e xenomórficos), e correlacioná-los com variáveis do processo de queima. E o mais importante, servir como base de treinamento para a detecção automatizada.

Quanto a detecção automatizada, concluí-se que o não reconhecimento dos cristais das classes xenomórficos e idiomórficos se dá devido a baixa quantidade de imagens disponíveis. Já a excelente identificação dos subdiomórficos se deve a grande quantidade desse tipo de cristal presente na microestrutura das imagens analisadas, o que proporcionou um bom treinamento do MRCNN. Assim a identificação automatizada mostrou-se uma alternativa viável, visto que mesmo com poucas imagens disponíveis, conseguiu realizar a detecção dos cristais, tendendo assim a diminuir e facilitar bastante o trabalho humano nesse processo, se treinada com um bom nível de imagens.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O Capítulo 1 faz uma síntese do trabalho que posteriormente será discorrido com mais detalhes. O Capítulo 2 fornece o conjunto de informações necessárias a respeito do cimento Portland, tais como, indústria e processo de fabricação. Em seguida é mostrado o principal constituinte do cimento Portland, o clínquer,

bem como os fornos rotativos e as reações químicas que ocorrem no processo de clínquerização. Cita as justificativas que levaram à elaboração deste trabalho e os seus objetivos. O Capítulo 3 apresenta a utilização da microscopia de luz refletida, em imagens de clínquer, mais precisamente nos cristais de alita, além de focar na abordagem utilizada, agrupamento manual dos cristais, para a proposição de uma análise automatizada via algoritmo. O Capítulo 4 mostra e analisa os resultados obtidos. Finalmente, o Capítulo 5 discorre sobre as conclusões obtidas com a realização do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

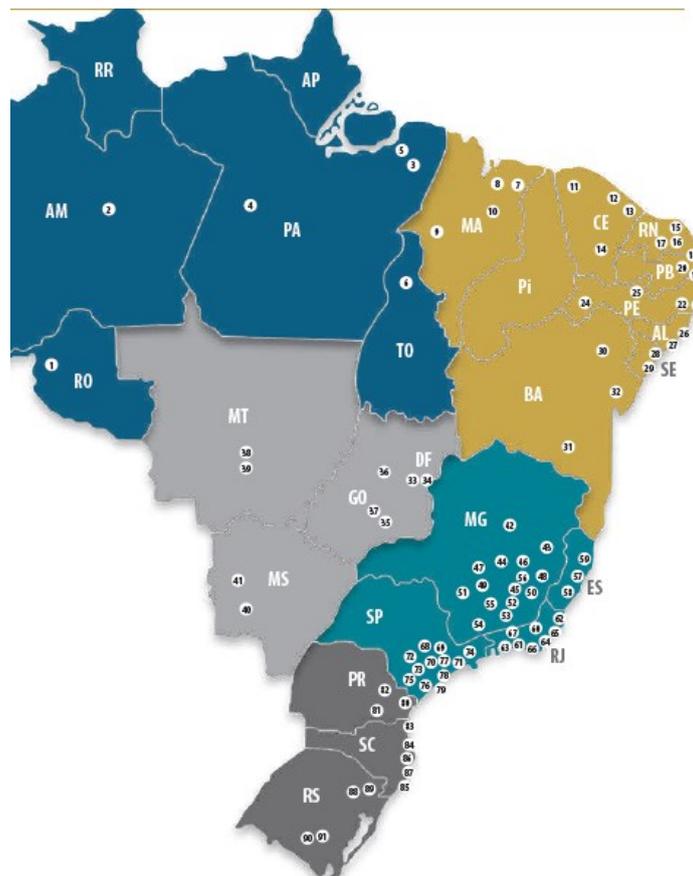
Neste capítulo são mostradas informações a respeito do tema abordado, tais como, dados da indústria brasileira atualmente, processo de fabricação e obtenção do clínquer Portland. Além disso, são apresentados fornos rotativos, bem como as reações que ocorrem no seu interior, na produção do clínquer.

2.1 Indústria brasileira de cimento Portland

A indústria brasileira de cimento conta com 24 grupos produtores de cimento em operação, em um total de 91 unidades produtoras espalhadas pelo país. Conforme o relatório anual disponibilizado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), a capacidade produtiva dessas unidades somadas giram em torno de 61 milhões de toneladas/ano.

Na Figura 1 verifica-se a distribuição geográfica das fábricas brasileiras de cimento segundo (SNIC, 2020), sendo essas unidades produtoras mostradas no Anexo 1.

Figura 1 – Plantas de cimento no Brasil



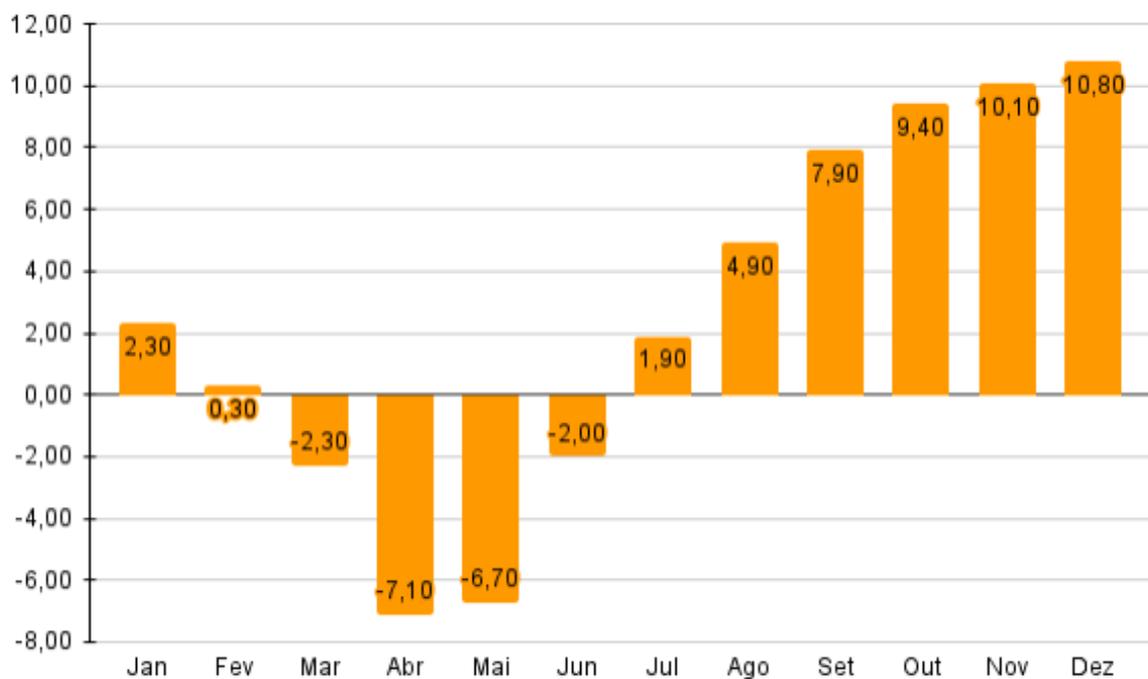
Fonte: SNIC (2020)

A chegada da pandemia do coronavírus derrubou a economia global em 2020. No Brasil não foi diferente e o Produto interno bruto (PIB) sofreu uma retração de 4,1%, além de grandes perdas na indústria e nos serviços. Mesmo com a instauração de políticas públicas, como a adoção do auxílio emergencial, a atividade econômica registrou o pior resultado da série do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), iniciada em 1996, como mostrado no relatório anual SNIC (2020).

Contudo, mesmo com a queda considerável do PIB brasileiro, ocorreu um crescimento da atividade de construção civil em período pandêmico. Em sua maioria estimuladas pela introdução do auxílio emergencial aliado a baixa taxa de juros.

Com a pandemia e as regras sanitárias de isolamento social o domicílio deixou de ser apenas um lar para se transformar num local de trabalho e lazer. Assim, as reformas residenciais e comerciais foram um grande fator de impulsionamento para a construção civil. Como consequência, houve uma forte procura por materiais de construção fazendo a venda desses insumos subir 10,8% em 2020, como visto na Figura 2, retirada e adaptada do relatório anual SNIC (2020).

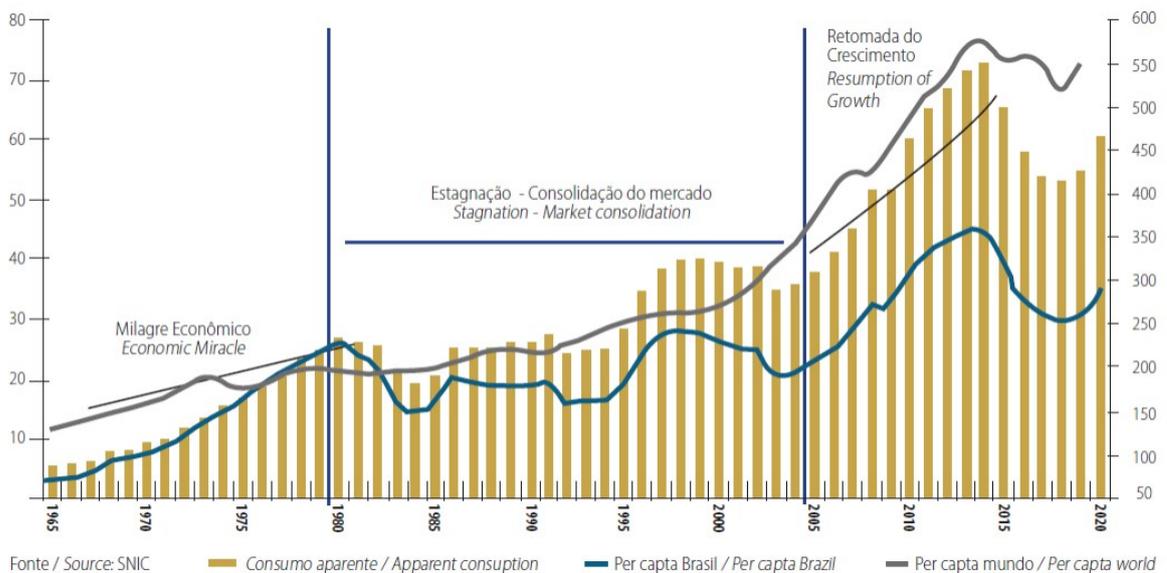
Figura 2 – Volume de venda de materiais de construção - % acumulado no ano de 2020



Fonte: SNIC (2020) - Adaptado

Como dito anteriormente, mesmo com fatores não favorecendo, o consumo de cimento fechou o ano de 2020 com 10,6% de crescimento, totalizando 60,6 milhões de toneladas, conforme mostrado no relatório anual SNIC (2020). Esse número resulta num consumo per capita de 286 kg/hab/ano e ajudou a indústria a se recuperar parcialmente da forte crise que atingiu o setor nos anos de 2015 a 2018, causada pela instabilidade política no país. A Figura 3, mostra a evolução do consumo de cimento no Brasil desde os anos 70 até 2020, refletindo a vigorosa expansão da atividade da construção nos últimos anos.

Figura 3 – Consumo aparente no Brasil(em milhões de toneladas)



Fonte: SNIC (2020)

Em âmbito internacional, o Brasil lidera tanto a produção quanto o consumo na América Latina. O país está entre os 10 maiores produtores e consumidores mundiais de cimento, como pode ser visto na Figura 4 e na Figura 5.

