



DAFNY PERES CANDIDO SOUZA

**AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS DE
PROCESSO DA PRODUÇÃO DE MASSAS DE
TAMPONAMENTO**

**LAVRAS - MG
2022**

DAFNY PERES CANDIDO SOUZA

**AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO DA PRODUÇÃO
DE MASSAS DE TAMPONAMENTO**

Monografia apresentada a
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Engenharia de Materiais,
para obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Juliano Elvis de Oliveira

Orientador

**LAVRAS - MG
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Souza, Dafny Peres Candido.

Avaliação estatística das variáveis de processo da produção de
massas de tamponamento / Dafny Peres Candido Souza. - 2022.
69 p.

Orientador(a): Juliano Elvis de Oliveira.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,
2022.

Bibliografia.

1. Materiais cerâmicos. 2. Massa de tamponamento. 3.
Superfície de resposta. I. Oliveira, Juliano Elvis de. II. Título.

DAFNY PERES CANDIDO SOUZA

**AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO DA PRODUÇÃO
DE MASSAS DE TAMPONAMENTO**

**STATISTIC EVALUATION OF THE PROCEDURE VARIABLES OF THE
TAPHOLE CLAY PRODUCTION**

Monografia apresentada a
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Engenharia de Materiais,
para obtenção do título de
Bacharel.

APROVADA em 11 de Abril de 2022.

Profa. Dra. Camila Soares Fonseca UFLA
Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira UFLA

Prof. Dr. Juliano Elvis de Oliveira

Orientador

**LAVRAS - MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe que sempre me apoiou e acreditou em mim.

À minha família que sempre rezaram pelo meu sucesso.

Ao meu namorado que esteve comigo em todas dificuldades da graduação.

Aos meus amigos que me ajudaram tanto academicamente quanto pessoalmente.

Ao namorado da minha mãe que sempre esteve a disposição para ajudar.

Aos meus professores que me ensinaram muito mais do que a ementa demanda.

Aos colaboradores do departamento de Processos e DTR da Saint Gobain – Vinhedo, PCR, que me ajudaram em todas etapas dessa pesquisa e também em como crescer como profissional.

Ao programa de graduação em Engenharia de Materiais.

Muito obrigada!

RESUMO

Uma das grandes preocupações das grandes empresas é o controle de suas variáveis de processo, buscando a padronização de seus procedimentos e com isso maior estabilidade e qualidade dos seus produtos. No caso da produção das massas de tamponamento existem duas variáveis fundamentais para o controle do processo: a quantidade de ligante e o tempo de batida. Sendo que ambas influenciam confirmadamente na plasticidade da massa, o atual parâmetro de controle. A avaliação da influência dessas variáveis nas propriedades físicas, mecânicas e plasticidade da massa foi realizada por meio do planejamento composto central, PCC, foram analisadas 3 diferentes formulações, X, Y e Z, cada uma em 11-12 situações variando alternadamente os valores das variáveis estudadas. A metodologia de superfície de resposta, MSR, foi utilizada para estudar os resultados obtidos desse planejamento. Assim, foi possível confirmar a influência do tempo de batida e quantidade de ligante na plasticidade da massa e nas propriedades físicas após queima, sendo a quantidade de ligante a variável que teve maior influência na plasticidade da massa de tamponamento e nas propriedades físicas. No caso das propriedades mecânicas foi analisado uma relação mais indireta com as variáveis estudadas, portanto as respostas foram mais instáveis.

Palavras-chave: Superfície de resposta. Ligante. Planejamento composto central.

