

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**COMPREENDENDO A INFLUÊNCIA DA TITÂNIA NO PROCESSAMENTO
DA ALUMINA ELETROFUNDIDA MARROM E SUA CARACTERIZAÇÃO
PARA APLICAÇÕES ABRASIVAS.**

Edmilson Ricelli dos Passos

São Carlos
2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**COMPREENDENDO A INFLUÊNCIA DA TITÂNIA NO PROCESSAMENTO
DA ALUMINA ELETROFUNDIDA MARROM E SUA CARACTERIZAÇÃO
PARA APLICAÇÕES ABRASIVAS.**

Edmilson Ricelli dos Passos

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais como requisito parcial à
obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Professor Dr. José de Anchieta Rodrigues

São Carlos

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

P289ci

Passos, Edmilson Ricelli dos.

Compreendendo a influência da titânia no processamento da alumina eletrofundida marrom e sua caracterização para aplicações abrasivas / Edmilson Ricelli dos Passos. -- São Carlos : UFSCar, 2014.

138 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Materiais. 2. Óxido de alumínio. 3. Titanato de alumínio. 4. Friabilidade. 5. Teoria do orbital molecular. I. Título.

CDD: 620.11 (20ª)

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar agradeço a Deus e dedico esse trabalho aos meus pais, Ernani Ribeiro dos Passos e Rosseline Maria Marotti dos Passos, pelo apoio e incentivo durante toda a minha vida;

À minha esposa, Aline Ferreira da Silva, pela paciência, amor e incentivo. E pelo meu filho João Pedro da Silva Passos, a quem dedico a minha vida e amor.

VITAE DO CANDIDATO

Coordenador de Engenharia de Processo e Desenvolvimento da empresa Elfusa Geral de Eletrofusão LTDA. (2009 -)

Engenheiro de Materiais pela Universidade de São Paulo – EEL/USP (2009).


i

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE
EDMILSON RICELLI DOS PASSOS
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, EM 28 DE JANEIRO DE 2014.


BANCA EXAMINADORA:



Dr. José de Anchieta Rodrigues
Orientador
PPG-CEM/UFSCar



Dr. Jorge Borges Gallo
Alcoa Alumínio S. A.



Dr. Márcio Raymundo Morelli
PPG-CEM/UFSCar

AGRADECIMENTO

Ofereço a minha gratidão às pessoas, empresas e instituições, abaixo listadas, que prestaram apoio na realização deste trabalho:

Ao professor e orientador Dr. José de Anchieta Rodrigues pelo auxílio durante toda a pós-graduação e por todo apoio técnico-científico;

À Companhia ELFUSA GERAL DE ELETROFUSÃO LTDA, uma empresa do GRUPO CURIMBABA, em especial ao empresário Sebastião Curimbaba, ao consultor técnico Dr. Gabriel Warwick Kerr de Paiva Cortes, ao Superintendente Mário Teixeira Franco, ao ex-Diretor Técnico Carlos Gabriel Caruy, ao Diretor Técnico Jaime Splettstoser, ao Diretor Industrial Marcel Cavalcante, ao Conselheiro Dr. Leonardo Curimbaba, ao Coordenador de Laboratório Sérgio Luiz Damalio e sua equipe que ajudaram nas caracterizações físico-químicas. Em especial deixo os meus agradecimentos ao técnico de pesquisa e desenvolvimento Fábio Eduardo Hernandez pelo apoio e suporte no preparo das amostras e ao analista de processo Leandro César Ribeiro pelas discussões e análises técnicas.

À Escola de Engenharia de Lorena EEL/USP, em especial ao Prof. Dr. Carlos Angelo Nunes e ao técnico Geraldo do Prado (*in memoriam*) pelo trabalho de encapsulamento das amostras tratadas ao argônio.

RESUMO:

Motivado pelo aumento do consumo de grãos abrasivos e pela necessidade do mercado abrasivo em desenvolver ferramentas de desbaste, polimento e corte cada vez mais eficientes, este trabalho teve como objetivo entender a influência da titânia na obtenção do óxido de alumínio eletrofundido "*blue fired*". Este é um material obtido a partir do óxido de alumínio eletrofundido marrom, o qual é submetido a um tratamento térmico e por consequência adquire propriedades físicas superiores ao do óxido de alumínio marrom convencional comercializado. Para garantir que o óxido de alumínio "*blue fired*" adquira as características físico-químicas exigidas pelo mercado, o mesmo deve apresentar uma coloração azul e uma friabilidade inferior ao do óxido de alumínio eletrofundido marrom. Dada a forte procura do mercado por este tipo de produto, a Elfusa Geral de Eletrofusão LTDA vem desde 2009 trabalhando no aprimoramento da tecnologia para a obtenção em escala industrial do óxido de alumínio "*blue fired*". Nesse contexto a Elfusa propôs ao Coordenador de Engenharia de Processo e Desenvolvimento, Edmilson Ricelli dos Passos, um estudo tecnológico e sistemático sobre a produção de óxido de alumínio "*blue fired*". Desta forma, este trabalho aborda o processo de eletrofusão da bauxita até a obtenção do óxido de alumínio "*blue fired*", assim como uma comparação das propriedades mecânicas deste material com os óxidos de alumínio eletrofundidos marrom convencionais. Tanto as variáveis de processo quanto a influência da composição química foram analisadas durante o trabalho, utilizando técnicas de caracterização físicas e químicas. Ficou provado nesse trabalho que o controle das variáveis tempo, temperatura e atmosfera são essenciais para a produção do óxido de alumínio "*blue fired*". A coloração azul do óxido de alumínio é justificada por fenômenos óticos de transição eletrônica e não pela formação da fase titanato de alumínio, como algumas explicações encontradas na literatura técnica afirmam.

UNDERSTANDING THE INFLUENCE OF TITANIA IN BROWN ELECTROFUSED ALUMINA PROCESSING AND ITS CHARACTERISTICS FOR ABRASIVE APPLICATIONS.

ABSTRACT

Motivated by increased consumption of abrasive grains and the need of the abrasive market to develop roughing, polishing and increasiling efficient cutting tools, this work aimed to understand the influence of titania in obtaining "blue fired" fused aluminum oxide. This is a material obtained from the brown fused aluminum oxide, which is subjected to a heat treatment and consequently gets higher physical properties than the conventional brown aluminum oxide sold. To ensure that the "*blue fired*" aluminum oxide acquires the physicochemical characteristics required by the market, it should have a blue color and a friability inferior than brown fused aluminum oxide. Given the strong market demand for this type of product, Elfusa Geral de Eletrofusão LTDA has been working on improving the technology for obtaining industrial scale "*blue fired*" aluminum oxide since 2009. In this context Elfusa proposed the Coordinator of Process Engineering and Development, Edmilson Ricelli dos Passos, a technological and systematic study on the production of "*blue fired*" aluminum oxide. Thus, this work discusses the process of electrofusion of bauxite to obtain the "*blue fired*" aluminum oxide, as well as a comparison of the mechanical properties of this material with conventional brown fused aluminum oxides. Both process variables as the influence of the chemical composition were analyzed during the study, using physical and chemical characterization techniques. It has been proved in this work that controlling for time, temperature and atmosphere variables is essential for the production of "blue fired" aluminum oxide. The blue coloration of the aluminum oxide is explained by electronic transition optical phenomena is the formation of aluminum titanate phase, as some explanations found in the technical literature state.

PUBLICAÇÕES

PASSOS, R. E.; RODRIGUES, A. J. Compreendendo a influência da titânia no processamento da alumina eletrofundida marrom e sua caracterização para aplicações abrasivas. In: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DE 18 A 21 DE MAIO DE 2014 (trabalho submetido). Bento Gonçalves-RS. Maio, 2014.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	iii
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	viii
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS:	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS:	xix
1 INTRODUÇÃO:	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 A Indústria de Abrasivos:	3
2.2 Sistema de produção de grãos abrasivos eletrofundidos:	4
2.3 Abrasivos provenientes de Bauxita	9
2.4 Tipos de grãos abrasivos:	17
2.5 Tipos de grãos abrasivos a base de alumina:	17
2.5.1 Óxido de alumínio eletrofundido marrom com alta titânia ou óxido de alumínio regular:	20
2.5.2 Óxido de alumínio eletrofundido marrom com baixa titânia ou óxido de alumínio semi friável:	20
2.5.3 Óxidos de alumínio “ <i>blue fired</i> ”:	21
2.5.4 Óxido de alumínio eletrofundido branco:	22
2.5.5 Óxido de alumínio eletrofundido rosa (baixa cromia):	22
2.5.6 Óxido de alumínio eletrofundido rosa (alta cromia):	23
2.5.7 Zircônia-Alumina:	23
2.5.8 Carbetos de Silício - SiC:	24
2.5.9 Superabrasivos:	24
2.6 Teoria da coloração em minerais.	25
2.7 Métodos de caracterização de grãos abrasivos:	29
2.8 Aplicações dos óxidos de alumínio em abrasivos:	29
2.8.1 Rebolos e Lixas:	30
2.9 Mercado de Abrasivos:	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS:	32

3.1 Materiais analisados.	32
3.1.1 Preparação dos Materiais.	33
3.2 Metodologia empregada:	35
3.2.1 Caracterização granulométrica:	35
3.2.2 Densidade Real (D_r) e Densidade bulk (D_b)::	38
3.2.4 Ensaio de Friabilidade:	41
3.2.5 Análise química	43
3.2.6 MEV e EDS:	44
3.2.7 Microscopia óptica estereoscópica:	45
3.2.8 Difração de raios X:	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Óxido de Alumínio Marrom Semi Friável Especial, ASFE:	47
4.2 Óxido de Alumínio Marrom Semi Friável, ASF:	57
4.3 Óxido de Alumínio Marrom Regular, AR:	65
4.4. Comparação entre os resultados parciais dos óxidos de alumínio marrom semi friáveis (ASF e ASFE) e o óxido de alumínio marrom regular (AR).	77
4.5 Influências do tempo de tratamento térmico na produção dos óxidos de alumínio marrons “ <i>blue fired</i> ”.	78
4.6 Influência da atmosfera de tratamento térmico durante a produção dos óxidos de alumínio marrom “ <i>blue fired</i> ”.	88
4.7 Influência das matérias-primas na produção do óxido de alumínio “ <i>blue fired</i> ”.	103
4.8 Reprodutibilidade dos resultados:	112
5 CONCLUSÕES:	116
6 TRABALHOS FUTUROS:	118
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA:	120
APÊNDICE A	123

ÍNDICE DE TABELAS:

Tabela 1- Efeito da titânia da dureza da alumina eletrofundida [10].	19
Tabela 2 - Ordem de friabilidade dos óxidos de alumínio sendo 1 o óxido mais friável e o 7 o menos friável [13].	23
Tabela 3 - Diferentes causas para a coloração em minerais [17].	28
Tabela 4-Análise química típica do óxido de alumínio semi friável especial-ASF, em %-p.	32
Tabela 5-Análise química típica do óxido de alumínio semi friável-ASF, em %-p.	32
Tabela 6-Análise química típica do óxido de alumínio regular-AR, em %-p.....	32
Tabela 7- Especificação granulométrica do grão P24 (ANSI).....	33
Tabela 8- Especificação granulométrica do grão P60 (ANSI).....	33
Tabela 9- Especificação granulométrica do grão P220 (ANSI).....	33
Tabela 10 - Lista dos tratamentos térmicos realizados com os abrasivos deste trabalho.	34
Tabela 11- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P24. .	48
Tabela 12 - Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P60. .	49
Tabela 13 - Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P220.	50
Tabela 14- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra do ASF do grão P60, correspondente a Figura 25.	55
Tabela 15- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra do ASF do grão P60 após tratamento térmico à 1250°C, correspondente a Figura 26.	55
Tabela 16- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra do ASF do grão P60 após o tratamento térmico a 1400°C, correspondente a Figura 27.	56
Tabela 17- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P24. ...	57
Tabela 18- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P60. ...	58
Tabela 19- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P220.	59
Tabela 20- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de ASF do grão P60, correspondente a Figura 30.....	64
Tabela 21- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de ASF do grão P60 após tratamento térmico à 1250°C, correspondente a Figura 31.	64
Tabela 22- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de ASF do grão P60 após tratamento térmico à 1400°C, correspondente a Figura 32.	65
Tabela 23- Resultados dos tratamentos térmicos do AR para o grão P24.	66

Tabela 24- Resultados dos tratamentos térmicos do AR para o grão P60.....	67
Tabela 25- Resultados dos tratamentos térmicos do AR para o grão P220.....	68
Tabela 26- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de AR do grão P60 sem tratamento térmico, correspondente a Figura 35.	75
Tabela 27- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de AR do grão P60 após tratamento térmico à 1250°C, correspondente a Figura 36.	75
Tabela 28- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de AR do grão P60 após tratamento térmico à 1400°C, correspondente a Figura 37.	76
Tabela 29- Análise físico-química do ASFE grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	79
Tabela 30- Análise físico-química do ASFE grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	80
Tabela 31- Análise físico-química do ASFE grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	81
Tabela 32- Análise físico-química do ASF grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	82
Tabela 33- Análise físico-química do ASF grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	83
Tabela 34- Análise físico-química do ASF grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	84
Tabela 35- Análise físico-química do AR grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1300°C.....	85
Tabela 36- Análise físico-química do AR grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	86
Tabela 37- Análise físico-química do AR grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.....	87
Tabela 38- Análise físico-química das amostras de ASFE sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.....	89
Tabela 39- Análise físico-química das amostras de ASFE sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.....	90
Tabela 40- Análise físico-química das amostras de ASFE sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.....	91
Tabela 41- Análise físico-química das amostras de ASF sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.....	92

Tabela 42- Análise físico-química das amostras de ASF sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	93
Tabela 43- Análise físico-química das amostras de ASF sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	94
Tabela 44- Análise físico-química das amostras de AR sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1300°C durante 14 horas.	95
Tabela 45- Análise físico-química das amostras de AR sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	96
Tabela 46- Análise físico-química das amostras de AR sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	97
Tabela 47- Análise química das matérias-primas utilizadas para a eletrofusão da carga de alumina calcinada e dióxido de titânio (rutilo).....	104
Tabela 48 - Análise química das matérias-primas utilizadas para a eletrofusão da carga de alumina calcinada, titânia e hematita.	104
Tabela 49- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P24 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14horas, ao ar.	105
Tabela 50- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P60 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14horas, ao ar.	106
Tabela 51- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P220 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14horas, ao ar.	107
Tabela 52- Avaliação estatística dos resultados para os grãos P24, P60 e P220 para os óxidos de alumínio ASFE, ASF e AR fundidos com bauxita.	113
Tabela 53 - Resultados das caracterizações do ASFE com os tratamentos térmicos para o grão P24.....	123
Tabela 54 - Resultados das caracterizações do ASFE com os tratamentos térmicos para o grão P60.....	123
Tabela 55 - Resultados das caracterizações do ASFE com os tratamentos térmicos para o grão P220.....	124
Tabela 56 - Resultados das caracterizações do ASF com os tratamentos térmicos para o grão P24.....	124
Tabela 57- Resultados das caracterizações do ASF com os tratamentos térmicos para o grão P60.....	125
Tabela 58 - Resultados das caracterizações do ASF com os tratamentos térmicos para o grão P220.....	125

Tabela 59 - Resultados das caracterizações do AR com os tratamentos térmicos para o grão P24.	126
Tabela 60 - Resultados das caracterizações do AR com os tratamentos térmicos para o grão P60.	126
Tabela 61 - Resultados das caracterizações do AR com os tratamentos térmicos para o grão P220.	127
Tabela 62 - Análise físico-química do ASFE grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	127
Tabela 63 - Análise físico-química do ASFE grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	128
Tabela 64 - Análise físico-química do ASFE grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	128
Tabela 65 - Análise físico-química do ASF grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	129
Tabela 66 - Análise físico-química do ASF grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	129
Tabela 67 - Análise físico-química do ASF grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	130
Tabela 68 - Análise físico-química do AR grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1300°C.....	130
Tabela 69 - Análise físico-química do AR grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	131
Tabela 70 - Análise físico-química do AR grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.....	131
Tabela 71 - Análise físico-química do ASFE sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	132
Tabela 72 - Análise físico-química do ASFE sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	132
Tabela 73 - Análise físico-química do ASFE sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	133
Tabela 74 - Análise físico-química do ASF sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	133
Tabela 75 - Análise físico-química do ASF sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1300°C durante 14 horas.	134
Tabela 76 - Análise físico-química do ASF sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	134

Tabela 77 - Análise físico-química do AR sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	135
Tabela 78 - Análise físico-química do AR sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	135
Tabela 79 - Análise físico-química do AR sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.	136
Tabela 80 - Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P24 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.	136
Tabela 81- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P60 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.	137
Tabela 82- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P220 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.	138

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1- Imagem ilustrativa do minério de bauxita. Cortesia da Elfusa.	4
Figura 2 - Relações energia livre de Gibbs-temperatura para algumas reações que podem ocorrer na produção da alumina eletrofundida [7].	6
Figura 3 – (a) Fluxo de produção do óxido de alumínio marrom eletrofundido. (b) Fluxo de produção do óxido de alumínio branco eletrofundido.	8
Figura 4 - a) Imagem ilustrativa de um forno Higgins em operação. b) Bloco de óxido de alumínio eletrofundido marrom após a fusão. Cortesia da Elfusa.	10
Figura 5 – Perfil esquemático de um forno Higgins utilizado no sistema de eletrofusão.	11
Figura 6 - Processo de retirada de amostra. Cortesia da Elfusa.	12
Figura 7 - Amostra retirada do forno de eletrofusão, que são enviadas para o laboratório de análise química. Cortesia da Elfusa.	12
Figura 8 - Separador Magnético utilizado na separação do Fe-Si do óxido de alumínio. Cortesia da Elfusa.	13
Figura 9 - Bloco de óxido de alumínio eletrofundido branco em processo de resfriamento. Cortesia da Elfusa.	14
Figura 10 - Imagem ilustrativa de um forno basculante para a produção de óxido de alumínio eletrofundido.	15
Figura 11 - Relação Altura/Diâmetro igual á 1. A alumina- β fica concentrada no centro do bloco [13].	16
Figura 12 - Capa com relação altura/diâmetro<1. A alumina- β é dispersa ao longo do bloco [13].	16
Figura 13 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $TiO_2-Al_2O_3$ [15].	22
Figura 14- Espectro de absorção óptica da safira, gema azul do córindon. [17]27	
Figura 15 – Dois exemplos de sistema de peneiramento para classificação de partículas [22].	36
Figura 16 - Equipamento utilizado para a análise granulométrica de macro partículas-Rotap RX-29. Cortesia da Elfusa.	38
Figura 17- Aparato utilizado para realizar a densidade bulk solta em macrogrão [28].	40
Figura 18 - Equipamento utilizado para analisar a friabilidade. Cortesia da Elfusa.	41
Figura 19- Equipamento de FRX. Cortesia da Elfusa.	44
Figura 20 - IRFN para o ASFE P24 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.	48
Figura 21- IRFN para o ASFE P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.	49

Figura 22 - IRFN para o ASFE P220 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	50
Figura 23- Imagens ópticas dos grãos ASFE, P60: S/T- sem tratamento térmico, tratado á 1250°C e tratado à 1400°C.....	51
Figura 24 - Difratoograma de raios X das amostras dos grãos de ASFE-P60, sem tratamento térmico, tratada à 1250°C e tratada à 1400°C.....	52
Figura 25- Microscopia eletrônica de varredura do ASFE, grão P60 e sem tratamento térmico.....	53
Figura 26- Microscopia eletrônica de varredura do ASFE, grão P60 e após o tratamento térmico a 1250°C.....	54
Figura 27- Microscopia eletrônica de varredura do ASFE, grão P60 e após o tratamento térmico a 1400°C.....	54
Figura 28 - IRFN para o ASF P24 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	57
Figura 29 - IRFN para o ASF P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	58
Figura 30 - IRFN para o ASF P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	59
Figura 31- Imagens ópticas dos grãos de ASF, grão P60: S/T-sem tratamento térmico, tratado á 1250°C e tratado à 1400°C.....	60
Figura 32- Difratoograma de raios X das amostras de ASF, sem tratamento térmico, tratada à 1250°C e tratada à 1400°C.....	61
Figura 33- Microscopia eletrônica de varredura do ASF, grão P60 e sem tratamento térmico.....	62
Figura 34- Microscopia eletrônica de varredura do ASF, grão P60 e após o tratamento térmico a 1250°C.....	63
Figura 35- Microscopia eletrônica de varredura do ASF, grão P60 e após o tratamento térmico a 1400°C.....	63
Figura 36 - IRFN para o AR P24 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	66
Figura 37 - IRFN para o AR P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	67
Figura 38 - IRFN para o AR P220 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.....	68
Figura 39 - Comparação do IRFN dos óxidos de alumínio marrons ASFE, ASF e AR para o grão P24.....	69
Figura 40-Comparação do IRFN dos óxidos de alumínio marrons ASFE, ASF e AR para o grão P60.....	69
Figura 41-Comparação do IRFN dos óxidos de alumínio marrons ASFE, ASF e AR para o grão P220.....	70
Figura 42- Imagens ópticas do AR, grão P60: S/T-sem tratamento térmico, tratado á 1250°C e tratado à 1400°C.	71

Figura 43- Difratoograma de raios X das amostras de AR, sem tratamento térmico, tratada à 1250°C e tratada à 1400°C.	72
Figura 44- Microscopia eletrônica de varredura do AR, grão P60 e sem tratamento térmico.	73
Figura 45- Microscopia eletrônica de varredura do AR, grão P60 e após o tratamento térmico a 1250°C.	74
Figura 46- Microscopias eletrônica de varredura do AR, grão P220 e após o tratamento térmico a 1250°C. Regiões distintas do mesmo grão.	74
Figura 47-IRFN para o ASFE grão P24 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	79
Figura 48 - IRFN para o ASFE grão P60 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	80
Figura 49 - IRFN para o ASFE grão P220 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	81
Figura 50 - IRFN para o ASF grão P24 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	82
Figura 51 - IRFN para o ASF grão P60 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	83
Figura 52 - IRFN para o ASF grão P220 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	84
Figura 53 - IRFN para o AR grão P24 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	85
Figura 54-IRFN para o AR grão P60 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	86
Figura 55 - IRFN para o AR grão P220 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.	87
Figura 56- Imagem ilustrativa das amostras encapsuladas em tubos de quartzo com argônio para a realização do tratamento térmico, evitando-se a presença de oxigênio.....	88
Figura 57 - IRFN para o ASFE em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P24.....	89
Figura 58-IRFN para o ASFE em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.....	90
Figura 59 - IRFN para o ASFE em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P220.....	91
Figura 60 - IRFN para o ASF em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P24.....	92
Figura 61 - IRFN para o ASF em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.....	93
Figura 62 - IRFN para o ASF em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P220.....	94

Figura 63 - IRFN para o AR em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.....	95
Figura 64 - IRFN para o AR em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.....	96
Figura 65 - IRFN para o AR em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P220.....	97
Figura 66- Imagens comparativas dos grãos de ASFE: S/T, tratados á 1250°C sem encapsulamento, tratados a em atmosfera inerte (1250°C-E) e tratado a 1400°C sem encapsulamento.....	98
Figura 67- Imagens comparativas dos grãos de ASF: S/T, tratados á 1250°C sem encapsulamento, tratados a em atmosfera inerte (1250°C-E) e tratado a 1400°C sem encapsulamento.....	99
Figura 68- Imagens comparativas dos grãos de AR: S/T, tratados á 1250°C sem encapsulamento, tratados a em atmosfera inerte (1250°C-E) e tratado à 1400°C sem encapsulamento.....	99
Figura 69- Difratoograma de raios X do ASFE tratado a 1250°C sem encapsulamento e 1250°C-E (encapsulado).	100
Figura 70- Difratoograma de raios X do ASF tratado a 1250°C sem encapsulamento e 1250°C-E (encapsulado).	101
Figura 71- Difratoograma de raios X do AR a 1250°C sem encapsulamento e 1250°C-E (encapsulado).	102
Figura 72 - IRFN para os óxidos de alumínio sem tratamento térmico e tratados a 1250°C por 14 horas ao ar, fundido com bauxita, fundido com alumina e rutilo e fundido com alumina, hematita e rutilo, para o grão P24.	105
Figura 73 - IRFN para os óxidos de alumínio sem tratamento térmico e tratados a 1250°C por 14 horas ao ar, fundido com bauxita, fundido com alumina e rutilo e fundido com alumina, hematita e rutilo, para o grão P60	106
Figura 74 - IRFN para os óxidos de alumínio sem tratamento térmico e tratados a 1250°C por 14 horas ao ar, fundido com bauxita, fundido com alumina e rutilo e fundido com alumina, hematita e rutilo, para o grão P220.....	107
Figura 75- Imagens comparativas dos grãos P60 de alumina eletrofundida marrom semi friável especial: S/T-material fundido com bauxita e sem tratamento térmico, 1250°C-material fundido com bauxita e tratado á 1250°C; $Al_2O_3+TiO_2$ -ST-material fundido com alumina calcinada e rutilo sem tratamento térmico; e $Al_2O_3+TiO_2$ -1250°C- material fundido com alumina calcinada e rutilo tratado a 1250°C, por 14 horas, ao ar.	108
Figura 76- Imagens comparativas dos grãos P60 de alumina eletrofundida marrom semi friável especial: S/T-material fundido com bauxita e sem tratamento térmico; 1250°C-material fundido com bauxita e tratado á 1250°C; $Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2$ -S/T-material fundido com alumina calcinada, rutilo e hematita sem tratamento térmico; e $Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2$ -1250°C-material fundido	

com alumina calcinada, rutilo e hematita e tratado a 1250°C, por 14 horas, ao ar.....	109
Figura 77- Difratoograma de raios X comparativos das amostras de óxido de alumínio semi friável especial utilizando somente alumina e rutilo sem tratamento térmico-S/T e tratada a 1250°C, por 14 horas, ao ar.	110
Figura 78- Difratoograma de raios X comparativos das amostras de óxido de alumínio semi friável especial utilizando alumina, rutilo e hematita na sem tratamento-S/T e tratada a 1250°C, por 14 horas, ao ar.....	111

1 INTRODUÇÃO:

A indústria de lixas e rebolos depende fortemente da qualidade de suas matérias-primas, dentre elas os grãos abrasivos. Em função da necessidade do mercado em buscar grãos abrasivos de alto desempenho, a Elfusa Geral de Eletrofusão LTDA, como produtora de óxido de alumínio eletrofundido marrom, branco e especiais, vem investindo na melhoria contínua de seus produtos. A fim de atender um mercado cada vez mais exigente, a empresa entrou recentemente no mercado de óxido de alumínio *“blue fired”*.

O óxido de alumínio *“blue fired”* consiste no óxido de alumínio marrom tratado em altas temperaturas por um tempo determinado. O grão ao passar por esse tratamento tem suas propriedades abrasivas otimizadas e adquire uma coloração azul. Em função disso o material é conhecido no mercado como óxido de alumínio *“blue fired”*. A otimização do tratamento pode ser justificada comparando-se as propriedades físicas do grão de óxido de alumínio marrom convencional com o *“blue fired”*, cujo poder abrasivo e durabilidade são significativamente maiores.

O *“blue fired”* tem um excelente valor de venda devido à necessidade do mercado ser cada vez maior para este tipo de abrasivo. A demanda desse produto está em forte ascensão, pois além do aumento do consumo de abrasivos, o *“blue fired”* vem substituindo vários outros abrasivos em muitas aplicações.

Assim, essa dissertação teve como objetivo entender a técnica de produção do óxido de alumínio *“blue fired”*, utilizado em aplicações abrasivas, além de ter compreendido melhor as influências de variáveis de processo e de composição química do grão abrasivo.

Por fim, este trabalho se justifica no fato da Elfusa ter a intenção de aumentar sua participação no mercado de óxido de alumínio *“blue fired”* e ao mesmo tempo, otimizar a linha de produção desse tipo de produto. Além disso a Elfusa têm como compromisso com seus clientes o aprimoramento contínuo e a garantia de qualidade de seus produtos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A Indústria de Abrasivos:

Embora no Brasil os produtos abrasivos não sejam classificados como produtos estratégicos como nos países de primeiro mundo, tais como os EUA, Japão, Alemanha e Inglaterra, esse produto está intimamente ligado ao desenvolvimento do país, pois os abrasivos estão presentes nos diversos segmentos da cadeia produtiva como na construção civil, siderurgia, cerâmica e principalmente automobilístico. Com o fortalecimento da economia brasileira, fazendo com que o Brasil se enquadrasse como país emergente e a íntima ligação dos produtos abrasivos com as indústrias de bens duráveis, cresce cada vez mais o consumo de abrasivos no mercado interno [1].

Outro fato relevante no mundo são as leis ambientais que fizeram com que países europeus deixassem esse tipo de segmento para investir em países em desenvolvimento, onde as leis ambientais ainda continuam mais brandas. Outro ponto a favor do Brasil, trata-se da ampla oferta dos insumos utilizados na fabricação dos abrasivos eletrofundidos, o que constitui vantagem competitiva no mercado internacional. Contudo, ainda há o problema do suprimento sustentável de energia elétrica a custo baixo, pois a energia elétrica está entre os insumos mais caros de produção da indústria de eletrofusão no Brasil [2].

No mercado de óxido de alumínio "*blue fired*" a necessidade de fornecedores é cada vez mais evidente e as empresas consumidoras estão mais exigentes a cada dia. Para que o "*blue fired*" adquira a coloração e as propriedades mecânicas exigidas pelo mercado, um controle técnico tanto da composição química da matéria-prima quanto das condições do forno são necessários.

2.2 Sistema de produção de grãos abrasivos eletrofundidos:

Na produção de óxido de alumínio eletrofundido, a bauxita bruta é a matéria-prima para a produção de grãos abrasivos à base de alumina (Figura 1). A Bauxita é a matéria-prima básica composta de 70 à 85%-peso de alumina sob a forma dos minerais gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, boemita $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, e diásporo $\alpha\text{AlO}(\text{OH})$, juntamente com os óxidos de ferro goethita e hematita, o mineral de argila caulinita e traços menores de anatase e rutilo, TiO_2 [3].



Figura 1- Imagem ilustrativa do minério de bauxita. Cortesia da Elfusa.

A proporção dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha. Assim, a bauxita branca contém de 2 a 4%-p de óxido de ferro, ao passo que na bauxita vermelha essa proporção atinge 25%-p. A bauxita é a fonte natural do alumínio que é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. A bauxita é utilizada na fabricação de materiais abrasivos, refratários, cimentícios e para a produção do coríndon sintético. O

coríndon sintético destaca-se nos setores de refratários e cerâmicos, movimentando cerca de 500 milhões de dólares por ano no mundo [4].

A Austrália é a maior produtora bauxita, com quase um terço da produção mundial, seguida pela China, Brasil, Guiné, e Jamaica [5].

Para a produção do óxido de alumínio marrom eletrofundido inicia-se o processo com a homogeneização da bauxita, juntamente com coque e cavaco de ferro, a fim de se produzir óxido de alumínio marrom eletrofundido, gerando uma família de produtos abrasivos contendo quantidades controladas de até 4% de dióxido de titânio. O processo de transformação do mineral em seu produto final necessita de um controle químico do percentual de determinados óxidos, pois estes exercem influência direta nas propriedades físicas do material. Tal controle é determinado pela adição de agentes redutores durante a fusão, através da estequiometria pré-definida da carga a ser fundida. É de interesse aproveitar possíveis ligas metálicas geradas no processo. Dessa forma a adição de cavaco de ferro mencionado acima é necessário para o controle da liga. Mais detalhes sobre essas ligas serão apresentadas ao decorrer do trabalho. As reações que cercam esta correção são reações de redução (ganho de elétrons), que fazem com que o óxido presente seja reduzido a metal para uma posterior separação.

As reações de redução (Equações 1, 2 e 3) mais significativas durante a fusão da alumina eletrofundida marrom são [6]:



Podemos supor quais reações poderão ocorrer em determinadas condições de temperatura e pressão utilizando o diagrama de Ellingham (Figura 2) [7]. Neste diagrama também se verifica que se as condições de temperatura e pressão, entre outras variáveis, durante a fusão não forem apropriadamente controladas, a presença de reações redutoras indesejadas podem ocorrer, como a redução do Al_2O_3 a alumínio metálico, que ocorre entre

1950°C e 2100°C, ocasionando um aumento da concentração de Al^0 na liga de Fe-Si, e diminuição do rendimento do coríndon produzido conforme a reação apresentada na Equação 4 .

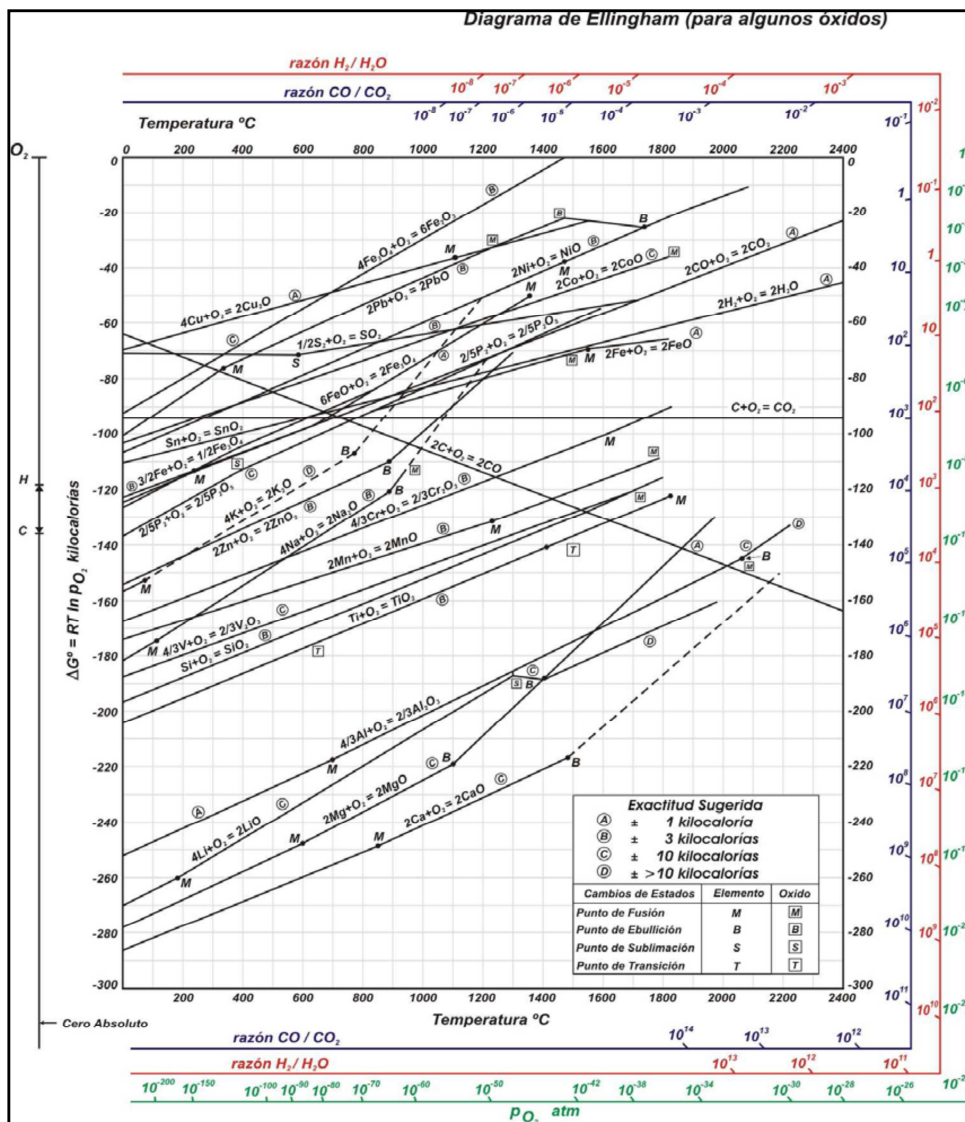
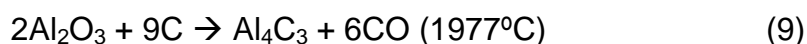
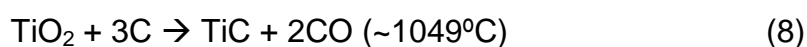
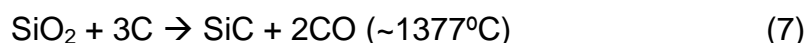


Figura 2 - Relações energia livre de Gibbs-temperatura para algumas reações que podem ocorrer na produção da alumina eletrofundida [7].

Pode-se constatar também a ocorrência da redução do teor de sílica não apenas pela geração de Si^0 , mas também pela formação de SiO gasoso conforme as Equações 5 e 6 [6,8]:



Outras reações como a formação de carbetos, a determinadas temperaturas, também podem ocorrer conforme as Equações 7, 8 e 9 [6]:



A probabilidade de formação de carbetos é pequena quando a concentração final de alumina no banho é menor do que 98%, uma vez que o carbono é preferencialmente consumido nas reações das Equações 1, 2 e 3. Entretanto, quando presente, o carbeto de alumínio é de difícil remoção, uma vez que a Equação 10 torna-se favorável apenas acima de 2127°C [8].



A presença de Al_4C_3 é altamente indesejável devido à sua elevada tendência de reação com o oxigênio e a sua hidrolização quando em contato com água ou resinas, causando assim a liberação do gás metano e podendo causar trincas nas ferramentas de corte ou desbaste, durante suas fabricações. Um fluxograma resumido da produção do óxido de alumínio eletrofundido marrom é apresentado na Figura 3a.

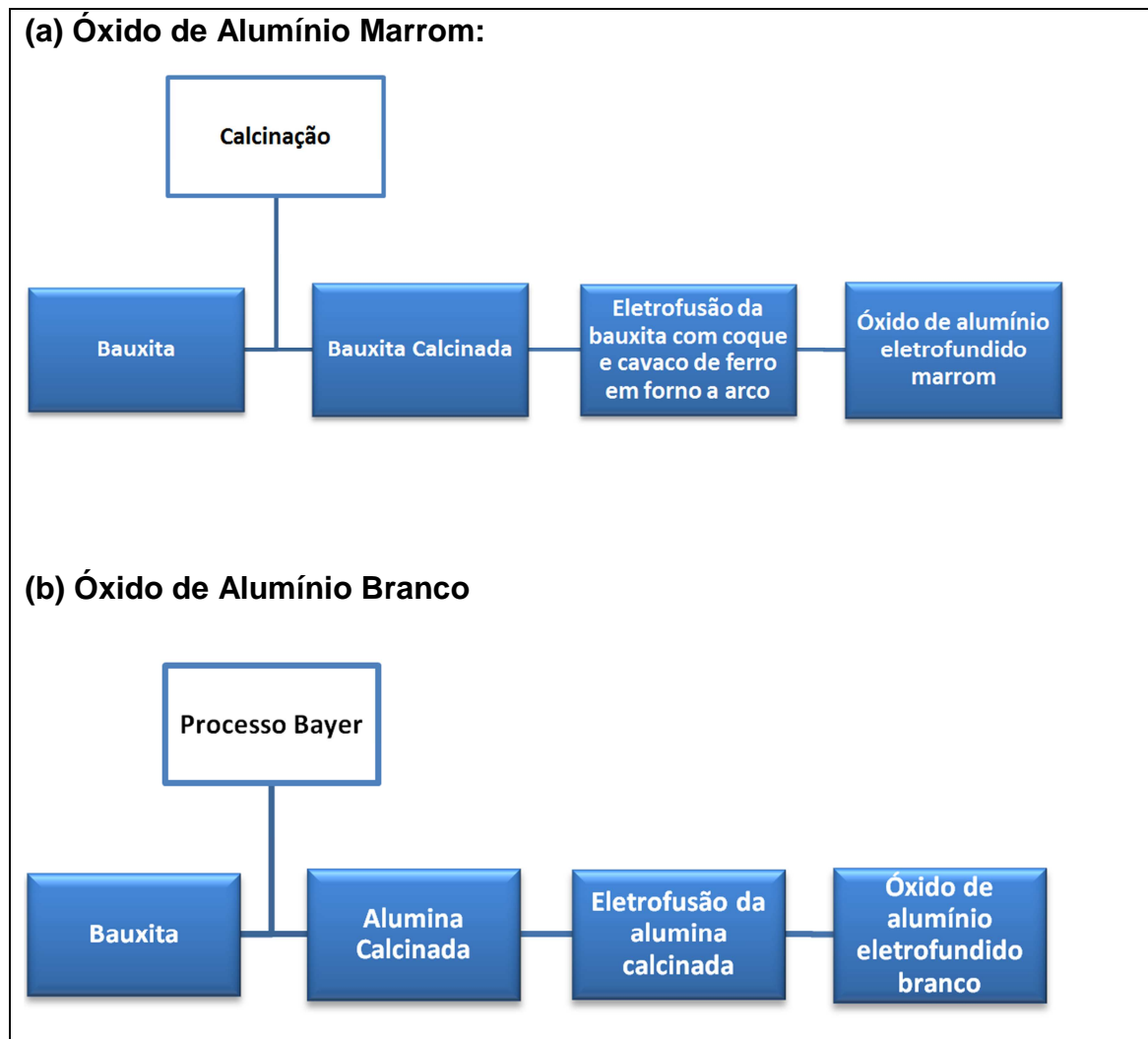


Figura 3 – (a) Fluxo de produção do óxido de alumínio marrom eletrofundido. (b) Fluxo de produção do óxido de alumínio branco eletrofundido.

Para o processo de eletrofusão do óxido de alumínio eletrofundido branco (Figura 3b) a bauxita também é a fonte de Al_2O_3 , porém o minério é refinado antes do processo de eletrofusão, pelo processo Bayer, inventado em 1887 por Karl Bayer na Rússia. Neste caso, a bauxita é aquecida em um vaso de pressão com solução de hidróxido de sódio a 150-200°C. Depois da separação do resíduo de ferro (lama vermelha) por filtração, gibbsita pura é precipitada pelo resfriamento do líquido, e sedimenta como hidróxido de alumínio fino [9]. Assim a gibbsita, é então, convertida em óxido de alumínio pelo processo de calcinação. O processo Bayer elimina quase todas as impurezas naturais presentes na bauxita *in natura*, mas deixa um resíduo de

soda de 0,1 a 0,4%-p Na_2O na alumina calcinada purificada [9]. Porém, esse processo de purificação ao qual a bauxita é submetida, aumenta o custo do óxido de alumínio eletrofundido branco em cerca de 5 vezes em relação ao óxido de alumínio eletrofundido marrom, que utiliza a bauxita calcinada.

O Grupo Curimbaba, do qual a Elfusa faz parte, não possui a planta de refino de bauxita pelo processo Bayer (toda alumina calcinada utilizada na eletrofusão do óxido de alumínio branco é adquirida de fornecedores externos).

2.3 Abrasivos provenientes de Bauxita

Como pode ser observado na Figura 3, o óxido de alumínio eletrofundido obtido a partir da Bauxita é produzido por 2 diferentes processos. A bauxita in natura ou calcinada pode ser eletrofundida em forno elétrico a arco ou ela pode ser submetida ao processo Bayer previamente para uma purificação química e depois submetida ao processo de eletrofusão. Outro processo de fabricação de abrasivos provenientes de bauxita, mas que não envolve a eletrofusão, é a sinterização. Nesse processo a bauxita é sinterizada em fornos rotativos e depois classificada em diferentes granulometrias.