Figura 4 – Maiores produtores de cimento(em milhões de toneladas)

Países	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1. China	2.420,0	2.480,0	2.350,0	2.403,0	2.316,3	2.176,7	2.300,0
2. Índia	280,0	260,0	270,0	289,3	285,0	327,7	320,0
3. Vietnã	58,0	60,5	57,4	77,3	78,8	90,2	97,0
4. Estados Unidos	77,4	83,2	83,4	84,7	86,1	87,8	88,6
5. Indonésia	56,0	65,0	65,0	61,3	68,0	70,8	64,2
6. Irã	72,0	65,0	58,6	55,0	54,0	58,0	60,0
7. Turquia	72,7	71,2	71,4	75,4	80,6	72,5	57,0
8. Brasil	70,2	72,5	66,5	58,2	54,0	53,6	56,6
9. Coréia do Sul	47,3	63,2	63,0	56,7	57,9	55,0	56,4
10. Japão	57,4	53,8	55,0	53,4	55,5	55,3	55,2
11. Rússia	72,0	68,4	69,0	55,0	54,7	53,7	54,1
12. México	34,6	35,0	39,8	42,4	42,8	42,8	47,5
13. Egito	50,0	50,0	55,0	55,0	53,0	81,2	47,0
14. Arábia Saudita	57,0	55,0	55,0	55,9	47,1	42,2	42,2
15. Alemanha	31,5	32,1	31,1	32,7	34,0	33,7	34,2
Total Mundial	4.180,0	4.600,0	4.650,0	4.100,0	4.100,0	3.992,0	4.168,0

Fonte: SNIC (2020) - Adaptado

Figura 5 – Maiores consumidores de cimento(em milhões de toneladas)

Países	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1. China	2.429,5	2.466,4	2.339,0	2.403,0	2.379,9	2.355,1	2.470,5
2. Índia	235,0	269,4	273,6	288,3	284,0	326,8	336,7
3. Estados Unidos	81,9	89,0	92,3	94,4	96,6	98,9	102,1
4. Vietnã	56,1	49,8	55,7	74,0	72,5	75,4	76,2
5. Indonésia	58,0	59,9	62,0	61,6	66,3	69,5	69,8
6. Rússia	68,1	71,0	63,0	56,0	55,2	54,2	58,1
7. Brasil	71,0	72,7	66,2	58,0	53,7	52,9	54,8
8. Coréia do Sul	45,0	43,7	50,7	51,2	50,2	52,0	49,5
9. Egito	53,9	51,3	53,7	56,8	53,8	51,5	48,4
10. Irã	59,9	53,6	48,6	42,8	44,4	49,0	47,5
11. Turquia	60,9	64,2	65,0	66,8	72,2	64,3	45,4
12. Arábia Saudita	54,2	56,6	60,7	55,7	47,1	41,0	42,3
13. Japão	45,5	46,4	43,4	43,0	42,5	42,4	41,3
14. Paquistão	21,8	27,2	32,0	33,6	37,3	39,7	39,7
15. México	32,9	35,9	38,9	39,9	39,9	40,3	37,1
Total Mundial	4.050,3	4.155,0	4.081,0	4.068,0	4.069,7	4.108,0	4.282,3

Fonte: SNIC (2020) - Adaptado

Percebe-se, através dos dados apresentados, o mercado cimenteiro continua crescendo no Brasil e no mundo fazendo-se necessário que o produto produzido seja de alta qualidade, e o processo de produção como um todo seja confiável.

2.2 Processo de fabricação do cimento e formação do clínquer

O principal componente do cimento Portland é o clínquer, e seu processo de fabricação, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), é uma operação de suma importância.

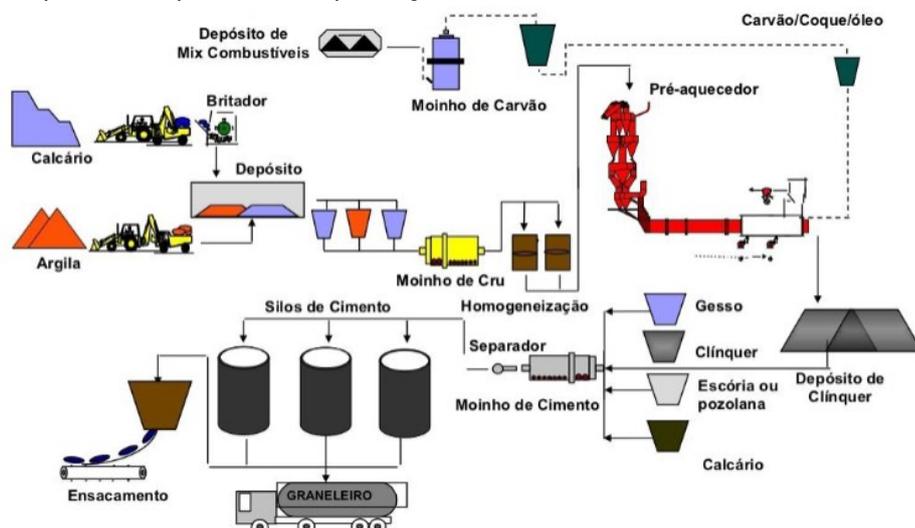
A ABCP (2002), faz a seguinte afirmação.

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó.

A Figura 6 representa um esquema simplificado do processo de produção do clínquer e conseqüentemente do cimento Portland.

O diagrama em questão mostra a extração dos materiais principais, argila e calcário. Após a extração, ocorre a trituração daqueles materiais que apresentam dimensões grandes. Em seguida são misturados e passam por um processo de moagem com intuito de atingir homogeneidade da mistura. Após isso, a farinha é transportada para silos de armazenamento que serve de fonte de alimentação para o forno rotativo onde ocorre a queima. Depois da clínquerização e resfriamento, os nódulos de clínquer são levados para um moinho, onde ocorre a moagem e homogeneização, formando o cimento Portland.

Figura 6 – Esquema simplificado da produção de cimento Portland.



Fonte: Mochizuki (2017)

Para a fabricação do clínquer, sabe-se que o material deve possuir componentes como carbonato de cálcio (CaCO_3), sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e trióxido de ferro (Fe_2O_3). Dificilmente esses materiais são encontrados todos juntos nas devidas proporções, sendo necessário fazer a mistura adequada desses componentes. Na Tabela 1, retirado de (ABCP, 1984), pode ser visto a composição típica do cimento Portland e suas respectivas proporções.

Tabela 1 – Composição típica Cimento Portland Comum

Componente	Proporção em massa (%)
CaO	58,9 – 66,8
SiO ₂	19,0 – 24,2
Al ₂ O ₃	3,9 – 7,3
Fe ₂ O ₃	1,8 – 5,0
MgO	0,8 – 6,0
SO ₃	0,9 – 3,0

Fonte: ABCP (1984)

Inicialmente, ocorre a extração das matérias-primas obtidas a partir do desmonte de depósitos, Figura 7. Esta etapa do processo é de suma importância para o processo produtivo do clínquer, pois nela ocorre a inspeção e controle das composições físicas e químicas das matérias-primas. Esse controle é realizado de modo a buscar uma matéria-prima de composição uniforme, proporcionando qualidade do processo e produto.

Figura 7 – Depósitos de extração de materias primas.



Fonte: Mochizuki (2017)

O material extraído, apresenta dimensões relativamente grandes, Figura 8 (a), sendo transportado para britadores, que são máquinas usadas na fragmentação de grandes volumes

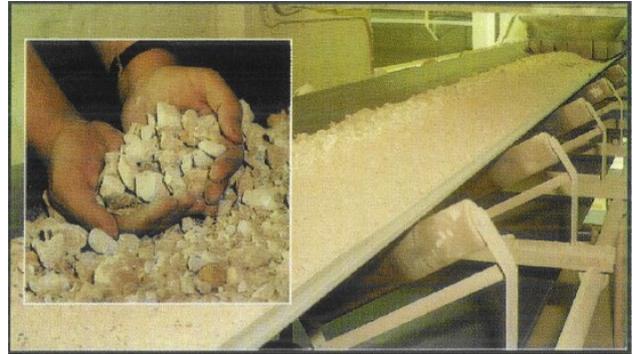
de rocha, Figura 8 (b). Nessa etapa, as rochas são reduzidas a granulometrias específicas e em seguida são direcionadas para a etapa seguinte.

Figura 8 – Processo de obtenção do calcário



(a) Rocha calcária

Fonte: Centurione (1999)



(b) Calcário britado

A etapa seguinte do processo é conhecida como dosagem. Nela ocorre a determinação da porcentagem de cada matéria prima de forma a atingir a composição que se deseja para o clínquer. A dosificação é de extrema importância para as etapas seguintes, já que as reações para formação do clínquer dependem em sua maioria de uma dosagem correta das matérias primas.

Após a dosagem adequada, o material é conduzido para um sistema de moagem. Nesta etapa ocorre a moagem do material, com o objetivo de fragmentar o tamanho das matérias primas, propiciando uma granulometria suficientemente fina e uma mistura homogênea dos componentes, comumente chamada de farinha.

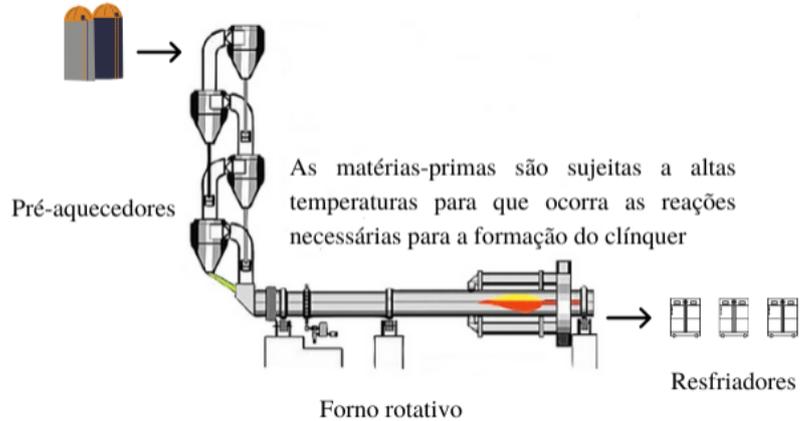
Em seguida, a farinha é transportada para silos de armazenagem e homogeneização da mistura, para que esta chegue ao forno com o mínimo de desvio possível em sua composição química.

Após a homogeneização, a farinha é levada para a torre de ciclones (pré-aquecedor). Nela ocorre o pré-aquecimento da farinha através da troca de calor na torre que se apresenta em contra-corrente, ou seja, a farinha desce a torre pela ação da gravidade e os gases quentes provenientes do forno rotativo sobem a torre devido a uma diferença de pressão existente. A farinha chega na torre de ciclones a uma temperatura de aproximadamente 80 °C. No topo da torre a temperatura é de cerca de 310 °C e no fundo é por volta de 890 °C.

Ao sair do pré-aquecedor, a farinha entra no forno de clínquerização, Figura 9, onde ocorre o processo de queima. Para a queima, necessita-se do auxílio de energia que é feito via queimador/maçarico que é posicionado na saída do forno.

Figura 9 – Pré-aquecedor e forno rotativo

Matérias-primas, provindas dos silos, são encaminhadas para os pré-aquecedores



Fonte: Pries (2017) - Adaptado

Após a permanência no forno por um determinado período de tempo, em temperaturas próximas de $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, ocorre a formação do clínquer.

Depois da clinquerização, ocorre o resfriamento dos nódulos, Figura 10, que, segundo a ABCP (1984), o resfriamento do clínquer é uma das etapas mais importantes de sua formação, pois fatores como estabilidade, idiomorfismo, decomposição dos cristais de Alita (C3S), dependem diretamente desse processo.

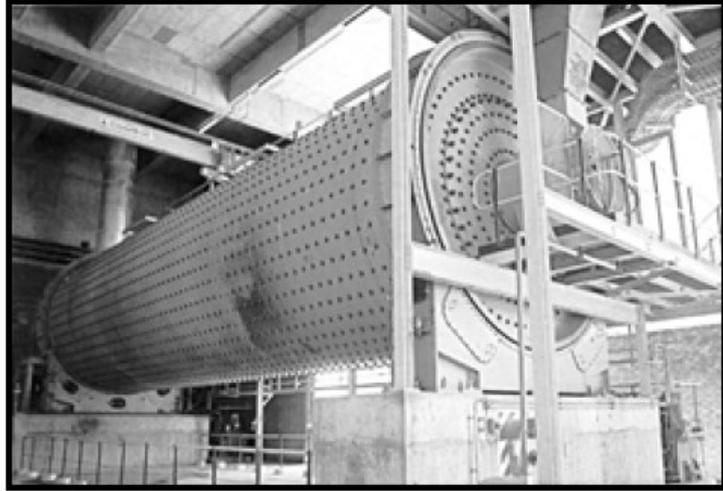
Figura 10 – Nódulos de clínquer após resfriamento



Fonte: Próprio autor, 2022.