ABSTRACT

One of the greatest worries corporations and industries face nowadays is the control of their procedure variables, with the goal of achieving higher padronization, stability and quality of their products. In the specific case of the taphole clay there are two essential variables to control their production: the binder quantity and the mixture time. Considering that both confirmably affect the taphole clay plasticity, which is the current parameter of quality control. The study of the level of influence of this two main variables on the plasticity and the physical and mechanical properties was achieved by means of the mathematical model central composite design, CCD, were analyzed 3 different taphole clay formulations named, X, Y and Z, each of them in 11-12 situations alternately varying the value of the main variables. The response surface methodology, RSM, was used to study the results obtained by the CCD, therefore, it was possible to confirm the influence of the mixture time and the binder quantity on the clay plasticity and its physical properties, with the binder quantity being the more influential on the clay plasticity.

Keywords: Response surface methodology. Binder. Central composite design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Furo De Corrida No Alto Forno.....	19
Figura 2 – Superfície De Resposta.....	21
Figura 3 – Esquema De Funcionamento De Um Plastômero.....	24
Figura 4 – Sistema De Mensuração Da Densidade e Porosidade Aparente.....	25
Figura 5 – Máquina De Ensaio Universal Modelo KRATOS.....	26
Figura 6 – Relação Entre Artigos e Ano De Publicação.....	27
Figura 7 – Relação Entre Artigos e Território De Origem.....	28
Figura 8 – Relação Entre Artigos Por Área Do Conhecimento.....	28
Figura 9 – Superfície De Resposta Do Índice De Extrusão.....	30
Figura 10 – Ajuste Do Modelo.....	30
Figura 11 – Diagrama De Pareto Do Índice De Extrusão.....	31
Figura 12 – Superfície De Resposta Índice De Trabalhabilidade.....	32
Figura 13 – Ajuste Do Modelo.....	32
Figura 14 – Diagrama De Pareto Do Índice De Trabalhabilidade.....	33
Figura 15 – Correlação Entre Índice De Extrusão e Trabalhabilidade.....	33
Figura 16 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (800°C).....	34
Figura 17 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (800°C).....	34
Figura 18 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (1350°C).....	35
Figura 19 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (1350°C).....	35
Figura 20 – Diagramas De Pareto Da Densidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b).....	36
Figura 21 – Diagramas De Pareto Da Porosidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b).....	36
Figura 22 – Ajuste Do Modelo Para Densidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b).....	37
Figura 23 – Ajuste Do Modelo Para Porosidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b).....	37
Figura 24 – Superfície De Resposta RFTA (800°C).....	38
Figura 25 – Superfície De Resposta RFTA (1350°C).....	38
Figura 26 – Diagramas De Pareto RFTA A 800°C (a) e 1350°C (b).....	39
Figura 27 – Ajuste Do Modelo De RFTA A 800°C (a) e 1350°C (b).....	39
Figura 28 – Superfície De Resposta RCTA (800°C).....	40
Figura 29 – Superfície De Resposta RCTA (1350°C).....	40