O processo de eletrofusão, em forno elétrico a arco, da bauxita in natura, da bauxita calcinada ou da alumina calcinada é o processo mais antigo e foi desenvolvido por Charles B. Jacobs in 1900. O processo original para a eletrofusão utilizava-se de um forno revestido de grafite que o inviabilizava pelo custo de processo. Em 1904, A. C. Higgins desenvolveu um processo de eletrofusão em que o forno era composto basicamente de uma capa metálica refrigerada a água [10]. Este tipo de forno é utilizado até os dias atuais e é conhecido na indústria de eletrofusão como forno Higgins (Figura 4a) que é composto por uma carcaça de aço ou alumínio sobre um carro de metal (Figura 4b) protegido de grafite em sua base [11, 12].

Um fluxo de água contínuo no lado externo da capa (Figura 4a) juntamente com uma fina camada do óxido de alumínio já eletrofundido que se forma durante o processo, exerce o papel de resfriamento e isolamento da capa do forno, respectivamente, suficiente para manter a integridade da capa

metálica. Afinal, o ponto de fusão da alumina (2060°C) é muito superior ao do aço carbono (1538°C) [13] que compõe o material da capa.

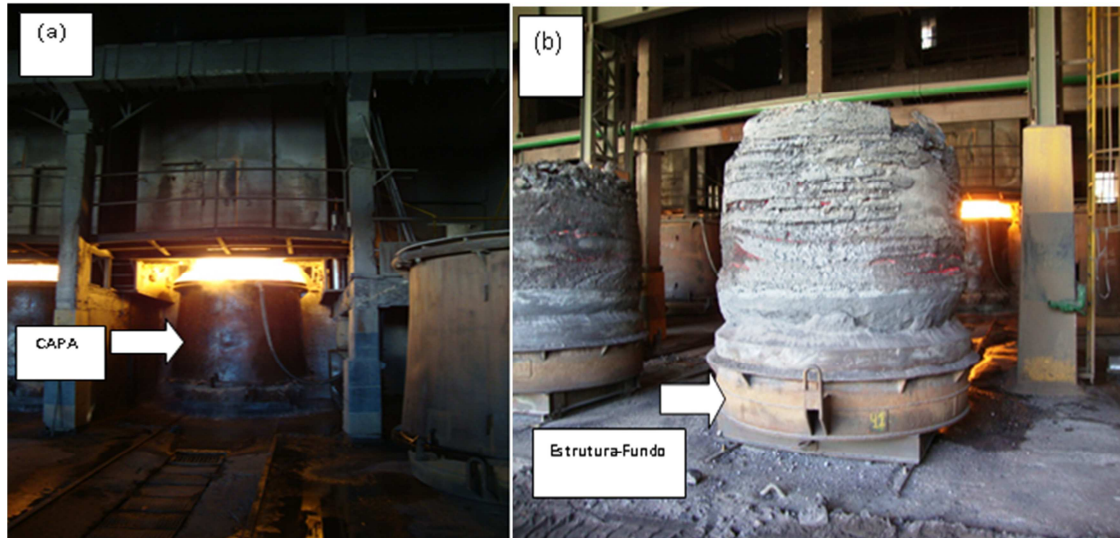


Figura 4 - a) Imagem ilustrativa de um forno Higgins em operação. b) Bloco de óxido de alumínio eletrofundido marrom após a fusão. Cortesia da Elfusa.

Antes de iniciar o processo de eletrofusão, é inserida na base do forno, acima da proteção de grafite, uma proteção de material à base de óxido de alumínio e um material condutor (Figura 5). Esse material condutor permite que os três eletrodos suspensos se conectem, formando um triângulo na parte inferior permitindo a passagem de corrente elétrica e iniciando o processo. O material condutor responsável pela partida é rapidamente consumido, porém o calor gerado durante a fusão é responsável em manter a fusão da bauxita, que então se torna um eletrólito líquido e mantém o forno ligado. O abastecimento do material é contínuo durante as horas seguintes até atingir a capacidade máxima do forno que varia com o tamanho da capa utilizada.

Conjunto Capa + Base
Unidade: mm

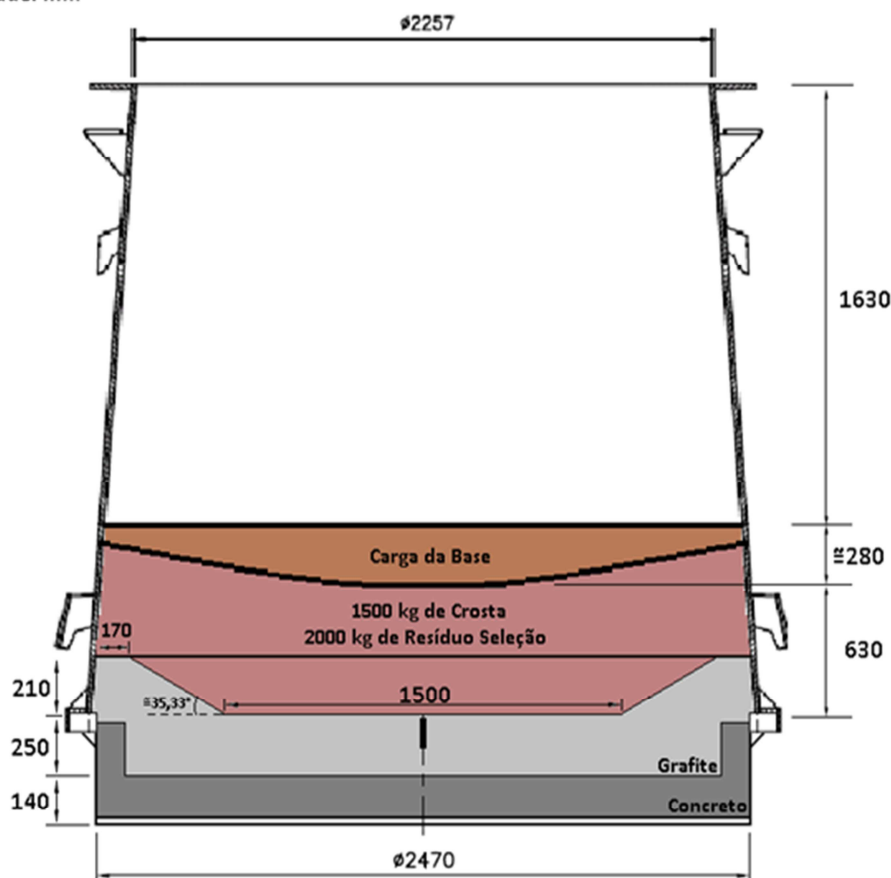


Figura 5 – Perfil esquemático de um forno Higgins utilizado no sistema de eletrofusão.

O fluxo de corrente é controlado ajustando-se a altura dos eletrodos que vão sendo consumidos no processo. A fim de se controlar a corrente, o forno apresenta um sistema eletro-mecânico em que a medida que a corrente decai, o eletrodo é afundado ao banho e a medida que a corrente se eleva o eletrodo é levantado, de forma a manter uma potência o mais constante possível dentro do forno.

Durante o processo de fusão, que dura aproximadamente 20 horas, 3 amostras são coletadas para a verificação química do banho. Uma primeira amostra é retirada no início do processo, a segunda amostra no meio do processo e a última amostra ao final do processo. Caso alguma divergência seja detectada, correções utilizando cavaco de ferro, ilmenita e/ou carvão vegetal podem ser feitas. O esquema de retirada de amostra é baseado em

uma barra de ferro que o forneiro insere rapidamente no banho já líquido (Figura 6). Em seguida essa amostra é retirada da barra (Figura 7), passa por um processo de moagem e em seguida é submetido a análise de fluorescência de raios X.



Figura 6 - Processo de retirada de amostra. Cortesia da Elfusa.



Figura 7 - Amostra retirada do forno de eletrofusão, que são enviadas para o laboratório de análise química. Cortesia da Elfusa.

Após a fusão, o bloco é transferido para a etapa de resfriamento, na qual o bloco irá sofrer um resfriamento até a temperatura ambiente. Uma grande quantidade de alumina cristalina crescerá em direção ao centro do bloco

eletrofundido. A capa tem um perfil elevado, com uma razão dimensional de aproximadamente 1:1. As impurezas do óxido de alumínio eletrofundido marrom vão se concentrar na fase líquida, no centro e na parte inferior do lingote formado. Após o resfriamento, o lingote é britado e classificado para remover a concentração primária de impurezas. Adicionalmente, ferro e ferro-silício, que são formados pelo processo de redução da bauxita, são posteriormente removidos com separadores magnéticos (Figura 8).



Figura 8 - Separador Magnético utilizado na separação do Fe-Si do óxido de alumínio. Cortesia da Elfusa.

Nesse aspecto, é importante que a liga formada tenha uma composição de aproximadamente 75%-p de Fe e 15%-p de Si para que apresente um caráter magnético.

Na eletrofusão do óxido de alumínio branco, as reações de redução das impurezas que acontecem no óxido de alumínio marrom não ocorrem, uma vez que a alumina calcinada, principal matéria-prima utilizada, apresenta uma pureza de 99,7%-p de Al_2O_3 . A maior preocupação é a conversão da soda residual da matéria prima proveniente do processo Bayer em sódio-alumina- β que cristaliza lentamente em placas hexagonais na alumina. Como a alumina- β possui um ponto de fusão mais baixo do que a alumina, a alumina- β será

novamente concentrada em algumas porções do lingote (Figura 9) que se solidificaram por último.



Figura 9 - Bloco de óxido de alumínio eletrofundido branco em processo de resfriamento. Cortesia da Elfusa.

Para a realização do processo de eletrofusão do óxido de alumínio marrom é necessário uma quantidade de energia de 2,2 MVA/h para produzir 1 tonelada de produto acabado, enquanto que para a eletrofusão do óxido de alumínio branco é necessário somente 1,5 MVA/h para produzir 1 tonelada [13].

Com o aumento da capacidade e eficiência das demandas, tem havido uma tendência dos produtores de óxido de alumínio eletrofundido em utilizar fornos basculantes (Figura 10) de até 6 m de diâmetro, que podem bascular o material fundido em painéis refrigerados com água permitindo assim uma produção praticamente contínua, pois o forno basculante trabalha de forma intermitente (exceto para manutenções) [13]. Hoje a empresa Elfusa não possui nenhum forno basculante.



Figura 10 - Imagem ilustrativa de um forno basculante para a produção de óxido de alumínio eletrofundido.

Estes fornos usam uma fonte de alimentação de até 10 MVA ou até maior e pode bascular até 24 toneladas a cada 4 horas, além disso, esse tipo de forno confere uma maior estabilidade na constância de qualidade do material [13]. O formato da capa em que o material é basculado para uso em fornos basculante pode ter um impacto importante sobre a estrutura do grão. Por exemplo, para uma fusão de óxido de alumínio branco no forno basculante, no qual o material é vertido em uma capa alta (Figura 11), o perfil do processo de resfriamento é semelhante a um forno Higgins, ou seja, os cristalitos de alumina com o crescimento dendrítico e uma pequena formação de alumina- β [13]. No entanto, vertendo em uma capa de perfil baixo (Figura 12) o resfriamento do material é muito mais rápido, formando cristalitos de alumina com estruturas e composições muito mais uniformes, mas com teor superior de alumina- β [13]. Apartir desta formação, grãos abrasivos tenderão a fraturar em fragmentos relativamente grandes ao longo de planos bem definidos, mas com grande capacidade de recuperação de arestas. Cristalização em vasos de perfil baixo revela estruturas com uma quantidade menor de crescimento direcional e que formam cristais mais finos, resultando em fragmentos menores durante a fratura dos grãos. O material também é cerca de 10% mais macio em relação a região de maior concentração de sódio, alumina- β [13]. Para fusões de óxido de alumínio marrom em fornos basculantes cerca de 25%-p a mais de alumina

é vertido a cada basculada, enquanto a maior parte do Fe-Si é acumulado no fundo ao longo de muitas basculadas até que seja basculado em um carrinho com uma cama de areia.

A qualidade e a consistência da basculada tende a ser melhor quanto maior for à quantidade basculada, uma vez que é menos dispendioso para monitorar o processo e permite realizar um melhor controle da redução do TiO_2 , SiO_2 e Fe_2O_3 presentes na bauxita. Os moldes basculantes tendem a ser de baixo perfil e os grãos resultantes apresentam uma mistura de células dendríticas com fina camada de alumina equiaxial, juntamente com algumas inclusões de ferro-silício.

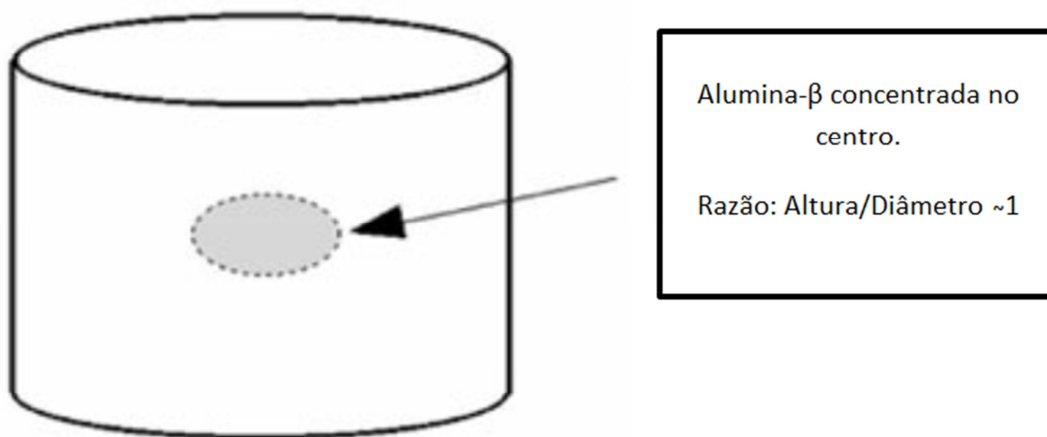


Figura 11 - Relação Altura/Diâmetro igual á 1. A alumina- β fica concentrada no centro do bloco [13].

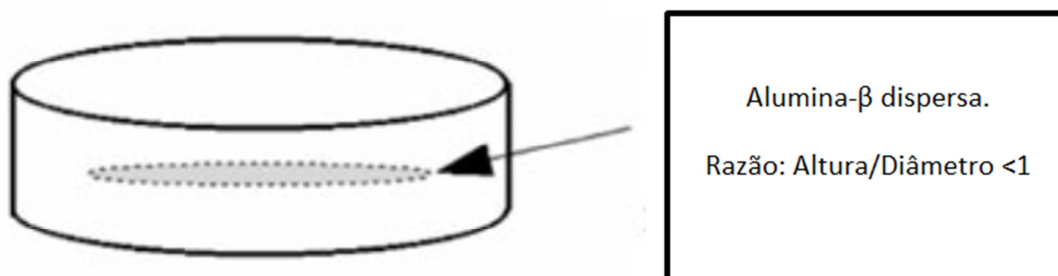


Figura 12 - Capa com relação altura/diâmetro < 1 . A alumina- β é dispersa ao longo do bloco [13].

2.4 Tipos de grãos abrasivos:

Os grãos abrasivos sintéticos apresentam duas grandes classificações, as quais podem ser divididas em químicas e físicas. A primeira trata da composição química do material. Alterando o teor de impureza e o tipo de material eletrofundido, as propriedades mecânicas dos abrasivos serão influenciadas. A outra classificação se refere à cominuição, que dependendo do processo em que o material é submetido ele terá suas propriedades abrasivas alteradas. Após a eletrofusão e o resfriamento, o lingote é inicialmente britado e segue para os moinhos de rolos. Em seguida, vai para as peneiras de classificação. Como esses processos são de alto impacto e o material é uma cerâmica eletrofundida, o processo de cominuição irá gerar grandes fraturas, resultando em partículas afiadas, imperfeitas e anisotrópicas. Caso um moinho de bolas ou moletadores sejam utilizados no sistema, as partículas tendem a apresentar suas arestas arredondadas. Com isso, é possível controlar a morfologia das partículas de tal forma que aquelas que se tornam facetadas sejam utilizadas no mercado de lixas e as partículas arredondadas sejam preferencialmente utilizadas para a fabricação de rebolos e discos de corte.

2.5 Tipos de grãos abrasivos a base de alumina:

A alumina eletrofundida é basicamente composta de 93 a 99%-p de alumina- α ou corindon e aproximadamente 1 a 7%-p de impurezas. A quantidade dessas impurezas irá determinar as características de aplicação dos diferentes tipos de óxidos de alumínio eletrofundidos. Basicamente, a principal influência dessas impurezas está relacionada com a friabilidade desses materiais, assunto esse que será abordado nos próximos itens desse trabalho. Além disso, as impurezas influenciam o comportamento do cristal de corindon, quanto ao seu tamanho e dureza intrínseca.

Basicamente, a classificação do óxido de alumínio marrom é feita pelo teor de titânia (TiO_2) que se divide em: baixa titânia ou alta pureza

(aproximadamente 1,5%-p de TiO_2) e alta titânia e baixa pureza (aproximadamente 2,5%-p de TiO_2). Uma razão técnica para essa distinção é que o material de maior pureza (baixo TiO_2) apresenta uma friabilidade inferior em relação ao óxido de alumínio branco e superior ao óxido de alumínio de alta titânia. Outra importante propriedade abrasiva do óxido de alumínio de baixo teor de TiO_2 é a sua grande capacidade de reposição de suas arestas, a medida que o grão é fraturado, fundamentais para os abrasivos. Por outro lado, o material com menor pureza (alto TiO_2) apresenta uma maior resistência mecânica.

O tamanho médio de cristal do óxido de alumínio eletrofundido é, aproximadamente, entre 400 a 1200 μm e esse parâmetro é influenciado principalmente pela velocidade de resfriamento e pelo tamanho do forno de eletrofusão. Na prática, fornos pequenos e resfriamento rápido produzem materiais com cristais menores. Assim, quando se tem cristais com os mesmos níveis de pureza, a friabilidade tende a ser maior para cristais maiores [10].

Adicionalmente, além da fase de corindon outras fases podem estar presentes nos blocos eletrofundidos tais como:

- a) Fase vítrea;
- b) Liga de ferro-silício que não apresentou boa decantação;
- c) Materiais cristalinos com outras composições;
- d) Inclusão de coque e matérias-primas não fundidas.

Mesmo as fases de corindon podem apresentar diferentes colorações tais como cinza, azul e marrom. A cor azul é ocasionada pela presença do TiO_2 em solução sólida, que pode apresentar diferentes tonalidades dependendo dos elementos de transição presentes [10]. O efeito do TiO_2 nos cristais de corindon ainda não é conhecido com precisão. Contudo sabe-se que há uma contribuição nas mudanças de propriedades mecânicas, pois o TiO_2 causa expansão na rede cristalina, um aumento no tamanho da célula unitária

e presumidamente uma redução na dureza. Na Tabela 1 pode-se observar a diferença na dureza Knoop para dois teores de TiO_2 [10].

Tabela 1- Efeito da titânia da dureza da alumina eletrofundida [10].

TiO₂ (%-p)	Parâmetro de rede da Célula (Å)	Dureza Knoop kgf/mm²
0,5	5,127	2100
2,0	5,130	1950

O teor de TiO_2 retido como solução sólida está relacionado com o teor de titânia utilizada durante a fusão e isso irá influenciar a friabilidade final do grão abrasivo.

No óxido de alumínio de alta titania, uma escória a base de titania se concentra nos contornos de grão, unindo os grãos e conferindo um certo grau de dureza ao agregado. Em grãos de baixa titania a escória apresenta um comportamento mais globular e aparece em forma isolada ao longo dos cristais dos agregados. Nesse caso, a presença da titânia não é tão efetiva e, conseqüentemente, não irá alterar as propriedades mecânicas do cristal de corindon, deixando assim o grão mais friável.

A escória consiste em um material que contém sílica como base e microcristalitos de impurezas. A escória a base de silício apresenta uma composição aproximada de uma mulita e é composta basicamente por alumina, sílica e titânia. Os cristais de mulita são algumas vezes detectáveis. Os microcristalitos encontrados na escória são formados por outras impurezas. Nos microcristalitos, o dititanato de alumínio e o óxido de magnésio já foram identificados. O Al_2O_3 pode estar presente não só como alumina- α , mas também como fase amorfa contida nos microcristalitos [10].

2.5.1 Óxido de alumínio eletrofundido marrom com alta titânia ou óxido de alumínio regular:

Trata-se de um óxido de alumínio que apresenta em sua composição de 2 a 3%-p de dióxido de titânio. É um material muito utilizado na fabricação de rebolos, que exigem uma alta resistência do grão abrasivo e também na fabricação de lixas para dar acabamento em peças com alto grau de rugosidade. É direcionado para corte de aços de baixa liga e materiais ferrosos [13]. Esse óxido de alumínio pode ser submetido a tratamento térmico em temperaturas que variam de 1000° a 1300°C com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, uma vez que impurezas orgânicas inerentes do processo de redução e microtrincas inseridas durante o processo de britagem e moagem são eliminados [10]. Dependendo do tempo, temperatura e atmosfera ao qual esse óxido é submetido, é possível produzir o óxido de alumínio regular “*blue fired*”.

No mercado de abrasivo, além do tratamento térmico, os óxidos podem ser submetidos a aplicação de produtos orgânicos e inorgânico na superfície do grão com objetivo de melhorar a ancoragem destes com a resina.

2.5.2 Óxido de alumínio eletrofundido marrom com baixa titânia ou óxido de alumínio semi friável:

Corresponde a um óxido de alumínio que apresenta em sua composição de 1 à 1,5%-p de TiO_2 e é muito utilizado no mercado de abrasivos por apresentar uma tenacidade um pouco superior em relação ao óxido de alumínio branco. Por conter baixa concentração de titânia, em sua composição esse material apresenta uma tenacidade inferior quando comparado ao óxido de alumínio marrom de alta titânia, porém uma friabilidade superior [13]. Os grãos semi friáveis são utilizados na fabricação de abrasivos destinados para o acabamento de peças e superfícies metálicas ou poliméricas. Assim essa classe de abrasivo necessita de uma certa tenacidade para suportar o esforço

mecânico ao qual o grão cerâmico é submetido e ao mesmo tempo não deve riscar ou gerar defeitos na peça submetida ao processo de usinagem ou polimento. Esse tipo de material é fornecido para fabricação de rebolos, discos de corte e para operações de corte de metais sensíveis ao calor. Assim como o óxido de alumínio marrom de alta titânia esse tipo de grão pode sofrer o tratamento térmico para a formação do óxido de alumínio “*blue fired*” semi friável, em que o objetivo do tratamento é o mesmo apresentado no item 2.5.1.

2.5.3 Óxidos de alumínio “*blue fired*”:

Tratam-se de óxidos de alumínio marrons com as mesmas proporções de Al_2O_3 que o óxido de alumínio marrom regular ou óxido de alumínio semi friável que após a moagem e classificação, são submetidos a um tratamento térmico a fim de se obter uma coloração azulada conhecida no mercado abrasivo como “*blue fired*”. Algumas teorias mostram que quando o coríndon é tratado a temperatura aproximada de 1280°C , durante 10 horas, a fase titanato de alumínio, Al_2TiO_5 (Figura 13) [14], surge conferindo ao material a cor azulada após a sua estabilização. Porém, na presente dissertação ficou comprovado que o Al_2TiO_5 não é a fase responsável pela coloração azul do óxido de alumínio “*blue fired*”. Ao submeter os óxidos de alumínio marrons a temperaturas superiores a 1350°C , os mesmos irão adquirir uma coloração branca. Por isso, é muito importante o controle da temperatura e do tempo, como também a atmosfera do forno que deve ser oxidante. O óxido de alumínio “*blue fired*” possui a função de aumentar a vida útil dos grãos eletrofundidos marrons (que não passaram pelo tratamento térmico). Na figura 13 o diagrama de fases $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ é apresentado. Nela observa-se que a formação da fase Al_2TiO_5 surge em temperaturas acima de 1180°C .

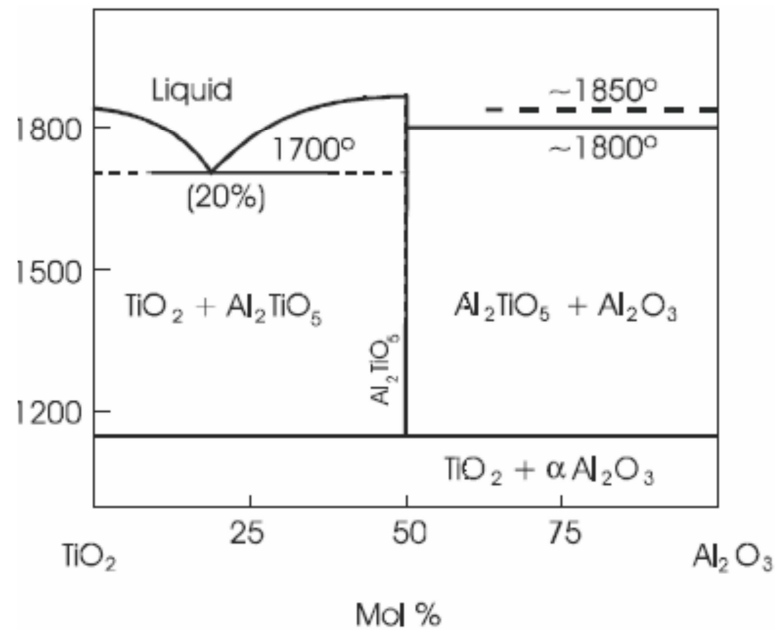


Figura 13 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [15].

2.5.4 Óxido de alumínio eletrofundido branco:

Caracterizado por ser um material com teor de no mínimo 99,5%-p. de Al_2O_3 , o óxido de alumínio eletrofundido branco apresenta como contaminante principal a alumina- β . É consideravelmente mais duro e mais friável do que o óxido de alumínio marrom e é utilizado em usinagem de aços inoxidáveis e em trabalhos que exigem alto desempenho [13].

2.5.5 Óxido de alumínio eletrofundido rosa (baixa cromia):

O óxido de alumínio eletrofundido rosa corresponde ao óxido de alumínio eletrofundido branco com um teor de óxido de cromo de no máximo 0,5%-p. O cromo possui a função de aumentar a tenacidade e a dissipação de calor em relação ao óxido de alumínio branco eletrofundido. É um material muito utilizado para o corte em aços de alta liga para evitar o

superaquecimento e, conseqüentemente, o endurecimento desse aço nas regiões do corte [13].

2.5.6 Óxido de alumínio eletrofundido rosa (alta cromia):

O material de alta cromia corresponde ao óxido de alumínio eletrofundido rosa que contém aproximadamente 3%-p de óxido de cromo a fim de fornecer ao óxido de alumínio eletrofundido uma resistência mecânica adicional.

A fim de se criar um ordenamento crescente da friabilidade para os diversos materiais apresentados neste texto, pode-se analisar o esquema apresentado na Tabela 2, na qual o primeiro óxido é o mais friável e o último o menos friável:

Tabela 2 - Ordem de friabilidade dos óxidos de alumínio sendo 1 o óxido mais friável e o 7 o menos friável [13].

1	Óxido de alumínio eletrofundido branco
2	Óxido de alumínio eletrofundido rosa (baixa cromia)
3	Óxido de alumínio eletrofundido rosa (alta cromia)
4	Óxido de alumínio eletrofundido marrom semi friável
5	Óxido de alumínio eletrofundido marrom semi friável – “ <i>blue fired</i> ”
6	Óxido de alumínio eletrofundido marrom regular
7	Óxido de alumínio eletrofundido marrom regular – “ <i>blue fired</i> ”

2.5.7 Zircônia-Alumina:

A zircônia é um material refratário com uma temperatura de fusão muito elevada 2650°C, e com uma tenacidade superior ao óxido de alumínio eletrofundido. Ela também tem um ponto de fusão maior do que o da alumina o que exige um controle de processo no forno Higgins bem maior. Os grãos abrasivos de zircônia-alumina são constituídos de cristais obtidos a partir da fusão de areia zirconada ou badeleíta e alumina em temperaturas de 1.900°C,

seguida de resfriamento rápido. Estes grãos possuem arestas agudas que se recompõe durante o processo de usinagem, fazendo com que as peças sejam usinadas de forma rápida e sem superaquecimento, sendo ideal, portanto, para aplicações de corte rápido e desbaste pesado [13].

2.5.8 Carbeto de Silício - SiC:

O carbeto de silício é obtido através do processo Acheson no qual ocorre a redução carbotérmica da sílica, com o auxílio de um eletrodo de carbono, em que uma corrente elétrica passa através de uma mistura de areia de quartzo e coque na proporção de 60 e 40%-p, respectivamente [16]. A temperatura de produção oscila entre 1900°C e 2400°C, durante aproximadamente 40 horas [16]. A cor do carbeto de silício varia desde um verde claro a um negro, em função das impurezas que contém. Os abrasivos de carbeto de silício são geralmente recomendados para usinagem de materiais de baixa resistência à tração tais como: ferro fundido cinzento, ligas de bronze, latão, alumínio e também para o polimento de peças cerâmicas, tal como granito.

2.5.9 Superabrasivos:

Os superabrasivos são materiais que apresentam uma tenacidade e uma condutividade térmica elevadas. Neste grupo encontram-se os diamantes natural e sintético, e o nitreto de boro cúbico (CBN). A obtenção desses superabrasivos implica em um custo extremamente elevado, resultando em custos de produção mil vezes superior aos grãos abrasivos a base de alumina [13]. O processamento e a utilização de grãos superabrasivos são muitas vezes diferentes dos abrasivos convencionais, mas em outras situações podem ser muito semelhantes.

2.6 Teoria da coloração em minerais.

A coloração é uma propriedade do mineral, porém não deve ser utilizada para sua identificação, já que é possível obter minerais com cores semelhantes utilizando para isso diferentes solutos. Alguns minerais podem apresentar cores variadas resultantes da dissolução de impurezas na sua estrutura cristalina. Assim, o óxido de alumínio marrom pode apresentar uma coloração diferenciada dependendo do grau de pureza e do tratamento térmico ao qual o material é submetido.

A coloração dos minerais é baseada em quatro teorias física distintas, segundo Nassau [17].

- Teoria do campo cristalino;
- Teoria do orbital molecular;
- Teoria de banda;
- Teoria óptica, ou fenômenos ópticos.

As causas específicas responsáveis pela coloração de minerais não são totalmente conhecidas. Muitas vezes técnicas de espectroscopia de precisão, ressonância magnética, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e até mesmo procedimento de síntese de laboratório são necessários para se evitar conclusões erradas.

Todas as teorias acabam se direcionando para a teoria da absorção de parte do espectro da luz, sendo que a cor observada é aquela que o material não consegue absorver a sua energia.

A teoria do campo cristalino é baseada nos cristais predominantemente iônicos, nos quais os íons apresentam seus elétrons desemparelhados. Assim, somente elementos com camada d parcialmente preenchida (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni e Cu), ou camada f parcialmente preenchida (actinídeos e lantanídeos) podem sofrer o efeito de desemparelhamento [17]. Desse modo quando as

camadas eletrônicas estão completamente preenchidas ou vazias (Cr^{+6} , Ce^{+4}) o efeito da coloração não é possível de ser observado. O exemplo mais comum deste tipo de efeito é do Fe que causa cor predominante nos minerais.

A teoria do orbital molecular é baseada em orbitais eletrônicos que não pertencem a um único átomo, mas sim a diversos átomos [17]. Um exemplo típico dessa teoria de coloração é o que ocorre na safira azul. O óxido de alumínio puro é composto apenas de alumínio e oxigênio e é um material incolor.

Na safira azul, os dopantes Fe e Ti são adicionados simultaneamente ao Al_2O_3 . Esses elementos químicos podem apresentar as seguintes valências: Fe^{+2} , Fe^{+3} , Ti^{+3} e Ti^{+4} , dependendo das suas concentrações, da pressão parcial de oxigênio e da temperatura em que a safira foi formada [17].

Quando o Fe^{+2} e Ti^{+4} substituem 2 íons de Al^{+3} vizinhos na rede do Al_2O_3 , uma larga banda de absorção é formada na extremidade do vermelho do espectro, causando o efeito azul do cristal a olhos nus.

Esse é um efeito de cor por transferência de carga (*charge transfer color*), que é a transição de íons vizinhos. Assim, a explicação não é pela transição em orbitais d dos íons individualmente. Nas Equações 11 e 12 seguem as transições eletrônicas [17].



Os íons de Fe^{+2} e Ti^{+4} precisam obrigatoriamente estar em lugares vizinhos da rede. Na transição de transferência de carga $\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{Fe}^{+3}$, um elétron é transferido do Fe^{+2} para o Ti^{+4} de modo que ocorre o seguinte processo:



Para se controlar os estados de oxidação adequados dos íons de Fe e Ti, recorre-se ao controle da atmosfera (O_2) e da temperatura do tratamento térmico.

Na Figura 14 pode ser visto o espectro de absorção da safira azul, no qual os picos de absorção identificados são devidos a transferência de carga.

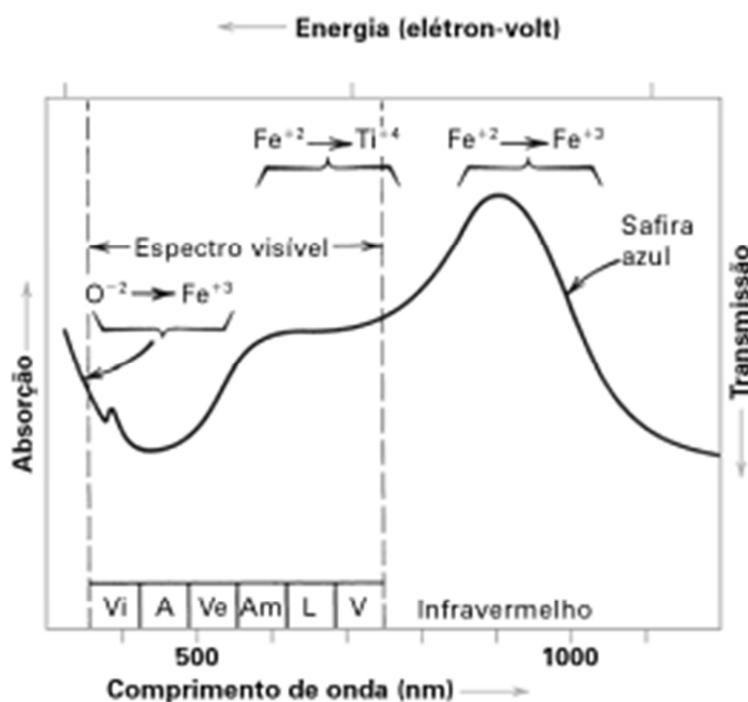


Figura 14-Espectro de absorção óptica da safira, gema azul do córindon. [17]

A teoria de banda é utilizada para explicar os fenômenos em minerais metálicos e materiais semicondutores. Enquanto que a teoria dos fenômenos óticos é baseada em fundamentos físicos tais como: dispersão, espalhamento, interferência e difração da luz.

Somente para efeito de exemplificação, segue a Tabela 3, na qual listam-se diferentes tipos de minerais e as diversas teorias adotadas para a coloração dos mesmos.

Tabela 3 - Diferentes causas para a coloração em minerais [17].

Fenômeno responsável pela coloração	Minerais típicos	Teorias
Compostos de Metais de transição.	Almandina, malaquita e turquesa.	Campo Cristalino
Transição de Metais como impurezas.	Citrina, esmeralda e óxido de alumínio rosa.	Campo Cristalino
Centros de cor.	Ametista e fluorita.	Campo Cristalino
Transferência de cargas.	Safira (óxido de alumínio azul), lazurita e crocoita.	Orbital Molecular
Materiais orgânicos.	Grafite, ambar e coral.	Orbital Molecular
Condutores.	Ferro, prata, chumbo e cobre.	Banda
Semicondutores.	Galena, pirita e enxofre.	Banda
Semicondutores dopados.	Diamante azul e diamante amarelo.	Banda
Dispersão	Facetamento.	Fenômenos óticos
Espalhamento.	Pedra da lua, asterismos na opala e olho de tigre.	Fenômenos óticos
Interferência.	Calcopirita iridescente.	Fenômenos óticos
Difração.	Opala.	Fenômenos óticos

Na seção 2.5.3 deste trabalho, apresentou-se o conceito de que a fase titanato de alumínio era o agente causador da mudança de coloração dos óxidos de alumínio regular e semi friável, alterando assim a cor do material de marrom para azul após o tratamento térmico.

Para avaliar a influência tanto da fase titanato de alumínio quanto da teoria do orbital molecular na mudança de coloração do óxido de alumínio, alguns experimentos e caracterizações foram realizados nesse trabalho a fim de comprovar a contribuição de cada teoria. Adianta-se que o titanato de alumínio não é a causa da cor azul do “*blue fired*”.

2.7 Métodos de caracterização de grãos abrasivos:

Os grãos abrasivos são submetidos a diversas análises a fim de caracterizar o material, tanto química quanto fisicamente. As análises mais utilizadas nesse segmento são as listadas nos itens abaixo.

- Difractometria de raios-X;
- Fluorescência de raios-X;
- Análise Granulométrica;
- Densidade Real e Densidade *Bulk*;
- Microscopia eletrônica de varredura com EDS;
- Microscopia óptica estereoscópica;
- Friabilidade de grãos abrasivos em Moinhos de Bolas.

2.8 Aplicações dos óxidos de alumínio em abrasivos:

A aplicação dos grãos abrasivos é determinada em função da sua composição química e da sua distribuição granulométrica. Em regra geral, grãos finos são usados em acabamentos de superfícies e grãos grossos são usados para remoção de material. Outra aplicação que vem se intensificando são abrasivos extremamente finos chamados de "micro grãos" utilizados em polimentos de acabamentos.

Nos abrasivos resinados, os desenvolvimentos nas técnicas de classificação dos grãos têm melhorado a habilidade de corte e prolongado a vida dos produtos. O grão abrasivo é a parte chave dos produtos abrasivos resinados que pode ser tanto um mineral natural quanto sintético. Devido a sua extrema dureza, minerais naturais como rochas ou esmeril (coríndon com impurezas de ferro) encontram-se limitados devido ao uso em produtos com aplicações em madeira, enquanto o mineral *crocus* (óxido de ferro natural) é limitado ao uso em componentes de polimento por causa da sua suavidade. De qualquer modo, minerais naturais contribuem com menos de 1 % do mercado

de abrasivos. Aplicações em metais requerem exclusivamente minerais sintéticos, uma vez que esses minerais oferecem consistência na sua qualidade e podem ser especialmente produzidos com forma facetada.

O uso de um determinado produto abrasivo resinado determina o mineral a ser utilizado no produto. Óxido de alumínio (sendo que o tratamento “*blue fired*” é dado a esse óxido) é o abrasivo mais comum, seguido de carbetto de silício. Visto que o carbetto de silício é mais duro e tem uma forma melhor, ele é usado em aplicações envolvendo vidros e outros materiais não-metálicos. O óxido de alumínio é utilizado em aplicações metálicas, nas quais grandes forças são comuns.

Minerais extremamente duros e caros como o diamante ou o nitreto cúbico de boro são restritos a processos especiais de polimento.

2.8.1 Rebolos e Lixas:

Abrasivos ligados:

Rebolos: são abrasivos conformados que apresentam em sua composição um ligante que atua como matriz e os grãos abrasivos dispersos. Os rebolos são utilizados em operações de desbaste e principalmente em retificadoras para remoção de material com precisão. Eles são classificados de acordo com o tipo de liga que possuem: vitrificados, resinoides (à base de resina) e emborrachados (borracha como ligante) [18].

Discos de corte: ferramentas utilizadas em operações de corte e desbaste. Os discos são fabricados geralmente com ligas resinoides e submetidos a um tratamento térmico de cura, diferentemente do que ocorre ao rebolo vitrificado [18].

Abrasivos não-ligados:

Lixas: são as ferramentas abrasivas mais utilizadas. São aplicadas desde operações de grandes remoções até em fino acabamento de superfície. Diferentemente dos rebolos e discos de cortes, as lixas não apresentam liga em sua estrutura [18].

Grãos livres: Alguns abrasivos podem ser aplicados de forma livre, ou seja, sem um ligante ou depositado em algum costado adesivo. Esse tipo de abrasivo geralmente é utilizado em máquinas de alta pressão ou de polimento. Exemplo dessa aplicação é a máquina de jateamento e as ceras de polimento [18].

2.9 Mercado de Abrasivos:

Anualmente o mercado de grãos abrasivos “*blue fired*” da Elfusa está aumentando. Como o mercado necessita de mais fornecedores desse tipo de produto e a técnica de produção ainda é pouco conhecida, a procura pelo “*blue fired*” é cada vez maior.

Não se tem a informação se a demanda desse tipo de produto continuará alta, uma vez que outras empresas já estão estudando a possibilidade de entrar nesse mercado e investirem também no “*blue fired*”. Por outro lado, o mercado desse material está em pleno crescimento, o que aumenta a procura pelo “*blue fired*” e diminui as chances de um excesso de oferta.

Nesse contexto, a Elfusa vem desde 2009 trabalhando para entrar nesse mercado cada vez mais rentável, mas que exige um conhecimento técnico específico. Em 2009 a Elfusa tinha um mercado mensal de 10t/mês deste produto e passou em 2013 para um mercado de 40t/mês, o que comprova que o setor está cada vez se deslocando para esse tipo de produto. Uma vez que o mercado está cada vez mais exigente e no intuito de melhorar a capacidade produtiva da empresa, este trabalho vem contribuir para a compreensão do processo tecnológico de produção desse tipo de grão abrasivo, já que pouco se sabe sobre a influência do tratamento térmico na friabilidade do óxido de alumínio marrom. Uma vez que a coloração azulada do óxido de alumínio “*blue fired*” é um fator exigido pelo mercado de abrasivos, as variáveis causadoras desse fenômeno foram estudadas neste trabalho, bem como a sua relação com a friabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS:

3.1 Materiais analisados.

Os óxidos de alumínio marrom além de apresentar uma diferença em composição química, apresentam também uma grande diversidade granulométrica. Para este trabalho, as amostras foram preparadas a partir de grãos com as granulometrias P24, P60 e P220 obtidos conforme a norma ANSI B7412 [19]. Este trabalho foi realizado utilizando-se óxido de alumínio semi friável especial (média titânia que será designado por ASFE), o óxido de alumínio semi friável (baixa titânia que será designado por ASF) e também o óxido de alumínio regular (alta titânia que será simbolizado por AR), cujas composições químicas estão mostradas nas Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente, e são todos produtos da Elfusa.

Tabela 4-Análise química típica do óxido de alumínio semi friável especial-ASFE, em %-p.

Al₂O₃	TiO₂	SiO₂	Fe₂O₃
97,40	1,68	0,54	0,11

Tabela 5-Análise química típica do óxido de alumínio semi friável-ASF, em %-p.

Al₂O₃	TiO₂	SiO₂	Fe₂O₃
97,64	1,43	0,53	0,12

Tabela 6-Análise química típica do óxido de alumínio regular-AR, em %-p.

Al₂O₃	TiO₂	SiO₂	Fe₂O₃	MgO
95,69	2,66	0,83	0,28	0,29

Nas tabelas 7, 8 e 9 encontram-se as especificações granulométricas dos grãos P24, P60 e P220 de acordo com a norma ANSI.

Tabela 7- Especificação granulométrica do grão P24 (ANSI).