Para finalizar, após o resfriamento, os nódulos são levados para silos de clínquer. Em seguida, seguem para o moinho, como pode ser visto no exemplo, (Figura 11), que é responsável pela quebra, trituração e homogeneização do material, formando então, o cimento portland.

Figura 11 – Moinho de bolas



Fonte: LAFARGE (1998)

O cimento ao sair do moinho é levado para o separador, onde a fração grossa retorna para o moinho, a fim de se obter a granulometria desejada para o produto final, Figura 12. A fração com finura adequada é levada para os silos de estocagem e homogeneização de cimento. Por fim, são ensacados ou comercializados a granel.

Figura 12 – Cimento Portland



Fonte: Próprio autor, 2022.

2.3 Fornos rotativos de clínquerização

Um forno rotativo é um equipamento industrial de produção em grande escala, Figura 13, usado para tratar termicamente materiais. O principal objetivo na utilização desse equipamento é aquecer o material presente no seu interior até a temperatura desejada. Trata-se de um cilindro metálico com comprimento comumente superior a 45m, e com diâmetros de até 8m. No geral, são construídos com chapas espessas de aço, e revestidos internamente com material refratário específico.

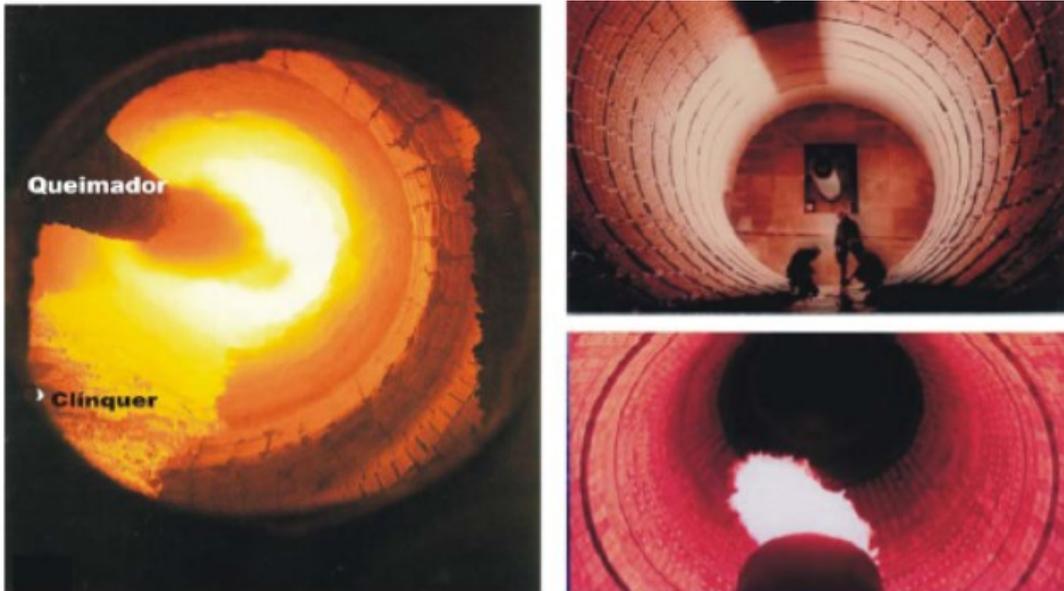
Figura 13 – Forno empregado na produção de clínquer.



Fonte: Neto (2018)

Esse revestimento é feito com materiais cerâmicos capazes de suportar os altos níveis de temperatura do processo de clínquerização, que chegam a atingir 1650°C quando em operação, Figura 14. A utilização desse material no interior do forno tem o objetivo de proteger a carcaça do cilindro contra ações térmicas (deformações), abrasividade do material e promover a retenção de calor (isolante). Geralmente o forno gira lentamente, de 1 a 4 Rotações por minuto (RPM) em torno de seu eixo, e apresenta uma inclinação horizontal de cerca de 3 a 4% no sentido do fluxo dos materiais.

Figura 14 – Interior do forno rotativo de clinquerização.



Fonte: Signoretti (2008)

2.4 Reações químicas no forno rotativo

Como visto anteriormente, para a produção de cimento Portland, as matérias primas básicas utilizadas são argila, calcário, sílica e óxido de ferro. Esses componentes interagem entre si no interior do forno, constituindo produtos mais complexos, com o intuito de atingir um estado de equilíbrio químico. Esse equilíbrio acontece de forma que os produtos depois de resfriados reproduzem o equilíbrio existente no momento da temperatura de clinquerização.

Durante o processo de hidratação do cimento, os componentes mineralógicos do clínquer reagem com a água e com isso originam os chamados produtos de hidratação que tem como objetivo principal proporcionar resistência e tenacidade para o concreto, conforme (CENTURIONE, 1999).

Ao introduzir a farinha no forno, ocorrem as reações químicas para obtenção do clínquer. Tais reações podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Reações no forno durante a clínquerização

Temperatura (°C)	Reação
100 - 200	Evaporação da água livre.
500 - 700	Desidroxilação da argila e reação do SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ com o calcário.
700 - 900	Decomposição dos carbonatos, com liberação de CO ₂ ; primeiras reações de estado sólido, levando à formação de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos e início de formação da belita (C ₂ S).
900 - 1200	Conversão de ferroaluminatos e aluminatos em C ₄ AF e C ₃ A; formação da belita a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre.
1200 - 1250	Cristalização das primeiras alitas (a partir de 1.200°C), a partir de cristais pré existentes de belita e cal livre e desaparecimento da sílica (SiO ₂) livre.
1250 - 1350	Início da formação de fase líquida (a partir de 1280 °C) a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, com conseqüente nodulização do clínquer.
acima de 1350	Complementação da formação dos cristais de C ₃ S e C ₄ AF. Desaparecimento de CaO livre.

Fonte: Centurione (1993) - Adaptado.

Em termos mineralógicos, o clínquer é formado por quatro fases principais: Alita, belita, aluminato de cálcio e ferrita, Tabela 3. Essas fases têm diferentes estruturas cristalinas, o que significa que diferentes propriedades podem ser encontradas.

Tabela 3 – Principais fases cristalinas do clínquer Portland

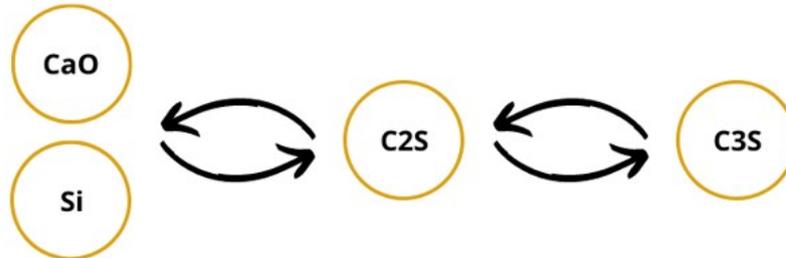
Nome do mineral	Composição aproximada	Fórmula	Notação química	Sistema cristalino
Alita	Silicato tricálcico (3CaO.SiO ₂)	Ca ₃ SiO ₅	C ₃ S	Monoclínico, triclínico e romboédrico
Belita	Silicato dicálcico (2CaO.SiO ₂)	Ca ₂ .SiO ₄	C ₂ S	Trigonal, ortorrômbico e monoclínico
Aluminato cálcico	Aluminato tricálcico (3CaO.Al ₂ O ₃)	Ca ₃ .Al ₂ O ₆	C ₃ A	Cúbico e ortorrômbico
Ferrita	Ferro aluminato tetracálcico (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀ ou Ca ₂ AlFeO ₅	C ₄ AF	Ortorrômbico

Fonte: Mehta e Monteiro (2008) - Adaptado

Todas as reações químicas que ocorrem dentro do forno são reversíveis, Figura 15. Assim, dependendo de fatores como aquecimento e resfriamento é possível retroceder ou avançar em termos de formação de determinados componentes na estrutura do clínquer. No processo

de formação, o aquecimento é usado para garantir que as reações aconteçam e os componentes mineralógicos sejam formados. Já o resfriamento é utilizado como forma de garantir que as reações químicas geradas pela clínquerização não retrocedam.

Figura 15 – Reversibilidade das reações dentro do forno



Fonte: Próprio autor, 2022.

O cristal de alita, também chamado de silicato tricálcico cuja composição pura é, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, ou C_3S , é o componente mais importante do clínquer Portland, com teor variando de aproximadamente 40 a 70%. Segundo, Souza et al. (2015), o cristal de C_3S é o maior responsável pelo desenvolvimento das propriedades de resistência mecânica e endurecimento do cimento produto final. O mesmo se cristaliza entre temperaturas que variam de 1200°C a 1450°C . Dependendo de fatores como composição, temperatura de formação, taxa de resfriamento e adição de outros materiais, o cristal de alita pode ser encontrado possuindo faces bem definidas, geralmente de seis lados formando hexágonos. Porém os cristais de C_3S (alita), podem se apresentar variando sua forma hexagonal até uma forma irregular.

O cristal de Belita (C_2S), também conhecido como silicato dicálcico, quando puro apresenta composição química, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, ou de forma abreviada C_2S . É o primeiro complexo de cal e sílica que se forma no aquecimento. Constitui entre 15 a 30% do clínquer Portland. Este composto reage lentamente com a água, contribuindo particularmente para um aumento na resistência acima dos 28 dias. Os grãos de C_2S normalmente são arredondados, com tamanho do cristal variando de acordo com a temperatura de queima do clínquer.

O aluminato de cálcio tem composição química $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou abreviada C_3A . Ele é responsável pela solidificação plástica da pasta cimentícia quando entra em contato com água. Juntamente com o C_3S , o C_3A tem um papel importante no desenvolvimento da resistência do cimento em períodos iniciais. Os cristais de C_3A são formados durante o processo de resfriamento do clínquer, que acontece logo após o processo de queima. Quanto mais rápido for o resfriamento do clínquer, menos desenvolvidos serão os cristais de Aluminato cálcico

(C3A).

Por último o cristal de ferrita, que tem como composição pura $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, contudo mais conhecido como Ferrita (C4AF), é o componente de participação intermediária na questão de desenvolvimento da resistência mecânica do cimento. Sua proporção na estrutura do clínquer pode chegar a até 13%. Além disso, o C4AF é responsável por produzir a coloração acinzentada do cimento, que se dá devido à presença do ferro em sua composição química. De forma semelhante ao aluminato de cálcio, o cristal de ferrita se cristaliza a partir do processo de solidificação de fases intersticiais fundidas presentes na estrutura do clínquer. Normalmente o C4AF se cristaliza posteriormente ao C3A.

Algumas características de cada fase presente no clínquer podem ser vistas resumidamente na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição das fases mineralógicas principais do clínquer

Substâncias	Propriedades e Aspectos Gerais	%
Alita (C3S)	As inclusões de belita, CaO e MgO são frequentes. Existem sete formas cristalinas que apresentam pouca variação estrutural. Principal responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica.	50 – 70
Belita (C2S)	Apresenta cinco formas polimórficas bem definidas e diferentes, que afetam as propriedades hidráulicas na belita. Contribui para a resistência mecânica, agindo destacadamente em idades mais longas (≥100 dias).	15 - 30
Aluminato Tricálcico (C3A)	Os álcalis se fixam no C3A, caracterizando cristais alongados. Três formas cristalinas são encontradas: tetragonal, cúbica e ortorrômbica. Compõe com a fase alumino-ferrítica, a fase intersticial. Juntamente com a alita confere resistência inicial às solicitações mecânicas.	5 - 10

Ferroaluminato	Pequena participação na resistência mecânica. 5 - 15
Tetracálcico (C4AF)	Responsável pela coloração cinzenta do cimento. A principal propriedade é a resistência aos ataques químicos.