Figura 30 – Diagramas De Pareto RCTA A 800°C (a) e 1350°C (b).....	41
Figura 31 – Ajuste Do Modelo De RCTA A 800°C (a) e 1350°C (b).....	41
Figura 32 – Comparativo Entre As Queimas Da Porosidade Aparente (a) e Densidade Aparente (b).....	42
Figura 33 – Comparativo Entre As Queimas Da RFTA (a) E RCTA (b).....	42
Figura 34 – Superfície De Resposta Do Índice De Extrusão.....	44
Figura 35 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Extrusão.....	44
Figura 36 – Diagrama De Pareto Do Índice De Extrusão.....	45
Figura 37 – Superfície De Resposta Do Índice De Trabalhabilidade.....	45
Figura 38 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Trabalhabilidade.....	46
Figura 39 – Diagrama De Pareto Do Índice De Trabalhabilidade.....	46
Figura 40 – Índice De Trabalhabilidade X Índice De Extrusão.....	47
Figura 41 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (800°C).....	47
Figura 42 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (800°C).....	48
Figura 43 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (1350°C).....	48
Figura 44 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (1350°C).....	49
Figura 45 – Diagramas De Pareto Da Densidade Aparente A 800°C(a) e 1350°C(b).....	49
Figura 46 – Ajuste Do Modelo Para a Densidade Aparente A 800°C(a) e 1350°C(b).....	50
Figura 47 – Diagramas De Pareto Da Porosidade Aparente A 800°C(a) e 1350°C(b).....	50
Figura 48 – Ajuste Do Modelo Para a Porosidade Aparente A 800°C(a) e 1350°C(b).....	51
Figura 49 – Superfície De Resposta RFTA (800°C).....	51
Figura 50 – Superfície De Resposta RFTA (1350°C).....	52
Figura 51 – Ajuste Do Modelo De RFTA A 800°C (a) E 1350°C (b).....	52
Figura 52 – Diagramas De Pareto RFTA A 800°C (a) E 1350°C (b).....	52
Figura 53 – Superfície De Resposta RCTA (800°C).....	53
Figura 54 – Superfície De Resposta RCTA (1350°C).....	53
Figura 55 – Ajuste Do Modelo De RCTA a 800°C (a) e 1350°C (b).....	54
Figura 56 – Diagramas De Pareto RCTA a 800°C (a) e 1350°C (b).....	54
Figura 57 – Comparativo Entre As Queimas Da Porosidade Aparente (a) E Densidade Aparente (b).....	55
Figura 58 – Comparativo Entre As Queimas Da RCTA (a) e RFTA (b).....	55

Figura 59 – Superfície De Resposta Do Índice De Extrusão.....	56
Figura 60 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Extrusão.....	57
Figura 61 – Diagrama De Pareto Para O Índice De Extrusão.....	57
Figura 62 – Superfície De Resposta Do Índice De Trabalhabilidade.....	58
Figura 63 – Diagrama De Pareto Para O Índice De Trabalhabilidade.....	58
Figura 64 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Trabalhabilidade.....	58
Figura 65 – Relação Entre Índice De Trabalhabilidade E Índice De Extrusão.....	59
Figura 66 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente.....	60
Figura 67 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente.....	60
Figura 68 – Ajuste Do Modelo Para a Densidade Aparente.....	61
Figura 69 – Diagrama De Pareto Para a Densidade Aparente.....	61
Figura 70 – Ajuste Do Modelo Para a Porosidade Aparente.....	62
Figura 71 – Diagrama De Pareto Para a Porosidade Aparente.....	62
Figura 72 – Superfície De Resposta Para RFTA.....	63
Figura 73 – Ajuste Do Modelo Para RFTA.....	63
Figura 74 – Diagrama De Pareto Para RFTA.....	63
Figura 75 – Superfície De Resposta Para RCTA.....	64
Figura 76 – Ajuste Do Modelo Para RCTA.....	64
Figura 77 – Diagrama De Pareto Para RCTA.....	65
Figura 78 – Comparação Da Plasticidade Das Massas.....	65
Figura 79 – Comparação Da Densidade E Porosidade Aparente (800°C).....	66
Figura 80 – Comparação Das Resistências Mecânicas (800°C).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento Fatorial PCC Para A Formulação X.....	23
Tabela 2 – Planejamento Fatorial PCC Para A Formulação Y.....	23
Tabela 3 – Planejamento Fatorial PCC Para A Formulação Z.....	24
Tabela 4 – Resultados para a formulação X.....	29
Tabela 5 – Resultados Da Formulação Y.....	43
Tabela 6 – Resultados Para A Formulação Z.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
3	OBJETIVOS.....	16
3.2	Objetivos Específicos.....	17
3.2	Objetivos Específicos.....	17
4	REVISÃO DA LITERATURA	17
4.1	Materiais Refratários.....	17
4.2	Massa de Tamponamento.....	17
4.3	Ligantes.....	19
4.4	Gestão de Processos	20
4.5	Planejamento Composto Central.....	21
5	MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1	Material	22
5.2	Metodologia.....	22
5.2.1	Análise Bibliométrica.....	22
5.2.2	Planejamento Composto Central (PCC).....	23
5.2.3	Produção das Massas.....	24
5.2.4	Densidade e Porosidade Aparente.....	25
5.2.5	Ensaio Mecânico de RFTA e RCTA.....	26
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
6.1	Formulação X.....	28
6.2	Formulação Y.....	43