P 24 (ANSI/FEPA)		
Tela/#ASTM (mm)	Mínimo (%)	Máximo (%)
16 (1,18)	0	0
20 (0,85)	0	25
25 (0,71)	45	100
+30 (+0,6)	65	100
35 (0,5)	0	100
-35 (-0,5)	0	3

Tabela 8- Especificação granulométrica do grão P60 (ANSI).

P 60 (ANSI/FEPA)		
Tela/#ASTM (mm)	Mínimo (%)	Máximo (%)
40 (0,425)	0	0
50 (0,297)	0	30
60 (0,25)	40	100
+70 (+0,212)	65	100
80 (0,18)	0	100
-80 (-0,18)	0	3

Tabela 9- Especificação granulométrica do grão P220 (ANSI).

P 220 (ANSI/FEPA)		
Tela/#ASTM (mm)	Mínimo (%)	Máximo (%)
140 (0,106)	0	0
200 (0,075)	0	15
230 (0,063)	0	100
+270 (+0,053)	40	100
+325 (0,045)	60	100
-325 (-0,045)	0	100

3.1.1 Preparação dos Materiais.

As amostras foram coletadas diretamente da linha de produção da Elfusa e foram analisadas por fluorescência e difração de raios X para a análise de impurezas e fases presentes no óxido de alumínio marrom. Além disso, as amostras foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura com EDS (espectroscopia de energia dispersiva) acoplado para a observação da superfície das partículas e identificação de elementos químicos. Em seguida,

as amostras de cada tipo foram submetidas a um teste de análise granulométrica, densidade aparente, densidade real e friabilidade para a caracterização das propriedades físicas dos grãos abrasivos antes do processo de tratamento térmico. Após essas caracterizações, amostras dos mesmos grãos analisados, foram submetidos a um tratamento térmico variando a temperatura de 1100°C a 1400°C, de 50 em 50°C, durante 14h após atingir o patamar de temperatura desejado. Os critérios de avaliação desse trabalho foram os valores de friabilidade, além da coloração do material após o tratamento térmico do óxido de alumínio marrom que deve ser azul. A coloração azulada para o óxido de alumínio “*blue fired*” é uma exigência do mercado, como já foi abordado anteriormente.

Após se encontrar a temperatura ideal (avaliando-se tanto a friabilidade quanto a coloração) para cada grão (P24, P60 e P220), as amostras foram submetidas a uma temperatura fixa, porém variando-se o tempo de tratamento nos valores de 7, 14 e 21h, para se avaliar a influência do tempo no processo.

Definido o tempo e a temperatura para cada tipo de grão, foi analisada a influência da presença do oxigênio no processo. Para isso foram realizados tratamentos térmicos das amostras, utilizando-se uma atmosfera oxidante (ar) e uma atmosfera inerte (argônio). A Tabela 10 é possível resumir os tratamentos térmicos realizados, variando o tempo, temperatura e atmosfera.

Tabela 10 - Lista dos tratamentos térmicos realizados com os abrasivos deste trabalho.

Granulometria.	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Atmosfera
P24	1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 e 1400.	7, 14 e 21.	Oxidante e Inerte.
P60	1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 e 1400.	7, 14 e 21.	Oxidante e Inerte.
P220	1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 e 1400.	7, 14 e 21.	Oxidante e Inerte.

Após o tratamento térmico, as amostras foram submetidas novamente as mesmas análises anteriores a fim de se ter um padrão de comparação. As análises químicas, densidade aparente, densidade real e a friabilidade foram realizadas em todas as amostras. As análises de MEV e EDS foram realizadas somente nas amostras que resultaram em melhor desempenho de cada tamanho de grão.

As impurezas tais como Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO e TiO_2 , influenciam na friabilidade e coloração do material. Para analisar a influência dessas impurezas no óxido de alumínio marrom “*blue fired*”, algumas amostras foram produzidas variando-se a percentagem desses componentes com o objetivo de se verificar a influência da composição nas propriedades físico química das mesmas. Essa etapa foi realizada somente após definido o padrão de tempo, temperatura e atmosfera ideal para cada grão.

3.2 Metodologia empregada:

Nas subseções a seguir serão apresentados os procedimentos utilizados para as caracterizações das amostras.

3.2.1 Caracterização granulométrica:

A análise granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Para partículas que possuem uma forma geométrica esférica, cilíndrica ou cúbica a determinação do tamanho das mesmas se dá convencionalmente pela medida do seu raio ou diâmetro, diâmetro da base, altura e do comprimento da aresta, respectivamente. Nos materiais cerâmicos, a forma irregular das partículas é predominante, fazendo-se assim do uso do conceito de tamanho equivalente, que é determinado pela medida de uma propriedade dependente do tamanho da partícula, relacionando-a com uma dimensão linear [20]. Assim, existem diversas técnicas de análise granulométrica, que se aplicam a faixas

granulométricas bem definidas. A escolha da técnica adequada para se efetuar a análise granulométrica de um determinado material vai depender do tamanho das partículas ali presentes.

Um primeiro método para se especificar a granulometria de um abrasivo é a utilização de peneiras. Os furos da peneira irão limitar os tamanhos do grão, e dessa forma nenhum grão além do tamanho que se quer estará presente. A classificação mais usual é a da norma norte-americana ANSI B74.12 [19] e a norma europeia FEPA-Standard 42-1:2006 [21] (Federation of European Producers of Abrasives). Para este trabalho foi utilizado a norma ANSI B74.12 [19]. Essas normas especificam o tamanho de grão através do número de fios que uma área padrão de uma polegada quadrada da peneira contém. O número de aberturas do tecido metálico presentes em uma polegada linear (25,44mm) é definida como malha e a abertura é definida como o espaço livre entre dois fios adjacentes da tela, medidos pelo lado interno dos fios [22]. Na Figura 15 segue um exemplo de malhas com diferentes tamanhos de aberturas.

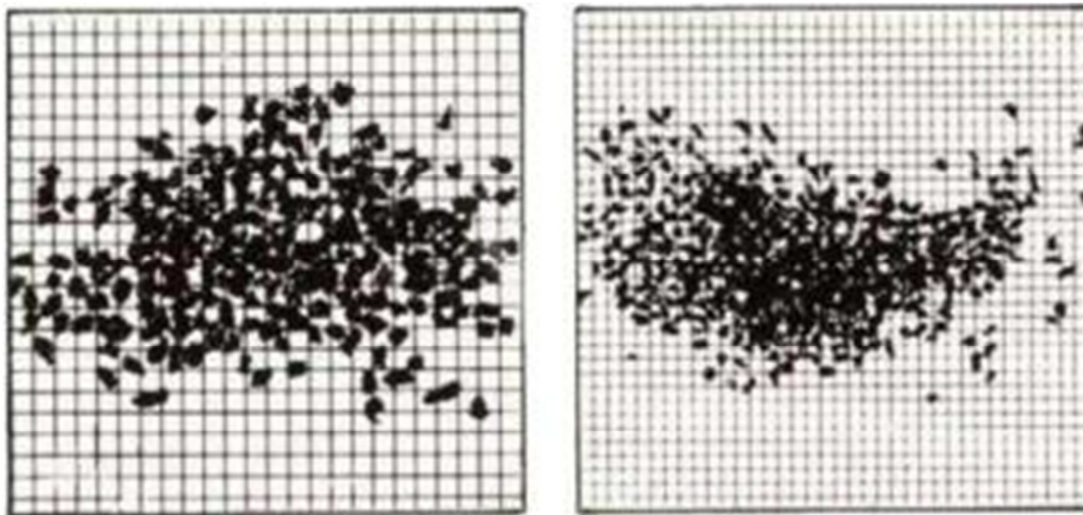


Figura 15 – Dois exemplos de sistema de peneiramento para classificação de partículas [22].

Porém, algumas utilizações requerem grãos tão pequenos, que estes já se tornam pós-impalpáveis, e não mais podem ser medidos utilizando-se peneiras. Para esses grãos, criou-se uma medição baseada no tempo de decantação em solução aquosa [22].

Os macro-grãos (com tamanhos de P12 ao P220) foram analisados com as peneiras testes (Tabelas 7, 8 e 9). Assim, uma faixa de limites pode estar presente em um dado tamanho, com um limite máximo de grosso e uma percentagem mínima de finos. Para a determinação da granulometria dos materiais foi utilizada uma sequência de peneiras com aberturas definidas de acordo ASTM E 11 [23], sendo as peneiras de maiores aberturas na parte superior e as peneiras com as menores aberturas na parte inferior. Na etapa seguinte, o material foi pesado em uma balança da marca Mettler, modelo PB 5001 S, previamente e adicionado na parte superior da sequência de peneiras. Em seguida esse conjunto foi submetido a um sistema de vibração, Rotap, modelo RX-29 (Figura 20), no qual o material é vibrado durante um determinado tempo para que o mesmo passe pelas peneiras. Assim, partículas grandes ficam retidas nas peneiras superiores. Em seguida, a sequência de peneira é desmontada e o material removido de cada peneira é pesado. Caso a peneira de cima da pilha tiver uma abertura de 200 micrometros e todo o material passar pela peneira, conclui-se que o material não contém partículas com tamanho superior a 200 micrometros. Se a próxima peneira tiver uma abertura de 170 micrometros e 10% do material ficar retido nessa peneira, conclui-se que 10% do material está com tamanho de partícula na faixa de 170 a 200 micrometros. Assim, com a sequência de peneiras apropriadas, pode-se obter a completa granulometria do material.



Figura 16 - Equipamento utilizado para a análise granulométrica de macro partículas-Rotap RX-29. Cortesia da Elfusa.

3.2.2 Densidade Real (D_r) e Densidade bulk (D_b)::

A densidade é uma ferramenta empregada para conversão de massa em volume ou vice-versa. A densidade (d) matematicamente é definida como a razão entre a massa de uma substância (m) e o seu volume (v) – Equação 14.

$$d = \frac{m}{v} \quad (14)$$

Os termos “densidade” e “massa específica” são frequentemente usados indistintamente. Em unidades métricas eles têm o mesmo valor numérico.

No caso de agregados minerais são determinados dois tipos de densidade:

- Densidade real do grão;
- Densidade bulk do grão.

- **Densidade Real (D_r)::**

Corresponde a massa específica real (γ_s) em relação a massa específica da água ($\gamma_a=1\text{g/cm}^3$), ou seja, $D_r = \gamma_s/\gamma_a$. A massa específica, γ_s , é a razão entre o peso seco do grão (P_s) e o volume da parte sólida (V_s). Este volume inclui a parte sólida do agregado e o volume dos poros impermeáveis (considerado aqui como parte integrante do volume dos sólidos). A densidade real é determinada no laboratório por (Equação 15):

$$D_r = \frac{P_s}{P_s - P_i} = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \quad (15)$$

Nessa equação, P_s corresponde ao peso do agregado seco (g), P_i corresponde ao peso do agregado após ser imerso em água durante 24 horas (g). A massa específica real (Equação 16) foi determinada com a utilização de um picnômetro a gás da marca Micromeritics, modelo accuPyc 1330. A técnica consiste em inserir a amostra em uma câmara do picnômetro de volume conhecido e em seguida o vazio existente no interior da câmara é preenchido com gás hélio. Com a diferença de volume do gás hélio utilizado para preencher a câmara vazia (V_i), a câmara cheia (V_f) e a massa do material seco (P_s), é possível determinar a massa específica real (D_{rp}).

$$D_{rp} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \left(\frac{PS}{(v_i - v_f)} \right) \quad (16)$$

- **Densidade *bulk* (D_b):**

A densidade *bulk* ou volumétrica é dada pela relação entre a massa de partículas necessária para preencher um recipiente de volume conhecido, em unidades de g/cm^3 . Esta densidade é influenciada pela geometria, pelo tamanho e pelas imperfeições presentes nas partículas, tais como poros e rugosidade.

Duas expressões de densidade *bulk* são utilizadas:

- Densidade *bulk* solta: medida colocando os sólidos em container de volume conhecido sem nenhuma vibração.
- Densidade *bulk* empacotada: medida após vibração ou empacotamento dos sólidos do container.

Para a determinação da densidade *bulk* solta foi utilizado o aparato mostrado na Figura 17.

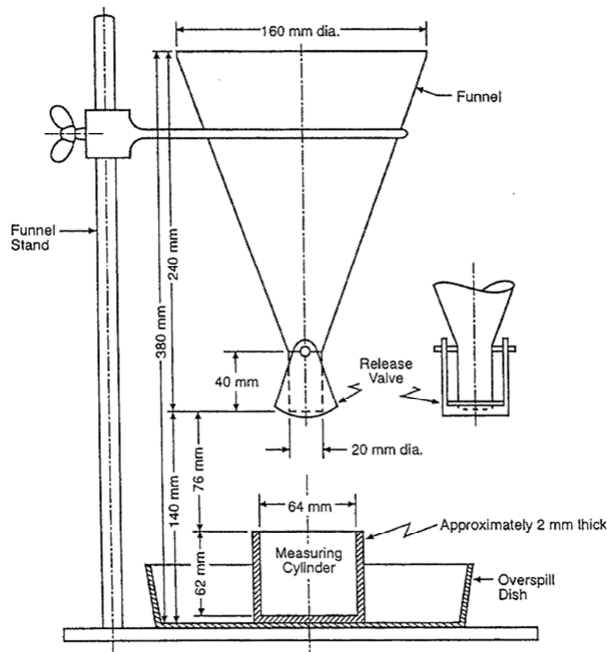


Figura 17- Aparato utilizado para realizar a densidade *bulk* solta em macrogrão [24].

Para a determinação da densidade *bulk*, as partículas analisadas foram secadas em uma estufa a temperatura de 100°C durante 1 hora. Em seguida as partículas foram resfriadas até atingirem a temperatura ambiente e, então, foram transferidas para o funil (Figura 17). O funil é aberto e os grãos escoam para um recipiente de forma cilíndrica, cujo volume é conhecido. Ao término da transferência do material para o cilindro, o excesso de material é retirado com o auxílio de uma régua de face plana, de forma a se evitar acúmulos ou depressões dos grãos, pois o material deve estar nivelado com a superfície do recipiente. Em seguida, o material foi removido do recipiente e teve sua massa medida com o auxílio de uma balança da marca Mettler, modelo AE 200. Com o volume do recipiente (v) e a massa do material (m) calcula-se a densidade *bulk* solta utilizando a equação 17 [24].

$$D_b \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \left(\frac{m}{v} \right) \quad (17)$$

Os ensaios de cada amostra foram realizados em duplicata pelo mesmo analista, em que os valores entre uma medição e outra não pudessem ultrapassar de $0,02\text{g/cm}^3$ de divergência (no caso das amostras que tiveram a divergência superior a $0,02\text{g/cm}^3$ uma terceira medição foi realizada).

3.2.4 Ensaio de Friabilidade:

O ensaio de friabilidade tem como objetivo mostrar o percentual de quebra de determinado grão abrasivo após ser submetido um processo de moagem. Para a determinação dessa propriedade os grãos classificados são submetidos a uma moagem durante 10 minutos em um moinho de bolas (Figura 18) e após um tempo são passados por uma peneira e verificada a quantidade de material que passou em uma determinada tela padrão.

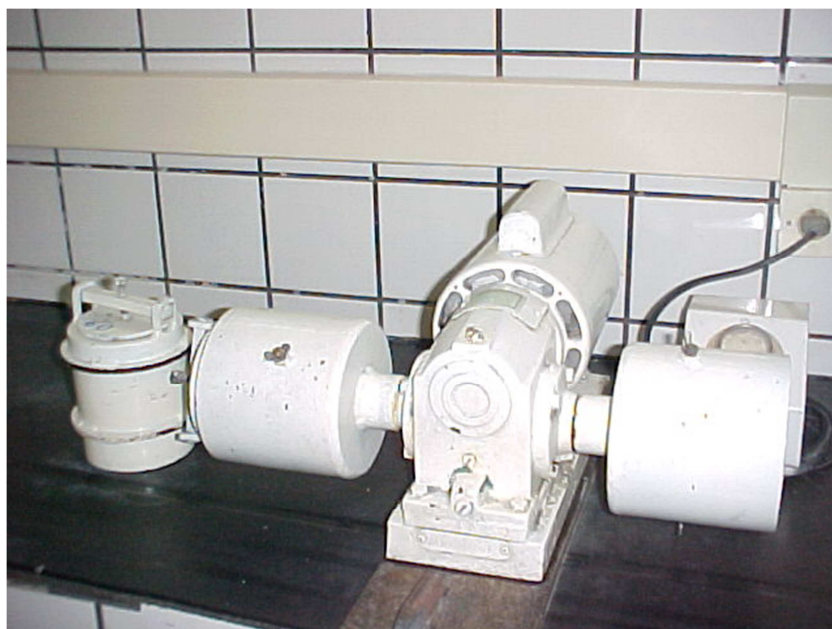


Figura 18 - Equipamento utilizado para analisar a friabilidade. Cortesia da Elfusa.

Para o ensaio deve-se utilizar 500 gramas do grão nominal. Para os grãos que serão analisados nesse trabalho para a obtenção do grão nominal é utilizado o seguinte procedimento.

Grão 24: Passar através da malha 20 e reter na malha 30 mesh.

Grão 60: Passar através da malha 50 e reter na malha 60 mesh.

Grão 220: Passar através da malha 200 e reter na malha 270 mesh.

Após o término do ciclo de moagem o material é removido por completo e o moinho é limpo com auxílio de um pincel, tomando-se todo o cuidado para que todo o material volte para as peneiras. Em seguida, os materiais removidos do moinho foram passados pelas peneiras de acordo com o tamanho de grão inicial (o material deve ser submetido por 5 minutos a rotap). As malhas utilizadas para cada grão segue abaixo.

Grão 24: # 25 mesh;

Grão 60: # 70 mesh;

Grão 220: # 230 mesh;

Para facilitar o entendimento deste trabalho adotou-se o conceito de índice de resistência à fratura do grão (IRF). O IRF representa o quão resistentes são as partículas do abrasivo em relação a fratura e é calculado pela equação 18. Enquanto que no cálculo da friabilidade é avaliado o peso de material que passa pela peneira, no IRF é avaliado o peso das partículas que ficaram retidas nas peneiras (que resistiram a fratura).

$$IRF = \left(\frac{\text{Peso da amostra retida na tela após a moagem}}{\text{Peso da amostra total inicial}} \right) * 100 \quad (18)$$

É conhecido que a forma apresentada pelas partículas influencia diretamente no IRF do material. Assim, partículas mais facetadas apresentam um IRF inferior em relação às partículas mais arredondadas, para uma mesma

granulometria. Para amenizar o efeito da forma das partículas no IRF, é calculado na equação 19 o índice de resistência à fratura, IRFN.

$$\text{IRFN} = \frac{\text{IRF} * D_r}{D_b * 100} \quad (19)$$

3.2.5 Análise química

A fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que permite não só uma análise qualitativa (identificação dos elementos presentes numa amostra), mas principalmente quantitativa dos elementos químicos. Os raios-X incidentes excitam os átomos constituintes da amostra, que por sua vez emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração [25].

Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios-X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X.

Para a análise química quantitativa utilizou-se a técnica de fluorescência de raios X. Antes da análise é necessário a preparação adequada do material. Para isso, cada amostra foi submetida a moagem em um moinho de carbeto de tungstênio da marca AMEF, modelo AMP1, durante 60 segundos. Após a moagem, 6g de material foram pesados em uma balança da marca Mettler, modelo AE 200, e misturados com 0,6 g de fundente de tetraborato de lítio da marca ExpectroFlux-1010D em um cadinho de platina. Em seguida a mistura foi fundida à 1200°C. Após 20 minutos, a amostra é removida e resfriada a temperatura ambiente. Após a remoção do cadinho de platina, a amostra é analisada utilizando um equipamento de fluorescência de raios X, modelo PW2540, da Philips (Figura 19).



Figura 19- Equipamento de FRX. Cortesia da Elfusa.

3.2.6 MEV e EDS:

Uma técnica muito interessante tanto na análise da microestrutura quanto para identificação de fases é a microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS) [18]. Por meio desses equipamentos pode-se:

- a) Entender as correlações microestrutura - defeitos - propriedades;
- b) Predizer as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas.

A microscopia eletrônica de varredura acoplada ao EDS foi utilizada para a observação da superfície dos grãos abrasivos antes e após o tratamento térmico com o objetivo de auxiliar na identificação de elementos na superfície dos grãos eletrofundidos, que pudessem justificar a mudança de coloração dos grãos de óxido de alumínio marrom antes e após o tratamento térmico. Para

este trabalho foi utilizado o microscópio de varredura FEI Inspect S50, do Laboratório de Caracterização Estrutural-LCE da UFSCar.

3.2.7 Microscopia óptica estereoscópica:

As imagens na estereoscopia são capturadas em diferentes ângulos e com o auxílio de dispositivos é possível obter as imagens com a percepção das dimensões de altura, largura e profundidade. Uma vez que os grãos abrasivos são partículas com formatos irregulares, a técnica de estereoscopia é a mais indicada para visualização da superfície do material. Dessa forma essa técnica foi utilizada para auxiliar na observação da coloração dos óxidos de alumínio marrons a medida que o tratamento térmico foi realizado. Para esse trabalho foi utilizado um estereoscópio da marca Motic, modelo K400.

3.2.8 Difração de raios X:

Utilizou-se a técnica de difração de raios X para avaliar a formação e a presença de diferentes fases, que pudessem justificar a mudança de coloração do óxido de alumínio marrom tratado em diferentes temperaturas, tempos e atmosferas. As amostras foram caracterizadas inicialmente para a identificação das fases cristalinas presentes no pó, resultante dos tratamentos. Em todas as medidas de DRX foram mantidas as mesmas condições experimentais. As análises foram analisadas no equipamento Philips, modelo X'PertPro, da Elfusa. As amostras foram moídas em um moinho de carbeto de tungstênio da marca AMEF, modelo AMP, até que o material atingisse 99% de suas partículas passantes numa malha de 325 mesh.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados serão discutidos com base na caracterização química e física levando em consideração a normalização da friabilidade e a coloração do material. Além disso, avalia-se a influência da composição química, granulometria, do tempo e da atmosfera a que a amostra foi submetida ao tratamento térmico.

A partir desses resultados, será possível analisar se a coloração do material possui alguma influência na friabilidade. Outro foco abordado será entender a mudança de coloração que ocorre no grão abrasivo durante o tratamento térmico.

A partir desses resultados, pode-se decidir por uma formulação mais adequada para o processo e se definir as melhores condições de operação do forno para a produção do óxido de alumínio *“blue fired”*.

4.1 Óxido de Alumínio Marrom Semi Friável Especial, ASFE:

Para a eletrofusão do óxido de alumínio semi friável especial, ASFE, utiliza-se como matérias-primas a bauxita, redutor, cavaco de ferro e outros compostos químicos que não podem ser informados neste trabalho por se tratar de informação estratégica na produção dessa classe de produto. Contudo, é conhecido que essas matérias-primas estratégicas influenciam significativamente a coloração do ASFE após o tratamento térmico. Nas tabelas 11, 12 e 13 encontram-se os resultados para as diferentes faixas granulométrica P24, P60 e P220, desse material, respectivamente. Para o cálculo do índice de resistência a fratura do grão-IRF, o valor da densidade real utilizada para o ASFE foi de $4,01 \text{ g/cm}^3$ [26].

Nas Figuras 20, 21 e 22 são apresentadas comparações do IRFN para os grãos de ASFE P24, P60 e P220. A denominação S/T utilizada tanto nas tabelas quanto nas figuras refere-se às amostras de ASFE sem sofrer tratamento térmico.

Tabela 11- Resultados dos tratamentos térmicos do ASFE para o grão P24.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial								
Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	46,80	48,70	52,90	56,00	58,90	62,10	61,30	60,20
IRFN	1,04	1,08	1,17	1,24	1,34	1,41	1,40	1,21
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,81	1,80	1,81	1,80	1,77	1,77	1,75	2,00
Cor		Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

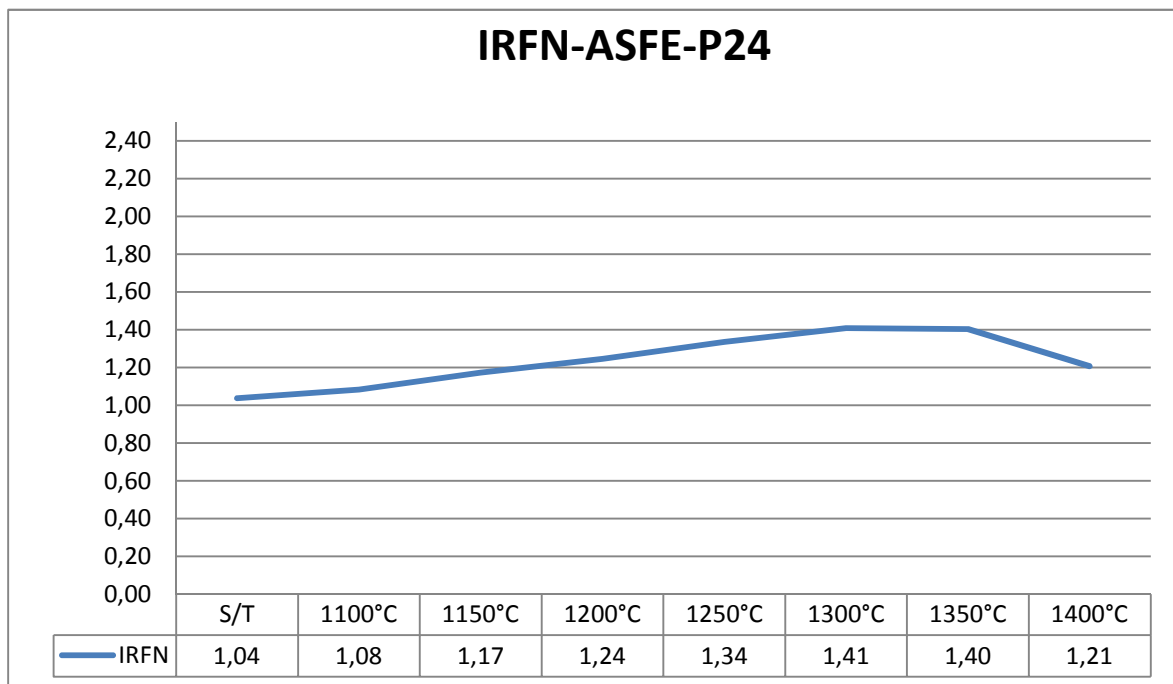


Figura 20 - IRFN para o ASFE P24 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Tabela 12 - Resultados dos tratamentos térmicos do ASFE para o grão P60.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial								
Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	50,1	51,4	52,4	52,8	59,8	62,6	61,8	63
IRFN	1,11	1,20	1,22	1,23	1,40	1,50	1,49	1,47
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,72	1,73	1,72	1,72	1,68	1,67	1,72
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom/Azul	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

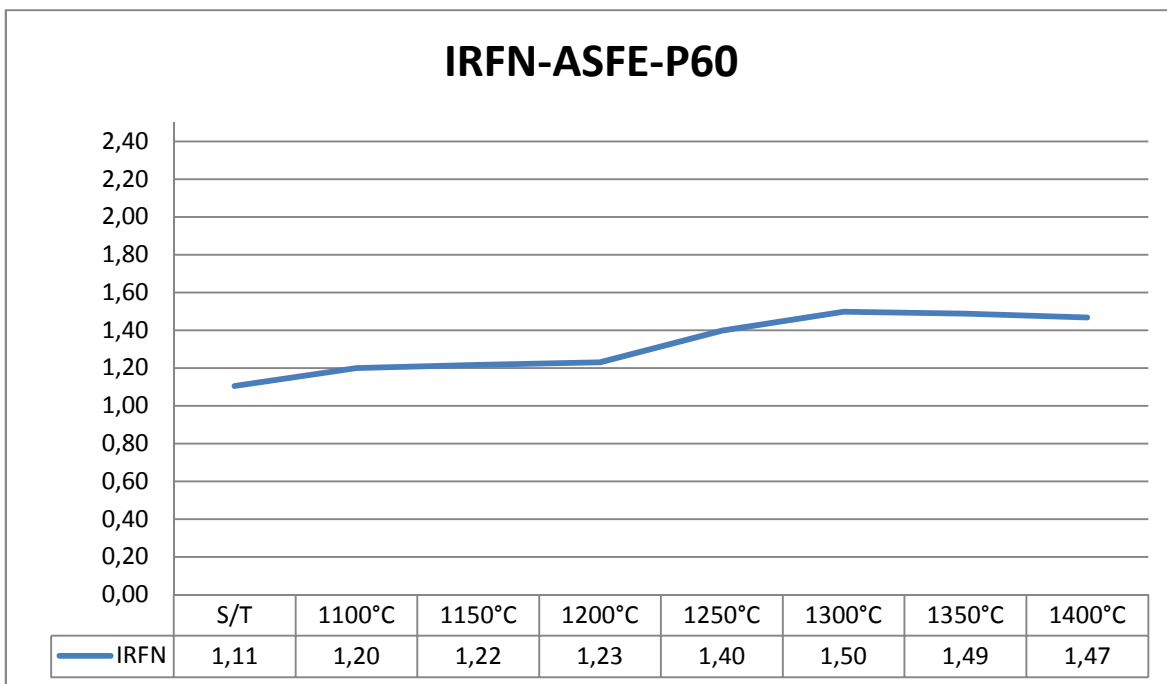


Figura 21- IRFN para o ASFE P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Tabela 13 - Resultados dos tratamentos térmicos do ASFE para o grão P220.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial								
Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	72,80	73,90	77,70	84,90	85,80	Sinterizado	Sinterizado	Sinterizado
IRFN	1,91	1,92	2,05	2,36	2,42			
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,53	1,55	1,52	1,45	1,42			
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Branco	Branco	Branco

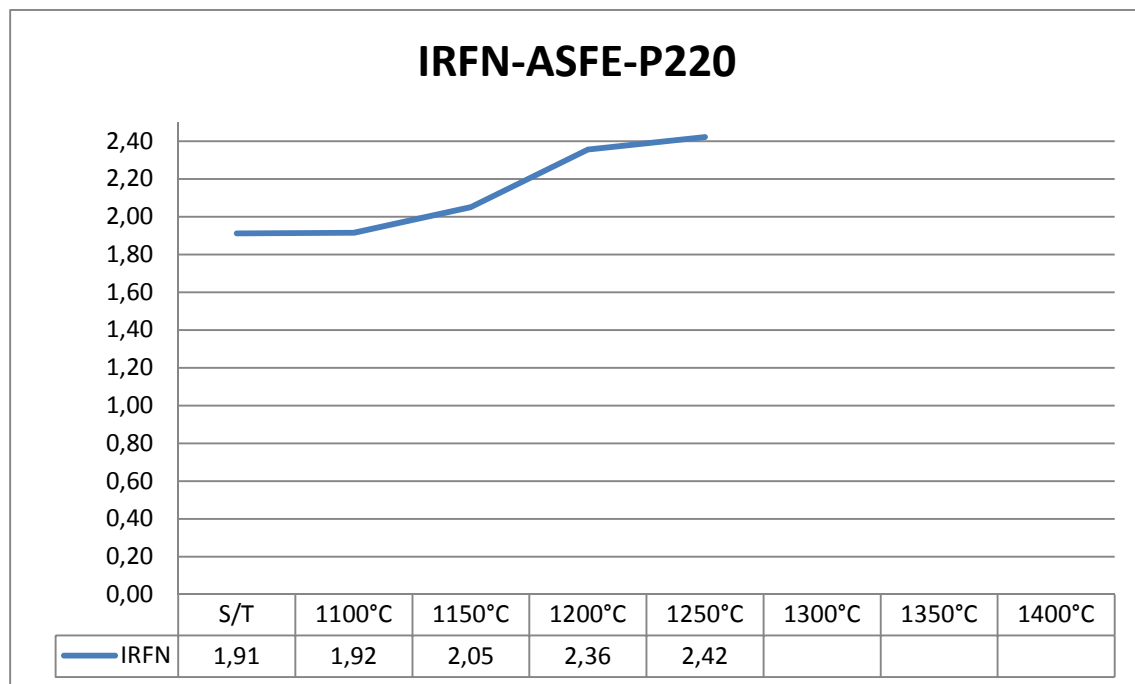


Figura 22 - IRFN para o ASFE P220 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Analisando-se as Tabelas 11, 12 e 13 e as Figuras 20, 21 e 22 observa-se que o IRFN aumenta até um nível de temperatura e depois diminui. Essa mudança é acompanhada de alteração na coloração das amostras, como se pode observar na Figura 23, no caso do grão P60. Nota-se também que a temperatura para atingir a condição de maior IRFN é diferente para cada granulometria. Essa diferença é função da área superficial dos grãos abrasivos, que quanto mais finos, maior será esta área. Assim os grãos mais finos atingem a temperatura de tratamento ideal em menores patamares. No grão P220 foi observado que a partir de 1300°C houve uma sinterização do material, não sendo possível analisar o IRFN.

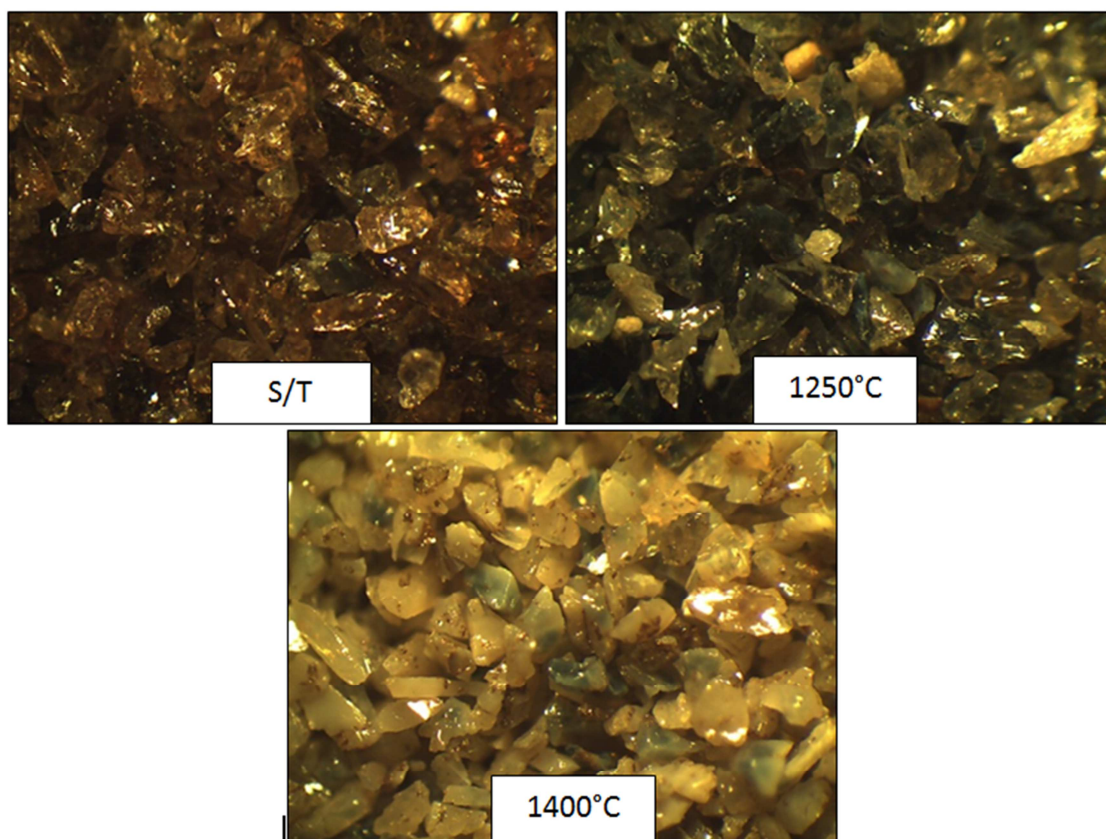


Figura 23- Imagens ópticas dos grãos ASFE, P60: S/T- sem tratamento térmico, tratado à 1250°C e tratado à 1400°C.

Analisando-se as imagens da Figura 23 é observado que os grãos de alumina tratados a 1250°C adquirem uma coloração azul. Essa coloração é o padrão de cor exigido pelo mercado para o óxido de alumínio semi friável especial “*blue fired*”. A medida que o material é submetido a uma maior temperatura, uma coloração esbranquiçada característica é observada. Essa coloração para óxido de alumínio semi friável marrom e “*blue fired*” não é aceitável no mercado de abrasivos.

Para auxiliar no estudo de caracterização das amostras, a técnica de difração de raios X foi utilizada. Uma vez que a composição química das amostras com diferentes granulometrias pertencem ao mesmo lote, o grupo de amostras do grão P60 foi utilizado como representativo para fins de identificação das diferenças ocorridas durante os tratamentos térmicos. Assim realizou-se a difração de raios X das amostras S/T (sem tratamento térmico),

1250°C (amostra tratada a 1250°C durante 14 horas) e 1400°C (amostra tratada a 1250°C durante 14 horas) (Figura 24).

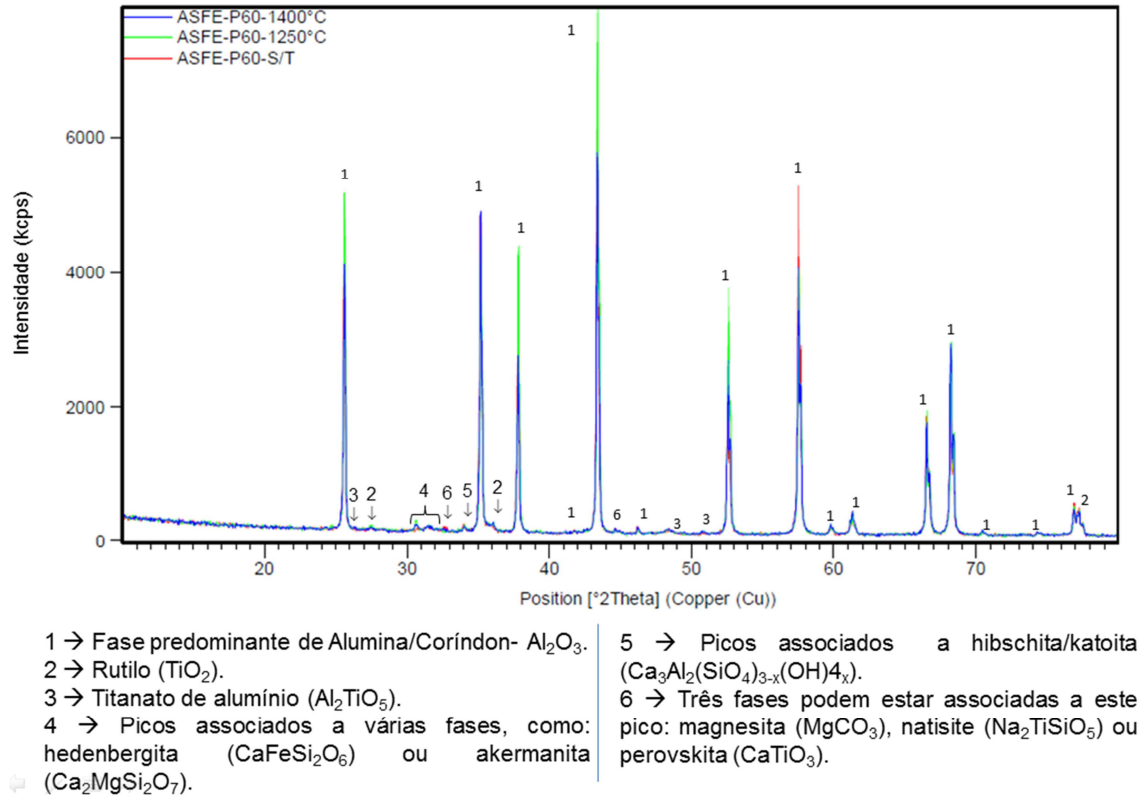


Figura 24 - Difratoograma de raios X das amostras dos grãos de ASFE-P60, sem tratamento térmico, tratada à 1250°C e tratada à 1400°C.

A identificação de fases foi dificultada uma vez que a fase majoritária é superior a 95% de Al_2O_3 . Contudo, à medida que o tratamento térmico ocorre é possível se verificar algumas pequenas mudanças. A principal fase a se destacar no difratograma é a intensificação da linha da fase rutilo na amostra de ASFE-P60 tratada à 1250°C durante 14 horas. As fases $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ e $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ também apresentam uma intensificação, enquanto as fases MgCO_3 , $\text{Na}_2\text{TiSiO}_5$ e CaTiO_3 acabam diminuindo de intensidade a medida que a temperatura do tratamento térmico é aumentada, mostrando que essas fases podem ter sido destruídas com o excesso de temperatura do tratamento térmico. A quantificação dessas fases deve ser encarada de modo apenas

semi-quantitativo, uma vez que a intensidade dos picos são relativamente baixas em relação à fase majoritária de alumina, mesmo empregando-se Rietveld.

Para auxiliar na identificação das fases, a técnica de MEV com EDS foi utilizada. A sequência de imagens apresentadas correspondem a: S/T (Figura 25), 1250°C (Figura 26) e 1400°C (Figura 27). Nas Tabelas 14, 15 e 16 é possível avaliar os elementos presentes em diversos pontos das microscopias apresentadas respectivamente nas Figuras 25, 26 e 27.

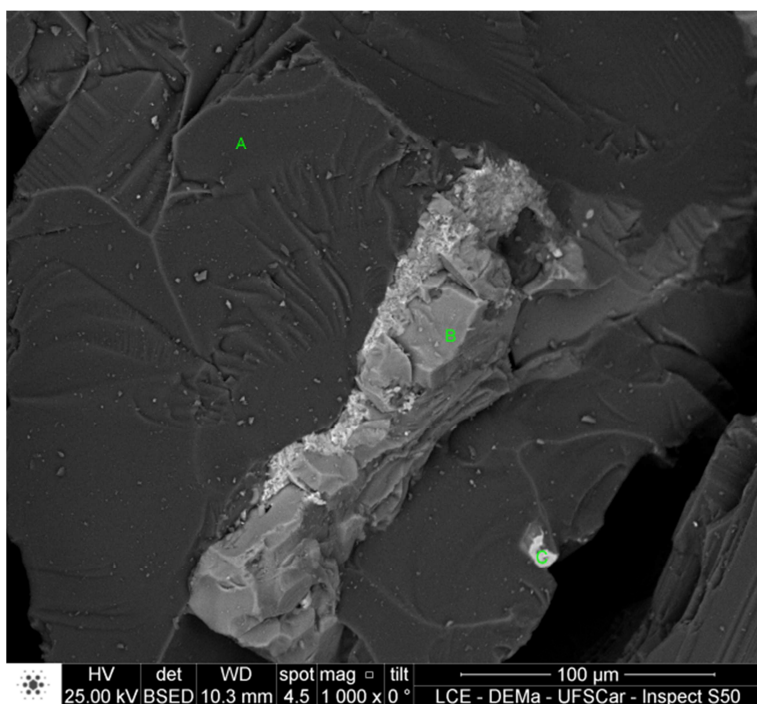


Figura 25- Microscopia eletrônica de varredura do ASFE, grão P60 e sem tratamento térmico.