Fonte: ABCP (1994) - Adaptado.

Portanto, não existe processo de clínquerização sem forno rotativo, sendo este o equipamento imprescindível na obtenção do clínquer. Assim é de suma importância realizar um monitoramento rígido das condições de operação deste equipamento. Fatores como temperatura e tempo de permanência no interior do forno, influenciam diretamente na microestrutura do clínquer formado. Atualmente são utilizadas as análises microscópicas dos cristais, por meio da microscopia de luz refletida, como forma de monitoramento. Contudo essa análise ainda é realizada de forma manual, tornando-a demorada e atrasando a obtenção das informações necessárias para o monitoramento.

2.5 Justificativa

A fim de realizar uma análise microscópica do clínquer, o presente trabalho se justifica por propor uma alternativa em relação a análise manual, facilitando a identificação e consequente monitoramento por meio da análise automática dos cristais.

2.6 Objetivos

Pelo exposto, tem-se para esse trabalho os objetivos que seguem.

2.6.1 Objetivo geral

Propor agrupamentos manuais de imagens de cristais de alita segundo sua forma (idiomorfismo), para serem utilizados no treinamento do MRCNN, um algoritmo de aprendizado de máquinas, com o intuito de fazer a identificação dos cristais de forma automática. Por meio disso facilitar e agilizar o monitoramento da condição de operação do forno rotativo em uma planta de cimento.

2.6.2 Objetivos específicos

1. Realizar agrupamentos manuais dos cristais de alita vistos nas imagens microscópicas de clínquer, segundo a forma que os mesmos se apresentam.
2. Interpretar as amostras de imagens microscópicas, segundo as características dos cristais de cada classe, e a partir disso fazer uma descrição e fornecer indicativos gerais da condição de queima do forno rotativo.
3. Utilizar os agrupamentos manuais como rótulos no treinamento de um algoritmo de aprendizado de máquina.
4. Analisar o resultado apresentando pelo algoritmo, em relação aos erros e acertos da marcação dos cristais.

O capítulo seguinte, mostra a metodologia usada para análise da microscopia do clínquer. Será realizado o estudo e marcação das imagens por meio da microscopia, com o intuito principal de fazer os agrupamentos e em seguida o treinamento do algoritmo para o monitoramento do forno rotativo de clinquerização.

3 METODOLOGIA

A utilização da microscopia de luz refletida se dá pela possibilidade de observação e exploração que essa técnica permite. Assim, seu auxílio é de suma importância na análise da microestrutura do clínquer, sendo possível fazer interpretações importantes a respeito da operação do forno.

3.1 Utilização da microscopia no estudo do clínquer de cimento Portland

A fim de se obter conhecimentos a cerca da microestrutura do clínquer, a microscopia, desempenha um papel essencial por ser uma técnica indispensável como forma de investigação. Isso se dá devido ao seu potencial de evidenciar características inerentes ao processo de clínquerização. Segundo KIHARA e MARCIANO (1995), a análise qualitativa do clínquer através da microscopia permite a reconstituição das condições de fabricação, além da otimização do processo de queima.

A microscopia consiste no preparo de uma amostra representativa do clínquer produzido, que é levada a um microscópio digital a fim de se obter imagens que forneçam informações sobre o estado do clínquer produzido em um determinado intervalo de tempo (STUTZMAN, 2012).

A maioria da microscopia usa seções polidas de clínquer e luz refletida, e métodos que incluem a análise de contagem de locais de porosidades, formas e dimensões dos cristais de C3S e C2S, dentre outras características que podem ser observadas nas imagens microscópicas, conforme dito por (Böhm e Lipus (2015); Young e Yang (2019)).

Com a aplicação da microscopia é possível fazer uma avaliação do tempo de queima do clínquer, da temperatura e de outros aspectos do forno ao longo do processo de clínquerização. Esses são fatores do processo de queima que influenciam diretamente no grau de desenvolvimento dos cristais. No presente trabalho será considerada a relação existente entre os fatores temperatura e tempo de permanência no forno e primeiro resfriamento, com a forma dos cristais formados.

Antes da realização da microscopia é necessário preparar as amostras de clínquer que serão visualizadas. Para isso são separados os conjuntos de grãos representativos do clínquer. Em seguida, o clínquer selecionado passa por um processo de lixamento, onde ocorre o desgaste das faces desses grãos. Após esse lixamento, as amostras passam por uma etapa de polimento, que conferem um acabamento final com alisamento das faces. Feito isso, essas porções de

clínquer são misturadas a uma resina de elevado índice de refração, que facilita a visualização da microestrutura no microscópio. Essas amostras são prensadas e distribuídas em um molde, Figura 16.

Figura 16: Amostra de clínquer pronto para visualização

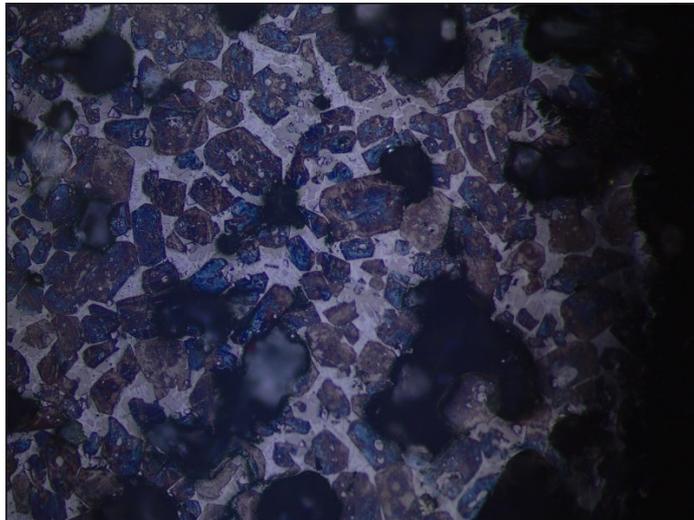


Fonte: Próprio autor, 2022.

3.2 Realização da microscopia

Após a visualização e captura das imagens do clínquer com o auxílio de um microscópio, as mesmas são armazenadas em um computador. É importante ser dito que as amostras de imagens da microestrutura do clínquer utilizadas no estudo, Figura 17, foram disponibilizadas de um banco de dados de uma cimenteira.

Figura 17: Exemplo imagem microscópica do clínquer



Fonte: Próprio autor, 2022.

Como dito anteriormente, a principal fase do clínquer é a alita ou C3S. Esse cristal provê informações sobre: tempo de clínquerização; temperatura alcançada dentro do forno e primeiro resfriamento do clínquer. Logo a análise desse cristal é a mais importante dentre todas as que são realizadas via microscopia, sendo o foco deste estudo.

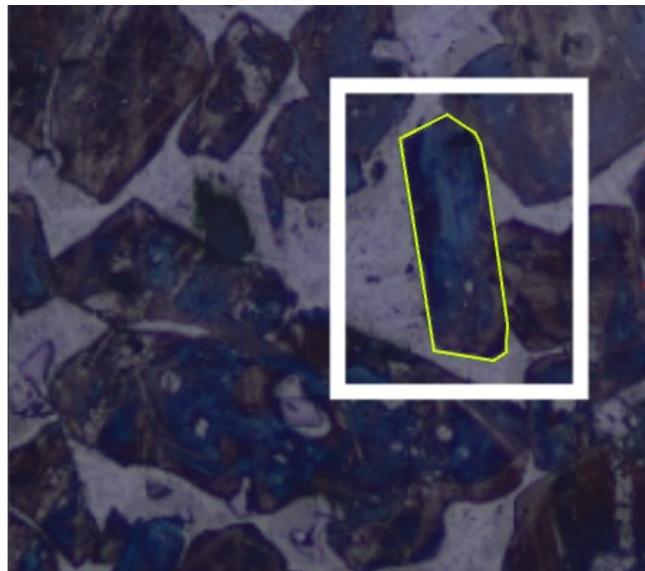
A partir da análise desses cristais é possível tirar conclusões a cerca do processo de clínquerização, e assim monitorar o desempenho do forno. Conforme visto em Campbell (1999), quando os cristais de alita apresentam diâmetros:

1. Superiores a 60 μm , são considerados elevados, indicam condições enérgicas de queima, ou seja, queima excessiva.
2. Inferiores a 20 μm , são considerados pouco desenvolvidos e dão indicativos de que o processo de queima não foi realizado de forma satisfatória.
3. Diâmetro variando entre 30 e 40 μm , indicam condições normais de queima.

Outro ponto, é a relação existente entre a temperatura no interior do forno rotativo com a forma do cristal produzido. Sabe-se que:

1. Cristais alongados, Figura 18, indicam uma temperatura alta no interior do forno no momento do processo de queima.
2. Cristais equidimensionais ou não alongados, Figura 19, indicam uma temperatura de clínquerização normal para o desenvolvimento do cristal.

Figura 18: Exemplo cristal de alita alongado



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 19: Exemplo cristal de alita equidimensional

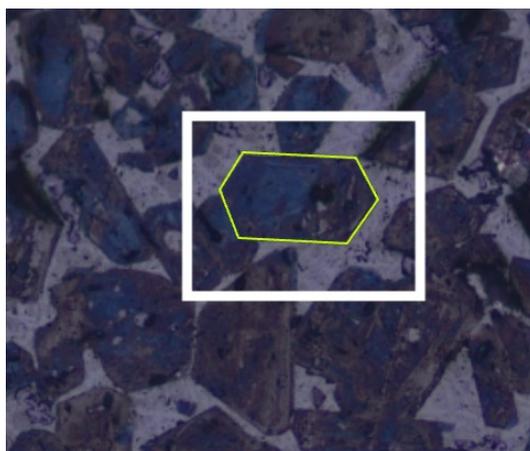


Fonte: Próprio autor, 2022.

Quanto ao resfriamento a relação existente entre essa etapa e a alita produzida está na forma (idiomorfismo) dos cristais formados. Aqui se dá o ponto muito importante do trabalho, visto que os agrupamentos serão realizados quanto a essas classificações. Assim, é sabido que:

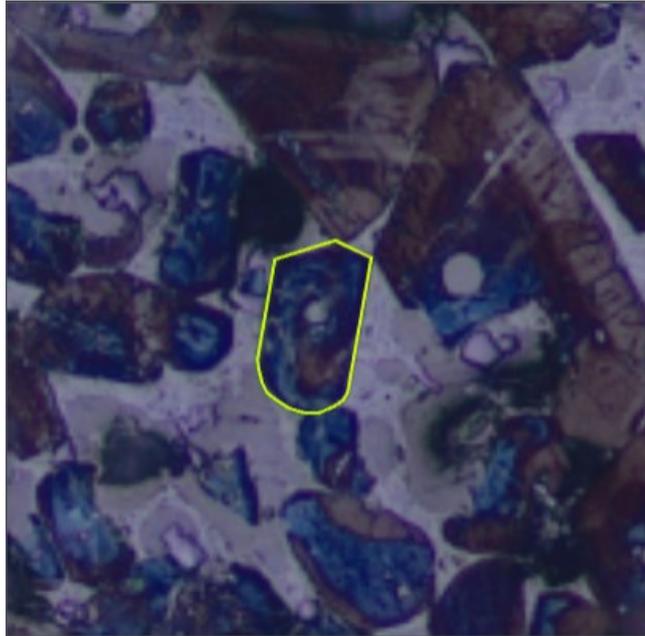
1. Cristais idiomórficos - Faces bem definidas, Figura 20, indicam que o processo de resfriamento ocorreu de forma ideal.
2. Cristais subdiomórficos - Faces imprecisamente desenvolvidas, Figura 21, indicam que houve uma variação de tempo na etapa, fazendo com que o resfriamento ocorra um pouco mais lento que o ideal.
3. Cristais xenomórficos - Faces que não se é possível identificar, Figura 22, indicam que o processo de resfriamento se deu de forma muito lenta.