6.3	Formulação Z.....	55
7	CONCLUSÃO.....	67
8	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica é responsável por 70% do consumo mundial em volume dos materiais refratários. Considerando que na produção de ferro gusa a massa de tamponamento é um material que está sendo constantemente consumido, grande parcela desse volume se deve a esse refratário (DICCINI, 2019). Assim, torna-se claro a importância da massa de tamponamento para os processos siderúrgicos. Isto posto, o aumento na produção mundial de aço, e consequentemente ferro gusa, impactam diretamente na demanda por produção e qualidade das massas de tamponamento (RIBEIRO, 2010).

As massas de tamponamento são produtos que necessitam ter um desempenho consistente e de rápida resposta, entretanto nesse contexto há carência na literatura de estudos com um conteúdo mais técnico e abrangente, em sua maior parte devido à elevada competitividade entre fabricantes, o que restringiu a divulgação de trabalhos mais detalhados (RIBEIRO, 2010). Dessa forma, a compreensão de como as diversas variáveis influenciam nas propriedades das massas de tamponamento, se faz um tópico interessante para estudo.

Uma das variáveis de processo que o projeto busca compreender melhor é referente ao ligante, um dos principais componentes da massa de tamponamento. Usualmente ligantes são a base de resina fenólicas ou alcatrão e são responsáveis também pelo ajuste de plasticidade da massa (DASH, 2009; DICCINI, 2019). Sendo assim, o projeto em questão visa um estudo da influência no índice de extrusão e nas propriedades físicas da massa de tamponamento, causada pela quantidade de ligante utilizado e também do tempo de mistura.

Para a análise desses pontos será utilizado o planejamento composto central, PCC, com o acréscimo da metodologia de superfície de resposta, MSR. Ambas técnicas conhecidas pela sua eficiência em descrever como variáveis testes afetam as respostas, além de também ser capaz de avaliar se há existência de um fator de correlação entre as variáveis teste (SILVA, 2008).

2 QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Durante o processo de produção das massas de tamponamento existem muitas variáveis de processo que influenciam nas propriedades do produto final, sendo que as duas variáveis mais influentes são a quantidade de ligante adicionado e o tempo de mistura. Sendo o primeiro aspecto apontado o mais complexo, uma vez que está diretamente ligado à plasticidade da massa, propriedade essa que é atualmente o parâmetro de controle mais utilizado pelos fabricantes.

Até então não existe nas diretrizes de processo uma quantidade exata do quanto de ligante tem que ser adicionado para que seja atingido um valor ideal da plasticidade da massa de tamponamento que permita sua liberação para comercialização. Desse modo, é adicionado o ligante em etapas gradativas até que seja obtido o resultado esperado do parâmetro de controle. Dessa forma, mudanças no ligante utilizado podem proporcionar alterações bruscas na qualidade do produto final. Percebe-se então que é necessário um estudo mais aprofundado sobre como a quantidade de ligante adicionado a massa de tamponamento influencia no parâmetro de controle e nas propriedades do produto.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O presente projeto visa analisar, a partir de um estudo estatístico de superfície de resposta, a influência de duas variáveis de processo, quantidade de ligante e tempo de batida, no parâmetro de controle (índice de extrusão), no índice de trabalhabilidade e em algumas propriedades físicas e mecânicas das massas de tamponamento, densidade e porosidade aparente e resistência à flexão e compressão à temperatura ambiente.