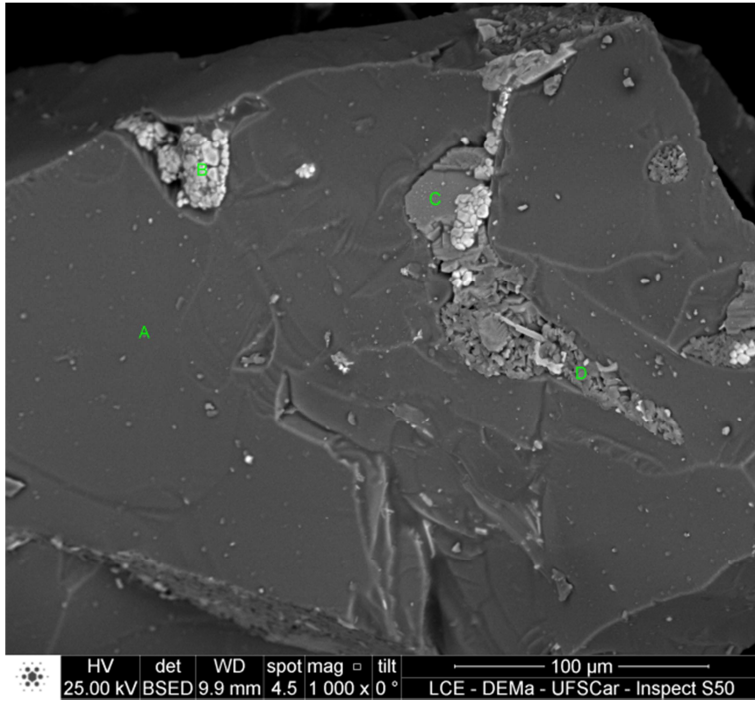


Figura 26- Microscopia eletrônica de varredura do ASFE, grão P60 e após o tratamento térmico a 1250°C.

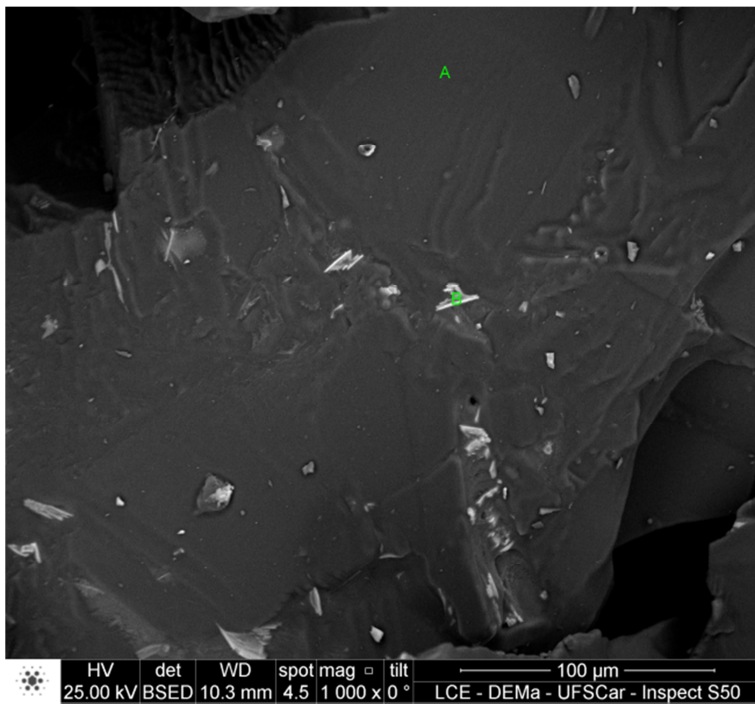


Figura 27- Microscopia eletrônica de varredura do ASFE, grão P60 e após o tratamento térmico a 1400°C.

Tabela 14- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra do ASFE do grão P60, correspondente a Figura 25.

Elemento químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C
O	36,78	31,71	32,65
Mg	-	-	0,28
Al	62,58	17,49	23,30
Zr	-	26,69	33,06
K	-	-	0,29
Ca	-	-	1,56
Ti	0,64	22,94	5,81
Ce	-	-	2,39
Mn	-	0,73	0,66

Tabela 15- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra do ASFE do grão P60 após tratamento térmico à 1250°C, correspondente a Figura 26.

Elemento químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
O	51,96	38,94	40,64	50,21
Na	-	0,51	0,20	0,33
Mg	-	0,17	0,37	0,27
Al	43,68	7,34	37,34	44,53
Si	2,02	4,54	1,85	2,42
Zr	1,69	30,13	4,65	1,71
K	-	0,99	0,22	-
Ca	0,30	4,69	2,40	-
Ti	0,34	10,55	3,09	-
Ce	-	1,18	5,49	-
Mn	-	0,97	1,88	0,11
Fe	-	-	1,86	0,42

Tabela 16- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra do ASFE do grão P60 após o tratamento térmico a 1400°C, correspondente a Figura 27.

Elemento químico (% massa)	Ponto A	Ponto B
O	43,99	55,34
Na	-	1,64
Mg	-	0,87
Al	55,91	27,27
Si	-	-
Zr	-	5,64
K	-	1,43
Ca	-	2,79
Ti	0,10	3,00
Ce	-	1,62
Mn	-	0,38
Fe	-	-

Tomando como exemplo o diagrama de TiO_2 e Al_2O_3 é comum se ter sistemas de óxidos praticamente insolúveis um no outro. Portanto sistemas com dois ou mais óxidos tem grande chance de se apresentarem como multifásicos. No caso da formulação em discussão as análises de EDS mostram o aparecimento de diferentes fases como mostrado nas figuras 25, 26 e 27. O mesmo comportamento ocorrerá nas demais formulações adiante.

Analisando-se a quantificação da difração do ASFE grão P60, na Figura 24, é possível observar a presença de algumas fases de baixa intensidade. Assim o MEV e o EDS auxiliaram na identificação de algumas dessas fases que apareceram na difração, assim como a distribuição das mesmas no material. Como já era esperado os elementos Al, O e Ti estavam presentes nas três imagens (Figuras 25, 26 e 27).

Contudo, pelo MEV e EDS, não foi possível observar alguma fase, como camada, que revestisse uniformemente os grãos de ASFE e que justificasse a coloração azulada desse material tratado à 1250°C (Figura 26). No entanto, o Ti aparece como solução sólida na alumina.

4.2 Óxido de Alumínio Marrom Semi Friável, ASF:

Para a eletrofusão do ASF, utiliza-se como matéria prima a bauxita, redutor, cavaco de ferro e Ilmenita (TiO_2+FeO) como fonte de TiO_2 . Como podem ser verificado nas Tabelas 17, 18 e 19, os teores de titânia nesse tipo de material são inferiores quando comparados ao ASFE. Nas Tabelas 17, 18 e 19 encontram-se os resultados para as diferentes faixas granulométricas P24, P60 e P220, respectivamente. Para o cálculo da normalização do IRFN, a densidade real utilizada para o ASF foi de $3,94\text{ g/cm}^3$ [26].

Nas Figuras 28, 29 e 30 são apresentadas o IRFN para o ASF P24, P60 e P220, respectivamente.

Tabela 17- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P24.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi Friável								
Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	50,10	50,30	51,30	50,20	53,40	45,10	47,10	41,10
IRFN	1,06	1,06	1,08	1,06	1,13	0,96	0,99	0,87
Densidade Bulk (g/cm^3)	1,86	1,87	1,87	1,87	1,87	1,85	1,88	1,86
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

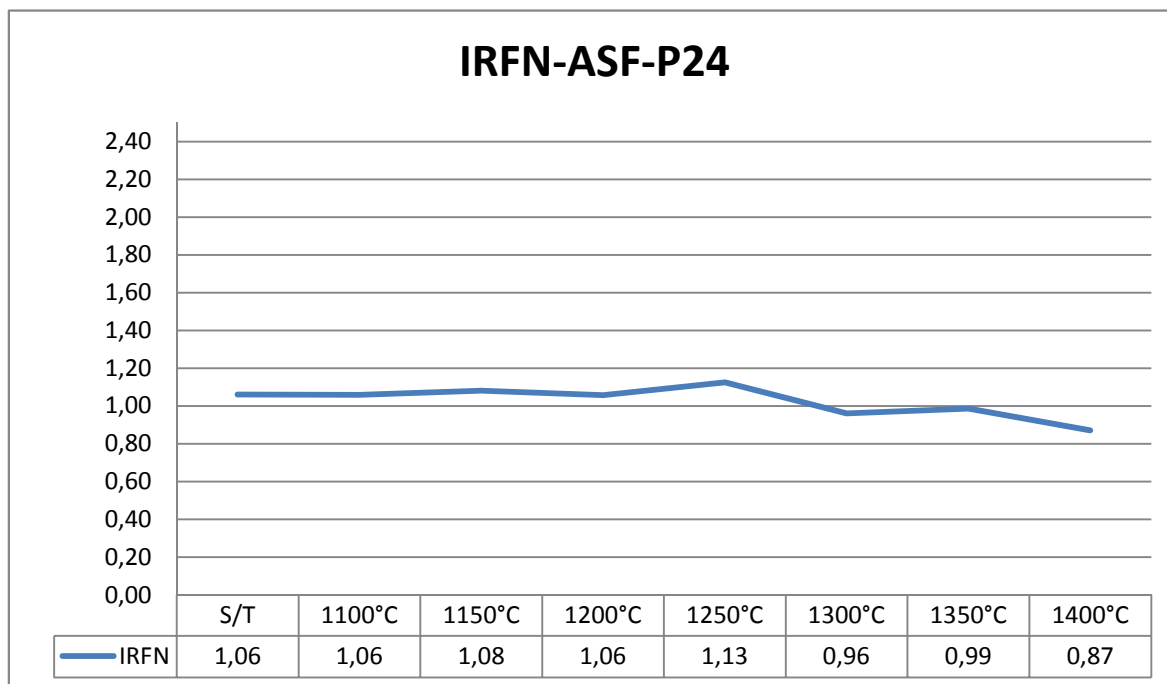


Figura 28 - IRFN para o ASF P24 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Tabela 18- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P60.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi Friável								
Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	55,10	57,80	56,80	53,00	51,80	62,00	61,80	58,20
IRFN	1,19	1,24	1,22	1,14	1,11	1,41	1,39	1,38
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,83	1,84	1,83	1,84	1,73	1,75	1,66
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

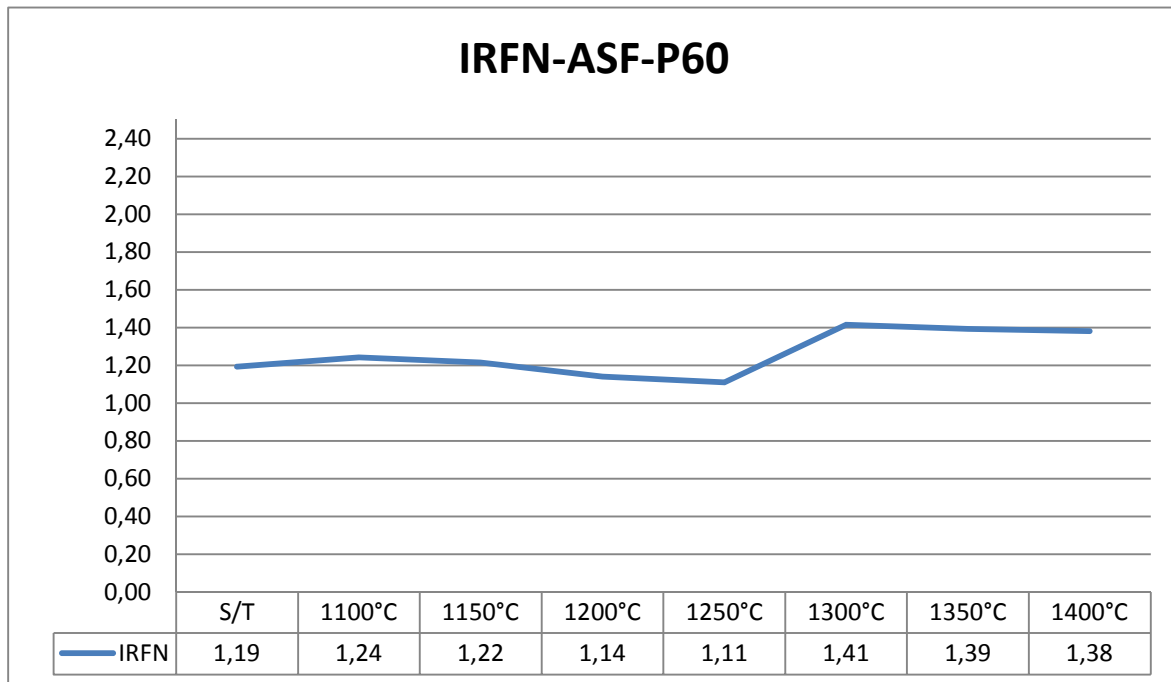


Figura 29 - IRFN para o ASF P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Tabela 19- Resultados dos tratamentos térmicos do ASF para o grão P220.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Semi Friável								
Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	77,60	74,30	76,90	82,50	81,60	Sinterizado	Sinterizado	Sinterizado
IRFN	1,99	1,98	1,96	2,31	2,26			
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,54	1,48	1,54	1,41	1,42			
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/Branco	Branco	Branco	Branco

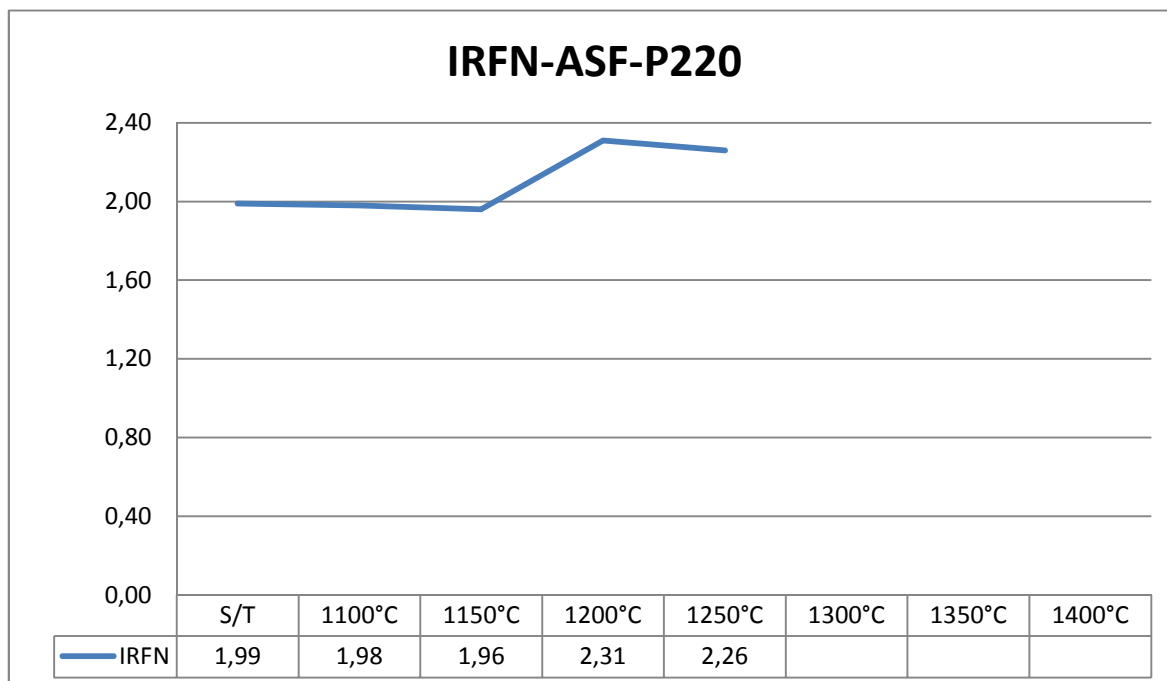


Figura 30 - IRFN para o ASF P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

No caso do ASF é possível verificar nas Tabelas 17, 18 e 19 e nas Figuras 28, 29 e 30 que o IRFN aumenta até um nível de temperatura e depois apresenta uma queda. Contudo, ao compararmos com os resultados obtidos para o ASFE (Figuras 20, 21 e 22) o ASF apresenta um comportamento significativamente diferente. Essa diferença entre os dois óxidos de alumínio também é observável na coloração dos mesmos. Enquanto no ASFE o grão P60 (Figura 23) adquire um azul intenso a 1250°C, no ASF é necessário uma temperatura maior para azular, embora esse azul não seja tão característico (Figura 31). Deve-se observar que o teor de Fe₂O₃ e de TiO₂ do ASF é inferior quando comparado ao ASFE. Essa diferença entre esses dois materiais, está

relacionado com a coloração, como será melhor explicado nas próximas seções. É observado, também, que a temperatura para se atingir a condição de menor friabilidade é diferente para cada granulometria. Essa diferença é em função da área de superfície dos grãos abrasivos, como já descrito anteriormente. Assim, os grãos mais finos atingem a temperatura de tratamento ideal em menores patamares. No caso do grão P220 foi observado que a partir de 1300°C houve sinterização do material, não sendo possível analisar a sua friabilidade.

Com o auxílio do estereomicroscópio, foi possível avaliar melhor os grãos ASF com a granulometria P60. Na Figura 31 pode ser notada uma grande diferença na coloração dos grãos dependendo do tratamento térmico é realizado.

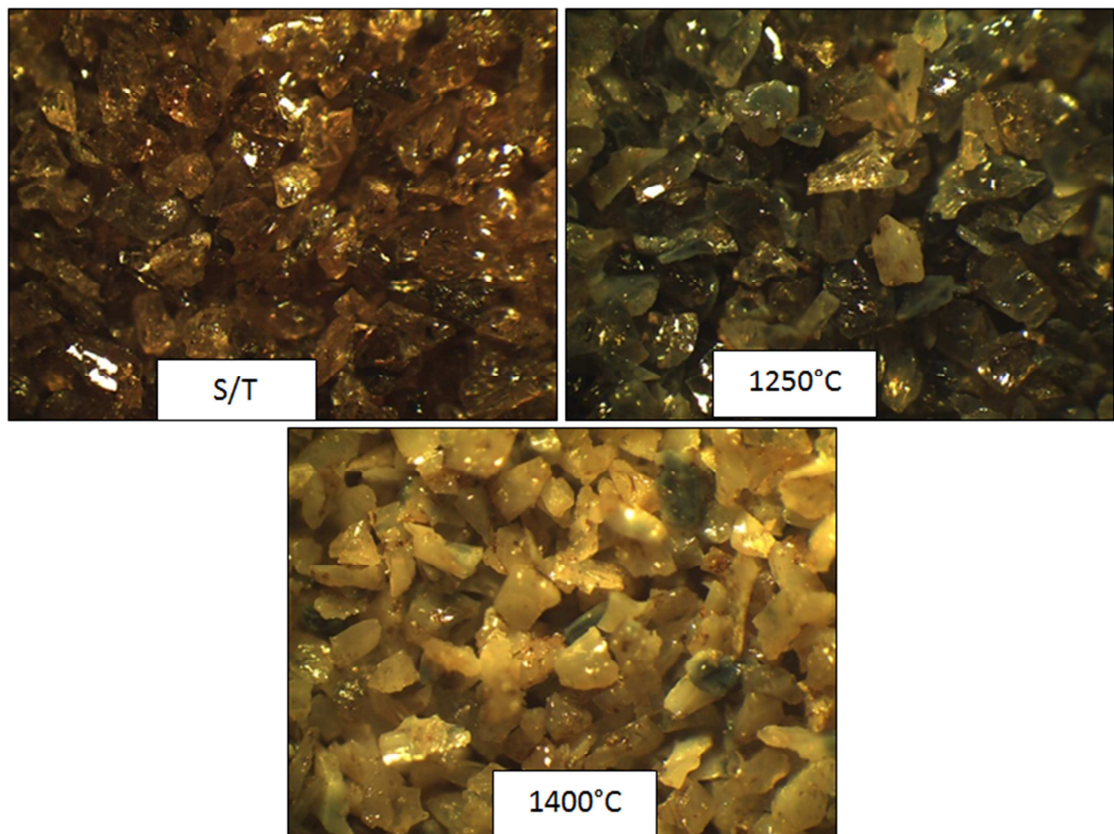


Figura 31- Imagens ópticas dos grãos de ASF, grão P60: S/T-sem tratamento térmico, tratado á 1250°C e tratado à 1400°C.

Analisando-se as imagens da Figura 31 é observado que o grão ASF tratado à 1250°C adquire uma coloração azul. Contudo é observado que alguns grãos ainda não azularam totalmente, provocando um efeito não desejado pelo mercado abrasivista. À medida que o material é submetido a uma maior temperatura uma coloração esbranquiçada aparece. Essa coloração é semelhante aquela apresentada pelo ASFE.

Também para as amostra de ASF, foi utilizada a técnica de difração de raios X. Uma vez que a composição química das amostras com diferentes granulometrias pertence ao mesmo lote, o grupo de amostras com a distribuição granulométrica P60 foi utilizado como representativa para as análises, a fim de se identificar as diferenças ocorridas durante os tratamentos. Assim realizou-se a difração de raios X das amostras S/T, tratada a 1250°C durante 14horas e 1400°C durante 14 horas. Os resultados encontram-se na Figura 32.

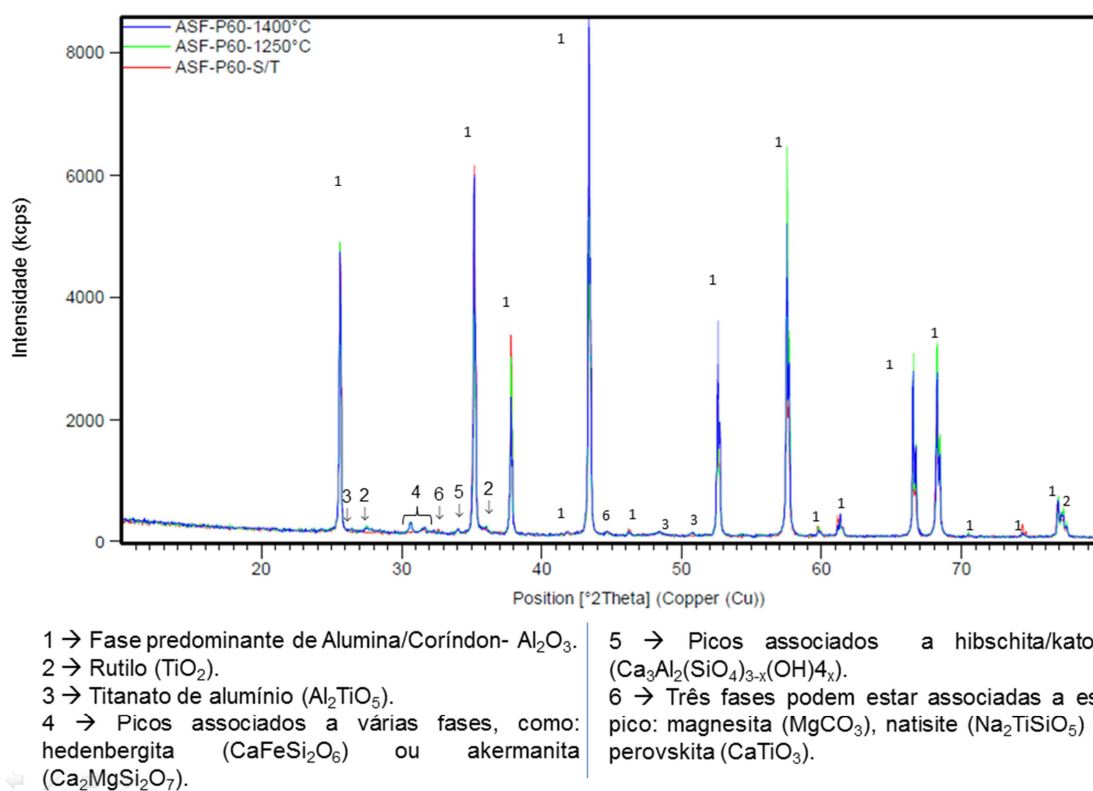


Figura 32- Difratoograma de raios X das amostras de ASF, sem tratamento térmico, tratada à 1250°C e tratada à 1400°C.

As mesmas dificuldades foram encontradas na identificação de fases já apresentadas para o ASFE, uma vez que a fase majoritária é superior a 95% de Al_2O_3 . Novamente, à medida que o tratamento térmico é aplicado é possível ocorrer algumas pequenas mudanças. O pico da fase rutilo se intensifica à medida que a temperatura do tratamento térmico é aumentada, tendo a sua maior intensidade para o grão P60 de ASF tratado à 1400°C . As fases $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ e $\text{Ca}_2\text{MgSiO}_7$ também apresentam uma intensificação enquanto as fases MgCO_3 , $\text{Na}_2\text{TiSiO}_3$ ou CaTiO_3 acabam diminuindo de intensidade a medida que a temperatura do tratamento térmico é aumentada.

As sequências de imagens de MEV a seguir correspondem a: S/T (Figura 33), 1250°C (Figura 34) e 1400°C (Figura 35). Nas Tabelas 20, 21 e 22 é possível avaliar os elementos químicos presentes em diversos pontos das microscopias apresentadas respectivamente nas Figuras 33, 34 e 35.

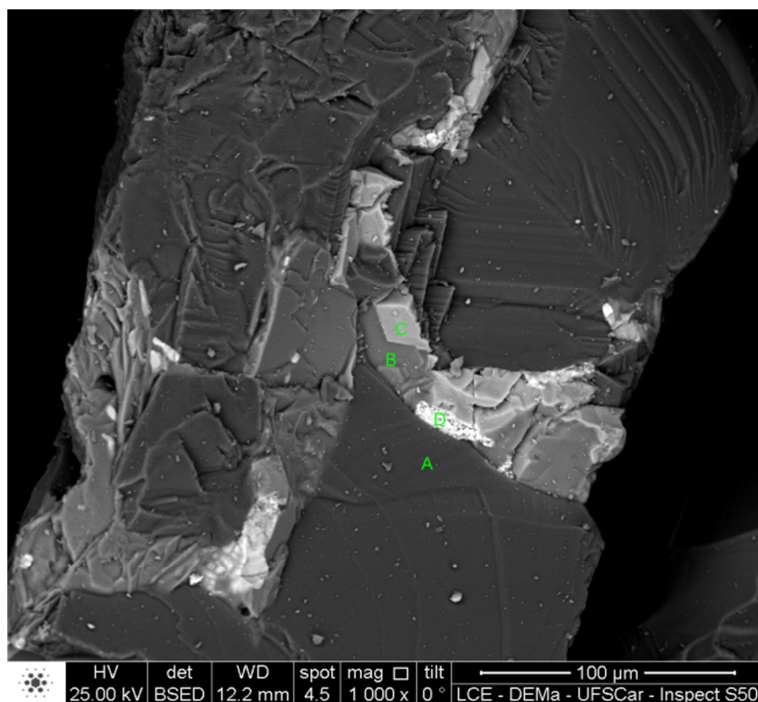


Figura 33- Microscopia eletrônica de varredura do ASF, grão P60 e sem tratamento térmico.

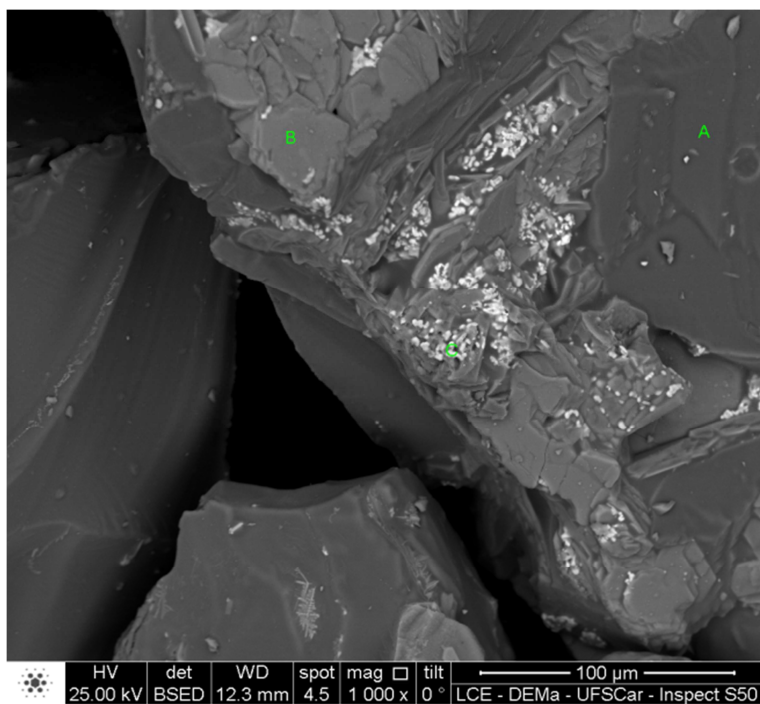


Figura 34- Microscopia eletrônica de varredura do ASF, grão P60 e após o tratamento térmico a 1250°C.

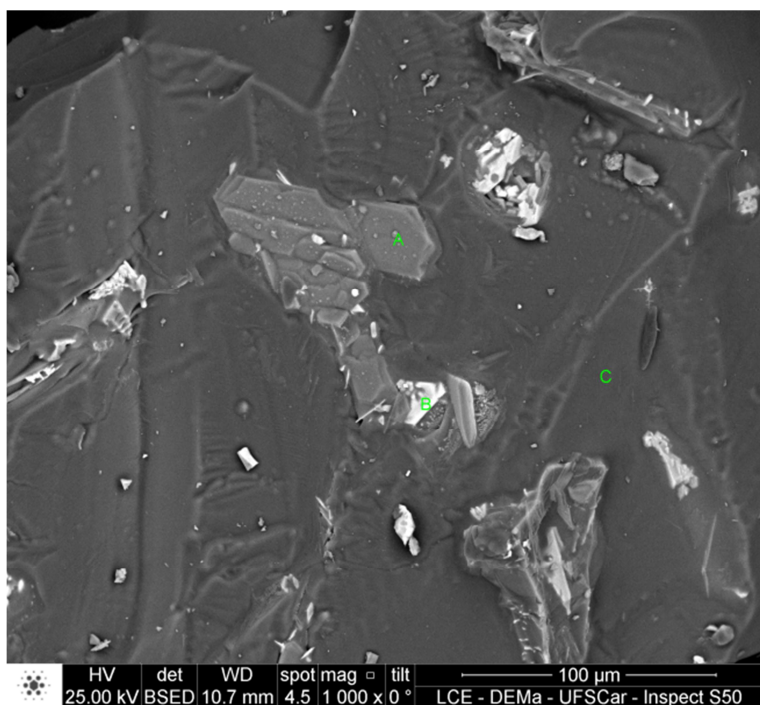


Figura 35- Microscopia eletrônica de varredura do ASF, grão P60 e após o tratamento térmico a 1400°C.

Tabela 20- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de ASF do grão P60, correspondente a Figura 33.

Elemento Químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
O	34,36	44,60	46,30	29,47
Na	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-
Al	62,46	47,76	41,93	10,12
Si	-	-	-	-
Zr	2,91	3,06	2,60	-
K	-	-	-	0,87
Ca	-	0,28	-	1,02
Ti	0,27	0,83	7,72	5,03
Ce	-	1,85	0,93	0,47
Mn	-	1,61	0,51	0,29
Fe	-	-	-	-

Tabela 21- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de ASF do grão P60 após tratamento térmico à 1250°C, correspondente a Figura 34.

Elemento Químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C
O	51,28	24,62	40,45
Na	-	-	-
Mg	-	2,76	0,87
Al	48,38	52,68	7,6
Si	-	-	-
Zr	-	5,8	46,44
K	-	0,57	0,56
Ca	-	2,90	0,28
Ti	0,34	3,55	3,46
Ce	-	6,53	0,25
Mn	-	0,59	0,09
Fe	-	-	-

Tabela 22- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de ASF do grão P60 após tratamento térmico à 1400°C, correspondente a Figura 35.

Elemento Químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C
O	18,88	34,15	41,95
Na	-	-	-
Mg	1,29	0,51	0,52
Al	51,23	5,34	55,45
Si	1,09	2,33	0,05
Zr	8,51	23,02	1,72
K	0,56	0,86	0,07
Ca	5,33	6,48	0,06
Ti	3,81	16,04	0,06
Ce	6,31	9,00	0,09
Mn	1,99	1,73	0,02
Fe	1,01	0,54	0,03

As mesmas fases presentes no ASFE apareceram no ASF para o grão P60. Esse comportamento já era esperado uma vez que as matérias-primas principais utilizadas no processo foram as mesmas. Alguns elementos como Ca, Mg, Si, Ce, Mn, Zr e Ce estão presentes em pequenas quantidades e são provenientes da bauxita utilizada no processo. Mesmo assim é evidente que os elementos Al, O e Ti são majoritários.

Assim como no ASFE, é possível analisar nas microscopias que nenhuma fase reveste os grãos, justificando a coloração azulada do ASF tratado a 1250°C na figura 31.

4.3 Óxido de Alumínio Marrom Regular, AR:

O AR, devido ao maior teor de TiO₂ em relação ao ASFE e ASF, como pode ser visto nas Tabelas 23, 24 e 25, é considerado uma outra classe de óxido de alumínio marrom. Em seu processo de eletrofusão utiliza-se como matérias-primas a bauxita, redutor, cavaco de ferro e ilmenita como fonte de TiO₂ (em quantidade muito superior ao material semi friável). Nas Tabelas 23,

24 e 25 encontram-se os resultados para as diferentes faixas granulométrica P24, P60 e P220 respectivamente. Para o cálculo do IRFN, a densidade real utilizada para o AR foi de $3,96 \text{ g/cm}^3$ [26].

Nas Figuras 36, 37 e 38 são apresentados os IRFN para os grãos de AR P24, P60 e P220.

Tabela 23- Resultados dos tratamentos térmicos do AR para o grão P24.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Regular								
Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	45,50	41,10	35,50	38,10	52,00	56,20	49,90	45,20
IRFN	0,94	0,86	0,74	0,79	1,11	1,21	1,07	1,02
Densidade Bulk (g/cm^3)	1,93	1,88	1,90	1,90	1,86	1,84	1,84	1,75
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/Branco	Azul/Branco

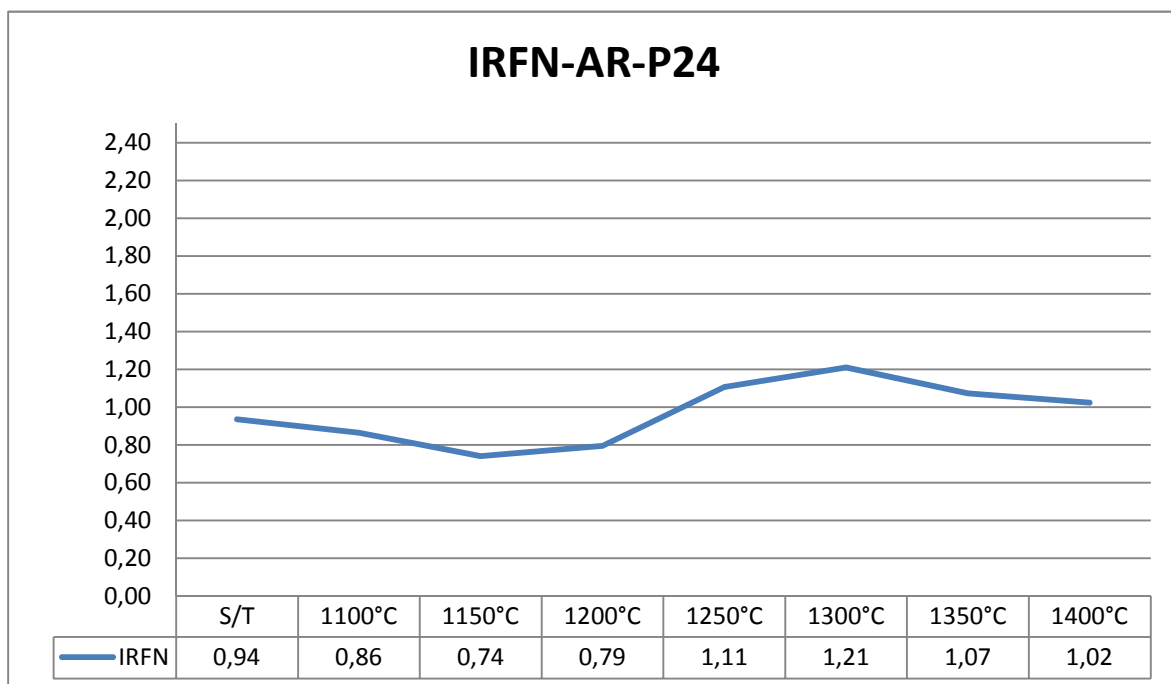


Figura 36 - IRFN para o AR P24 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Tabela 24- Resultados dos tratamentos térmicos do AR para o grão P60.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Regular								
Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	59,40	65,40	61,40	65,80	75,60	86,10	61,50	60,90
IRFN	1,31	1,46	1,35	1,55	1,78	2,07	1,47	1,46
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,79	1,77	1,80	1,68	1,69	1,65	1,66	1,65
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom/Azul	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

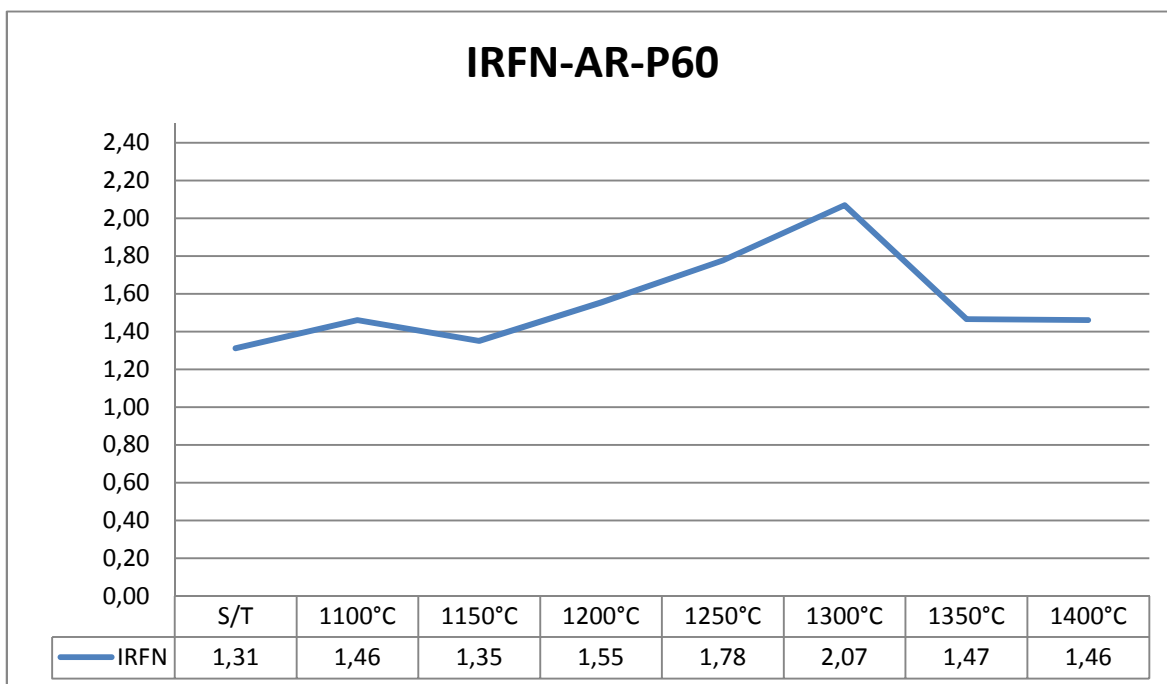


Figura 37 - IRFN para o AR P60 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Tabela 25- Resultados dos tratamentos térmicos do AR para o grão P220.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Regular								
Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
IRF (%)	83,70	84,10	84,30	84,50	85,50	86,00	83,30	
IRFN	1,97	2,08	2,00	2,27	2,32	2,34	2,16	
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,68	1,60	1,67	1,48	1,46	1,45	1,52	
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

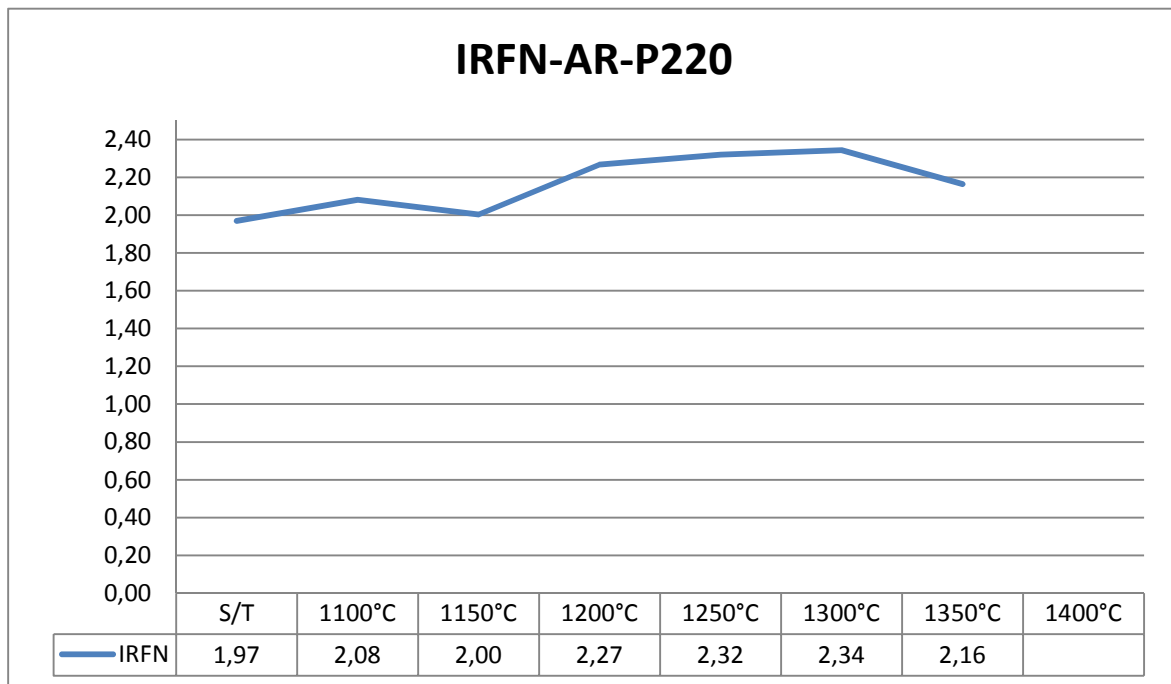


Figura 38 - IRFN para o AR P220 à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta.

Assim como ocorreu com o ASFE e ASF, nas tabelas 23, 24 e 25 e nas Figuras 36, 37 e 38 é observado que o IRFN aumenta até um nível de temperatura e depois diminui.

Para facilitar uma comparação do IRFN entre os três diferentes tipos de óxidos de alumínio marrom avaliados até este ponto do trabalho, nas Figuras 39, 40 e 41 é possível comparar o IRFN para as granulometrias P24, P60 e P220, respectivamente.