Figura 20: Exemplo cristal de alita idiomórfico



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 21: Exemplo cristal de alita subdiomórfico



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 22: Exemplo cristal de alita xenomórfico



Fonte: Próprio autor, 2022.

Além dessas, existem muitos outros pontos de investigação e monitoramento do forno rotativo no momento do processo de clinquerização. A seguir, na Tabela 5, são mostrados mais algumas observações comuns com relação aos cristais de C3S e as possíveis interpretações que podem ser feitas a partir da análise desses cristais.

Tabela 5: Características gerais da alita

Observações	Interpretação
Aumento na porcentagem de alita e tamanho do cristal	Aumento da temperatura e tempo de queima com $T = 1450^{\circ}\text{C}$ a 1750°C e tempo até 800 segundos
Cristais de alita amontoados	Temperatura alta
Cristais xenomórficos	Temperatura baixa
Cristais de alita relativamente grandes, um tanto arredondados	O clínquer queimado em condições redutoras, removido do forno a 1350°C , resfriado ao ar
Cristais de alita relativamente grandes, tipicamente corroídos; matriz bem diferenciada	O clínquer queimado sob condições oxidantes e resfriado a 1250°C no forno
Alitas maiores que $30\ \mu\text{m}$	Irregularidades durante a queima; Alta resistência da argamassa aos 28 dias
Alitas maiores que $20\ \mu\text{m}$ e idiomórfica	Clínquer bem queimado, alta resistência da argamassa
Diminuição no tamanho da alita, e aumento na abundância da alita	Aumento da temperatura de queima de 1500°C para 1700°C
Pequenos cristais de alita vs cristais grandes	Regiões ricas em cal versus ricas em sílica no clínquer
Diminuição do tamanho do cristal alita	Aumento na taxa de alimentação
Grande variação no tamanho da alita	Farinha não homogênea; fator de saturação de cal alta
Alita pequena	Chama curta, rápida taxa de aquecimento;
(a) Pequena alita (15 mm) (b) Alita moderada (15-30 mm) (c) Alita grande (30-60 mm)	(a) Farinha fina ou clínquer meio queimado (b) Clínquer bem queimado (c) Farinha crua grosseira
Tamanho de cristal alita de 70 a $100\ \mu\text{m}$	Tamanho ideal para maior efeito nas propriedades do cimento

Aumento na quantidade de alita pequena, diminuição de alitas grandes	Queima rápida em alta temperatura
Diminuição na faixa de tamanhos dos cristais alita	Aumento da temperatura de queima, diminuição do tempo de queima
Alita idiomórfica	Resfriamento relativamente rápido
Decomposição de alita em belita e cal livre;	Queima excessiva ou resfriamento lento no forno
Cristais corroídos de alita	Resfriamento lento
Alita com tamanho médio inferior a 10 μm	A resistência da argamassa geralmente diminui mais de 5%

Fonte: Campbell (1999)

Para o prosseguimento do estudo, é válido enfatizar que os cristais de C3S analisados, por questão de quantidade de amostras de imagens disponíveis, foram agrupados quanto ao idiomorfismo. Assim os cristais foram divididos em: Idiomórficos, subdiomórficos e xenomórficos, de acordo com as respectivas características preponderantes de cada classe.

Para a marcação dos cristais e agrupamento das imagens, utilizou-se o software de anotação de imagens Roboflow, disponibilizado por (Dwyer, B., Nelson, J., Solawetz, J., et. al., (2022),). O Roboflow provê ferramentas necessárias para transformar as imagens estudadas em um modelo de treinamento. Depois de carregar as imagens da microestrutura do clínquer no software, elas foram analisadas e todos os cristais presentes nessas imagens foram anotados. Para a anotação dos cristais foi utilizada a ferramenta polígono, onde permitiu-se, com maior precisão, determinar todo o contorno dos cristais de acordo com suas características, permitindo a separação nas suas respectivas classes. Após a anotação, todas as imagens foram salvas para utilização posterior.

Com relação a quantidade de amostras disponíveis, foram disponibilizadas 3 (três) amostras, das quais foram tiradas várias fotos. Para o estudo foram analisadas 121 (cento e vinte uma) dessas imagens microscópicas.

Após a identificação manual realizada no Roboflow, aproveitou-se a separação dos cristais em seus respectivos grupos, para realizar o treinamento do MRCNN, um algoritmo de aprendizado de máquinas usado para detecção e segmentação de objetos em imagens, disponibilizado por (ABDULLA, 2017). O MRCNN, se baseia em modelos pré-existentes no

reconhecimento de objetos. Ao utilizar o conjunto de dados referente a anotação dos cristais obtidas a partir da utilização do Roboflow, o modelo possibilitou que os cristais de C3S, fossem detectados de forma automática nas imagens microscópicas.

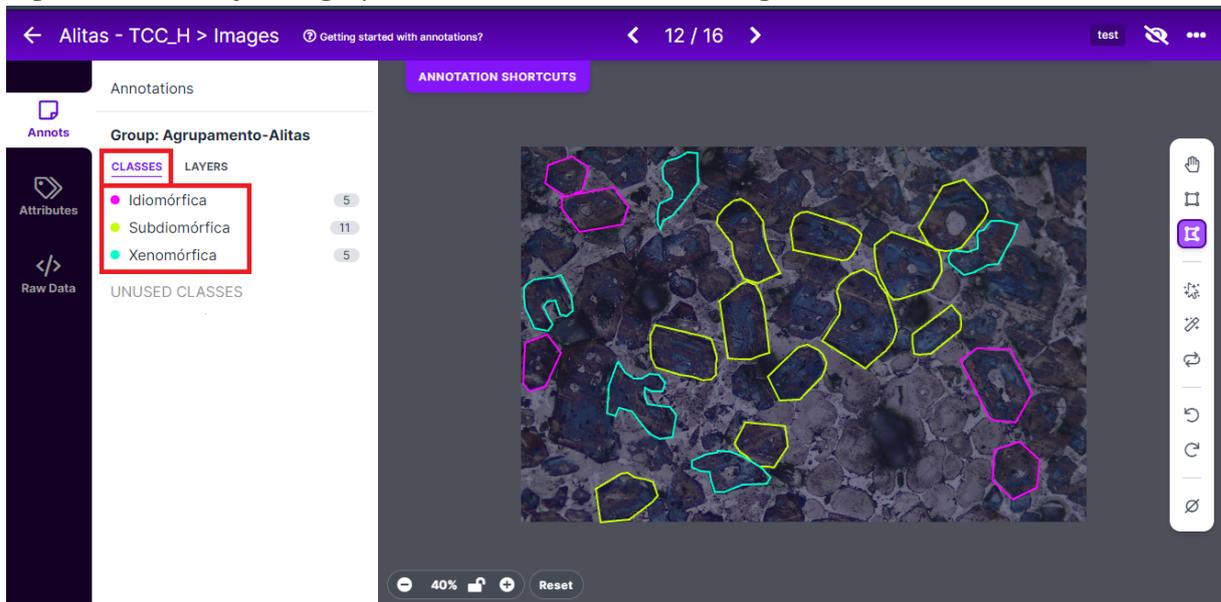
4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão mostrados alguns exemplos de marcação manual dos cristais realizados para o treinamento do MRCNN, bem como uma indicação geral do que os cristais refletem do processo de queima. Além disso, mais adiante no capítulo, será exibido o resultado da detecção realizada pelo algoritmo, pós treinamento realizado, comparado com as imagens originais.

4.1 Identificação e marcação manual dos cristais

Na Figura 23, é mostrada a interface do Roboflow. Nela, podem ser vistas as anotações dos cristais, contornados em diferentes cores para a realização do estudo. O contorno de cor rosa, indica o agrupamento dos cristais idiomórficos; o de cor amarelo, os subdiomórficos; O contorno de cor azul representa o agrupamento dos cristais xenomórficos.

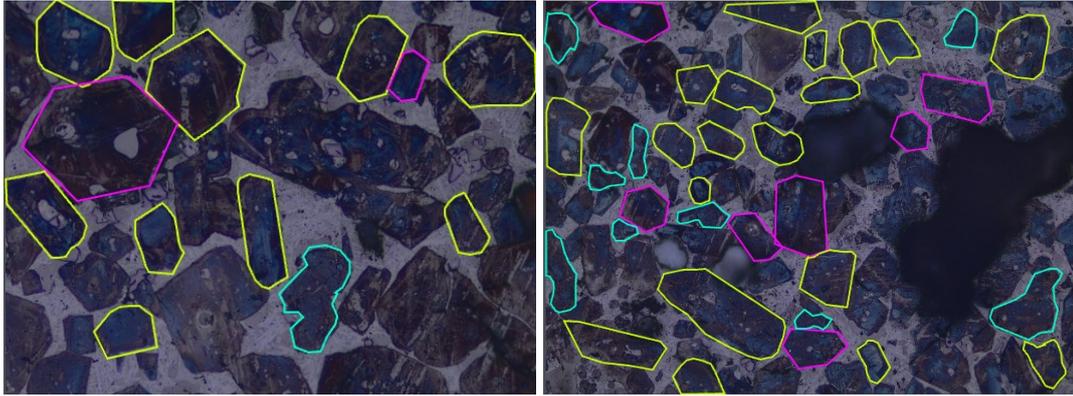
Figura 23: Marcação e agrupamento dos cristais de alita segundo suas características



Fonte: Próprio autor, 2022.

A Figura 24 mostra os grupos de alitas separadas pela sua forma (idiomorfismo). Cada grupo contém cristais com formas e característica semelhantes.

Figura 24: Exemplo de marcação e agrupamento dos cristais

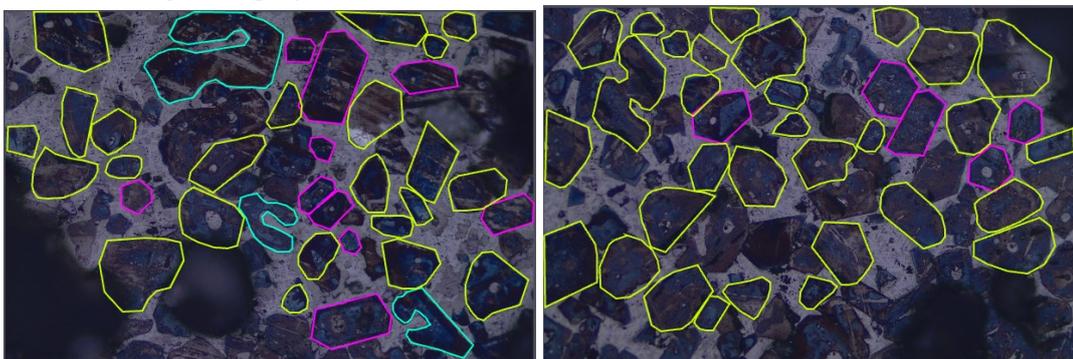


Fonte: Próprio autor, 2022.

Antes de fornecer uma indicação geral a cerca do que os cristais refletem sobre o processo de queima, é válido salientar que as características dos mesmos sempre são influenciadas por mais de um parâmetro. Por mais que um possa se sobressair a outro, os aspectos vistos sempre serão uma junção de vários fatores existentes entre processo de queima e primeiro resfriamento.

A visualização das formas, realizada através da utilização da microscopia, refletem aspectos dos cristais que podem ser utilizadas para fornecer indicativos sobre a operação do forno rotativo. Na Figura 25, é possível ver, em sua grande maioria, subdiomórficos.