3.2 Objetivos Específicos

- Confirmação da existência de uma relação entre o tempo de batida e o índice de extrusão;
- Análise da viabilidade da utilização do índice de trabalhabilidade como um parâmetro de controle secundário.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Materiais Refratários

Os materiais refratários são materiais que tem o objetivo de serem facilitadores na produção de outros itens, em sua maioria os refratários são de origem cerâmica e definidos pela presença de propriedades como um elevado ponto de fusão, resistência estrutural e estabilidade físico-química em altas temperaturas e ambientes corrosivos, além de apresentarem-se estáveis diante à grandes variações de temperatura (BORGES, 2016; LEE; MOORE, 1998).

Em função dessas características os materiais refratários são aplicados amplamente em indústrias de base, de metais ferrosos, não ferrosos, vidros, cerâmica, dentre outras, compondo grande parte dos equipamentos fabris, como fornos, reatores e incineradores (BORGES, 2016; FU et al., 2022; LEE; MOORE, 1998). Sendo a indústria siderúrgica e aciaria as maiores consumidoras de materiais refratários, como no revestimento de equipamentos, canais de corrida de gusa e altos-fornos (BITENCOURT; PANDOLFELLI, 2013a; BORGES, 2016; BRAGANÇA, 2012; LEE; MOORE, 1998).

Devido à alta competitividade e constante evolução dessas indústrias, essa tendência é algo que se transmite para o mercado de refratários, demandando um aumento na qualidade dos refratários e adequação às condições de serviço, melhor custo/benefício, otimização de processos produtivos e mudança na formulação (BITENCOURT; PANDOLFELLI, 2013a; BRAGANÇA, 2012; DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001).

Dentre este diverso mercado dos materiais refratários estão os revestimentos refratários, que servem como uma camada de proteção dos fornos e reatores, impactando intensamente na vida útil do equipamento (LEE; MOORE, 1998). Mais especificamente, o presente trabalho apresenta uma análise mais aprofundada do processo de produção das massas de tamponamento, utilizadas no setor siderúrgico na etapa de vazamento do ferro gusa e também auxiliando na proteção do interior do cadinho.

4.2 Massa de Tamponamento

Uma das etapas mais críticas na indústria siderúrgica é a de perfuração e tamponamento do furo de corrida, um canal pelo qual ocorre o vazamento do ferro gusa e escória, figura 1. O principal material utilizado nessa etapa é a massa de tamponamento, cujo o objetivo primário é vedar o furo de corrida, após a drenagem do ferro gusa do cadinho e permitir a subsequente perfuração para corridas futuras (DICCINI, 2019; RIBEIRO et al., 2013; SIVA KUMAR; MOHAMMED; SRINIVASA RAO, 2018a; STEENKAMP; MNISI; SKJELDESTAD, 2018).

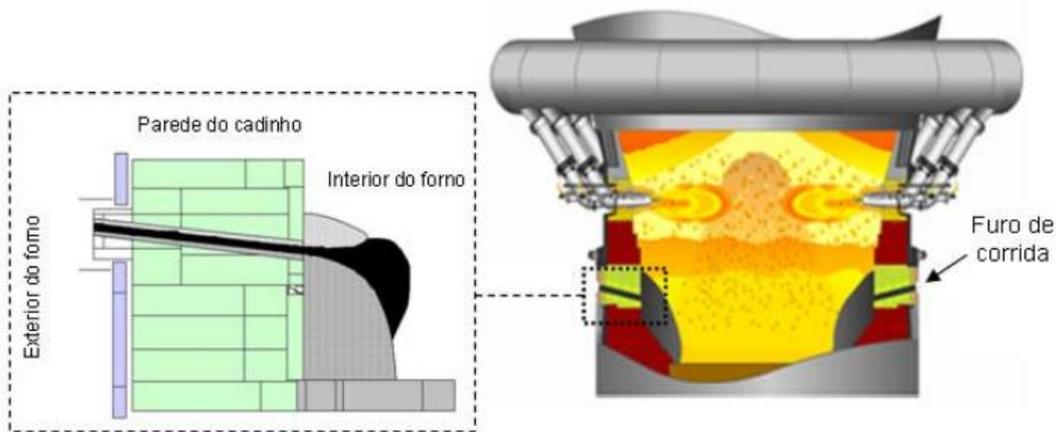
Assim a massa de tamponamento é um material refratário monolítico essencial na indústria metalúrgica para promover operações de vazamento de gusa estáveis e proteger a região interna do cadinho, prolongando sua vida útil (OTSUBO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2013; SHATOKHIN; ZIATDINOV; MANASHEVA, 2014).