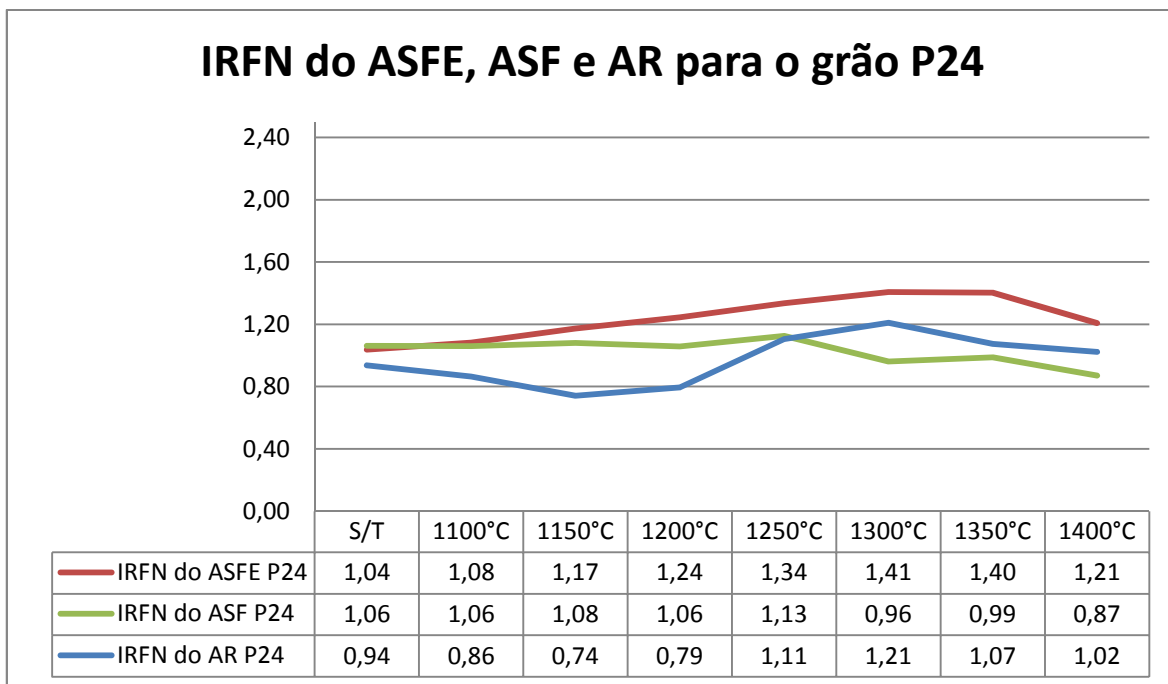


Figura 39 - Comparação do IRFN dos óxidos de alumínio marrons ASFE, ASF e AR para o grão P24.

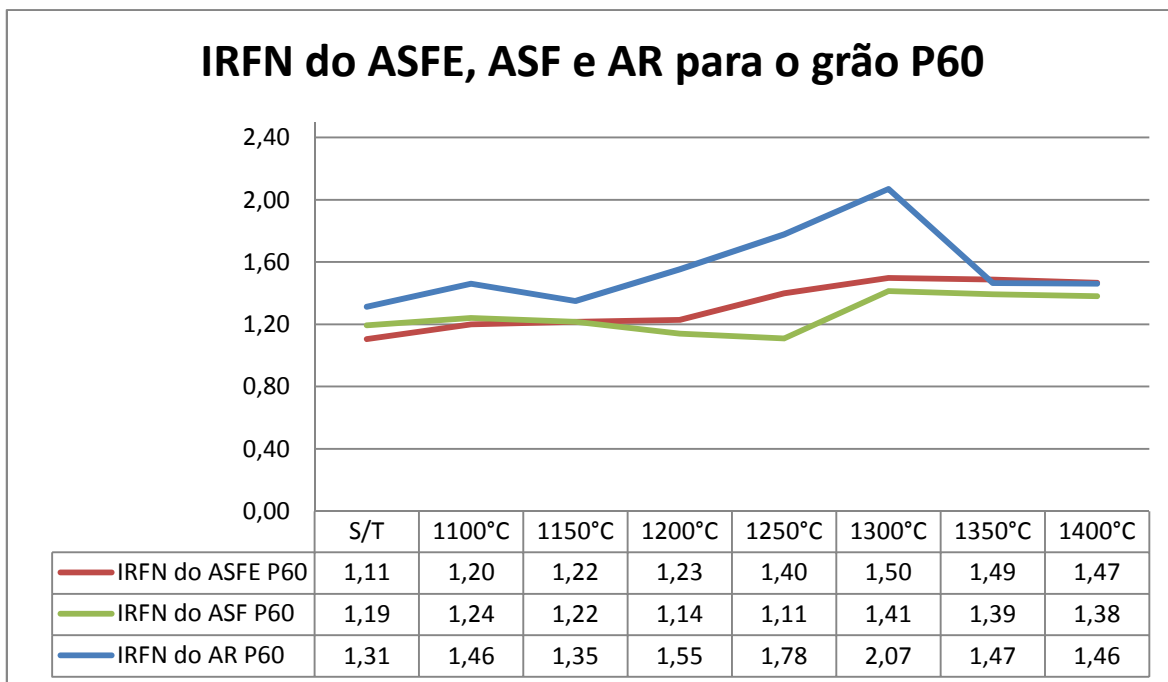


Figura 40-Comparação do IRFN dos óxidos de alumínio marrons ASFE, ASF e AR para o grão P60.

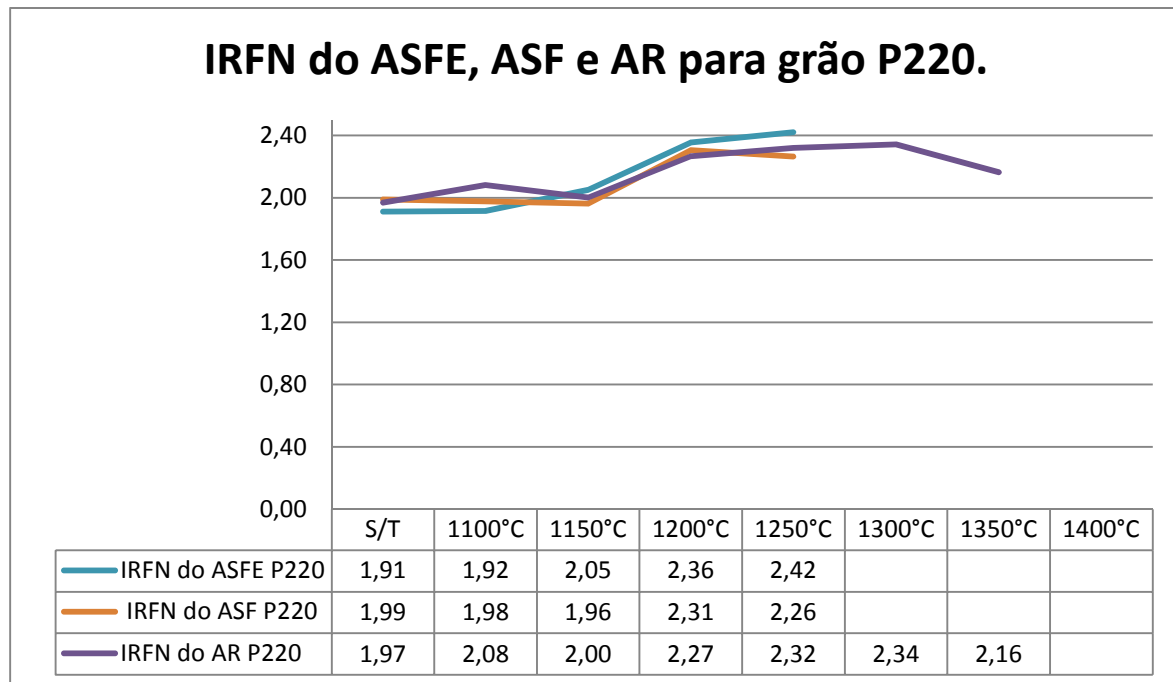


Figura 41-Comparação do IRFN dos óxidos de alumínio marrons ASFE, ASF e AR para o grão P220.

Ao se analisar as Figuras 39, 40 e 41, observa-se que o valor do IRFN aumenta a medida que a granulometria do material diminui. O ASFE apresenta os melhores valores de IRFN quando comparado ao ASF. Essa diferença entre os dois óxidos de alumínio semi friáveis, além do teor de TiO_2 , está também em algumas matérias-primas diferentes utilizadas durante o processo de eletrofusão. Essa diferença não pode ser revelada nesse trabalho por se tratar de segredo tecnológico da Elfusa. Pelo teor de TiO_2 mais elevado presente no AR, era esperado que o IRFN para esse material fosse mais elevado em relação aos semi friáveis. Esse comportamento, relacionado ao teor de TiO_2 , não foi observado para o grão P24, como é observado na Figura 39. Uma vez que o IRFN está relacionado com a densidade aparente do grão e como não é possível realizar o controle do tipo de fratura que ocorre nos óxidos de alumínio marrom, a presença de partículas mais arredondadas, inerentes do processo de moagem, podem ser as responsáveis por esse valor. E quanto maior o tamanho de partícula, maior a influência da morfologia do grão na densidade *bulk* do material e conseqüentemente no IRFN.

Assim como foi realizado para os óxidos de alumínio semi friáveis, um comparativo da coloração para o AR foi revelada na Figura 42, em que é possível avaliar a diferença da coloração do material, em relação ao material sem tratamento térmico, após os tratamentos térmicos.

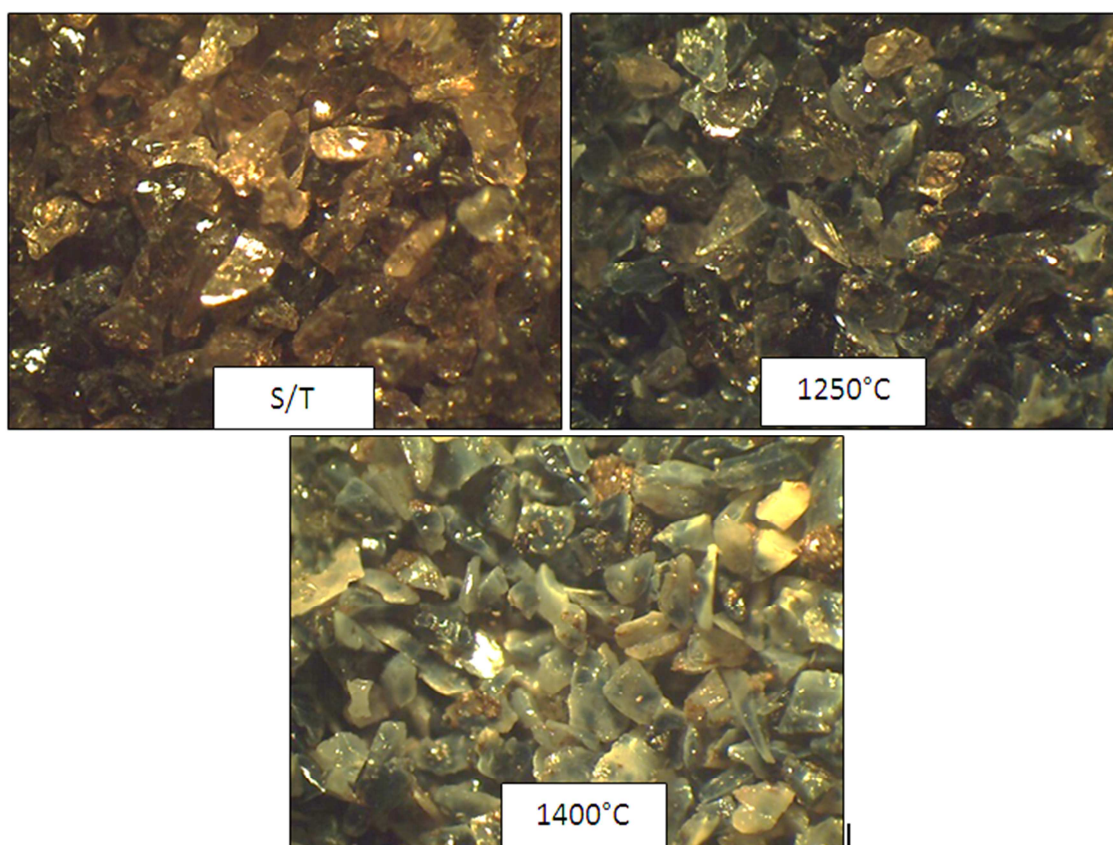


Figura 42- Imagens ópticas do AR, grão P60: S/T-sem tratamento térmico, tratado à 1250°C e tratado à 1400°C.

Analisando as imagens da Figura 42 é observado que os grãos de AR 1250°C adquirem uma coloração azul. Contudo, é observado um azul mais intenso comparado ao ASFE e ASF. Outra característica interessante é a coloração do material tratado a 1400°C. Ao contrário do que ocorreu nos casos dos semi friáveis, que apresentaram uma coloração branca à 1400°C, uma coloração cinza tendendo ao branco é adquirida pelo AR.

Também para as amostras de AR, o grupo de amostras com a distribuição granulométrica P60 foi utilizado como representativo para as análises por difração de raios X, como pode ser visto na Figura 43.

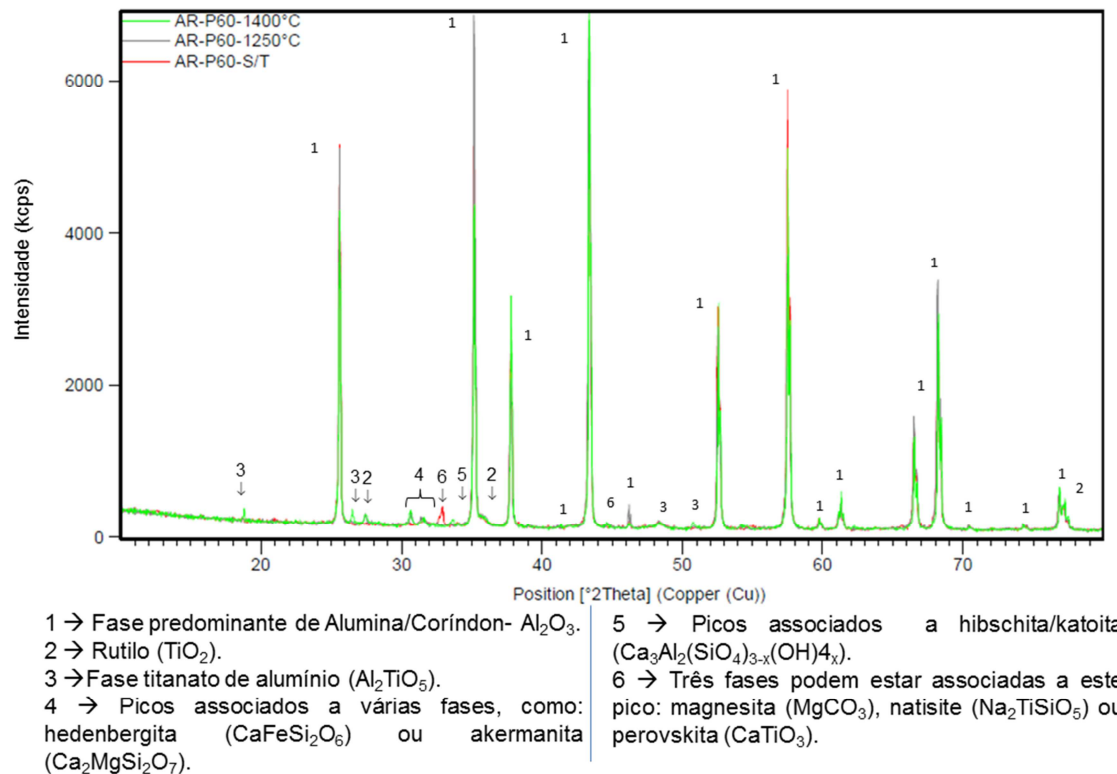


Figura 43- Difratoograma de raios X das amostras de AR, sem tratamento térmico, tratada à 1250°C e tratada à 1400°C.

No AR a especificação do teor de titânia é superior em relação ao teor do mesmo óxido encontrado na bauxita, diferente do ASFE e ASF em que a especificação do teor de titânia é inferior ao encontrado no minério. Dessa forma, para que a percentagem de titânia no AR atinja a especificação desejada, o processo de carboredução das impurezas SiO_2 e Fe_2O_3 é menor durante o processo de eletrofusão. Assim, a medida que o tratamento térmico evolui para temperaturas mais altas os picos das fases minoritárias (Figura 43) são mais intensos, facilitando a identificação das fases para o caso do AR. A principal fase a se destacar é a intensificação do rutilo à medida que a temperatura do tratamento térmico é aumentada. As fases $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ ou

$\text{Ca}_2\text{MgSiO}_7$ também apresentam uma intensificação enquanto as fases MgCO_3 , $\text{Na}_2\text{TiSiO}_3$ ou CaTiO_3 acabam diminuindo de intensidade a medida que a temperatura do tratamento térmico é aumentada. Para o AR tratado a 1400°C , é possível observar nitidamente a formação da fase de titanato de alumínio, que não foi possível detectar com grande clareza nos óxidos semi friáveis (o pico em $2\theta=19^\circ$ na Figura 43 que não foi possível identificar nos óxidos semi friáveis, no óxido de alumínio marrom regular foi possível na amostra trata a 1400°C).

As Figuras 44, 45 e 46 mostram uma sequência de imagens do AR nas condições S/T, tratado a 1250°C e tratado a 1400°C , respectivamente. Nas Tabelas 26, 27 e 28 é possível avaliar os elementos químicos presentes em diversos pontos das microscopias apresentadas respectivamente nas Figuras 44, 45 e 46.

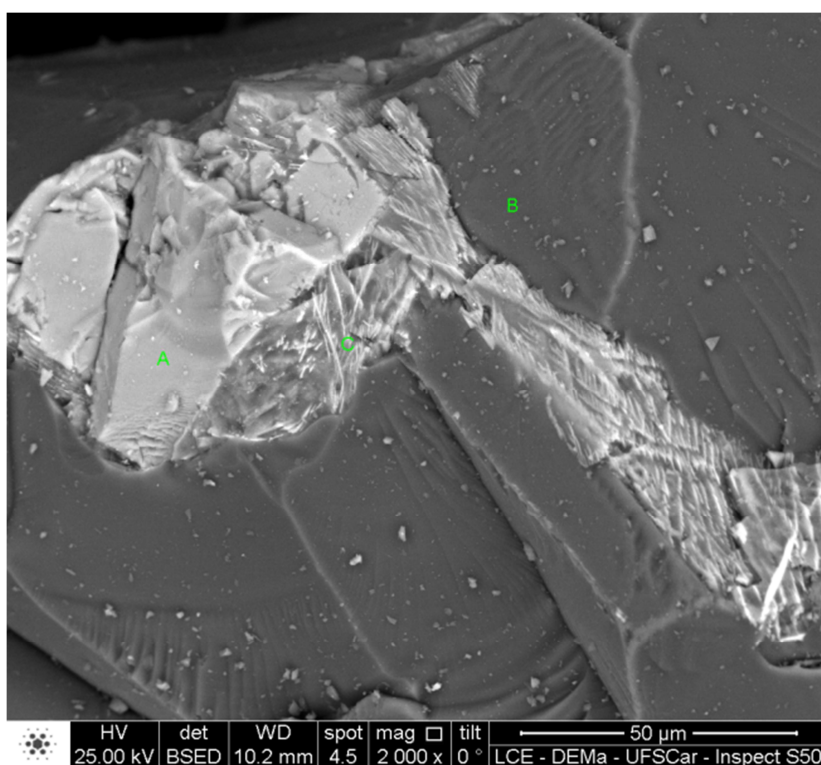


Figura 44- Microscopia eletrônica de varredura do AR, grão P60 e sem tratamento térmico.

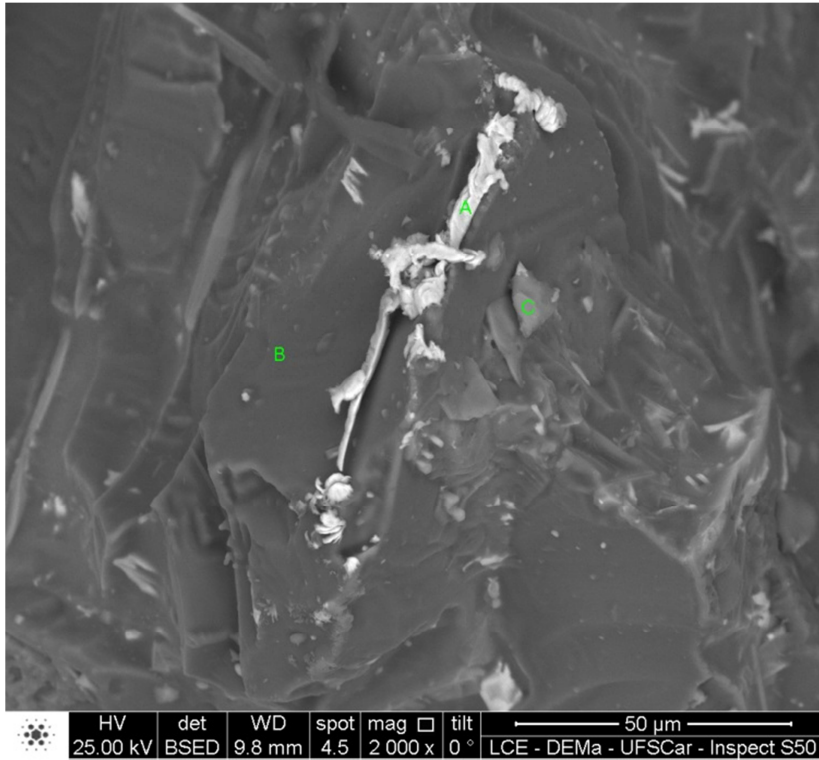


Figura 45- Microscopia eletrônica de varredura do AR, grão P60 e após o tratamento térmico a 1250°C.

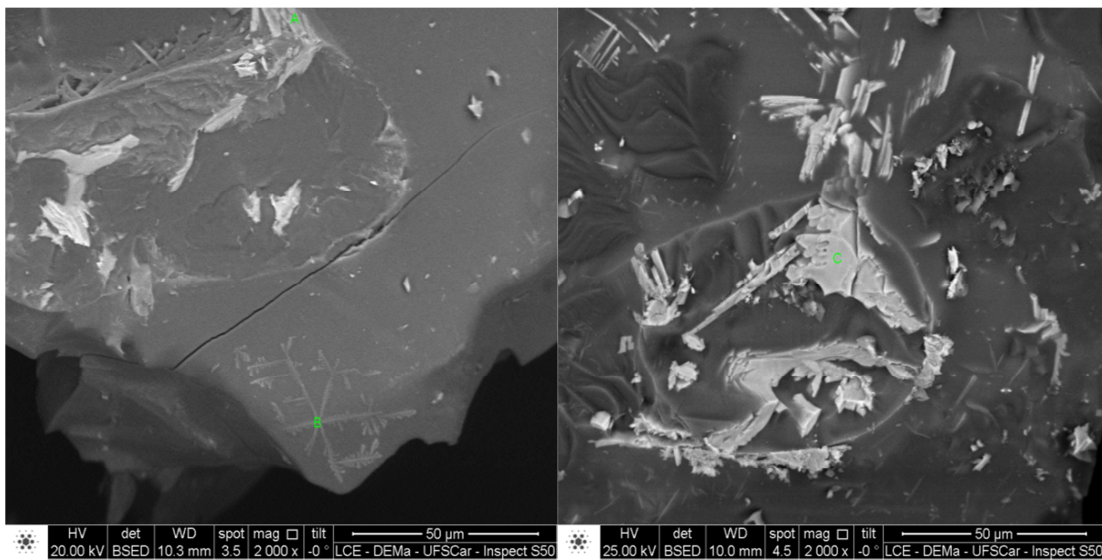


Figura 46- Microscopias eletrônica de varredura do AR, grão P220 e após o tratamento térmico a 1250°C. Regiões distintas do mesmo grão.

Tabela 26- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de AR do grão P60 sem tratamento térmico, correspondente a Figura 44.

Elemento químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C
O	44,59	43,71	46,61
Na	-	-	-
Mg	0,63	0,56	1,35
Al	21,71	54,57	15,95
Si	0,74	0,05	26,77
Zr	15,78	0,40	1,36
K	0,16	0,09	1,65
Ca	0,26	0,05	4,14
Ti	15,70	0,51	1,14
Ce	-	-	-
Mn	0,37	0,04	0,93
Fe	0,07	0,03	0,11

Tabela 27- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de AR do grão P60 após tratamento térmico à 1250°C, correspondente a Figura 45.

Elemento químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C
O	13,90	52,08	50,05
Na	-	-	0,92
Mg	-	0,51	1,34
Al	25,66	44,36	25,24
Si	1,88	1,74	18,44
Zr	-	-	-
K	-	-	1,07
Ca	-	0,02	1,65
Ti	0,36	1,08	1,19
Ce	-	-	-
Mn	-	-	-
Fe	58,21	0,21	0,10

Tabela 28- Quantificação dos elementos químicos em diferentes regiões da amostra de AR do grão P60 após tratamento térmico à 1400°C, correspondente a Figura 46.

Elemento químico (% massa)	Ponto A	Ponto B	Ponto C
O	39,04	41,59	43,92
Na	-	-	-
Mg	-	-	1,23
Al	19,79	52,95	4,06
Si	5,18	4,33	0,78
Zr	12,56	-	27,98
K	-	-	-
Ca	2,51	0,34	3,16
Ti	10,58	0,63	10,68
Ce	7,69	-	6,76
Mn	2,32	0,16	1,43
Fe	0,34	-	-

Ao se comparar as imagens de MEV dos óxidos de alumínio marrom ASFE, ASF e AR nenhuma aparente mudança característica é perceptível. Contudo ao analisarmos os resultados de EDS, é possível identificar a presença do elemento Fe mesmo na matriz de alumina (ponto B nas Figuras 44 e 45). O elemento Fe está presente na bauxita na forma de óxido e no cavaco de ferro utilizado para corrigir o teor magnético da liga de Fe-Si após a redução do Fe_2O_3 e SiO_2 . Como no AR a redução carbotérmica é menos acentuada em relação aos semi friáveis (ASFE e ASF), pois é necessário manter o teor de TiO_2 elevado, conseqüentemente a presença do elemento Fe é aceitável em solução sólida na alumina. É oportuno destacar que AR apresentou uma tonalidade de azul mais escuro em relação aos semi friáveis, inclusive na amostra tratada à 1400°C, como pode ser visto nas Figuras 23, 31 e 42. Novamente, não foi possível detectar a presença de uma fase contínua sobre a superfície dos grãos do AR, indicando alguma fase diferente que justificasse a mudança de coloração do material em função da temperatura do tratamento térmico.

4.4. Comparação entre os resultados parciais dos óxidos de alumínio marrom semi friáveis (ASF e ASFE) e o óxido de alumínio marrom regular (AR).

Nessa etapa do trabalho foi possível a análise da diferença de coloração do material, relacionado com a composição química dos óxidos de alumínio marrom e a temperatura de tratamento térmico para um mesmo tempo de tratamento (14 horas). Fica evidente nos três tipos de materiais que o IRF aumenta a medida que o material é tratado termicamente. Contudo, para cada granulometria e classe de amostra (ASF, ASFE e AR) uma temperatura ideal é necessária para atingir a friabilidade e a coloração azul otimizadas e exigidas pelo mercado de abrasivos. A coloração branca das amostras é observada no caso do ASFE e ASF à medida que a temperatura de tratamento térmico ideal é ultrapassada (Figuras 23 e 31). Fica também evidente que em elevadas temperaturas (a partir de 1350°C), os materiais começam apresentar uma redução do IRFN (Tabelas 11, 12, 13, 17, 18, 19, 23, 24 e 25).

No AR é observado o mesmo comportamento em relação à coloração e à friabilidade apresentado pelos óxidos de alumínio semi friáveis. Contudo, em altas temperaturas (a partir de 1350°C) o material ao invés de apresentar uma coloração predominantemente branca, o mesmo apresenta uma coloração cinza (Figura 42).

Com auxílio da difração de raios X foi possível verificar que algumas fases se formam a medida que o tratamento térmico é realizado. Contudo, as intensidades de seus picos são relativamente baixas, o que dificulta uma quantificação precisa. No AR (Figura 43) é mais visível essa mudança, uma vez que o teor de TiO_2 e de impurezas é mais elevado em relação aos ao ASFE (Figura 24) e ASF (Figura 32). Não foi possível com o auxílio da difração de raios X, MEV e EDS comprovar que a fase titanato de alumínio contribui para a coloração azul dos óxidos de alumínio marrom “*blue fired*”.

Por outro lado, ao se analisar os difratogramas do ASFE (Figura 24) e ASF (Figura 32) é possível notar que a fase titanato de alumínio não é

aparentemente identificada. Nesse contexto realizaram-se alguns outros experimentos a fim de se identificar outras possíveis causas para a mudança de coloração das amostras devido aos tratamentos térmicos. Essas experiências serão abordadas no decorrer desse trabalho.

4.5 Influências do tempo de tratamento térmico na produção dos óxidos de alumínio marrons “*blue fired*”.

Além da temperatura de tratamento térmico, a variável tempo é de suma importância para a linha de produção dos óxidos de alumínio marrons “*blue fired*”. Após a primeira etapa deste trabalho que foi definir a melhor temperatura de tratamento térmico para a produção de óxidos de alumínio marrons “*blue fired*” o passo seguinte foi realizar os testes variando o tempo de tratamento. Uma vez que na primeira etapa do trabalho os tratamentos foram realizados durante 14 horas após atingir a temperatura desejada, decidiu-se avaliar os experimentos utilizando tempos de tratamento de 7 e 21 horas. Os resultados encontram-se nas Tabelas 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37, para os mesmos três tipos de material. Em cada caso, empregou-se a melhor temperatura para o processo, avaliando-se a coloração azulada e o maior IRFN, avaliados nas seções 4.1, 4.2 e 4.3.

As Figuras de 47 a 55 mostram o correspondente comportamento do IRFN.

Tabela 29- Análise físico-química do ASFE grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial - 1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	46,80	54,90	58,90	55,70
IRFN	1,04	1,19	1,34	1,22
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,81	1,86	1,77	1,83
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul/Branco

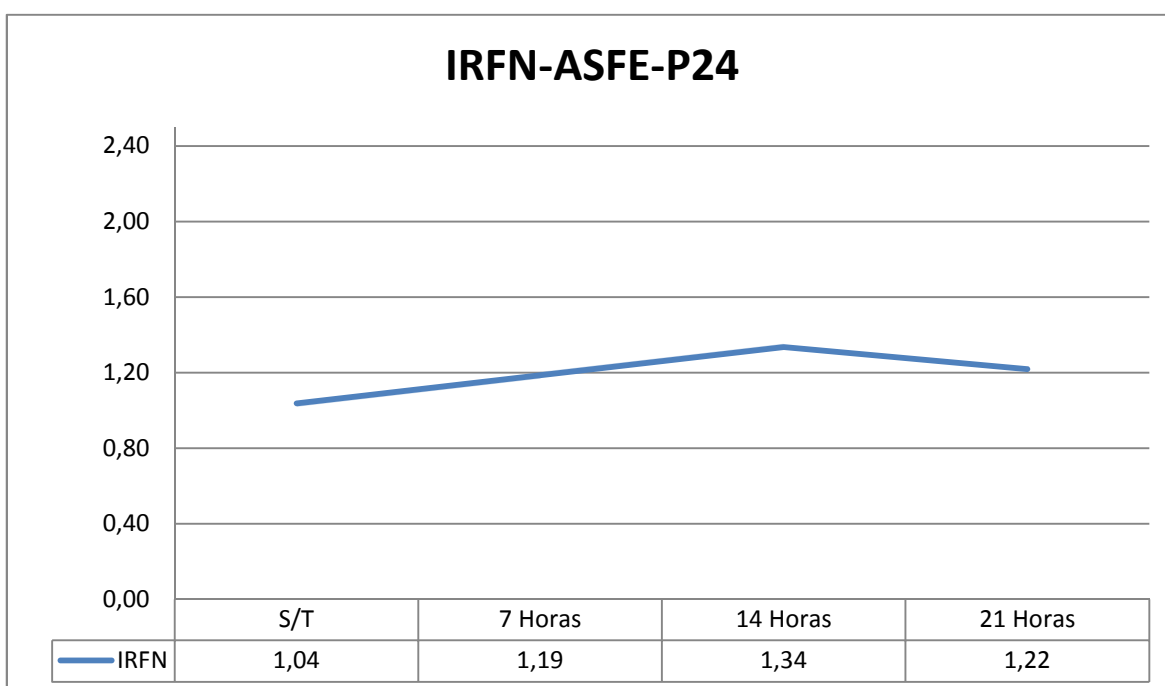


Figura 47-IRFN para o ASFE grão P24 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 30- Análise físico-química do ASFE grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial-1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	50,10	59,30	59,8	50,20
IRFN	1,11	1,39	1,40	1,16
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,71	1,72	1,74
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul/Branco

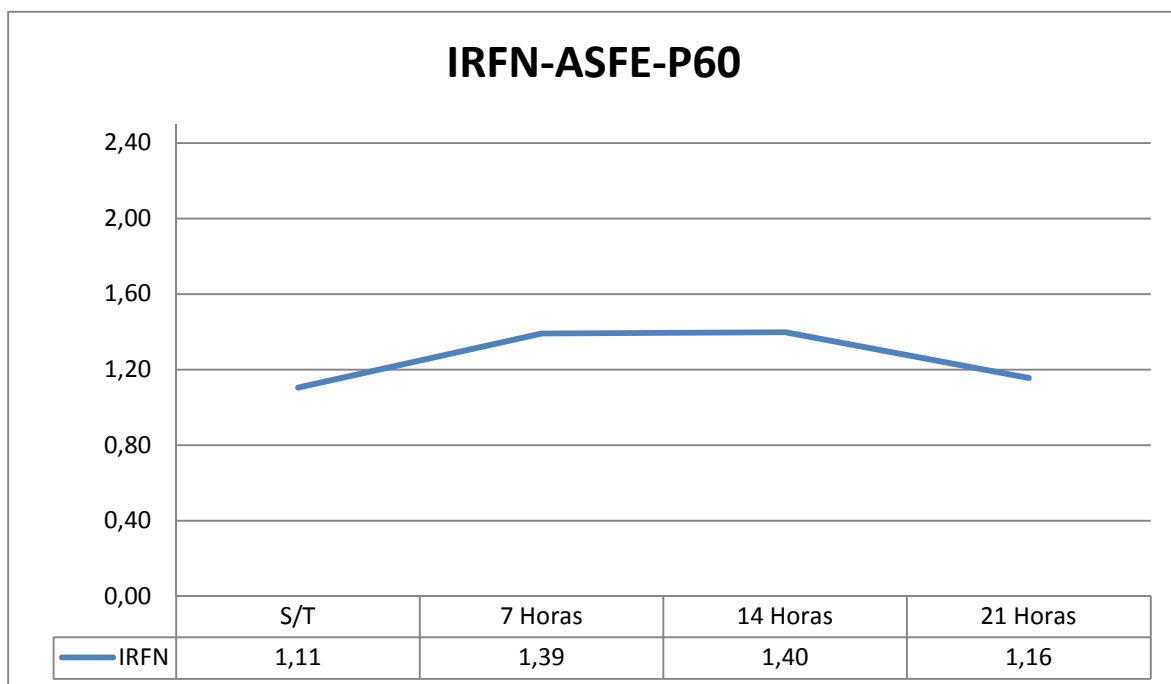


Figura 48 - IRFN para o ASFE grão P60 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 31- Análise físico-química do ASFE grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial-1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	72,80	80,10	85,80	79,20
IRFN	1,91	2,36	2,45	2,37
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,53	1,36	1,41	1,34
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul/Branco

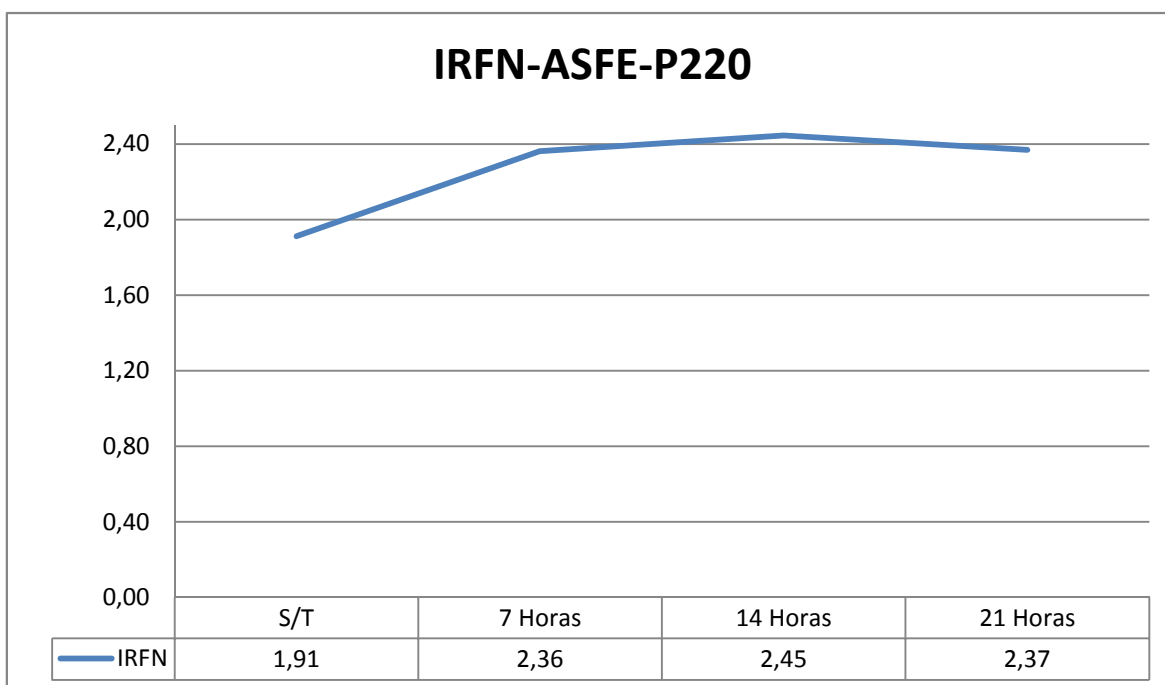


Figura 49 - IRFN para o ASFE grão P220 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 32- Análise físico-química do ASF grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi Friável - 1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	50,10	52,70	53,40	49,30
IRFN	1,06	1,12	1,13	1,05
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,87	1,86	1,87	1,85
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul

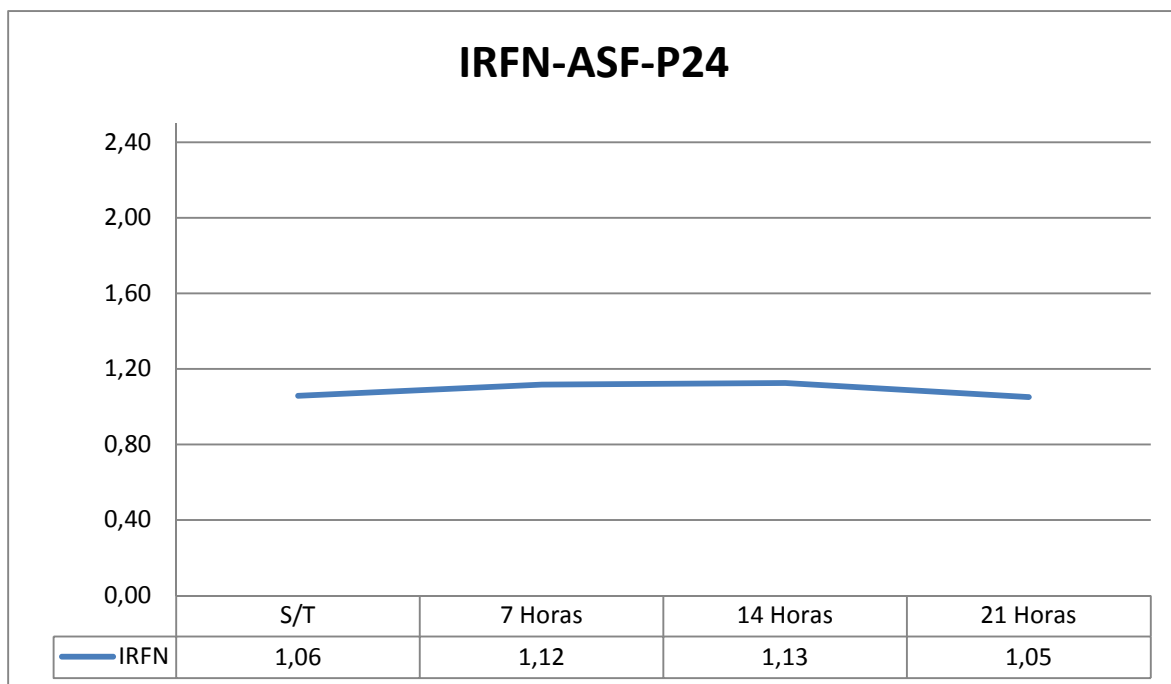


Figura 50 - IRFN para o ASF grão P24 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 33- Análise físico-química do ASF grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi Friável - 1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	55,10	69,30	62,00	59,60
IRFN	1,19	1,55	1,41	1,33
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,76	1,73	1,76
Cor	Marrom	Azul/Branco	Azul/Branco	Azul/Branco

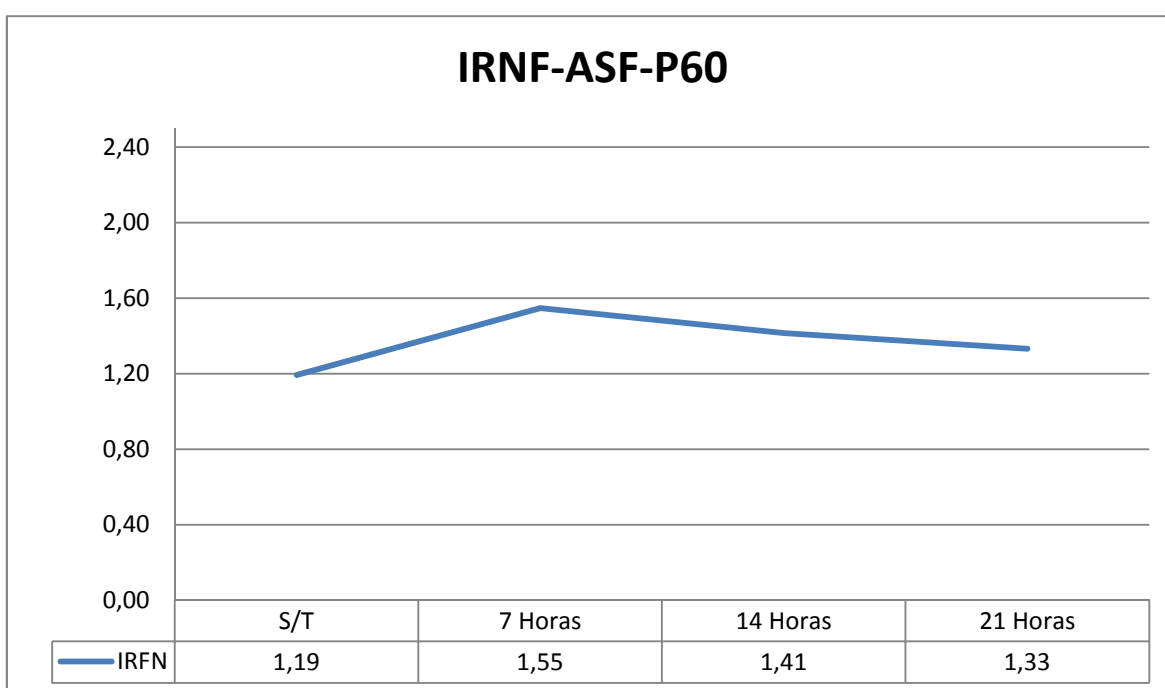


Figura 51 - IRFN para o ASF grão P60 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 34- Análise físico-química do ASF grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P220 -Óxido de Alumínio Semi Friável - 1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	77,60	81,40	82,50	79,00
IRFN	1,99	2,23	2,29	2,18
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,54	1,44	1,42	1,43
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul

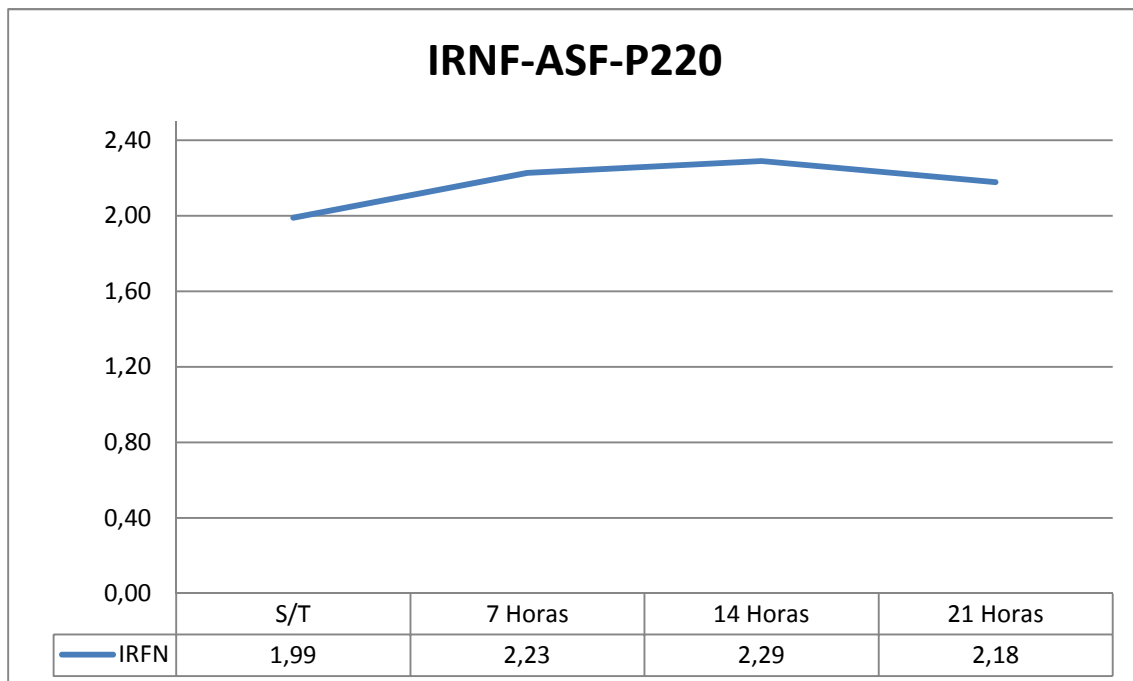


Figura 52 - IRFN para o ASF grão P220 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 35- Análise físico-química do AR grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1300°C.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Regular - 1300°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	45,50	49,30	52,00	52,30
IRFN	0,94	1,05	1,12	1,11
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,93	1,87	1,84	1,86
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul

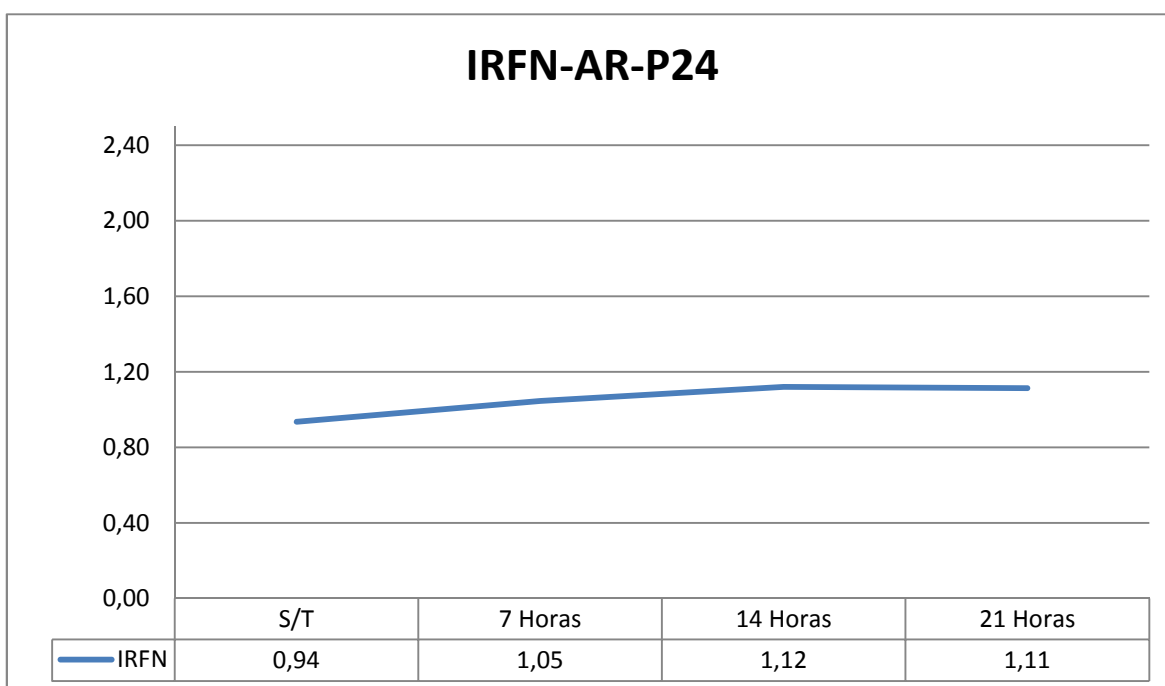


Figura 53 - IRFN para o AR grão P24 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 36- Análise físico-química do AR grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Regular - 1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	59,40	63,90	75,60	63,00
IRFN	1,31	1,49	1,78	1,46
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,79	1,70	1,69	1,71
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul/Branco

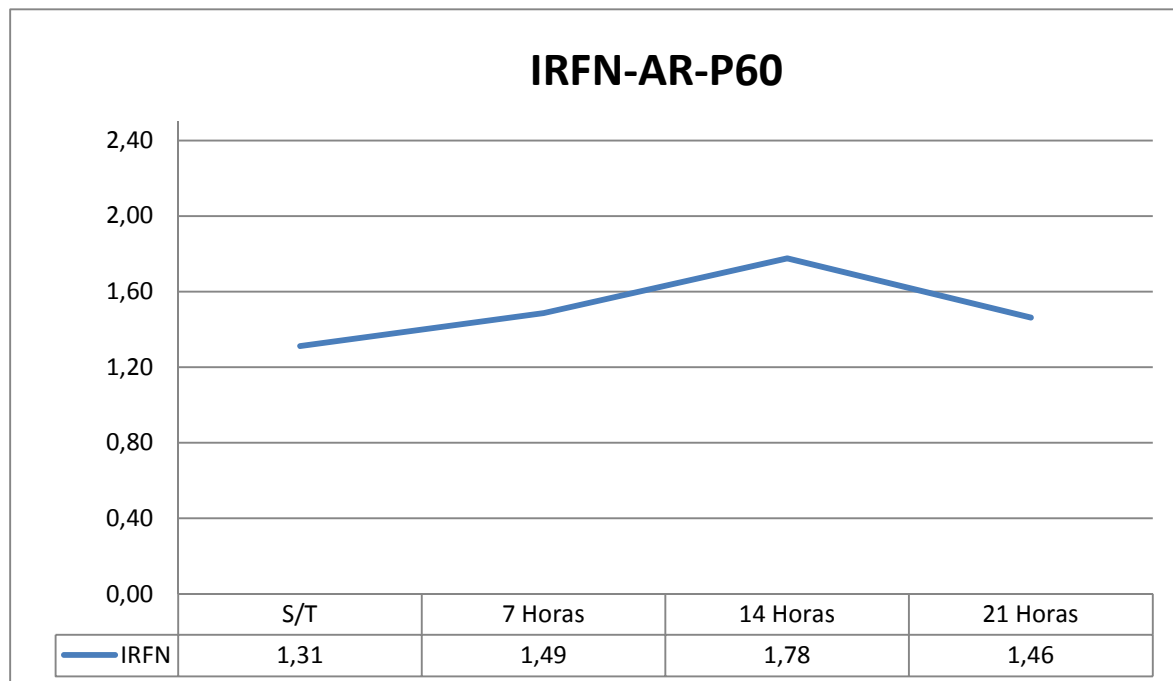


Figura 54-IRFN para o AR grão P60 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Tabela 37- Análise físico-química do AR grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico -1250°C.

Grão 220 - Óxido de Alumínio Regular - 1250°C				
Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
IRF (%)	83,7	93,3	84,5	84,9
IRFN	1,97	2,62	2,28	2,38
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,68	1,41	1,47	1,41
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul/Branco

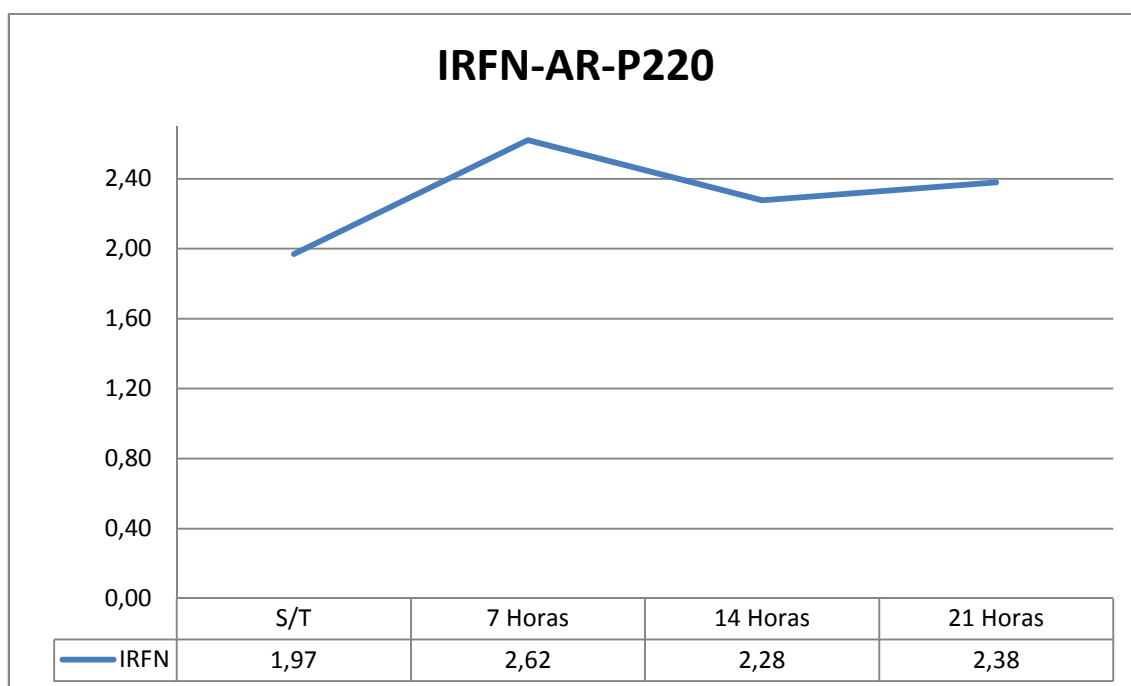


Figura 55 - IRFN para o AR grão P220 à medida que o tempo de tratamento térmico é aumentado.

Analisando-se as tabelas de 29 à 37 e as Figuras de 47 a 55 fica evidente que é necessário um tempo mínimo para que o material adquira as propriedades físico-químicas exigidas pelo mercado para os óxidos de alumínio “blue fired” AR e ASFE. O ASF apresenta um comportamento atípico, pois devido à baixa quantidade de titânia, a cor azul característica aparece somente nas faixas granulométricas P24 e P220. Para efeito de processo, o tempo de tratamento de 14 horas ficou estabelecido para as próximas etapas deste trabalho. Porém, verifica-se a cor azul para apenas 7 horas de tratamento térmico a 1250°C no AR, o que resulta em uma redução no tempo de

tratamento térmico do material, reduzindo assim os custos de produção. Isso será estudado em detalhe em trabalhos futuros.

4.6 Influência da atmosfera de tratamento térmico durante a produção dos óxidos de alumínio marrom “*blue fired*”.

Além da temperatura e do tempo de tratamento térmico, outra variável analisada foi a atmosfera utilizada durante o processo de tratamento térmico. Embora esse tipo de tratamento seja viável somente em escala laboratorial, uma vez que o custo inviabilizaria a produção em escala industrial, os resultados encontrados são importantes para que se possa concluir o que ocorre durante o processo de produção do óxido de alumínio marrom “*blue fired*”. Nos resultados que se seguem, as amostras são comparadas em relação ao material sem tratamento térmico. As amostras foram tratadas em fornos com ar atmosférico, além de amostras encapsuladas em tubo de quartzo contendo argônio para garantir a menor presença possível de oxigênio dentro das cápsulas (Figura 56).

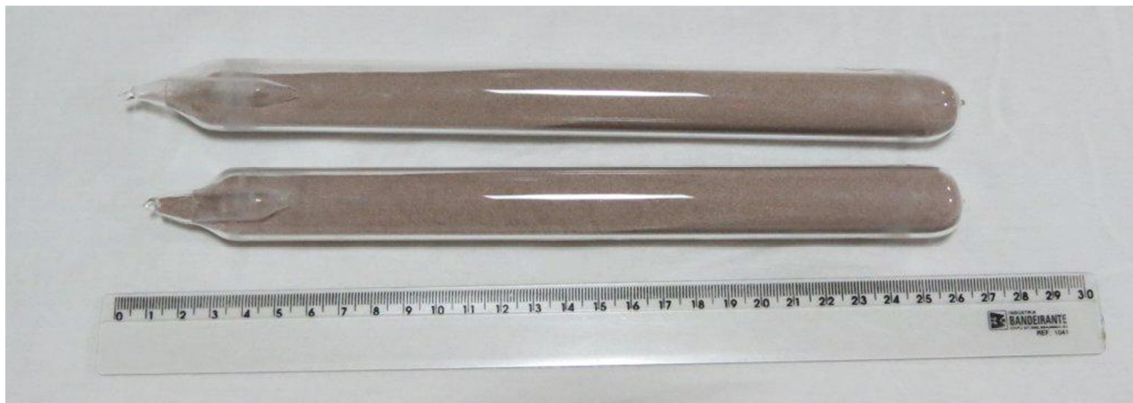


Figura 56- Imagem ilustrativa das amostras encapsuladas em tubos de quartzo com argônio para a realização do tratamento térmico, evitando-se a presença de oxigênio.

Nas tabelas de 38 a 46 é possível avaliar os resultados comparativos dos três óxidos de alumínio marrom tratados em diferentes atmosferas. Nas Figuras 57 à 65 seguem as comparações para o IRFN.

Tabela 38- Análise físico-química das amostras de ASFE sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial - 1250°C / 14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	46,80	58,90	48,10
IRFN	1,04	1,34	1,04
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,81	1,77	1,85
Cor	Marrom	Azul	Marrom

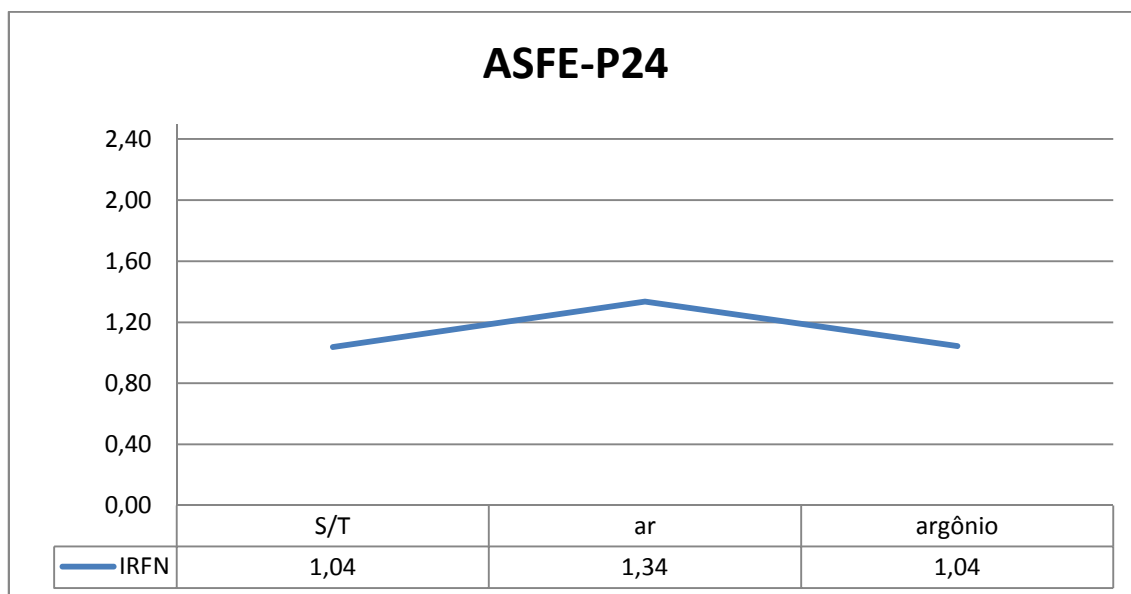


Figura 57 - IRFN para o ASFE em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P24.

Tabela 39- Análise físico-química das amostras de ASFE sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial - 1250°C/14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	50,1	59,8	52,30
IRFN	1,11	1,40	1,19
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,72	1,77
Cor	Marrom	Azul	Marrom

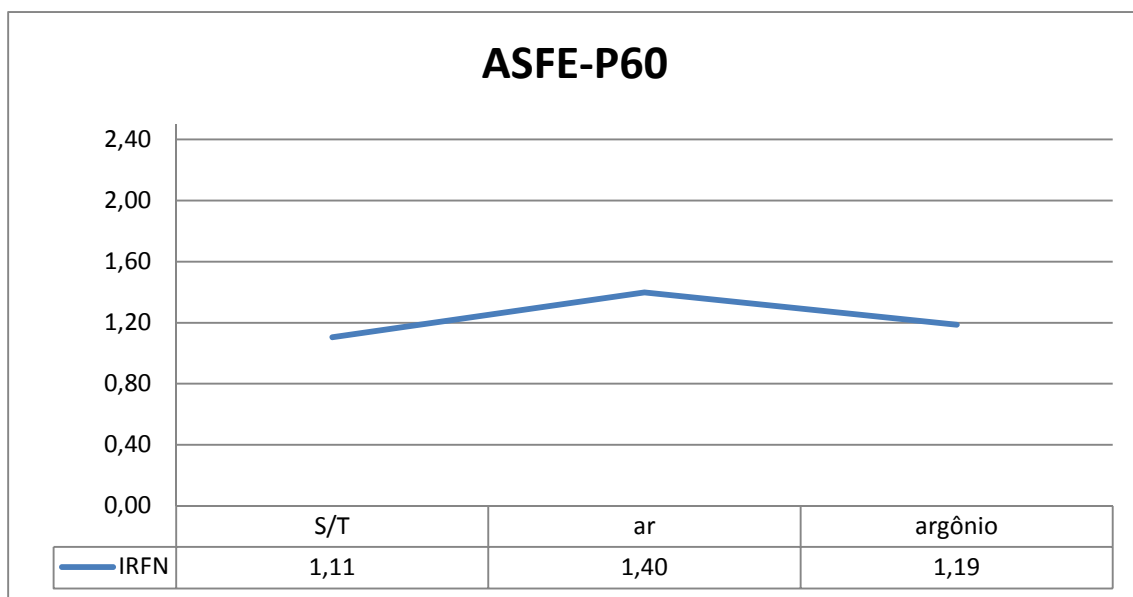


Figura 58-IRFN para o ASFE em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.

Tabela 40- Análise físico-química das amostras de ASFE sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P220 -Óxido de Alumínio Semi Friável Especial - 1250°C/14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	72,80	85,80	73,10
IRFN	1,91	2,42	1,97
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,53	1,42	1,49
Cor	Marrom	Azul	Marrom

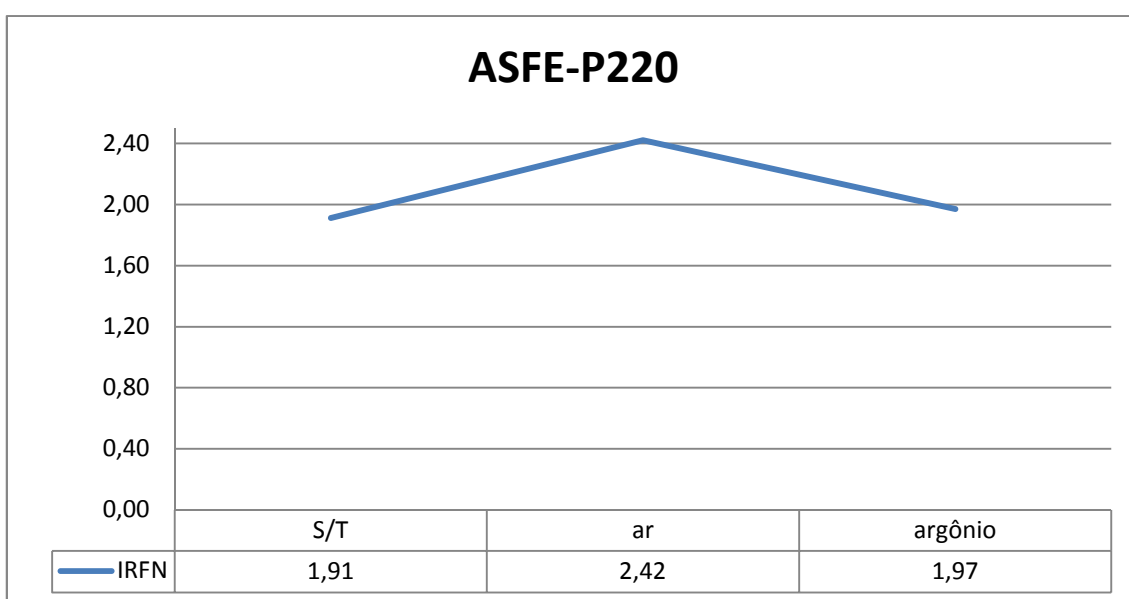


Figura 59 - IRFN para o ASFE em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P220.

Tabela 41- Análise físico-química das amostras de ASF sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi-Friável - 1250°C / 14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	50,1	53,40	51,4
IRFN	1,06	1,13	1,09
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,87	1,87	1,86
Cor	Marrom	Azul	Marrom

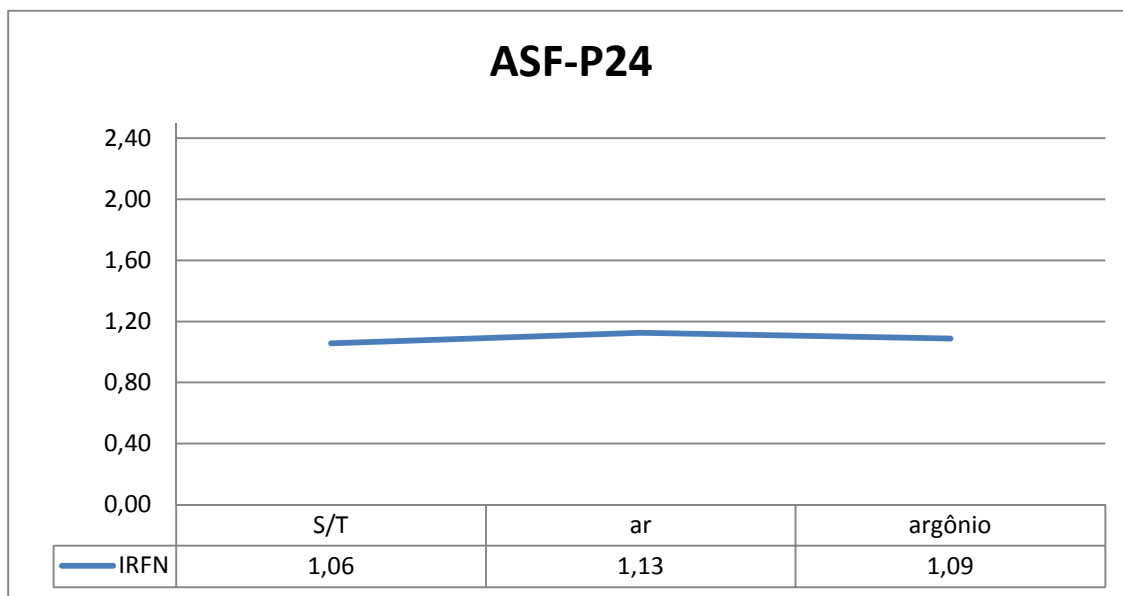


Figura 60 - IRFN para o ASF em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P24

Tabela 42- Análise físico-química das amostras de ASF sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi-Friável - 1250°C / 14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	55,1	62	56,7
IFRN	1,19	1,41	1,29
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,727	1,729
Cor	Marrom	Azul/Branco	Marrom

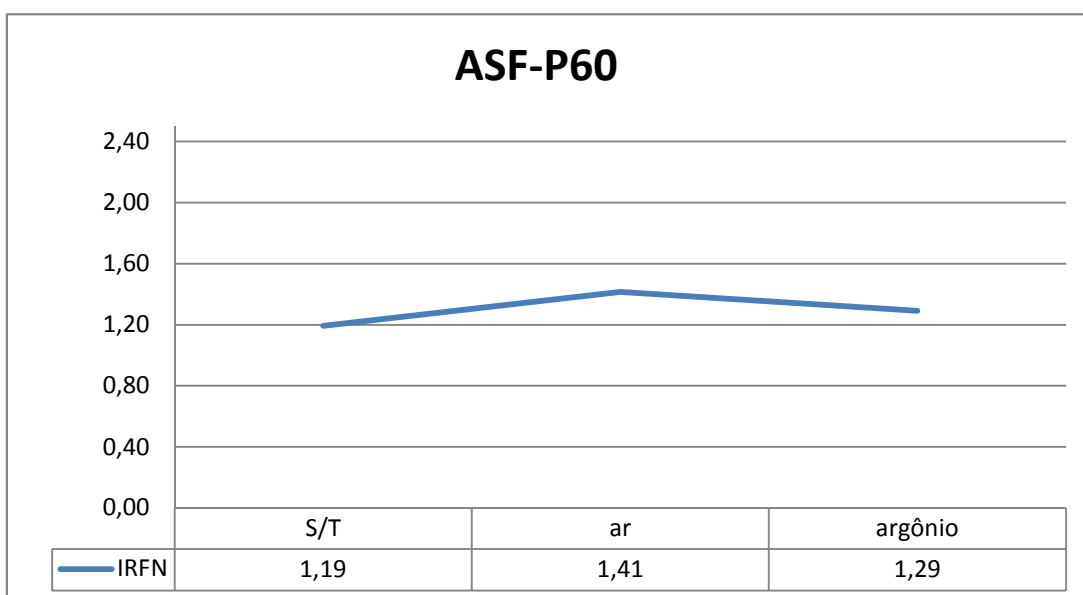


Figura 61 - IFRN para o ASF em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.

Tabela 43- Análise físico-química das amostras de ASF sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Semi-Friável - 1200°C / 14 Horas			
IRF (%)	77,60	82,50	78,50
IRFN	1,99	2,30	2,07
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,54	1,42	1,50
Cor	Marrom	Azul	Marrom

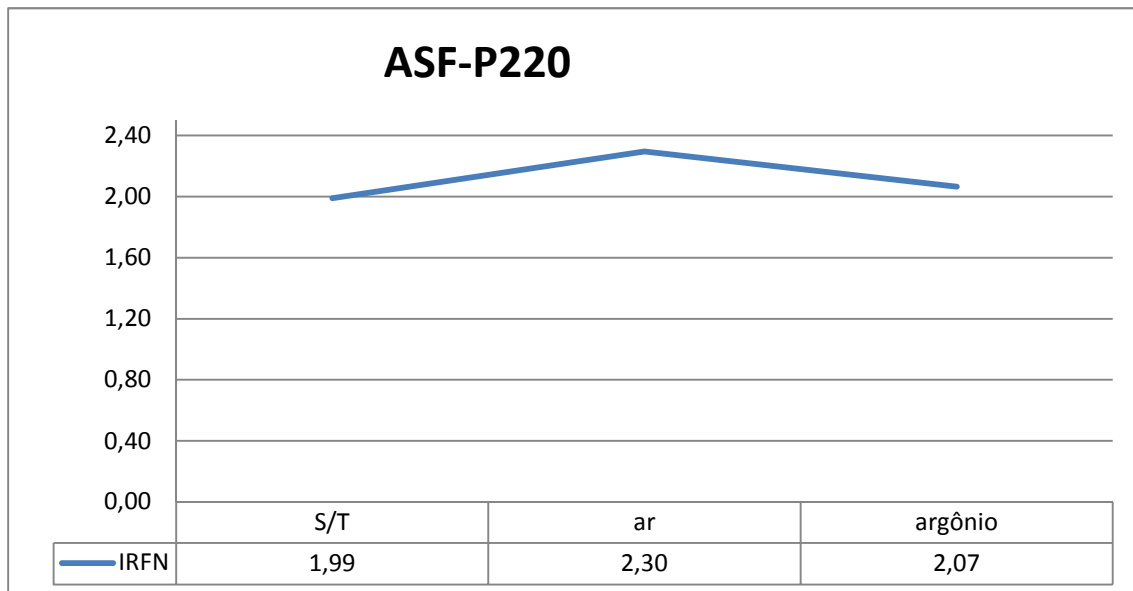


Figura 62 - IRFN para o ASF em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P220.

Tabela 44- Análise físico-química das amostras de AR sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1300°C durante 14 horas.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Regular - 1300°C / 14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	45,50	52,00	48,50
IRFN	0,94	1,12	1,08
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,93	1,84	1,78
Cor	Marrom	Azul	Marrom

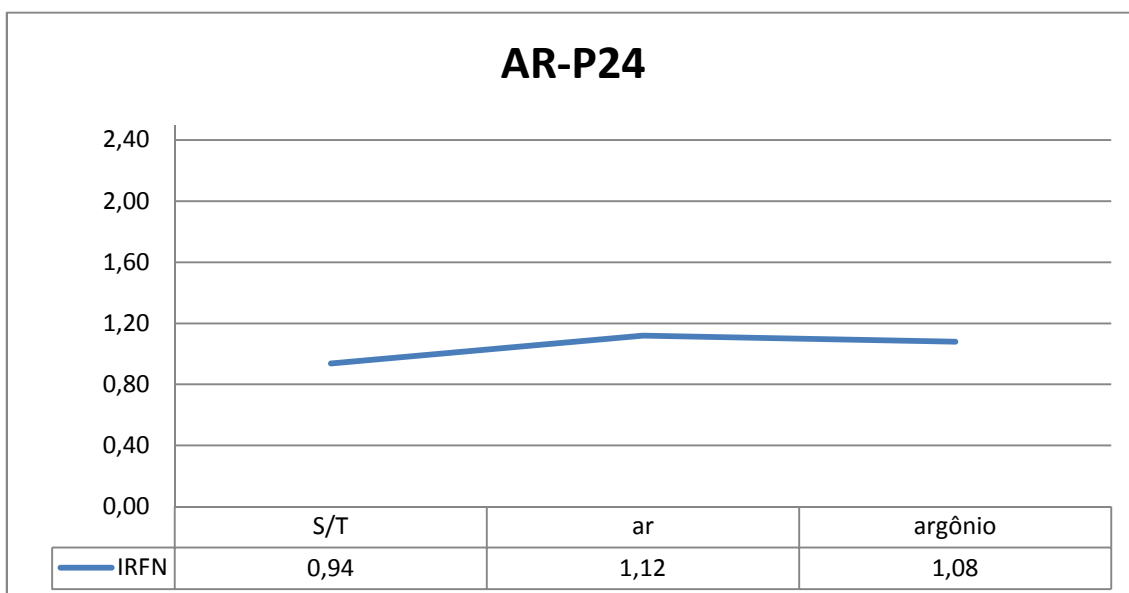


Figura 63 - IRFN para o AR em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P24.

Tabela 45- Análise físico-química das amostras de AR sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

AR- P60 - 1250°C/14 H.			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	59,40	75,60	60,40
IRFN	1,31	1,78	1,46
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,79	1,69	1,64
Cor	Marrom	Azul	Marrom

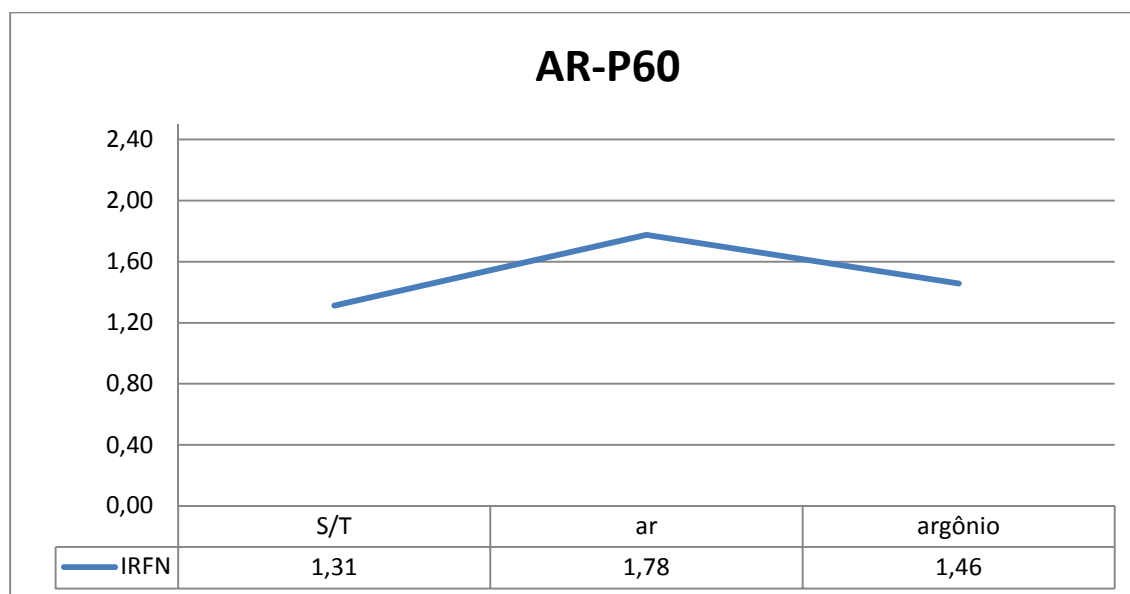


Figura 64 - IRFN para o AR em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P60.

Tabela 46- Análise físico-química das amostras de AR sem tratamento térmico (S/T), tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Regular - 1250°C/ 14 Horas			
Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
IRF (%)	83,70	85,50	84,90
IRFN	1,97	2,32	2,13
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,68	1,46	1,58
Cor	Marrom	Azul	Marrom

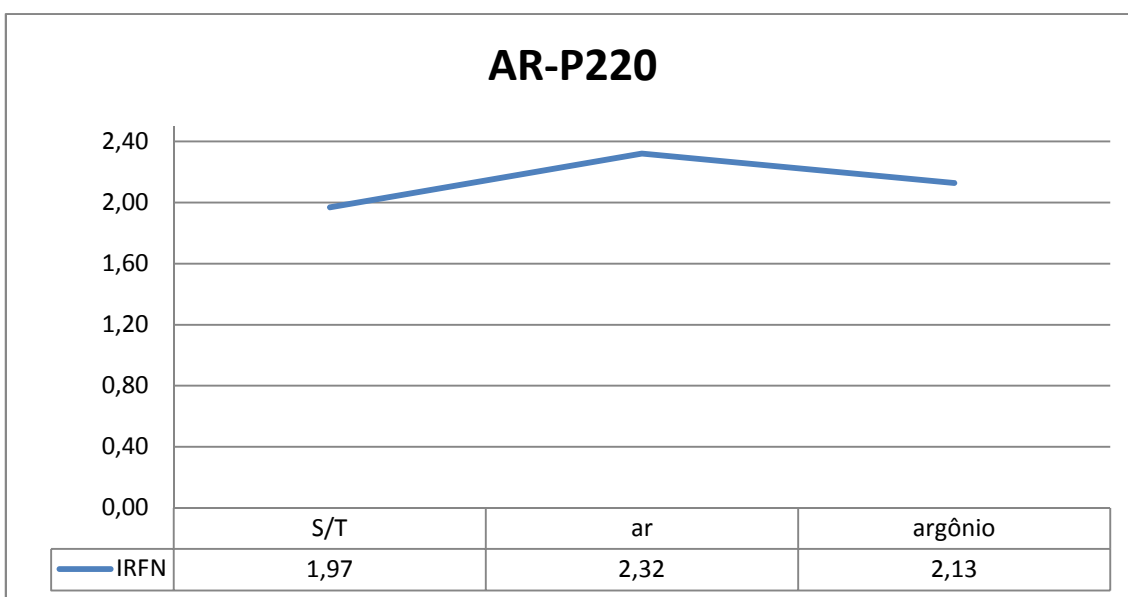


Figura 65 - IRFN para o AR em diferentes atmosferas e sem tratamento térmico (S/T) para o grão P220.

Analisando-se os resultados das tabelas de 38 a 46 e das Figuras de 57 ao 65 é claramente observado que o IRFN do material tratado em atmosfera inerte de argônio não se altera significativamente em relação aos óxidos de alumínio marrom sem tratamento térmico. Outro fato observado é que o IRNF do material tratado em atmosfera inerte é menor em relação ao material tratado ao ar. Outro aspecto importante está na coloração dos materiais. As amostras dos óxidos de alumínio marrom tratadas em atmosfera inerte não apresentaram a coloração azulada (Figuras 66, 67 e 68) características dos materiais tratados em atmosfera oxidante (ao ar). Assim, fica evidente que a presença do oxigênio

é de suma importância para que os óxidos de alumínio marrons adquiram as propriedades dos óxidos de alumínio “blue-fired”.

A mesma comparação em relação à coloração dos materiais já apresentada nos itens 4.1, 4.2 e 4.3 deste trabalho, é novamente apresentada, incluindo, agora, os materiais tratados em diferentes atmosferas - Figura 66, 67 e 68.

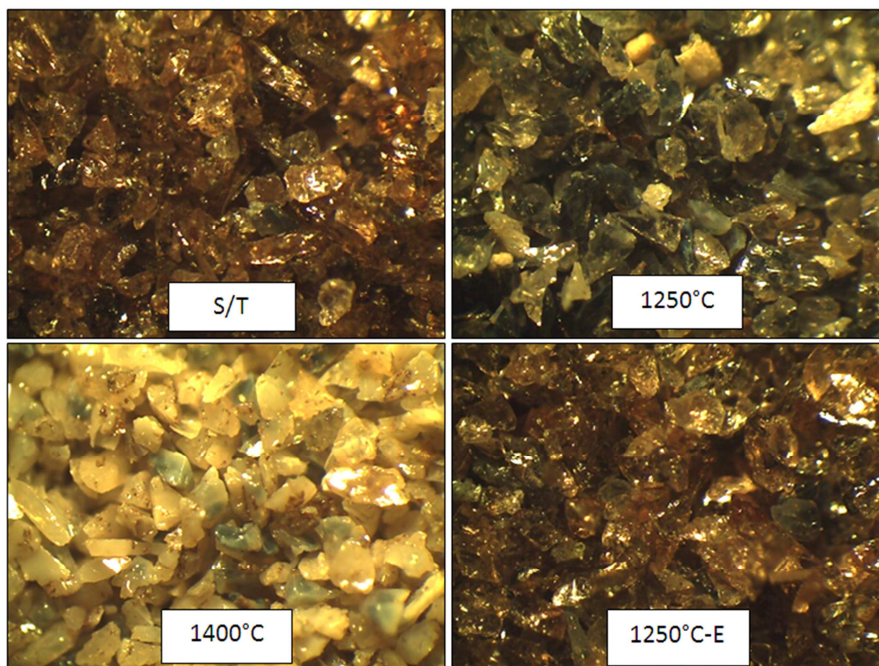


Figura 66- Imagens comparativas dos grãos de ASFE: S/T, tratados á 1250°C sem encapsulamento, tratados a em atmosfera inerte (1250°C-E) e tratado a 1400°C sem encapsulamento.

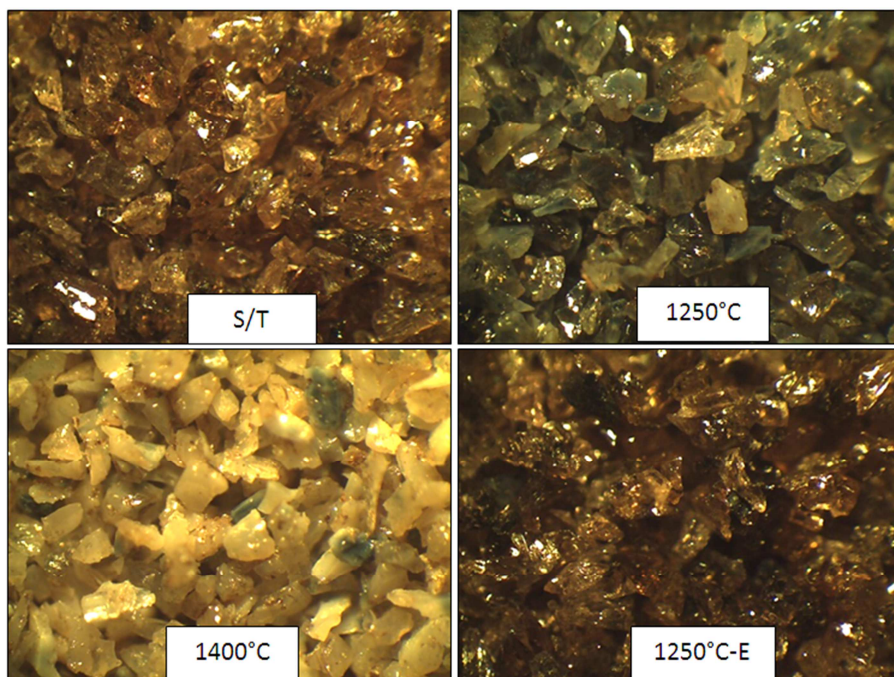


Figura 67- Imagens comparativas dos grãos de ASF: S/T, tratados á 1250°C sem encapsulamento, tratados a em atmosfera inerte (1250°C-E) e tratado a 1400°C sem encapsulamento.

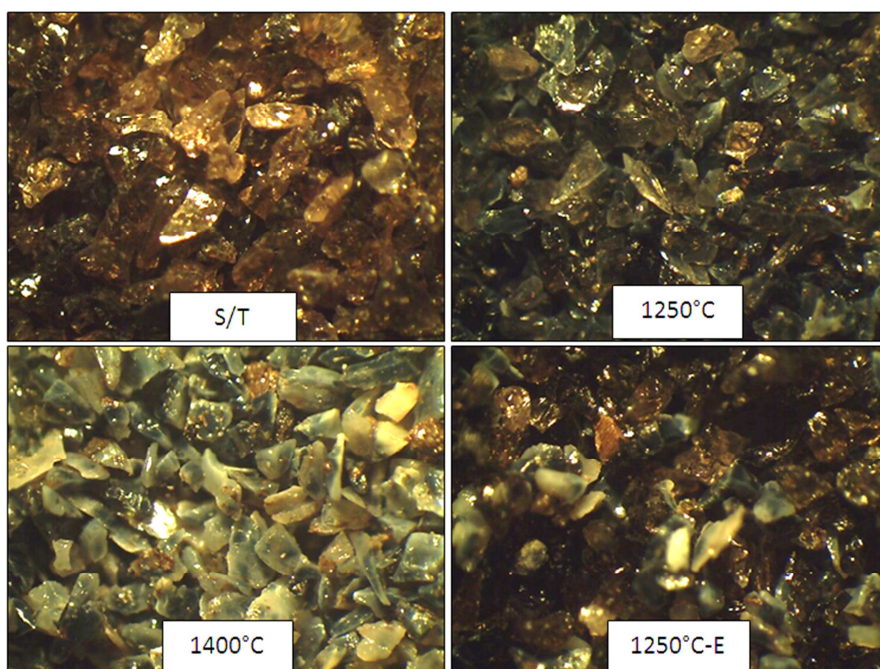


Figura 68- Imagens comparativas dos grãos de AR: S/T, tratados á 1250°C sem encapsulamento, tratados a em atmosfera inerte (1250°C-E) e tratado à 1400°C sem encapsulamento.