Figura 25: Marcação e agrupamento de cristais subdiomórficos



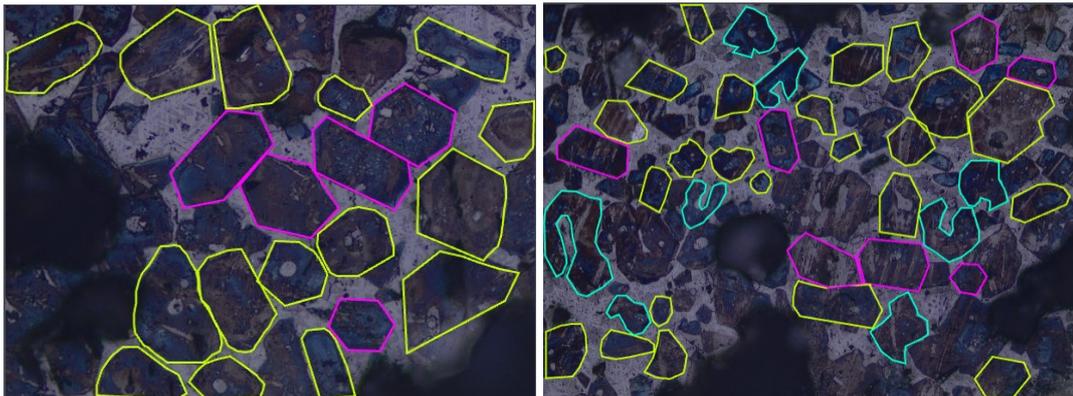
Fonte: Próprio autor, 2022.

Os cristais subdiomórficos, contornados pela cor amarela, se mostraram os mais comuns na microestrutura. Seu aspecto com faces semi-desenvolvidas refletem uma certa variação de tempo no processo de primeiro resfriamento, que ocorre ainda dentro do forno, fazendo com que o resfriamento em questão aconteça um pouco mais lento que o normal. Além desse fator principal na formação deste tipo de cristal, parâmetros como tempo e temperatura de

clinkerização, também são preponderantes. A junção de faces desenvolvidas junto de faces um tanto quanto arredondadas, característica desse tipo de cristal, pode ser resultado da queima, de certa forma insuficiente da farinha, o que explica o não desenvolvimento total das faces. Outro ponto a ser destacado nesse agrupamento é a existência, em determinadas imagens analisadas, de uma grande quantidade de cristais de alita, em certos pontos até amontoados. Tal fato pode ser relacionado com um aumento de temperatura de queima, fazendo surgir mais cristais na microestrutura.

Os cristais idiomórficos, contornados pela cor rosa, Figura 26, são mais difíceis de serem encontrados pois dependem de condições de fabricação relativamente ideais de operação do forno. Suas faces bem definidas (hexágonos), indicam que as condições de fabricação foram otimizadas, desde a composição química da farinha que se deu de forma “correta”, bem misturada, sem partículas muito grossas, até a estabilidade adequada das temperaturas de clinkerização. Quanto a temperatura, esse tipo de cristal reflete um clínquer muito bem queimado. Além disso, cristais idiomórficos indicam que o resfriamento se deu de forma rápida e ideal para que todas as faces se desenvolvessem corretamente.

Figura 26: Marcação e agrupamento de cristais idiomórficos



Fonte: Próprio autor, 2022.

Já os xenomórficos, contornados pela cor azul, Figura 27, indicam que fatores importantes podem não terem sido corretamente avaliados. Por exemplo, a temperatura de clinkerização no interior do forno, que muito provavelmente estava abaixo do necessário no momento da queima. Assim como em relação ao tempo de resfriamento, que é possível inferir que ocorreu de forma muito lenta levando em conta a aparência. Esses parâmetros somados produzem esses cristais mostrados, que não se é possível identificar suas faces.

Figura 27: Marcação e agrupamento de cristais xenomórficos



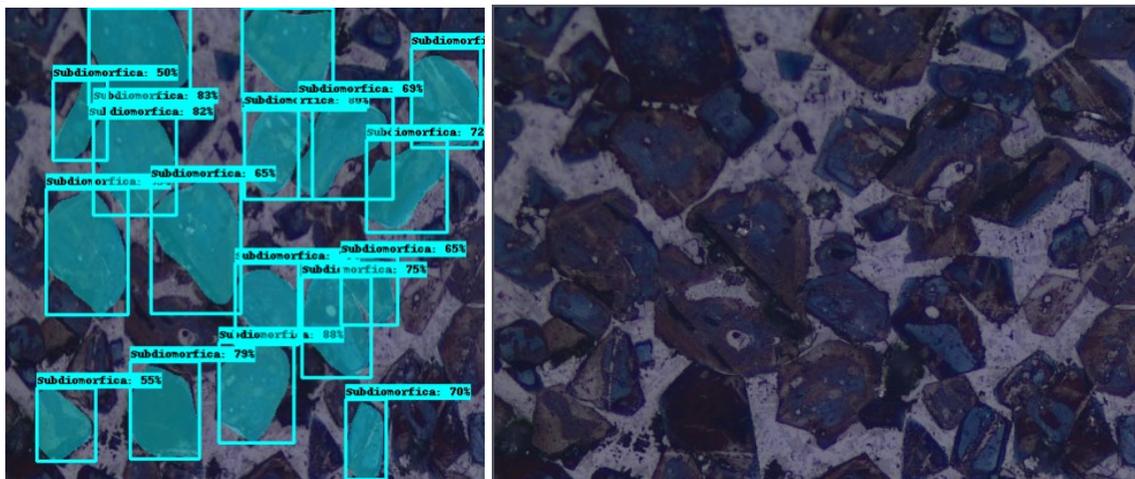
Fonte: Próprio autor, 2022.

4.2 Identificação automatizada dos cristais

A utilização do MRCNN, disponibilizado por (ABDULLA, 2017), proporcionou a obtenção dos resultados a seguir. Na imagem da esquerda é mostrado a detecção dos cristais feitas pelo o algoritmo, enquanto na da direita, é mostrado a imagem original para comparação entre ambas. A porcentagem existente em cada marcação realizada, indica o grau de certeza do algoritmo para com o cristal de C3S detectado e sua respectiva classe de agrupamento em que o mesmo se encaixa.

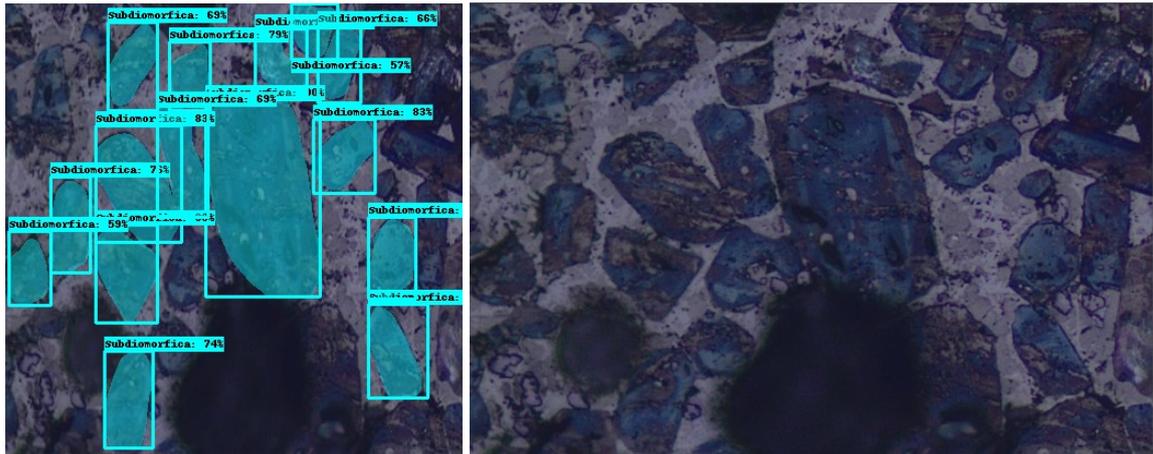
Observa-se que tanto na Figura 28 quanto na Figura 29, os cristais subdiomórficos foram em sua grande maioria marcados corretamente quando comparado com a imagem original. Percebe-se também que alguns cristais deixaram de ser marcados e alguns que poderiam se encaixar em outros agrupamentos foram marcados na classe subdiomórfica.

Figura 28: Resultado imagem microscópica 1



Fonte: Próprio autor, 2022.

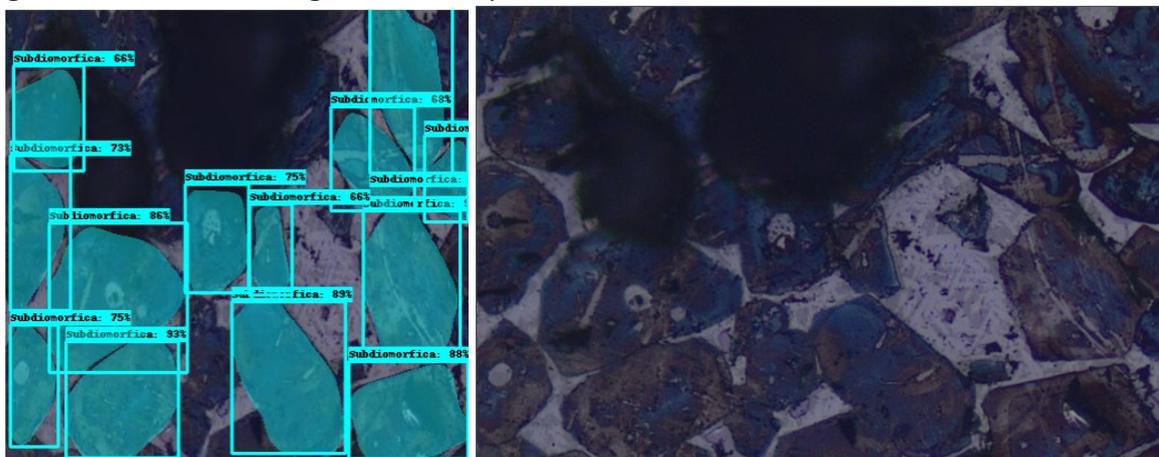
Figura 29: Resultado imagem microscópica 2



Fonte: Próprio autor, 2022.

Na Figura 30, observa-se que praticamente todos os cristais presentes na imagem foram identificados na classe correta e com um nível de certeza bom.

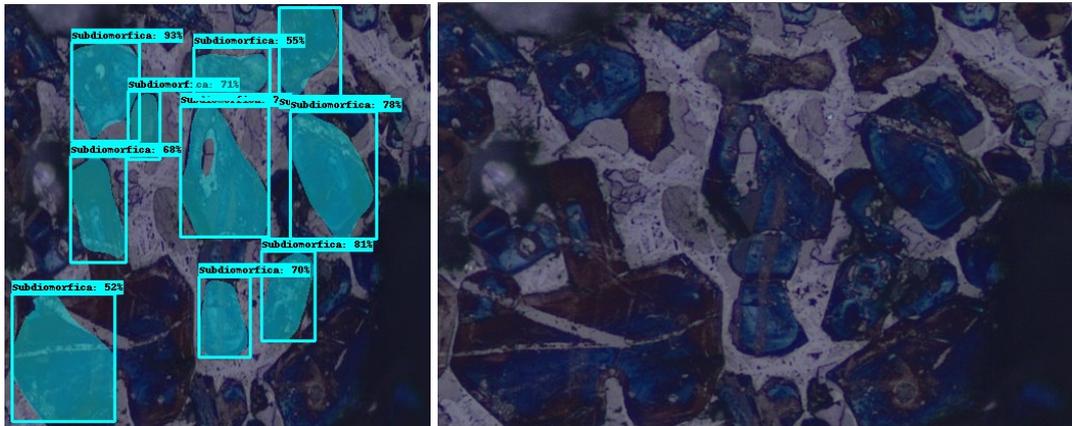
Figura 30: Resultado imagem microscópica 3



Fonte: Próprio autor, 2022.

Na Figura 31, nota-se a detecção incompleta de cristais, além da não identificação de outros.

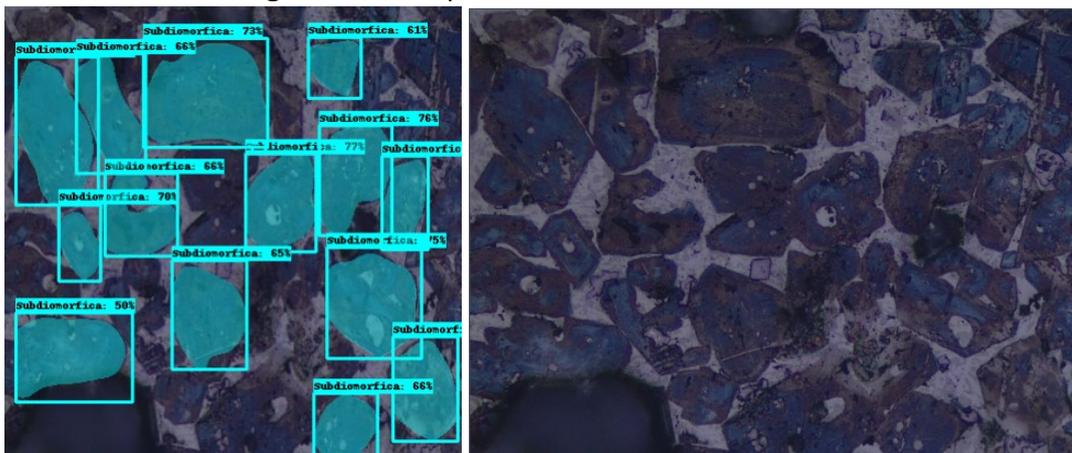
Figura 31: Resultado imagem microscópica 4



Fonte: Próprio autor, 2022.

Na Figura 32, cristais que se apresentavam menor dimensão não foram detectados. Além disso, nessa imagem alguns cristais foram agrupados na classe incorreta quando comparados com a marcação manual.

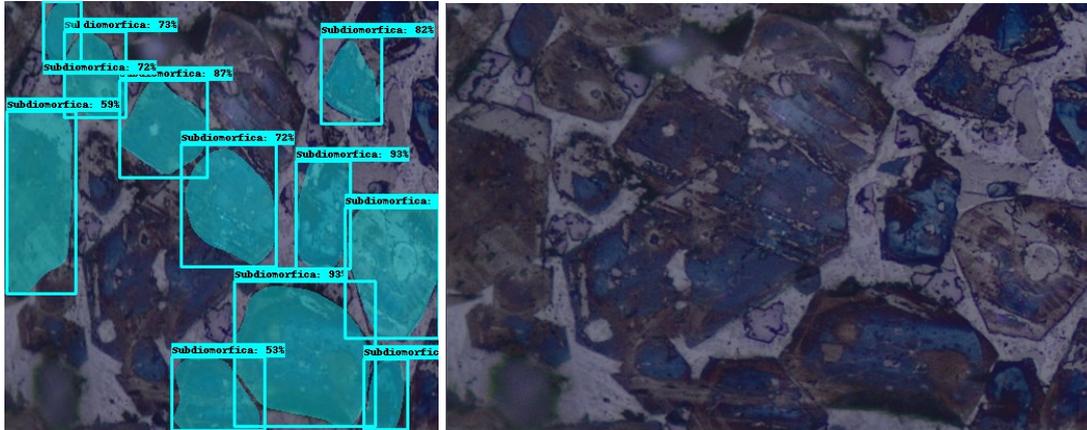
Figura 32: Resultado imagem microscópica 5



Fonte: Próprio autor, 2022.

Na Figura 33, nota-se uma detecção parcial de cristais, bem como também a não identificação de cristais, em especial um cristal da classe idiomórfica.

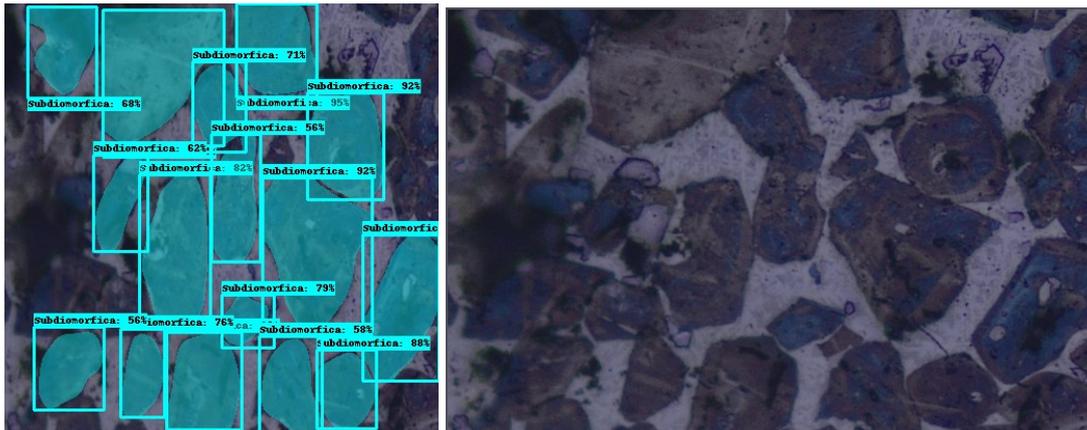
Figura 33: Resultado imagem microscópica 6



Fonte: Próprio autor, 2022.

Na Figura 34, percebe-se que praticamente todos os cristais foram detectados e agrupados na classe correta.

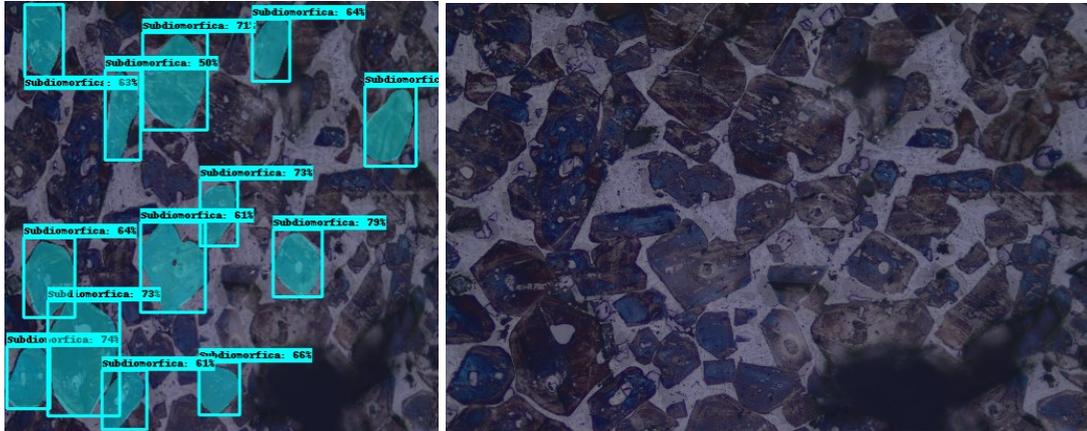
Figura 34: Resultado imagem microscópica 7



Fonte: Próprio autor, 2022.

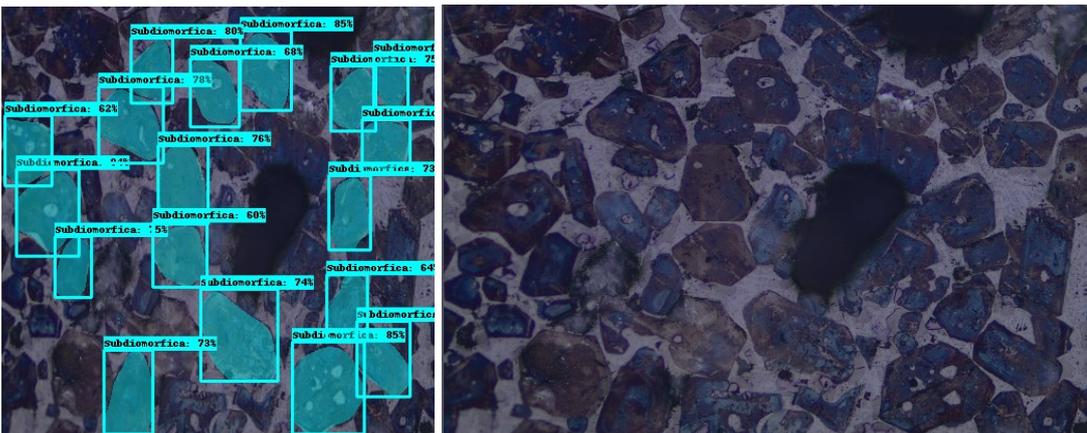
Com as Figuras 35 e 36, é possível perceber que em imagens com grande quantidade de cristais, o algoritmo não teve um bom desempenho. Muitos cristais foram ignorados quando comparados com a imagem da microestrutura original, mostrada a direita.

Figura 35: Resultado imagem microscópica 8



Fonte: Próprio autor, 2022.

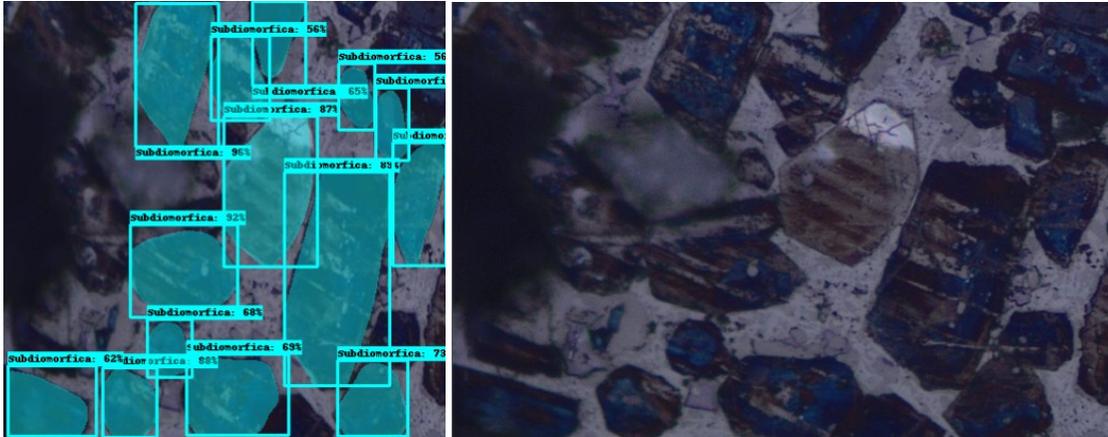
Figura 36: Resultado imagem microscópica 9



Fonte: Próprio autor, 2022.

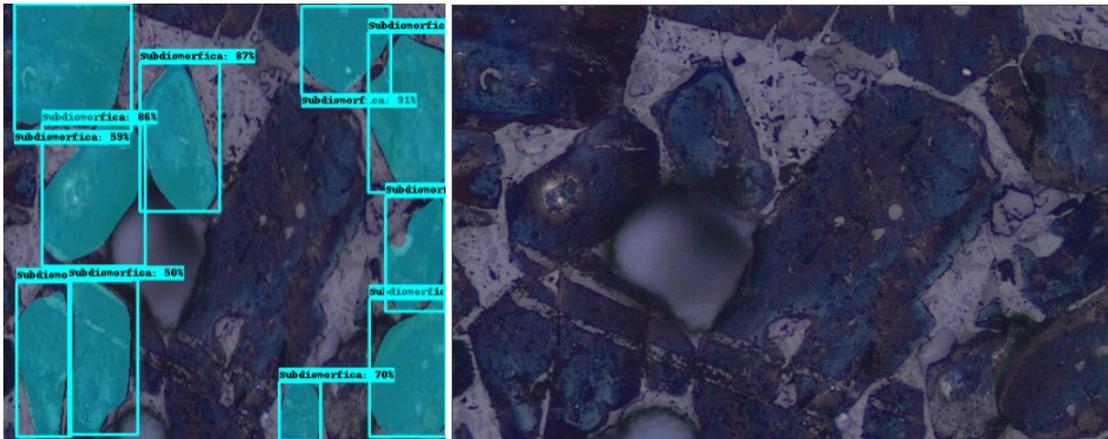
Já a Figura 37 e a Figura 38, mostra que em imagens com quantidade de cristais menores a análise e identificação se dá de uma melhor forma. Poucos ou quase nenhum cristal é ignorado, além de serem agrupados na classe correta.