A fim de se analisar as diferenças ocorridas durante o tratamento térmico dos óxidos de alumínio marrons tratados a 1250°C na presença de ar e encapsulados com argônio, a técnica de difração de raios X foi utilizada para verificação da diferença na formação de fases durante esses tratamentos térmicos – Figuras 69, 70 e 71.

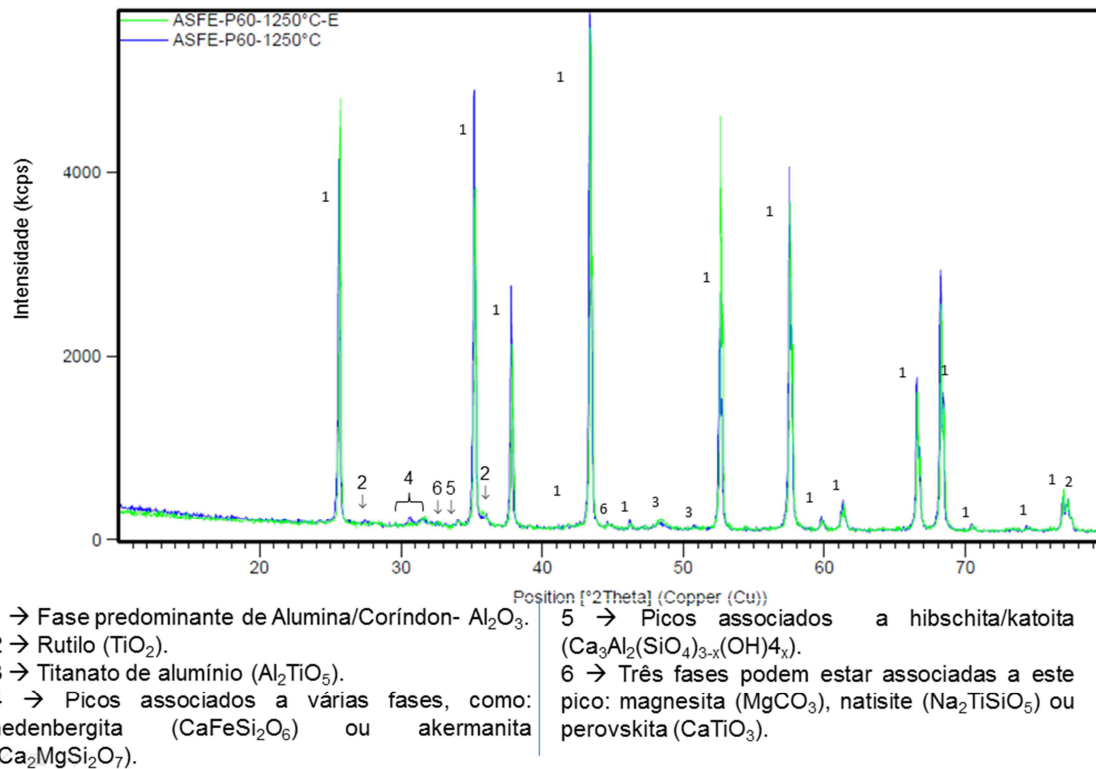
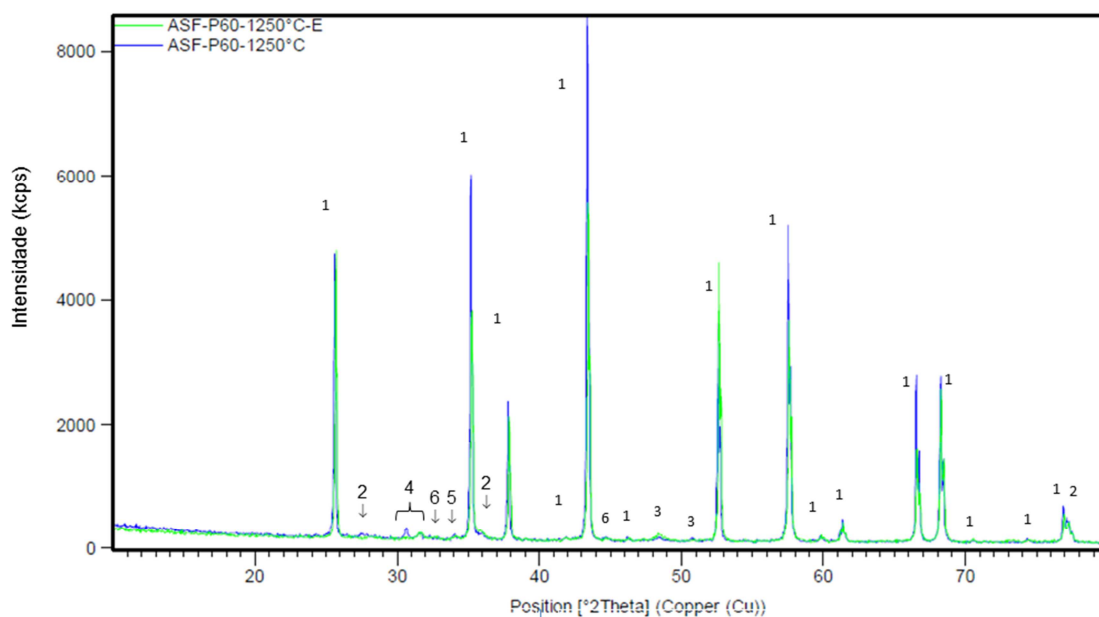


Figura 69- Difratoograma de raios X do ASF-E tratado a 1250°C sem encapsulamento e 1250°C-E (encapsulado).



- 1 → Fase predominante de Alumina/Coríndon- Al_2O_3 .
 2 → Rutilo (TiO_2).
 3 → Titanato de alumínio (Al_2TiO_5).
 4 → Picos associados a várias fases, como: hedenbergita ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) ou akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$).
 5 → Picos associados a hibschita/katoita ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_{3-x}(\text{OH})_4$).
 6 → Três fases podem estar associadas a este pico: magnesita (MgCO_3), natisite ($\text{Na}_2\text{TlSiO}_5$) ou perovskita (CaTiO_3).

Figura 70- Difratoograma de raios X do ASF tratado a 1250°C sem encapsulamento e 1250°C-E (encapsulado).

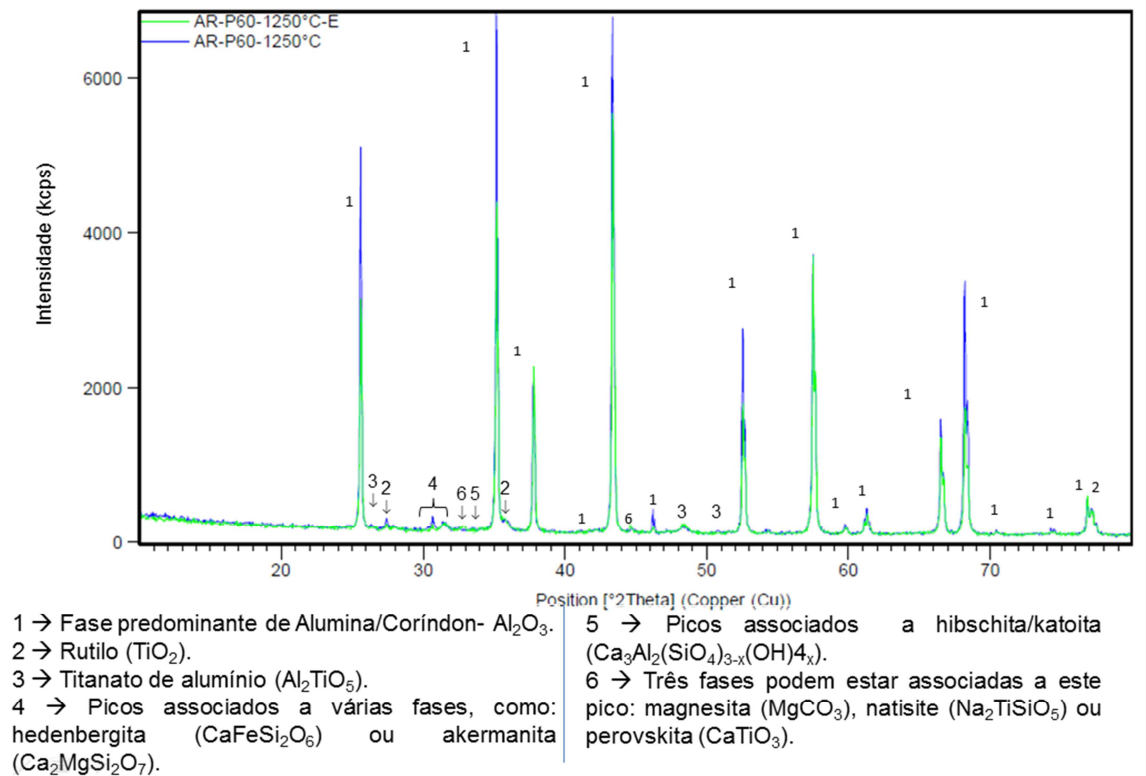


Figura 71- Difratoograma de raios X do AR a 1250°C sem encapsulamento e 1250°C-E (encapsulado).

Analisando-se as Figuras de 69 a 71 é possível observar que algumas fases que são identificadas nos diferentes tipos de óxido de alumínio marrom tratados a 1250°C sem encapsulamento (ao ar) não são identificadas nos materiais tratados a 1250°C ao argônio (1250°C-E). Para os óxidos de alumínio marrom semi friáveis, as principais diferenças estão nos picos da fase de Rutilo e nos picos das possíveis fases de $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ e $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$. Contudo, ao se comparar os semi friáveis encapsulados e não encapsulados, não houve diferença nos picos de Al_2TiO_5 , que pudessem comprovar a teoria de formação do titanato para a coloração azul. Porém, ao se comparar o óxido de alumínio marrom regular encapsulado e não encapsulado, uma diferença significativa dos picos de titanato de alumínio foi perceptível. Contudo, na amostra de AR que foi tratado ao argônio (encapsulado), o pico de titanato de alumínio não foi detectado e mesmo assim a coloração azul surgiu. Dessa forma pode-se

excluir a teoria de que a formação do titanato de alumínio está relacionado com a coloração azulada dos óxidos de alumínio marrom “*blue fired*”.

4.7 Influência das matérias-primas na produção do óxido de alumínio “*blue fired*”.

Após avaliar a influência dos parâmetros temperatura, tempo e atmosfera de tratamento térmico no IRF e coloração dos óxidos de alumínio marrons “*blue fired*” foi possível concluir que embora a influência das variáveis de processo tenham sido estudadas e entendidas até esta parte do trabalho, mesmo com o auxílio das técnicas de difração de raios X, fluorescência de raios X e MEV com EDS, não foi possível entender plenamente o fenômeno que causa a mudança de coloração nos materiais, devido à presença de várias impurezas em baixas concentrações.

Contudo, até este ponto do trabalho é possível fazer algumas avaliações importantes:

- a) O teor de titânia influencia o IRFN e a coloração final do óxido de alumínio marrom “*blue fired*”.
- b) É necessário uma temperatura e um tempo ideais para que a amostra adquira a friabilidade e a coloração desejáveis pelo mercado de abrasivos.
- c) A atmosfera oxidante, do forno de tratamento térmico é necessária para que o material adquira um valor de IRFN e a coloração desejáveis pelo mercado de abrasivos.
- d) Uma vez que o forno de eletrofusão utiliza uma atmosfera redutora para reduzir as impurezas, tais como Fe_2O_3 e SiO_2 , é impossível produzir óxido de alumínio marrom “*blue fired*” diretamente do processo de eletrofusão.

Assim, para o fechamento técnico deste trabalho foram propostas duas fusões no forno piloto do Centro de Pesquisa da Elfusa, a fim de se avaliar o fenômeno que ocorre durante o processo de formação do óxido de alumínio marrom “*blue fired*”.

- a) A primeira fusão foi realizada em um forno piloto utilizando como matéria prima alumina calcinada APF da empresa ALCOA ALUMÍNIO S.A. e rutilo da empresa INB-Indústrias Nucleares do Brasil de acordo com a Tabela 47. A proporção utilizada de cada matéria-prima foi de acordo com o teor de TiO_2 do ASFE, uma vez que o mercado desse material está em forte ascensão .

Tabela 47- Análise química das matérias-primas utilizadas para a eletrofusão da carga de alumina calcinada e dióxido de titânio (rutilo).

Matérias-primas	TiO₂ (%-p.)	SiO₂ (%-p.)	Na₂O (%-p.)	Fe₂O₃ (%-p.)	Al₂O₃ (%-p.)
Alumina APF	-	-	0,40	0,01	99,59
Rutilo	97,8	0,2	-	0,1	0,9

- b) A segunda eletrofusão foi realizada no mesmo forno piloto utilizando-se como matérias-primas alumina calcinada APF da empresa ALCOA, rutilo da empresa INB-Indústrias Nucleares do Brasil e hematita da empresa Bentomak - Tabela 48. A proporção utilizada de cada matéria-prima foi realizada para atingir o teor de TiO_2 do ASFE.

Tabela 48 - Análise química das matérias-primas utilizadas para a eletrofusão da carga de alumina calcinada, titânia e hematita.

Matérias-primas	TiO₂ (%-p.)	SiO₂ (%-p.)	Na₂O (%-p.)	Fe₂O₃ (%-p.)	Al₂O₃ (%-p.)
Alumina APF	-	-	0,40	0,01	99,59
Rutilo	97,8	0,2	-	0,1	0,9
Hematita	0,12	0,95	-	98,16	0,77

Após a eletrofusão dessas duas diferentes composições, os materiais foram classificados nas granulometrias P24, P60 e P220 e em seguida foi submetido ao tratamento térmico à 1250°C durante 14 horas ao ar. Nas tabelas

49, 50 e 51 encontram-se os resultados físicos e químicos da alumina semi friável especial eletrofundida com alumina e rutilo, da alumina semi friável especial eletrofundida com alumina, rutilo e hematita, bem como do óxido de alumínio semi friável especial da linha de produção, fundido com bauxita e aditivos. Nas Figuras 72, 73 e 74 plotam-se os valores de IRFN para efeito comparativo.

Tabela 49- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P24 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.

Grão P24 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial						
	Bauxita/ST	Bauxita/1250°C 14h	Alumina e Rutilo/ST	Alumina e Rutilo-1250°C- 14h	Alumina+Rutilo +Hematita/ST	Alumina+Rutilo+ Hematita/1250°C- 14h
IRF (%)	46,80	58,90	44,50	56,50	49,50	61,20
IRFN	1,04	1,34	0,97	1,29	1,11	1,33
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,81	1,77	1,84	1,75	1,79	1,85
Cor	Marrom	Azul	Marrom	Azul	Marrom	Azul

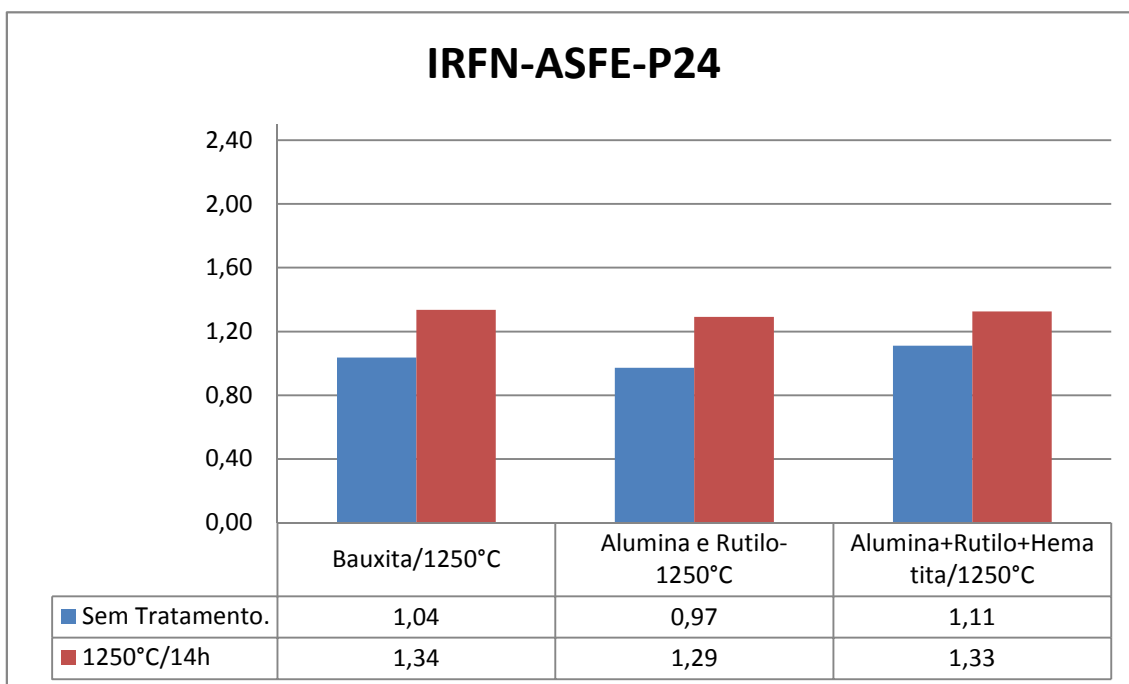


Figura 72 - IRFN para os óxidos de alumínio sem tratamento térmico e tratados a 1250°C por 14 horas ao ar, fundido com bauxita, fundido com alumina e rutilo e fundido com alumina, hematita e rutilo, para o grão P24.

Tabela 50- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P60 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.

Grão P60 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial						
Produto/Tratamento	Bauxita/ST	Bauxita/1250°C 14h	Alumina e Rutilo/ST	Alumina e Rutilo-1250°C- 14h	Alumina+Rutilo +Hematita/ST	Alumina+Rutilo+ Hematita/1250°C- 14h
IRF (%)	50,10	59,8	52,50	62,50	54,10	60,80
IRFN	1,11	1,40	1,22	1,42	1,25	1,42
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,82	1,72	1,72	1,77	1,72	1,74
Cor	Marrom	Azul	Marrom	Azul	Marrom	Azul

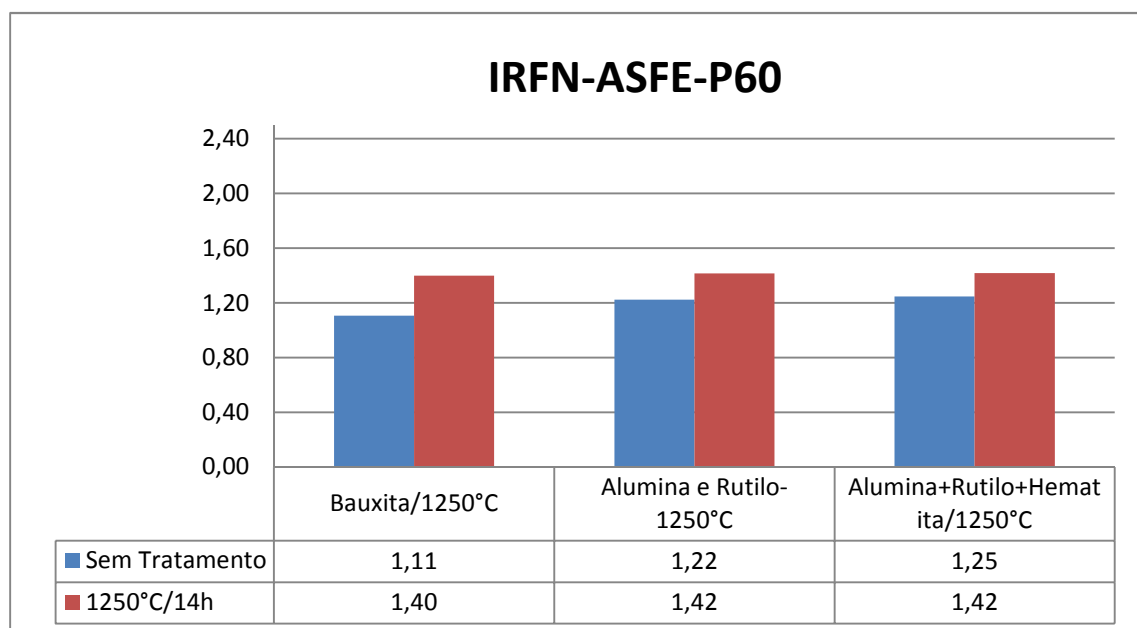


Figura 73 - IRFN para os óxidos de alumínio sem tratamento térmico e tratados a 1250°C por 14 horas ao ar, fundido com bauxita, fundido com alumina e rutilo e fundido com alumina, hematita e rutilo, para o grão P60.

Tabela 51- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P220 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.

Grão P220 - Óxido de Alumínio Semi Friável Especial						
Produto/Tratamento	Bauxita/ST	Bauxita/1250°C 14h	Alumina e Rutilo/ST	Alumina e Rutilo-1250°C- 14h	Alumina+Rutilo +Hematita/ST	Alumina+Rutilo+ Hematita/1250°C- 14h
IRF (%)	72,80	85,80	75,30	70,30	65,00	78,00
IRFN	1,91	2,42	1,92	2,23	1,68	2,42
Densidade Bulk (g/cm ³)	1,53	1,42	1,57	1,26	1,56	1,29
Cor	Marrom	Azul	Marrom	Azul/Branco	Marrom	Azul/Branco

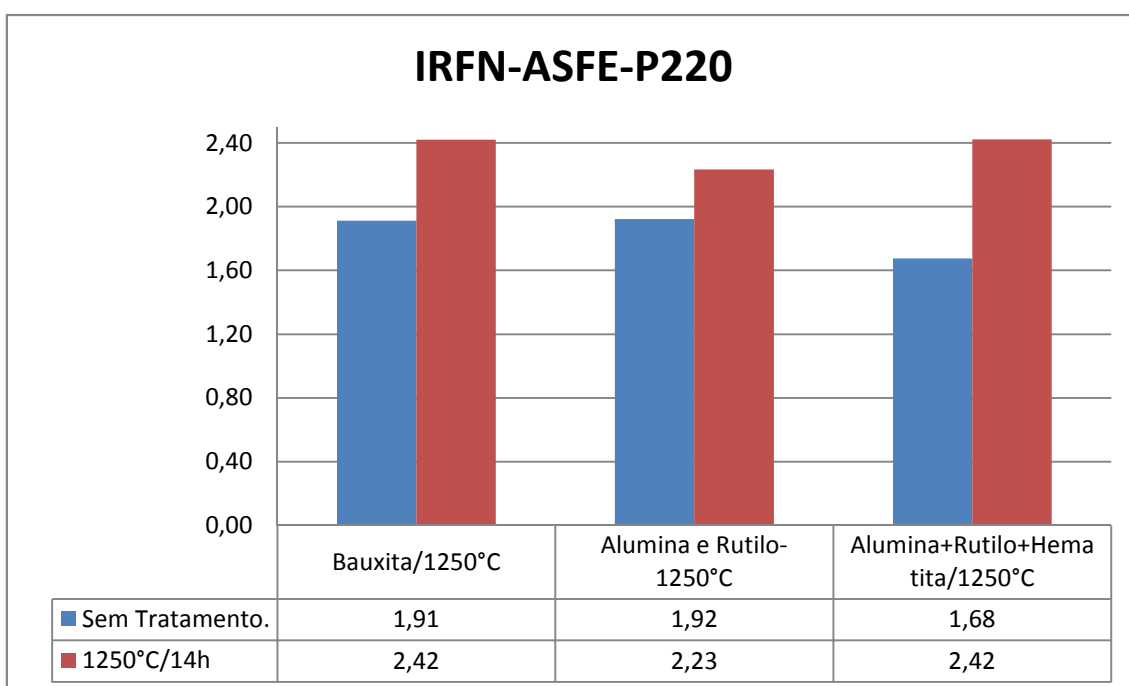


Figura 74 - IRFN para os óxidos de alumínio sem tratamento térmico e tratados a 1250°C por 14 horas ao ar, fundido com bauxita, fundido com alumina e rutilo e fundido com alumina, hematita e rutilo, para o grão P220.

Analisando-se os resultados nas tabelas 49, 50 e 51 e as Figuras 72, 73 e 74 é possível concluir que o tratamento térmico promoveu nos materiais eletrofundidos com matérias-primas selecionadas o mesmo efeito de aumentar o valor do IRFN do material. Contudo, no caso do óxido de alumínio semi friável especial somente com alumina e rutilo, após o tratamento térmico, embora o valor IRFN tenha aumentado (Tabelas 49, 50 e 51), a coloração branca indesejada pelo mercado de abrasivos foi característica como pode ser

observado na Figura 75. Porém, ao se adicionar a hematita, a coloração azul surge, como pode ser observado na Figura 76.

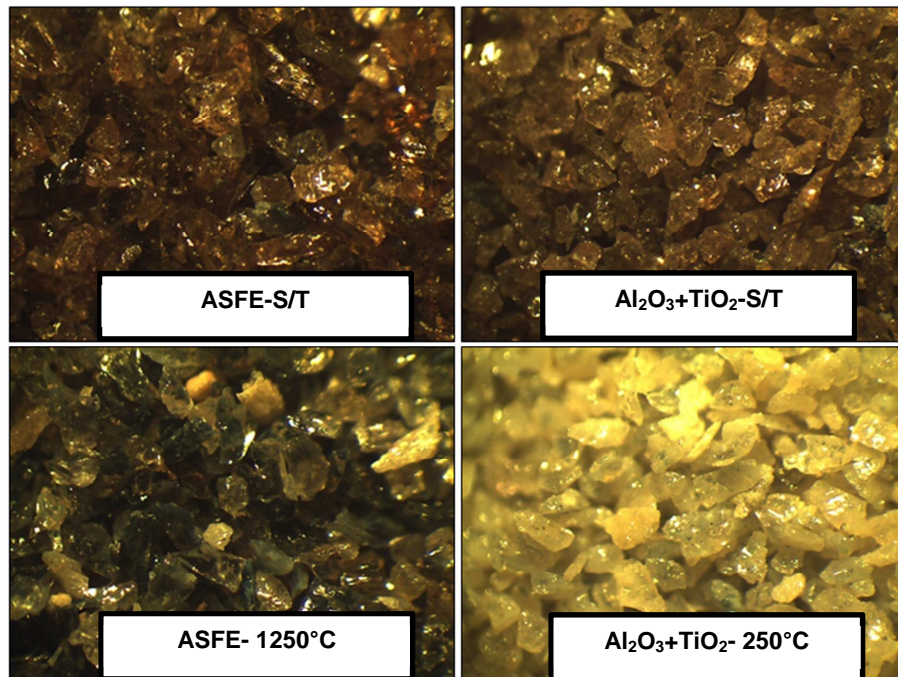


Figura 75- Imagens comparativas dos grãos P60 de alumina eletrofundida marrom semi friável especial: S/T-material fundido com bauxita e sem tratamento térmico, 1250°C-material fundido com bauxita e tratado á 1250°C; Al₂O₃+TiO₂-ST-material fundido com alumina calcinada e rutilo sem tratamento térmico; e Al₂O₃+TiO₂-1250°C- material fundido com alumina calcinada e rutilo tratado a 1250°C, por 14 horas, ao ar.

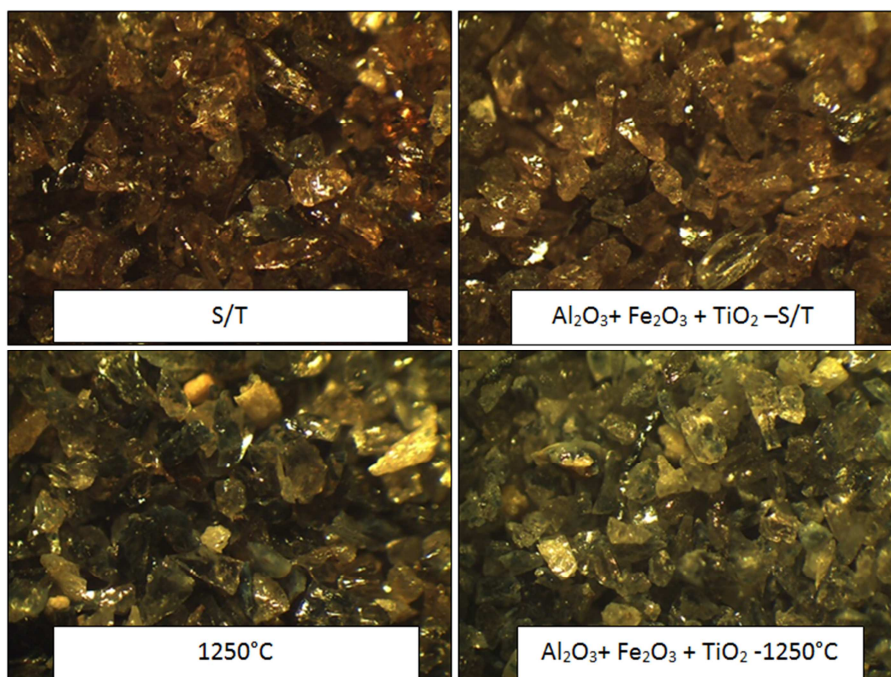
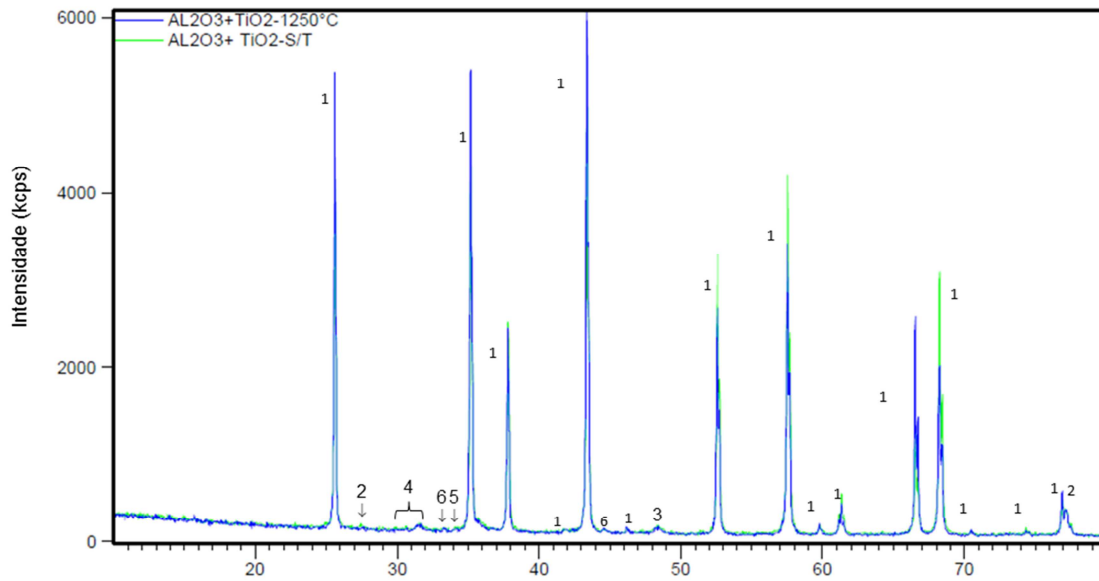


Figura 76- Imagens comparativas dos grãos P60 de alumina eletrofundida marrom semi friável especial: S/T-material fundido com bauxita e sem tratamento térmico; 1250°C-material fundido com bauxita e tratado á 1250°C; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 - \text{S/T}$ -material fundido com alumina calcinada, rutilo e hematita sem tratamento térmico; e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 - 1250^\circ\text{C}$ -material fundido com alumina calcinada, rutilo e hematita e tratado a 1250°C, por 14 horas, ao ar.

Para uma melhor análise das diferenças de comportamento entre o óxido de alumínio semi friável especial fundido com alumina e rutilo e daquele fundido com alumina, rutilo e hematita, a difração de raios X foi realizada tanto das amostras sem tratamento térmico quanto das amostras tratadas termicamente a 1250°C por 14 horas, ao ar (Figuras 77 e 78).



- | | |
|---|--|
| <p>1 → Fase predominante de Alumina/Coríndon- Al_2O_3.</p> <p>2 → Rutilo (TiO_2).</p> <p>3 → Fase de titanato de alumínio (Al_2TiO_5).</p> <p>4 → Picos associados a várias fases, como: hedenbergita ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) ou akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$).</p> | <p>5 → Possível hibschita/katoita ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3 \cdot x(\text{OH})_4$).</p> <p>6 → Três fases podem estar associadas a este pico: magnesita (MgCO_3), natisite ($\text{Na}_2\text{TiSiO}_5$) ou perovskita ($\text{CaTiO}_3$).</p> |
|---|--|

Figura 77- Difratograma de raios X comparativos das amostras de óxido de alumínio semi friável especial utilizando somente alumina e rutilo sem tratamento térmico-S/T e tratada a 1250°C, por 14 horas, ao ar.

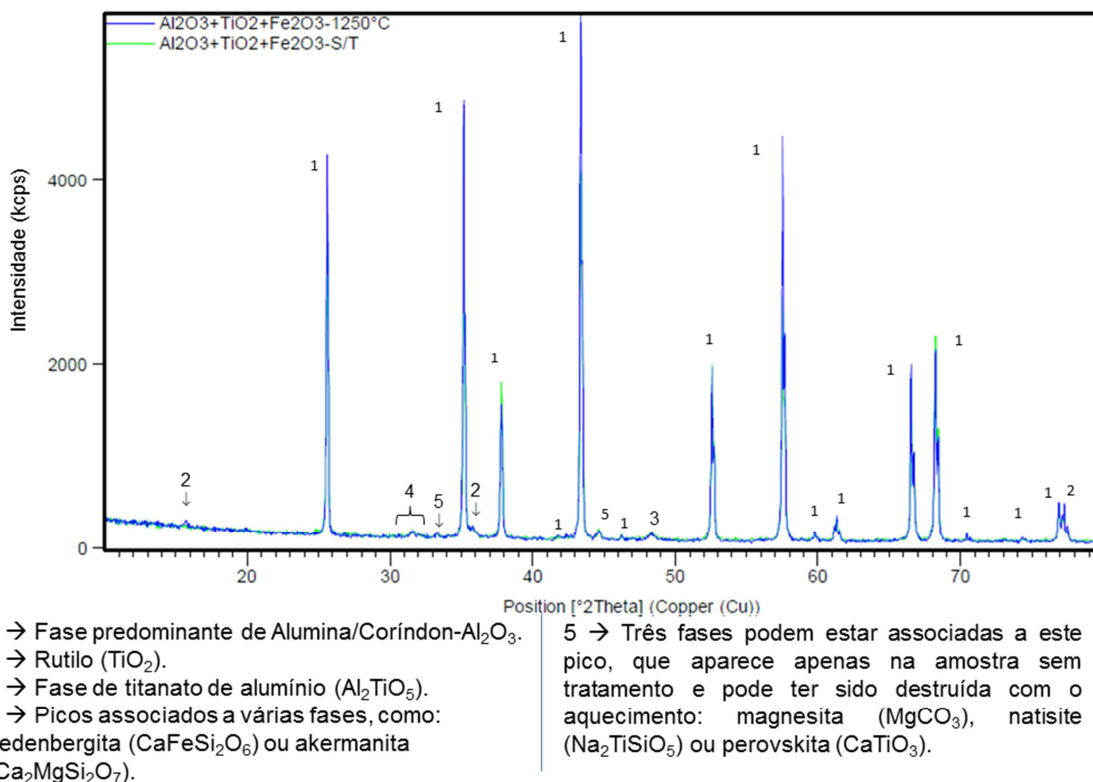


Figura 78- Difratoograma de raios X comparativos das amostras de óxido de alumínio semi friável especial utilizando alumina, rutilo e hematita na sem tratamento-S/T e tratada a 1250°C, por 14 horas, ao ar.

Analisando-se as figuras 77 e 78 é possível avaliar que ao se utilizar alumina, rutilo e hematita, os picos das fases contaminantes presentes no óxido de alumínio marrom a partir da bauxita não aparecem ou apresentam uma intensidade baixa, facilitando assim a compressão do fenômeno que justifica a mudança de coloração do material.

Pelos difratogramas das figuras 77 e 78 fica evidente que não há a formação do titanato de alumínio após o tratamento térmico a 1250°C (não há diferença na intensidade dos picos antes e após o tratamento térmico), e mesmo assim há um aumento do IRFN observado (Figuras 72, 73 e 74). Quando a hematita foi adicionada, observou-se que a coloração azul exigida para o “*blue fired*” é originada (Figura 76). Com isso a teoria do orbital molecular utilizada para explicar a coloração da safira é aplicável. Na safira o coríndon, Al_2O_3 é dopado com impurezas de Fe e Ti. Esses elementos

químicos podem apresentar as seguintes valências: Fe^{+2} , Fe^{+3} , Ti^{+3} e Ti^{+4} , dependendo das suas concentrações, da pressão parcial de O_2 e da temperatura em que a safira foi formada. Assim, quando o Fe^{+2} e Ti^{+4} substituem 2 íons de Al^{+3} vizinhos na rede do Al_2O_3 , uma larga banda de absorção é formada na extremidade do vermelho do espectro visível, causando o efeito azul do cristal. Esse é um efeito de cor por transferência de carga (*charge transfer color*), que é a transição de íons vizinhos. Assim, a explicação não é pela transição em orbitais d dos íons individualmente.

4.8 Reprodutibilidade dos resultados:

Devido a grande quantidade de amostras e variáveis, as análises de friabilidade foram analisadas adotando-se somente uma amostra para cada condição. Após a definição das condições ideais as amostras do mesmo lote analisadas inicialmente foram reanalisadas a fim se ter um valor estatístico. Na Tabela 52 encontram-se os resultados de reprodutibilidade dos ensaios de densidade, IRF, assim como o cálculo do IRFN.

Tabela 52- Avaliação estatística dos resultados para os grãos P24, P60 e P220 para os óxidos de alumínio ASFE, ASF e AR fundidos com bauxita.

ASFE										
	Grão 24 - ST					Grão 24 - 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	46,80	47,30	45,50	46,53	0,93	58,9	57,3	57,9	58,03	0,81
Densidade bulk (g/cm ³)	1,67	1,63	1,68	1,66	0,03	1,65	1,67	1,65	1,657	0,01
IRFN	1,12	1,16	1,09	1,12	0,04	1,43	1,38	1,41	1,405	0,03
ASFE										
	Grão 60 - ST					Grão 60- 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	50,10	50,70	50,30	50,37	0,31	59,80	58,20	57,40	58,47	1,22
Densidade aparente (g/cm ³)	1,82	1,81	1,82	1,82	0,01	1,72	1,71	1,73	1,72	0,01
IRFN	1,08	1,10	1,09	1,09	0,01	1,37	1,34	1,31	1,34	0,03
ASFE										
	Grão 220 - ST					Grão 220- 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	72,80	71,90	73,10	72,80	0,62	85,80	85,20	84,90	85,30	0,46
Densidade bulk (g/cm ³)	1,53	1,54	1,55	1,54	0,01	1,42	1,43	1,41	1,42	0,01
IRFN	1,87	1,84	1,86	1,86	0,02	2,38	2,35	2,37	2,37	0,02
ASF										
	Grão 24 - ST					Grão 24 - 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	50,10	50,40	51,40	50,63	0,68	53,40	54,20	51,30	52,97	1,50
Densidade bulk (g/cm ³)	1,86	1,87	1,85	1,86	0,01	1,84	1,83	1,84	1,84	0,01
IRFN	1,06	1,06	1,09	1,07	0,02	1,14	1,17	1,10	1,14	0,03
ASF										
	Grão 60 - ST					Grão 60- 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	55,10	54,30	56,10	55,17	0,90	62,00	61,30	63,20	62,17	0,96
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,83	1,82	1,82	0,01	1,73	1,72	1,71	1,72	0,01
IRFN	1,19	1,17	1,21	1,19	0,02	1,41	1,40	1,46	1,42	0,03
ASF										
	Grão 220 - ST					Grão 220- 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	77,60	75,30	76,10	76,33	1,17	81,60	82,10	81,90	81,87	0,25
Densidade bulk (g/cm ³)	1,54	1,50	1,55	1,53	0,03	1,42	1,43	1,40	1,42	0,47
IRFN	1,99	1,98	1,93	1,97	0,03	2,26	2,26	2,30	2,28	0,02
AR										
	Grão 24 - ST					Grão 24 - 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	45,50	45,80	48,20	46,50	1,48	56,20	56,80	54,10	55,70	1,42
Densidade bulk (g/cm ³)	1,93	1,94	1,95	1,94	0,01	1,84	1,83	1,81	1,83	0,02
IRFN	0,93	0,93	0,98	0,95	0,03	1,21	1,23	1,18	1,21	0,02
AR										
	Grão 60 - ST					Grão 60- 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	59,40	58,10	59,10	58,87	0,68	75,60	75,20	76,30	75,70	0,56
Densidade bulk (g/cm ³)	1,79	1,75	1,78	1,77	0,02	1,69	1,65	1,71	1,68	0,03
IRFN	1,31	1,31	1,31	1,31	0,00	1,77	1,80	1,77	1,78	0,02
AR										
	Grão 220 - ST					Grão 220- 1250°C				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
IRF(%)	83,70	81,90	82,30	82,63	0,95	85,50	85,90	84,30	85,23	0,83
Densidade bulk (g/cm ³)	1,68	1,68	1,69	1,68	0,01	1,46	1,51	1,48	1,48	0,03
IRFN	1,97	1,93	1,93	1,94	0,03	2,32	2,25	2,26	2,28	0,04

Avaliando a tabela 52 é possível observar que o desvio padrão do IRF apresenta um desvio padrão médio de 0,87% e o IRFN desvio padrão médio de 0,02. Com esses valores foi possível estimar o desvio padrão para avaliar a

ordem de grandeza do erro inserido nos ensaios. O óxido de alumínio semi friável especial fundido com alumina não foi analisado, uma vez que a quantidade de amostras não foi suficiente e na prática o custo de produção desse material fundido com alumina calcinada não será viável para a empresa.

5 CONCLUSÕES:

Após as análises dos resultados apresentados é possível concluir que:

- A temperatura, tempo e a atmosfera utilizada no forno de tratamento térmico dos óxidos de alumínio "*blue fired*" devem ser bem estabelecidos e para cada granulometria seus valores podem variar ligeiramente.
- O excesso de temperatura ou tempo de tratamento térmico ao qual o material é submetido faz com que o óxido de alumínio adquira uma coloração esbranquiçada e conseqüentemente uma redução do seu índice de resistência à fratura, IRFN.
- O TiO_2 em solução sólida, influencia no IRFN dos óxidos de alumínio marrons. Nas condições ideais de tratamento térmico oxidativo, o sistema favorece uma melhor dissolução do TiO_2 na alumina e ou as mudanças necessária de valência dos íons de Ti e de Fe. Contudo, quando a temperatura ou o tempo de tratamento térmico é ultrapassada em relação ao ideal, o TiO_2 é segregado na forma de rutilo e conseqüentemente o IRFN é reduzido.
- A coloração do óxido de alumínio nem sempre está correlacionado ao índice de resistência à fratura, IRFN. Essa afirmação foi comprovada ao realizar-se a fusão do óxido de alumínio semi friável especial utilizando-se somente alumina e rutilo. Com isso o material a 1250°C apresentou um aumento do IRFN, porém adquiriu uma coloração esbranquiçada.
- Ao realizar-se a fusão de alumina e rutilo adicionado de hematita foi possível verificar que a 1250°C o material teve o seu IRFN aumentado e juntamente adquiriu a coloração azul.

- A teoria que justifica a coloração azul do óxido de alumínio marrom “*blue fired*” é justificada pela dopagem do Al_2O_3 com impurezas de Fe e Ti. Como os íons desses metais podem apresentar dois estados de valência, transições por transferência de cargas podem ocorrer, ocasionando assim a mudança de coloração do óxido de alumínio marrom. Dessa forma a presença do oxigênio é fundamental para que ocorra a mudança de coloração do óxido de alumínio marrom.
- O teor de titânia no óxido de alumínio marrom exerce uma influência muito grande na alteração de coloração do material de marrom para azul, após o tratamento térmico. Dessa forma, o óxido de alumínio marrom regular-AR azula mais facilmente em relação ao semi friável especial-ASFE. E este último apresenta uma capacidade de azulamento superior ao do óxido de alumínio semi-friável-ASF. Dessa forma, para o óxido de alumínio marrom regular é possível utilizar um tempo de tratamento térmico inferior ao utilizado para os óxidos de alumínio marrons semi friáveis.

6 TRABALHOS FUTUROS:

- Estudar o fenômeno que ocorre no óxido de alumínio marrom, fazendo com o que o material adquira uma coloração esbranquiçada e reduzindo ao mesmo tempo, o IRFN, quando o tempo e/ou temperatura de tratamento térmico são excessivos.
- Estudar as quantidades mínimas de TiO_2 e Fe_2O_3 necessárias no óxido de alumínio marrom eletrofundido para que ele adquira a cor azul, exigida pelo mercado de abrasivos.
- Realizar um estudo científico sobre a friabilidade em grãos abrasivos, bem como as variáveis que podem interferir no teste, para sua determinação. Devem ser respondidas a perguntas tais como: 1) Qual o papel dos solutos? 2) O efeito é somente químico ou há fenômenos físicos envolvidos?

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA:

[1] NUSSBAUM, G. **CH, Rebolos e abrasivos**, São Paulo: Editora Jacomo, 1988.

[2] SISTEMA FIRJAN. **Tarifa de energia para indústria brasileira está 50% acima da média mundial.** Disponível em: <www.firjan.org.br/data/pages/2C908CEC30E85C950131B3B6A4A069BE.htm> Acessado em 10/09/2013.

[3] CENTRO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICO-CULTURAL DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, **Alumínio.** Disponível em: <www.cdcc.sc.usp.br/elementos/alumínio.html>. Acessado em: 10/01/2012.

[4] SAMPAIO, J.A; ANDRADE M.C.D; DULTRA A.J.B. **Bauxita**: CT2005-131-00 CETEM. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações.

[5] CONSTANTINO, L.R.V, *et al* . Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático, **Química Nova**, v. 25, n. 03, p. 490-498, 2002.

[6] BONADIA, N. P. **Aluminas eletrofundidas**: desenvolvimento de processo e produto. 2002. 172 f. Tese de mestrado em engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 2002.

[7] METALURGIA UDA. **Diagrama de Ellingham.** Disponível em: <www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Jchamorro/termodinamica/Diagramas%20de%20Ellingham.pdf>. Acesso em: 20/03/2012.

[8] CICHY, P. Fused alumina production. In: ELECTRIC ARC FURNACE CONFERENCE, 29., 1971, Toronto. **Proceedings**. Toronto: Lew A. Cummings, 1971. p. 162-175.

[9] HAYES, P. C.; ALGIE, S.H. **Process principles in minerals and materials production**. Sherwood: Hayes Pub. Co, 1993.

[10] COES, J. L. Applied Mineralogy. In COES, J. L. **Abrasives**: New York, Ed. by Frechette, Kirsch, 1971.

[11] CICHY, P. Fused alumina: pure and alloyed: as an abrasive and refractory material. In: HART, L.D. **Alumina chemicals**: science and technology handbook. Westerville: American Ceramic Society, 1991. p. 393-426.

[12] POWER, T. Fused minerals: the high purity high performance. **Industrial Minerals**, p. 37-57, Jul. 1985.

- [13] JACKSON, J. M. DAVIM, P. J. Abrasive tools and bonding systems machining with abrasives. In: JACKSON J. M. DAVIM, P. J. **Machining with abrasives**. New York: Editora Springer. 2011, 1-72.
- [14] FREUDENBERG, B.; MOCELLIN A. Aluminium titanate formation by solid-state reaction of fine Al_2O_3 and TiO_2 powders, **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 70, 33-38. 1987.
- [15] FREUDENBERG, B.; MOCELLIN A. **Aluminium titanate formation by solid-state reaction of coarse Al_2O_3 and TiO_2 powders**, **J. Am. Ceram. Soc.** v. 71, 22-28. 1988.
- [16] ACHESONM, E.G. **Carborundum: its history, manufacture and uses**. J. Franklin Inst. v. 136, 194-214, 1893
- [17] NASSAU, K. **The physics and chemistry of color: the fifteen causes of color**. NY. Editora Wiley, 1983.
- [18] MORAIS, T. L. M. SUSTER M., **Uso de Materiais abrasivos cerâmicos**. Anais do 45° Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis, 2001.
- [19] American National Standards Institute, ANSI B74.12. **Specification for the size of abrasive grain: grinding wheels, polishing and general industrial uses**. Ohio, 2009 .
- [20] STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte I**. Florianópolis: Editora da UFSC. 2008.
- [21] Federation of the European Producers of Abrasives, FEPA 42-1:2006(en). **Grains of fused aluminium oxide, silicon carbide and other abrasive materials for bonded abrasives and for general applications Macrogrits F 4 to F 220: Designation and determination of grain size distribution**. Paris, 2006.
- [22] DIAS, A. J. **A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos**. Faro: Universidade do Algarve, 2004.
- [23] American Society for Testing and Materials, ASTM. E11. **Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves**. West Conshohocken, 2010.
- [24] Federation of the European Producers of Abrasives, FEPA 44-1:2006(en). **Grains of fused aluminium oxide, silicon carbide and other abrasive materials abrasive materials: Determination of bulk density**. Paris, 2006.
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Industrial and environmental applications of nuclear analytical techniques Vienn: IAEA**, 1999.

[26] ELFUSA. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.elfusa.com.br/br/prod01-01.htm>>. Acessado em 04/12/2013.

APÊNDICE A

Para a simplificação das Tabelas apresentadas no corpo do trabalho, algumas informações foram retiradas. A fim de não se comprometer as caracterizações, nas Tabelas de 53 à 82 encontram-se os resultados completos das caracterizações

Tabela 53 - Resultados das caracterizações do ASFE com os tratamentos térmicos para o grão P24.

Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#16 (%)	0	0	0	0	0	1,8	2	2
#20 (%)	4	3,7	4,3	3,5	5,8	25	27	26,6
#25 (%)	48,3	49,9	48,3	47,5	50,3	36,3	38	40
#30 (%)	89,6	88,7	87,5	88,5	86,9	67,5	65,6	66
#35 (%)	5,70	6,00	5,20	6,50	5,40	4,70	4,40	4,40
#-35 (%)	0,70	1,60	2,00	1,50	2,00	0,60	1,00	1,00
Densidade bulk (g/cm ³)	1,81	1,80	1,81	1,80	1,77	1,77	1,75	2,00
TiO ₂ (%)	1,67	1,6	1,66	1,61	1,65	1,66	1,61	1,66
SiO ₂ (%)	0,38	0,37	0,43	0,40	0,43	0,41	0,40	0,39
Fe ₂ O ₃ (%)	0,22	0,22	0,26	0,23	0,26	0,26	0,24	0,24
Na ₂ O (%)	0,09	0,09	0,07	0,08	0,06	0,05	0,09	0,10
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,07	0,01	0,06	0,05	0,01	0,01
MgO (%)	0,11	0,10	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11
CaO (%)	0,20	0,21	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20
Al ₂ O ₃ (%)	97,31	97,39	97,19	97,36	97,21	97,24	97,32	97,29
IRF (%)	46,80	48,70	52,90	56,00	58,90	62,10	61,30	60,20
IRFN	1,04	1,08	1,17	1,24	1,34	1,41	1,40	1,21
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

Tabela 54 - Resultados das caracterizações do ASFE com os tratamentos térmicos para o grão P60.

Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#40 (%)	0	0,3	0	0	0	0	0,7	4,8
#50 (%)	20,5	16,8	14,5	16,9	24,2	31,6	33,5	40,4
#60 (%)	40,5	46,2	44,8	45,6	39,5	36,3	34	30,1
#70 (%)	68,5	76,4	76,8	75,8	68,5	61	58,5	47,9
#80 (%)	8,1	5,4	6,6	5,7	6,2	5,4	5,8	5,2
#-80 (%)	2,5	1,1	2,1	1,6	1,1	1,6	1,7	1,8
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,72	1,73	1,72	1,72	1,68	1,67	1,72
TiO ₂ (%)	1,61	1,64	1,64	1,62	1,61	1,62	1,60	1,66
SiO ₂ (%)	0,36	0,41	0,38	0,42	0,38	0,28	0,38	0,38
Fe ₂ O ₃ (%)	0,19	0,18	0,19	0,2	0,18	0,2	0,18	0,17
Na ₂ O (%)	0,13	0,11	0,09	0,1	0,13	0,16	0,12	0,17
K ₂ O (%)	0,01	0,05	0,02	0,04	0,13	0	0,04	0,04
MgO (%)	0,1	0,13	0,11	0,14	0,12	0,08	0,12	0,13
CaO (%)	0,18	0,24	0,24	0,23	0,24	0,2	0,23	0,18
Al ₂ O ₃ (%)	97,42	97,24	97,33	97,25	97,21	97,46	97,33	97,27
IRF (%)	50,1	51,4	52,4	52,8	59,8	62,6	61,8	63
IRFN	1,11	1,20	1,22	1,23	1,40	1,50	1,49	1,47
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom/Azul	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

Tabela 55 - Resultados das caracterizações do ASFE com os tratamentos térmicos para o grão P220.

Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#140 (%)	0,00	0,00	0,00	0,30	2,50	aglomerado/sinterizado	aglomerado/sinterizado	aglomerado/sinterizado
#200 (%)	15,00	7,00	9,20	10,80	11,40			
#230 (%)	40,90	47,60	42,50	42,70	36,80			
#270 (%)	69,30	81,90	79,00	77,00	72,30			
#325 (%)	77,40	88,70	75,00	84,60	80,50			
#-325 (%)	6,50	4,30	4,30	4,00	5,90			
Densidade bulk (g/cm ³)	1,53	1,55	1,52	1,45	1,42			
TiO ₂ (%)	1,61	1,85	1,82	1,79	1,78			
SiO ₂ (%)	0,41	0,44	0,41	0,45	0,50			
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,21	0,17	0,22	0,27			
Na ₂ O (%)	0,10	0,09	0,11	0,10	0,09			
K ₂ O (%)	0,10	0,02	0,03	0,02	0,06			
MgO (%)	0,13	0,15	0,13	0,14	0,17			
CaO (%)	0,20	0,25	0,25	0,24	0,27			
Al ₂ O ₃ (%)	97,24	96,99	97,08	97,04	96,86			
IRF (%)	72,80	73,90	77,70	84,90	85,80			
IRFN	1,91	1,92	2,05	2,36	2,42			
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Branco	Branco	Branco

Tabela 56 - Resultados das caracterizações do ASF com os tratamentos térmicos para o grão P24.

Produto/Tratamento	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#16 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
#20 (%)	23,30	22,90	23,80	24,20	30,60	33,00	30,30	31,70
#25 (%)	56,40	57,60	57,50	55,60	52,90	49,20	50,60	0,49
#30 (%)	72,30	73,10	72,50	71,80	66,30	63,40	65,50	64,50
#35 (%)	2,50	2,40	2,20	2,40	2,00	2,30	2,40	2,50
#-35 (%)	1,90	1,60	1,50	1,60	1,10	1,30	1,80	1,30
Densidade bulk (g/cm ³)	1,86	1,87	1,87	1,87	1,87	1,85	1,88	1,86
TiO ₂ (%)	1,52	1,51	1,53	1,53	1,53	1,55	1,43	1,49
SiO ₂ (%)	0,53	0,50	0,53	0,60	0,54	0,56	0,57	0,51
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,22	0,21	0,23	0,20	0,17	0,20	0,17
Na ₂ O (%)	0,04	0,08	0,05	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
MgO (%)	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
CaO (%)	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15
Al ₂ O ₃ (%)	97,47	97,47	97,46	97,35	97,47	97,46	97,53	97,55
IRF (%)	50,10	50,30	51,30	50,20	53,40	45,10	47,10	41,10
IRFN	1,06	1,06	1,08	1,06	1,13	0,96	0,99	0,87
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

Tabela 57- Resultados das caracterizações do ASF com os tratamentos térmicos para o grão P60.

Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#40 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,00	4,60
#50 (%)	21,60	20,00	19,90	21,10	21,00	36,90	38,70	34,00
#60 (%)	41,00	39,90	40,00	40,10	39,50	31,10	29,90	31,40
#70 (%)	68,10	67,40	67,60	67,40	67,60	49,70	48,60	53,40
#80 (%)	7,80	9,00	8,90	8,30	8,00	5,60	5,60	5,60
#-80 (%)	2,50	3,30	3,20	2,80	3,20	1,90	2,70	1,80
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,83	1,84	1,83	1,84	1,73	1,75	1,66
TiO ₂ (%)	1,48	1,47	1,44	1,38	1,39	1,44	1,38	1,65
SiO ₂ (%)	0,40	0,40	0,45	0,46	0,54	0,45	0,48	0,52
Fe ₂ O ₃ (%)	0,15	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,12
Na ₂ O (%)	0,06	0,08	0,06	0,06	0,12	0,06	0,09	0,11
K ₂ O (%)	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02
MgO (%)	0,04	0,04	0,05	0,43	0,06	0,05	0,05	0,06
CaO (%)	0,13	0,13	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,19
Al ₂ O ₃ (%)	97,72	97,72	97,74	97,42	97,61	97,73	97,70	97,33
IRF (%)	55,10	57,80	56,80	53,00	51,80	62,00	61,80	58,20
IRFN	1,19	1,24	1,22	1,14	1,11	1,41	1,39	1,38
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

Tabela 58 - Resultados das caracterizações do ASF com os tratamentos térmicos para o grão P220.

Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#140 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
#200 (%)	18,80	16,10	19,50	19,90	23,70	aglomerado/sinterizado	aglomerado/sinterizado	aglomerado/sinterizado
#230 (%)	43,30	39,10	43,80	38,30	41,10			
#270 (%)	68,30	67,60	68,80	64,70	65,20			
#325 (%)	75,50	76,60	75,20	72,40	71,50			
#-325 (%)	5,90	7,50	5,50	5,90	6,10			
Densidade bulk (g/cm ³)	1,54	1,48	1,54	1,41	1,42			
TiO ₂ (%)	1,55	1,57	1,59	1,59	1,56			
SiO ₂ (%)	0,55	0,51	0,54	0,43	0,44			
Fe ₂ O ₃ (%)	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03			
Na ₂ O (%)	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15			
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02			
MgO (%)	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05			
CaO (%)	0,15	0,16	0,16	0,14	0,13			
Al ₂ O ₃ (%)	97,59	97,60	97,50	97,63	97,62			
IRF (%)	77,60	74,30	76,90	82,50	81,60			
IRFN	1,99	1,98	1,96	2,31	2,26			
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/	Branco	Branco	Branco

Tabela 59 - Resultados das caracterizações do AR com os tratamentos térmicos para o grão P24.

Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#16 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
#20 (%)	25,00	28,00	26,60	32,00	37,00	38,00	41,80	40,20
#25 (%)	47,30	47,70	44,20	46,00	39,70	36,90	38,70	36,70
#30 (%)	71,00	69,70	70,70	66,30	60,50	60,00	56,40	53,40
#35 (%)	2,00	1,80	2,70	1,60	1,60	1,80	1,50	1,50
#-35 (%)	0,20	0,00	0,60	1,60	0,20	0,30	0,00	0,20
Densidade bulk (g/cm ³)	1,93	1,88	1,90	1,90	1,86	1,84	1,84	1,75
TiO ₂ (%)	2,42	2,53	2,47	2,37	2,38	2,40	2,42	2,41
SiO ₂ (%)	0,36	0,70	0,69	0,61	0,65	0,70	0,67	0,64
Fe ₂ O ₃ (%)	0,16	0,25	0,17	0,22	0,17	0,14	0,15	0,21
Na ₂ O (%)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
K ₂ O (%)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
MgO (%)	0,11	0,14	0,11	0,11	0,10	0,13	0,12	0,10
CaO (%)	0,21	0,25	0,17	0,19	0,19	0,18	0,18	0,20
Al ₂ O ₃ (%)	96,67	96,06	96,32	96,43	96,44	96,37	96,38	96,38
IRF (%)	45,50	41,10	35,50	38,10	52,00	56,20	49,90	45,20
IRFN	0,94	0,86	0,74	0,79	1,11	1,21	1,07	1,02
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul/Branco	Azul/ Branco

Tabela 60 - Resultados das caracterizações do AR com os tratamentos térmicos para o grão P60.

Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#40 (%)	0,00	0,30	0,00	7,70	7,90	9,00	8,70	11,10
#50 (%)	23,90	27,70	24,40	40,60	38,10	43,20	40,80	43,10
#60 (%)	43,70	41,60	43,60	30,20	28,00	27,00	27,70	25,00
#70 (%)	70,00	66,70	70,20	47,10	46,10	42,90	44,00	65,10
#80 (%)	4,80	4,40	4,80	3,50	46,10	3,40	3,80	3,80
#-80 (%)	0,50	0,40	0,70	0,50	4,80	1,20	2,30	3,90
Densidade bulk (g/cm ³)	1,79	1,77	1,80	1,68	1,69	1,65	1,66	1,65
TiO ₂ (%)	2,61	2,81	2,83	2,58	2,54	2,55	2,80	2,73
SiO ₂ (%)	0,71	0,72	0,73	0,73	0,65	0,69	0,72	0,75
Fe ₂ O ₃ (%)	0,05	0,06	0,04	0,09	0,06	0,15	0,06	0,05
Na ₂ O (%)	0,05	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05
K ₂ O (%)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
MgO (%)	0,26	0,21	0,24	0,22	0,23	0,20	0,21	0,24
CaO (%)	0,15	0,17	0,17	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15
Al ₂ O ₃ (%)	96,14	95,97	95,91	96,15	96,27	96,17	95,96	96,00
IRF (%)	59,40	65,40	61,40	65,80	75,60	86,10	61,50	60,90
IRFN	1,31	1,46	1,35	1,55	1,78	2,07	1,47	1,46
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom/Azul	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

Tabela 61 - Resultados das caracterizações do AR com os tratamentos térmicos para o grão P220.

Produto	S/T	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C	1350°C	1400°C
Telas								
#140 (%)	0,00	0,00	0,00	4,80	4,60	0,05	0,04	aglomerado/sinterizado
#200 (%)	14,80	14,80	14,80	16,00	18,00	16,90	25,00	
#230 (%)	40,10	37,90	40,20	30,90	29,20	33,10	35,70	
#270 (%)	59,20	56,30	58,10	45,70	44,50	24,20	52,90	
#325 (%)	65,30	62,00	63,70	50,60	49,30	52,50	58,30	
#-325 (%)	8,20	7,90	7,80	6,40	6,90	6,20	7,60	
Densidade bulk (g/cm ³)	1,68	1,60	1,67	1,48	1,46	1,45	1,52	
TiO ₂ (%)	3,40	3,39	3,37	3,06	3,17	3,11	2,93	
SiO ₂ (%)	0,68	0,69	0,65	0,55	0,61	0,54	0,46	
Fe ₂ O ₃ (%)	0,09	0,11	0,12	0,08	0,09	0,08	0,07	
Na ₂ O (%)	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	
K ₂ O (%)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	
MgO (%)	0,33	0,33	0,32	0,30	0,31	0,29	0,26	
CaO (%)	0,24	0,24	0,21	0,22	0,20	0,20	0,20	
Al ₂ O ₃ (%)	95,20	95,17	95,28	95,74	95,57	95,74	96,04	
IRF (%)	83,70	84,10	84,30	84,50	85,50	86,00	83,30	
IRFN	1,97	2,08	2,00	2,27	2,32	2,34	2,16	
Cor	Marrom	Marrom	Marrom	Azul	Azul	Azul/ Branco	Azul/ Branco	Branco

Tabela 62 - Análise físico-química do ASFE grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0,00	0,30	0	0,00
#20 (%)	4,00	38,10	5,8	35,50
#25 (%)	48,30	46,20	50,3	48,30
#30 (%)	89,60	58,00	86,9	60,90
#35 (%)	5,70	2,00	5,40	2,00
#-35 (%)	0,70	1,60	2,00	1,60
Densidade bulk (g/cm ³)	1,81	1,86	1,77	1,83
TiO ₂ (%)	1,67	1,60	1,65	1,61
SiO ₂ (%)	0,38	0,32	0,43	0,38
Fe ₂ O ₃ (%)	0,22	0,19	0,26	0,20
Na ₂ O (%)	0,09	0,10	0,06	0,08
K ₂ O (%)	0,02	0,10	0,06	0,01
MgO (%)	0,11	0,13	0,12	0,11
CaO (%)	0,20	0,16	0,21	0,17
Al ₂ O ₃ (%)	97,31	97,40	97,21	97,44
IRF (%)	46,80	54,90	58,90	55,70
IRFN	1,04	1,19	1,34	1,22
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul/Branco

Tabela 63 - Análise físico-química do ASFE grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	9,30	0	12,00
#50 (%)	20,50	35,80	24,2	35,30
#60 (%)	40,50	29,20	39,5	28,20
#70 (%)	68,50	47,00	68,5	45,90
#80 (%)	8,10	5,50	6,2	5,20
#-80 (%)	2,50	2,40	1,1	1,60
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,71	1,72	1,74
TiO ₂ (%)	1,61	1,63	1,61	1,64
SiO ₂ (%)	0,36	0,26	0,38	0,31
Fe ₂ O ₃ (%)	0,19	0,15	0,18	0,18
Na ₂ O (%)	0,13	0,15	0,13	0,12
K ₂ O (%)	0,01	0,01	0,13	0,01
MgO (%)	0,10	0,12	0,12	0,09
CaO (%)	0,18	0,14	0,24	0,13
Al ₂ O ₃ (%)	97,42	97,54	97,21	97,52
IRF (%)	50,10	59,30	59,8	50,20
IRFN	1,11	1,39	1,40	1,16
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul/Branco

Tabela 64 - Análise físico-química do ASFE grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#140 (%)	0,00	10,70	2,50	7,30
#200 (%)	15,00	26,30	11,40	27,10
#230 (%)	40,90	29,20	36,80	34,00
#270 (%)	69,30	49,10	72,30	54,00
#325 (%)	77,40	55,60	80,50	59,90
#-325 (%)	6,50	7,40	5,90	5,70
Densidade bulk (g/cm ³)	1,53	1,36	1,41	1,34
TiO ₂ (%)	1,61	1,80	1,78	1,80
SiO ₂ (%)	0,41	0,24	0,50	0,26
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,12	0,27	0,17
Na ₂ O (%)	0,10	0,13	0,09	0,16
K ₂ O (%)	0,10	0,01	0,06	0,00
MgO (%)	0,13	0,12	0,17	0,15
CaO (%)	0,20	0,14	0,27	0,15
Al ₂ O ₃ (%)	97,24	97,44	96,86	97,31
IRF (%)	72,80	80,10	85,80	79,20
IRFN	1,91	2,36	2,45	2,37
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul/Branco

Tabela 65 - Análise físico-química do ASF grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
#20 (%)	23,30	34,00	30,60	38,80
#25 (%)	56,40	49,30	52,90	44,70
#30 (%)	72,30	62,60	66,30	57,60
#35 (%)	2,50	2,10	2,00	2,00
#-35 (%)	1,90	1,30	1,10	1,60
Densidade bulk (g/cm ³)	1,87	1,86	1,87	1,85
TiO ₂ (%)	1,52	1,42	1,53	1,45
SiO ₂ (%)	0,53	0,55	0,54	0,57
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,19	0,20	0,16
Na ₂ O (%)	0,04	0,07	0,04	0,16
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,02	0,02
MgO (%)	0,05	0,05	0,05	0,07
CaO (%)	0,16	0,16	0,15	0,14
Al ₂ O ₃ (%)	97,47	97,54	97,47	97,43
IRF (%)	50,10	52,70	53,40	49,30
IRFN	1,06	1,12	1,13	1,05
Cor	Marrom	Azul/Marrom	Azul	Azul

Tabela 66 - Análise físico-química do ASF grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	0,20	5,00	0,20
#50 (%)	21,60	35,30	36,90	32,70
#60 (%)	41,00	34,40	31,10	34,80
#70 (%)	68,10	55,40	49,70	57,30
#80 (%)	7,80	6,70	5,60	7,20
#-80 (%)	2,50	2,40	1,90	2,60
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,76	1,73	1,76
TiO ₂ (%)	1,48	1,39	1,44	1,32
SiO ₂ (%)	0,40	0,50	0,45	0,46
Fe ₂ O ₃ (%)	0,15	0,13	0,13	0,14
Na ₂ O (%)	0,06	0,19	0,06	0,17
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,01	0,02
MgO (%)	0,04	0,07	0,05	0,06
CaO (%)	0,13	0,12	0,13	0,12
Al ₂ O ₃ (%)	97,72	97,58	97,73	97,71
IRF (%)	55,10	69,30	62,00	59,60
IRFN	1,19	1,55	1,41	1,33
Cor	Marrom	Azul/Branco	Azul/Branco	Azul/Branco

Tabela 67 - Análise físico-química do ASF grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#140 (%)	0,00	8,90	0,00	8,40
#200 (%)	18,80	27,70	19,90	24,20
#230 (%)	43,30	32,90	38,30	31,60
#270 (%)	68,30	52,70	64,70	53,90
#325 (%)	75,50	58,20	72,40	60,60
#-325 (%)	5,90	5,20	5,90	6,80
Densidade bulk (g/cm ³)	1,54	1,44	1,42	1,43
TiO ₂ (%)	1,55	1,69	1,59	1,67
SiO ₂ (%)	0,55	0,67	0,43	0,53
Fe ₂ O ₃ (%)	0,03	0,04	0,05	0,04
Na ₂ O (%)	0,05	0,15	0,10	0,17
K ₂ O (%)	0,02	0,03	0,01	0,02
MgO (%)	0,06	0,09	0,05	0,07
CaO (%)	0,15	0,15	0,14	0,14
Al ₂ O ₃ (%)	97,59	97,18	97,63	97,36
IRF (%)	77,60	81,40	82,50	79,00
IRFN	1,99	2,23	2,29	2,18
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul

Tabela 68 - Análise físico-química do AR grão P24, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1300°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
#20 (%)	25,00	43,20	38,00	42,10
#25 (%)	47,30	38,20	36,90	39,50
#30 (%)	71,00	55,10	60,00	55,70
#35 (%)	2,00	1,40	1,80	1,20
#-35 (%)	0,20	0,30	0,30	0,10
Densidade bulk (g/cm ³)	1,93	1,87	1,84	1,86
TiO ₂ (%)	2,42	2,43	2,40	2,50
SiO ₂ (%)	0,36	0,59	0,70	0,60
Fe ₂ O ₃ (%)	0,16	0,17	0,14	0,15
Na ₂ O (%)	0,04	0,05	0,05	0,03
K ₂ O (%)	0,03	0,05	0,03	0,05
MgO (%)	0,11	0,26	0,13	0,23
CaO (%)	0,21	0,18	0,18	0,18
Al ₂ O ₃ (%)	96,67	96,30	96,37	96,26
IRF (%)	45,50	49,30	52,00	52,30
IRFN	0,94	1,05	1,12	1,11
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul

Tabela 69 - Análise físico-química do AR grão P60, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	1,10	7,90	0,90
#50 (%)	23,90	45,60	38,10	45,20
#60 (%)	43,70	30,90	28,00	31,70
#70 (%)	70,00	48,40	46,10	49,00
#80 (%)	4,80	3,50	46,10	3,80
#-80 (%)	0,50	1,40	4,80	1,10
Densidade bulk (g/cm ³)	1,79	1,70	1,69	1,71
TiO ₂ (%)	2,61	2,51	2,54	2,49
SiO ₂ (%)	0,71	0,73	0,65	0,66
Fe ₂ O ₃ (%)	0,05	0,14	0,06	0,06
Na ₂ O (%)	0,05	0,03	0,06	0,03
K ₂ O (%)	0,03	0,01	0,03	0,01
MgO (%)	0,26	0,32	0,23	0,34
CaO (%)	0,15	0,17	0,16	0,14
Al ₂ O ₃ (%)	96,14	96,09	96,27	96,27
IRF (%)	59,40	63,90	75,60	63,00
IRFN	1,31	1,49	1,78	1,46
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul/Branco

Tabela 70 - Análise físico-química do AR grão P220, alterando-se o tempo de tratamento térmico - 1250°C.

Produto/Tratamento	S/T	7 Horas	14 Horas	21 Horas
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	25,80	4,80	22,80
#50 (%)	26,50	30,20	38,20	30,80
#60 (%)	40,10	23,10	30,90	24,70
#70 (%)	59,20	34,90	45,70	37,10
#80 (%)	65,30	3,70	50,60	3,70
#-80 (%)	8,20	5,40	6,40	5,60
Densidade bulk (g/cm ³)	1,68	1,41	1,47	1,41
TiO ₂ (%)	3,40	3,38	3,06	3,75
SiO ₂ (%)	0,68	0,71	0,55	0,91
Fe ₂ O ₃ (%)	0,09	0,13	0,08	0,13
Na ₂ O (%)	0,03	0,05	0,03	0,04
K ₂ O (%)	0,03	0,03	0,02	0,03
MgO (%)	0,33	0,43	0,30	0,48
CaO (%)	0,24	0,24	0,22	0,25
Al ₂ O ₃ (%)	95,20	95,03	95,74	94,41
IRF (%)	83,70	93,30	84,50	84,90
IRFN	1,97	2,62	2,28	2,38
Cor	Marrom	Azul	Azul	Azul/Branco

Tabela 71 - Análise físico-química do ASFE sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0,00	0	1,40
#20 (%)	4,00	5,8	23,50
#25 (%)	48,30	50,3	54,20
#30 (%)	89,60	86,9	70,50
#35 (%)	5,70	5,40	2,80
#-35 (%)	0,70	2,00	2,80
Densidade bulk (g/cm ³)	1,81	1,77	1,85
TiO ₂ (%)	1,67	1,65	1,61
SiO ₂ (%)	0,38	0,43	0,32
Fe ₂ O ₃ (%)	0,22	0,26	0,20
Na ₂ O (%)	0,09	0,06	0,09
K ₂ O (%)	0,02	0,06	0,02
MgO (%)	0,11	0,12	0,12
CaO (%)	0,20	0,21	0,18
Al ₂ O ₃ (%)	97,31	97,21	97,46
IRF (%)	46,80	58,90	48,10
IRFN	1,04	1,34	1,04
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 72 - Análise físico-química do ASFE sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0	0	2,20
#50 (%)	20,5	24,2	24,20
#60 (%)	40,5	39,5	38,20
#70 (%)	68,5	68,5	63,30
#80 (%)	8,1	6,2	7,70
#-80 (%)	2,5	1,1	2,60
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,72	1,77
TiO ₂ (%)	1,61	1,61	1,63
SiO ₂ (%)	0,36	0,38	0,41
Fe ₂ O ₃ (%)	0,19	0,18	0,19
Na ₂ O (%)	0,13	0,13	0,09
K ₂ O (%)	0,01	0,13	0,01
MgO (%)	0,1	0,12	0,14
CaO (%)	0,18	0,24	0,24
Al ₂ O ₃ (%)	97,42	97,21	97,29
IRF (%)	50,1	59,8	52,30
IRFN	1,11	1,40	1,19
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 73 - Análise físico-química do ASFE sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#140 (%)	0,00	2,50	14,20
#200 (%)	15,00	11,40	25,80
#230 (%)	40,90	36,80	28,40
#270 (%)	69,30	72,30	45,00
#325 (%)	77,40	80,50	54,30
#-325 (%)	6,50	5,90	5,70
Densidade bulk (g/cm ³)	1,53	1,42	1,49
TiO ₂ (%)	1,61	1,78	1,65
SiO ₂ (%)	0,41	0,50	0,32
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,27	0,23
Na ₂ O (%)	0,10	0,09	0,08
K ₂ O (%)	0,10	0,06	0,00
MgO (%)	0,13	0,17	0,08
CaO (%)	0,20	0,27	0,21
Al ₂ O ₃ (%)	97,24	96,86	97,43
IRF (%)	72,80	85,80	73,10
IRFN	1,91	2,42	1,97
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 74 - Análise físico-química do ASF sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0	0	0
#20 (%)	23,3	30,6	25
#25 (%)	56,4	52,9	51,7
#30 (%)	72,3	66,3	69,1
#35 (%)	2,5	2	2,9
#-35 (%)	1,9	1,1	1,5
Densidade bulk (g/cm ³)	1,868	1,87	1,863
TiO ₂ (%)	1,52	1,53	1,47
SiO ₂ (%)	0,53	0,54	0,93
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,2	0,22
Na ₂ O (%)	0,04	0,04	0,09
K ₂ O (%)	0,02	0,02	0,01
MgO (%)	0,05	0,05	0,1
CaO (%)	0,16	0,15	0,2
Al ₂ O ₃ (%)	97,47	97,47	96,98
IRF (%)	50,1	53,40	51,4
IRFN	1,06	1,13	1,09
Cor	Marrom	Marrom/Azul	Marrom

Tabela 75 - Análise físico-química do ASF sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1300°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0	5	5,2
#50 (%)	21,6	36,9	30,6
#60 (%)	41	31,1	33,2
#70 (%)	68,1	49,7	55,9
#80 (%)	7,8	5,6	6,4
#-80 (%)	2,5	1,9	2
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,727	1,729
TiO ₂ (%)	1,48	1,44	1,37
SiO ₂ (%)	0,4	0,45	0,6
Fe ₂ O ₃ (%)	0,15	0,13	0,17
Na ₂ O (%)	0,06	0,06	0,12
K ₂ O (%)	0,02	0,01	0
MgO (%)	0,04	0,05	0,07
CaO (%)	0,13	0,13	0,17
Al ₂ O ₃ (%)	97,72	97,73	97,5
IRF (%)	55,1	62	56,7
IRFN	1,19	1,41	1,29
Cor	Marrom	Azul/Branco	Marrom

Tabela 76 - Análise físico-química do ASF sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#140 (%)	0,00	0,00	3,30
#200 (%)	18,80	19,90	15,60
#230 (%)	43,30	38,30	32,60
#270 (%)	68,30	64,70	62,90
#325 (%)	75,50	72,40	71,00
#-325 (%)	5,90	5,90	10,10
Densidade bulk (g/cm ³)	1,54	1,42	1,50
TiO ₂ (%)	1,55	1,59	1,83
SiO ₂ (%)	0,55	0,43	2,11
Fe ₂ O ₃ (%)	0,03	0,05	0,07
Na ₂ O (%)	0,05	0,10	0,00
K ₂ O (%)	0,02	0,01	0,00
MgO (%)	0,06	0,05	0,22
CaO (%)	0,15	0,14	0,20
Al ₂ O ₃ (%)	97,59	97,63	95,57
IRF (%)	77,60	82,50	78,50
IRFN	1,99	2,30	2,07
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 77 - Análise físico-química do AR sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P24. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0,00	0,00	8,80
#20 (%)	25,00	38,00	39,00
#25 (%)	47,30	36,90	30,90
#30 (%)	71,00	60,00	30,90
#35 (%)	2,00	1,80	50,20
#-35 (%)	0,20	0,30	1,80
Densidade bulk (g/cm ³)	1,93	1,84	1,78
TiO ₂ (%)	2,42	2,40	2,14
SiO ₂ (%)	0,36	0,70	7,07
Fe ₂ O ₃ (%)	0,16	0,14	0,20
Na ₂ O (%)	0,04	0,05	0,05
K ₂ O (%)	0,03	0,03	0,01
MgO (%)	0,11	0,13	0,24
CaO (%)	0,21	0,18	0,17
Al ₂ O ₃ (%)	96,67	96,37	89,77
IRF (%)	45,50	52,00	48,50
IRFN	0,94	1,12	1,08
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 78 - Análise físico-química do AR sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P60. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	7,90	14,60
#50 (%)	23,90	38,10	37,70
#60 (%)	43,70	28,00	26,50
#70 (%)	70,00	46,10	43,80
#80 (%)	4,80	46,10	3,20
#-80 (%)	0,50	4,80	0,70
Densidade bulk (g/cm ³)	1,79	1,69	1,64
TiO ₂ (%)	2,61	2,54	2,22
SiO ₂ (%)	0,71	0,65	4,55
Fe ₂ O ₃ (%)	0,05	0,06	0,07
Na ₂ O (%)	0,05	0,06	0,05
K ₂ O (%)	0,03	0,03	0,01
MgO (%)	0,26	0,23	0,29
CaO (%)	0,15	0,16	0,17
Al ₂ O ₃ (%)	96,14	96,27	92,21
IRF (%)	59,40	75,60	60,40
IRFN	1,31	1,78	1,46
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 79 - Análise físico-química do AR sem tratamento térmico, tratadas ao ar e tratadas ao argônio para o grão P220. As amostras foram tratadas a 1250°C durante 14 horas.

Produto/Tratamento	S/T	ar	argônio
Telas	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	4,60	18,60
#50 (%)	26,50	39,20	27,60
#60 (%)	40,10	29,20	26,20
#70 (%)	59,20	44,50	42,00
#80 (%)	65,30	49,30	46,80
#-80 (%)	8,20	6,90	7,00
Densidade bulk (g/cm ³)	1,68	1,46	1,58
TiO ₂ (%)	3,40	3,17	4,07
SiO ₂ (%)	0,68	0,61	1,08
Fe ₂ O ₃ (%)	0,09	0,09	0,14
Na ₂ O (%)	0,03	0,03	0,06
K ₂ O (%)	0,03	0,02	0,04
MgO (%)	0,33	0,31	0,46
CaO (%)	0,24	0,20	0,29
Al ₂ O ₃ (%)	95,20	95,57	92,86
IRF (%)	83,70	85,50	84,90
IRFN	1,97	2,32	2,13
Cor	Marrom	Azul	Marrom

Tabela 80 - Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P24 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.

Produto/Tratamento	Bauxita/ST	Bauxita/1250°C	Alumina e Rutilo/ST	Alumina e Rutilo-1250°C	Alumina+Rutilo+Hematita/ST	Alumina+Rutilo+Hematita/1250°C
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#16 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
#20 (%)	4,00	5,80	11,30	8,40	8,00	11,50
#25 (%)	48,30	50,30	45,00	36,60	45,50	45,00
#30 (%)	89,60	86,90	77,40	76,60	72,10	69,60
#35 (%)	5,70	5,40	10,20	13,50	16,10	15,70
#-35 (%)	0,70	2,00	1,40	1,50	3,80	3,20
Densidade bulk (g/cm ³)	1,81	1,77	1,84	1,75	1,79	1,85
TiO ₂ (%)	1,67	1,65	1,62	1,67	1,62	1,60
SiO ₂ (%)	0,38	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃ (%)	0,22	0,26	0,05	0,18	0,21	0,30
Na ₂ O (%)	0,09	0,06	0,36	0,27	0,38	0,20
K ₂ O (%)	0,02	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00
MgO (%)	0,11	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO (%)	0,20	0,21	0,03	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	97,31	97,21	97,94	97,88	97,78	97,90
IRF (%)	46,80	58,90	44,50	56,50	49,50	61,20
IRFN	1,04	1,34	0,97	1,29	1,11	1,33
Cor	Marrom	Azul	Marrom	Azul	Marrom	Azul

Tabela 81- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P60 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.

Produto/Tratamento	Bauxita/ST	Bauxita/1250°C	Alumina e Rutilo/ST	Alumina e Rutilo-1250°C	Alumina+Rutilo +Hematita/ST	Alumina+Rutilo+Hematita/1250°C
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#40 (%)	0,00	0	0,00	0,40	0,00	0,00
#50 (%)	20,50	24,2	3,70	9,00	10,50	3,70
#60 (%)	40,50	39,5	40,20	34,70	40,00	41,50
#70 (%)	68,50	68,5	82,40	76,80	68,70	70,00
#80 (%)	8,10	6,2	12,00	11,60	17,40	21,20
#-80 (%)	2,50	1,1	5,20	2,20	3,40	5,10
Densidade bulk (g/cm ³)	1,82	1,72	1,72	1,77	1,72	1,74
TiO ₂ (%)	1,61	1,61	1,62	1,64	1,62	1,65
SiO ₂ (%)	0,36	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃ (%)	0,19	0,18	0,01	0,15	0,20	0,30
Na ₂ O (%)	0,13	0,13	0,30	0,04	0,28	0,23
K ₂ O (%)	0,01	0,13	0,00	0,00	0,01	0,01
MgO (%)	0,10	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO (%)	0,18	0,24	0,03	0,04	0,00	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	97,42	97,21	98,04	98,13	97,89	97,81
IRF (%)	50,10	59,8	52,50	62,50	54,10	60,80
IRFN	1,11	1,40	1,22	1,42	1,25	1,42
Cor	Marrom	Azul	Marrom	Azul	Marrom	Azul

Tabela 82- Análise físico-química dos óxidos de alumínio eletrofundidos com bauxita; alumina e rutilo; e com alumina, hematita e rutilo para o grão P220 – sem tratamento e tratados à 1250°C durante 14 horas, ao ar.

Produto/Tratamento	Bauxita/ST	Bauxita/1250°C	Alumina e Rutilo/ST	Alumina e Rutilo-1250°C	Alumina+Rutilo +Hematita/ST	Alumina+Rutilo+Hematita/1250°C
Telas	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
#140 (%)	0,00	2,50	0,00	5,30	0,00	4,50
#200 (%)	15,00	11,40	3,90	18,20	2,60	14,60
#230 (%)	40,90	36,80	47,70	34,40	34,30	33,70
#270 (%)	69,30	72,30	80,10	59,70	75,30	64,20
#325 (%)	77,40	80,50	6,50	8,60	86,00	72,30
#- 325 (%)	6,50	5,90	9,50	8,20	11,40	13,10
Densidade bulk (g/cm ³)	1,53	1,42	1,57	1,26	1,56	1,29
TiO ₂ (%)	1,61	1,78	1,62	1,60	1,65	1,63
SiO ₂ (%)	0,41	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	0,27	0,07	0,36	0,34	0,30
Na ₂ O (%)	0,10	0,09	0,26	0,32	0,28	0,29
K ₂ O (%)	0,10	0,06	0,00	0,00	0,01	0,01
MgO (%)	0,13	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO (%)	0,20	0,27	0,03	0,05	0,00	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	97,24	96,86	98,02	97,67	97,72	97,77
IRF (%)	72,80	85,80	75,30	70,30	65,00	78,00
IRFN	1,91	2,42	1,92	2,23	1,68	2,42
Cor	Marrom	Azul	Marrom	Azul/Branco	Marrom	Azul/Branco