Figura 37: Resultado imagem microscópica 10



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 38: Resultado imagem microscópica 11



Fonte: Próprio autor, 2022.

No geral, é perceptível que em todas as imagens analisadas, o MRCNN conseguiu realizar a identificação apenas de cristais subdiomórficos. Isso se deve a grande quantidade desse tipo de cristal presente nas imagens analisadas, fato esse que promove um bom nível de treinamento para o algoritmo em relação aos cristais desse grupo.

Com relação aos idiomórficos e xenomórficos, devido as suas características especiais, principalmente no quesito forma, hexágonos e a falta de um padrão que não é possível a identificação das faces respectivamente, aliado a um baixo número de imagens, não foi possível

realizar um treinamento adequado do algoritmo para que ele fosse capaz de identificar, assim como feito para os subdiomórficos.

Outro ponto a ser destacado foi o desempenho do MRCNN em imagens com grandes quantidades de cristais. Nessas imagens muitos cristais foram ignorados. Contudo, assim como a dificuldade de marcar cristais de determinadas classes, isso também pode ser explicado pela baixa quantidade de imagens disponíveis.

5 CONCLUSÕES

Mediante ao estudo realizado é possível visualizar que as condições de operação e de queima dos fornos rotativos são fatores preponderante na obtenção do clínquer. Viu-se que parâmetros, principalmente como, temperatura e tempo de clinquerização, e resfriamento influenciam diretamente nas características dos cristais formados, e que o uso da microscopia de luz refletida como forma de análise e investigação é de grande valia para saber o que se passa nessa etapa.

Com o agrupamento dos cristais de alita realizado, pôde-se observar melhor as características específicas de cada classe de cristal formado. Além disso, também se valendo dos agrupamentos feitos, foi possível inferir indicativos gerais a respeito das classes de cristais criadas (subdiomórficos, idiomórficos e xenomórficos) e a relação com o processo de queima, assim como, o mais importante, treinar o algoritmo para que ele fosse capaz de detectar os cristais de forma correta.

Com relação a identificação automatizada dos cristais via algoritmo de aprendizado de máquinas, concluí-se que a não detecção dos cristais das classes xenomórficos e idiomórficos se dá devido a baixa quantidade de amostras de imagens disponíveis. Já a excelente identificação dos subdiomórficos se deve a grande quantidade desse tipo de cristal presente na microestrutura das imagens analisadas, o que proporcionou um bom treinamento do MRCNN.

Além disso, o algoritmo obteve resultados bons quando na imagem analisada existia poucos cristais para serem detectados. Nesses casos, quase todos os cristais foram identificados e agrupados na classe correta. O que não se repetiu nas imagens com grandes quantidades de cristais, onde muitos foram ignorados e com isso não sendo detectados. Logo, a automatização do processo de detecção dos cristais, mesmo com o baixo número de imagens disponíveis, se mostrou uma alternativa viável, visto que tende a diminuir e facilitar bastante o trabalho humano, uma vez que após a identificação dos cristais, é possível fazer a contagem, a medição dos cristais usando outros algoritmos específicos, redução de custos, tempo, desperdício e aumentar a produtividade se treinada com um bom número de imagens.

Assim, pode-se concluir que os objetivos propostos foram em grande parte alcançados durante a realização deste trabalho, principalmente no que diz respeito a importância da utilização da microscopia de luz refletida e da automatização desse processo como forma de monitoramento da condição de operação do forno rotativo.

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, W. Mask R-CNN for object detection and instance segmentation on Keras and TensorFlow. Online: Github, 2017. https://github.com/matterport/Mask_RCNN.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Curso de microscopia de cimento Portland. Departamento de Físico-Química. São Paulo, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Microscopia de clínquer de cimento Portland. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento portland. São Paulo, 2002.
- BÖHM, M.; LIPUS, K. Evaluation of portland cement clinker with optical microscopy—case studies iii. Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, v. 15, p. 33–37, 2015.
- CAMPBELL, D. Microscopical examination and interpretation of portland cement and clinker: Portland cement association. Old Orchard RD, Skokie, USA, 1999.
- CENTURIONE, S. L. Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 1993.
- CENTURIONE, S. L. A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 1999.
- Dwyer, B., Nelson, J., Solawetz, J., et. al., (2022). Roboflow (Version 1.0) [Software]. Disponível em: <https://roboflow.com.computervision>.
- KIHARA, Y.; MARCIANO, J. Qualidade e produtividade na indústria de cimento. Informativo Abesc, 1995.
- LAFARGE, B. Treinamento para Técnicos Fabricação. Noções básicas do processo forno e torre de ciclones. Minas Gerais: ARCOS, 1998.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008.
- MOCHIZUKI, V. d. L. Balanço térmico do forno rotativo e do resfriador da fábrica elizabeth cimentos ltda. Universidade Federal da Paraíba, 2017.
- NETO, F. d. C. S. Acompanhamento do processo produtivo do cimento portland e avaliação da cogeração de energia na unidade fabril da companhia industrial de cimento apodi em quixeré-ce. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018.
- PRIES, R. A. Riscos químicos no processo de blendagem de resíduos industriais para coprocessamento. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- SIGNORETTI, V. T. Controle das emissões de NO, SO e metais pesados quando utilizam combustíveis alternativos e de alto teor de enxofre na indústria de cimento. 2008.
- SNIC. Relatório anual 2020. São Paulo: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC, 2020.

SOUZA, H.; JR, A. S.; JR, E. C.; COSTA, A. Predição da composição do clínquer industrial utilizando minimização da energia livre de gibbs. *Cerâmica, SciELO Brasil*, v. 61, p. 23–30, 2015.

STUTZMAN, P. E. Microscopy of clinker and hydraulic cements. *Reviews in mineralogy and geochemistry, Mineralogical Society of America*, v. 74, n. 1, p. 101–146, 2012.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of portland cement clinker from iron ore tailings. *Construction and Building Materials, Elsevier*, v. 197, p. 152–156, 2019.

ANEXO A – PLANTAS CIMENTEIRAS AO LONGO DO TERRITÓRIO
BRASILEIRO

Nº	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
1	Porto Velho	Porto Velho	RO	Votorantim
2	Mizu	Manaus	AM	Mizu
3	Cibrasa	Capanema	PA	João Santos
4	Primavera	Primavera	PA	Votorantim
5	Barcarena	Barcarena	PA	Votorantim
6	Xambioá	Xambioá	TO	Votorantim
7	São Luís	São Luís	MA	Votorantim
8	Cimento Bravo	São Luís	MA	Cimar
9	Cimento Verde do Brasil	Açailândia	MA	Cimento Verde do Brasil
10	Icibra	Bacabeira	MA	Icibra
11	Sobral	Sobral	CE	Votorantim
12	Pecém	Caucaia	CE	Votorantim
13	Apodi	Pecém	CE	Apodi
14	Apodi	Quixeré	CE	Apodi
15	Itapetinga	Mossoró	RN	João Santos
16	Mizu	Baraúna	RN	Mizu
17	Cimento Elo	Currais Novos	RN	Revemar
18	Intercement	João Pessoa	PB	Intercement
19	Lafargeholcim	Caaporá	PB	Lafargeholcim
20	Cimento Elizabeth	Alhandra	PB	Cimento Elizabeth
21	Cimento Nacional	Pitimbu	PB	Cimento Nacional
22	Intercement	Cabo de Sto. Agostinho	PE	Intercement
23	Cimento Forte	Cabo de Sto. Agostinho	PE	Cimento Forte
24	Poty Paulista	Paulista	PE	Votorantim
25	Pajeú	Carnaíba	PE	Cimento Pajeú
26	Intercement	São M. dos Campos	AL	Intercement
27	Cimento Zumbi	Marechal Deodoro	AL	Cimento Zumbi

...

Tabela 6 – Continuação

N°	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
28	Laranjeiras	Laranjeiras	SE	Votorantim
29	Mizu	Pacatuba	SE	Mizu
30	Intercement	Campo Formoso	BA	Intercement
31	Intercement	Brumado	BA	Intercement
32	Lafargeholcim	Candeias	BA	Lafargeholcim
33	Ciplan	Sobradinho	DF	Ciplan
34	Sobradinho	Sobradinho	DF	Votorantim
35	Intercement	Cezarina	GO	Intercement
36	Lafargeholcim	Cocalzinho	GO	Lafargeholcim
37	Edealina	Edealina	GO	Votorantim
38	Nobres	Nobres	MT	Votorantim
39	Cuiabá	Cuiabá	MT	Votorantim
40	Intercement	Bodoquena	MS	Intercement
41	Corumbá	Corumbá	MS	Votorantim
42	Lafargeholcim	Montes Claros	MG	Lafargeholcim
43	Intercement	Santana do Paraíso	MG	Intercement
44	Cimento Nacional	Matozinhos	MG	Cimento Nacional
45	Mizu	Matozinhos	MG	Mizu
46	Liz	Vespasiano	MG	Liz
47	Lafargeholcim	Pedro Leopoldo	MG	Lafargeholcim
48	Intercement	Pedro Leopoldo	MG	Intercement
49	Cimento Nacional	Arcos	MG	Cimento Nacional
50	CSN	Arcos	MG	CSN
51	Itaú de Minas	Itaú de Minas	MG	Votorantim
52	Tupi	Carandaí	MG	Tupi
53	Lafargeholcim	Barroso	MG	Lafargeholcim
54	Intercement	Ijací	MG	Intercement
55	Cimento Nacional	Sete Lagoas	MG	Cimento Nacional

...

Tabela 6 – Continuação

N°	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
56	Carmocal	Pains	MG	Mineradora Carmocal
57	Lafargeholcim	Serra	ES	Lafargeholcim
58	Itabira	C. de Itapemirim	ES	João Santos
59	Mizu	Vitória	ES	Mizu
60	Rio negro	Cantagalo	RJ	Votorantim
61	Cimento Nacional	Cantagalo	RJ	Cimento Nacional
62	Lafargeholcim	Cantagalo	RJ	Lafargeholcim
63	Tupi	Volta Redonda	RJ	Tupi
64	CSN	Volta Redonda	RJ	CSN
65	Mizu	Rio de Janeiro	RJ	Mizu
66	Santa Cruz	Itaguaí	RJ	Votorantim
67	Lafargeholcim	Rio de Janeiro	RJ	Lafargeholcim
68	Lafargeholcim	Sorocaba	SP	Lafargeholcim
69	Santa Helena	Votorantim	SP	Votorantim
70	Salto	Salto de Pirapora	SP	Votorantim
71	Cubatão	Cubatão	SP	Votorantim
72	Lafargeholcim	Itapeva	SP	Lafargeholcim
73	Ribeirão Grande	Ribeirão Grande	SP	Votorantim
74	Tupi	Mogi das Cruzes	SP	Tupi
75	Intercement	Apiaí	SP	Intercement
76	Intercement	Cajati	SP	Intercement
77	Intercement	Jacareí	SP	Intercement
78	Mizu	Mogi das Cruzes	SP	Mizu
79	SP Cim	Suzano	SP	SP Cim
80	Rio Branco	Rio Branco do Sul	PR	Votorantim
81	Itambé	Balsa Nova	PR	Itambé
82	Supremo	Adrianópolis	PR	Secil
83	Itajaí	Itajaí	SC	Votorantim

...

Tabela 6 – Continuação

N°	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
84	Vidal Ramos	Vidal Ramos	SC	Votorantim
85	Imbituba	Imbituba	SC	Votorantim
86	Supremo	Pomerode	SC	Secil
87	Pozosul	Capivari de Baixo	SC	Pozosul
88	Intercement	Nova Santa Rita	RS	Intercement
89	Esteio	Esteio	RS	Votorantim
90	Intercement	Candiota	RS	Intercement
91	Pinheiro Machado	Pinheiro Machado	RS	Votorantim

Fonte: SNIC (2020)