Além das propriedades usuais inerente aos materiais refratários, as massas de tamponamento precisam apresentar propriedades muito bem balanceadas, por exemplo, devem ter uma alta plasticidade para facilitar a etapa de injeção no furo de corrida, porém não tão plásticas ao ponto de não conseguirem deslocar o gusa e a escória restantes para dentro do cadinho. Alta taxa de sinterização para devida vedação do furo de corrida, contudo, sem que a sua cura ocorra antes de preencher todo o comprimento do canal. Devem ser resistentes o suficiente para não haver vazamentos, mas ainda assim permitirem futuras operações de perfuração facilmente (DASH, 2009; DICCINI, 2019; NELSON; HUNDERMARK, 2016; RIBEIRO, 2010).

A massa de tamponamento é um refratário de alta complexidade, sua composição é constituída de diversas matérias-primas com diferentes funções, além de ser um produto dinâmico que passa por diversas mudanças em sua formulação para ajustes de propriedades segundo às necessidades em uma dada situação (DICCINI, 2019; RIBEIRO et al., 2013; SIVA KUMAR; MOHAMMED; SRINIVASA RAO, 2018b). Sendo que, quanto mais extremas as condições do ambiente do alto-forno, melhor deve ser a qualidade das matérias-primas utilizadas (DICCINI, 2019).

De uma maneira geral as massas de tamponamento são compostas de agregados refratários (aluminosos, sílico-aluminosos ou silicosos), argilo-minerais, fontes de carbono, agentes anti-erosivos/corrosivos, elementos ou ligas metálicas e o ligante, usualmente resina ou piche e derivados (SIVA KUMAR; MOHAMMED; SRINIVASA RAO, 2018a).

Figura 1 – Furo De Corrida No Alto Forno



Fonte: Ribeiro, 2010

4.3 Ligantes

Ligantes são materiais, usualmente líquidos, que apresentam a função de manter a mistura unida. É um dos principais componentes da massa de tamponamento. Existem pré-requisitos para a seleção de ligantes. Como por exemplo compostos de elevado teor de carbono capaz de ser fixado por pirólise, estabilidade para estocagem, fluidez adequada, boa adesão e preço acessível (BITENCOURT; PANDOLFELLI, 2013b).

Além de atuar como ligante entre as matérias primas, nas massas de tamponamento esse aditivo tem também a função de ajustar a plasticidade da mistura. Os principais ligantes utilizados nas formulações de massas de tamponamento são as resinas fenólicas e o alcatrão e seus derivados (BITENCOURT; PANDOLFELLI, 2013b; DASH, 2009).

As massas de tamponamento contendo agentes ligantes a base de alcatrão apresentam uma boa plasticidade, devido às características termoplásticas, uma ótima capacidade de fixação de carbono, baixo custo e boa adesão, contudo o tempo de cura é maior. Por outro lado, as massas a base de resina apresentam cura rápida, promovendo menores tempos entre vazamentos e maior resistência pós cura, porém tem baixa estabilidade em estocagem, devido à polimerização e aumento da viscosidade, assim uma grande quantidade de resina é necessária para garantir a plasticidade desejada (DASH, 2009; NELSON; HUNDERMARK, 2016).

Na questão de liberação de compostos nocivos, ambos ligantes apresentam essa característica, o ligante libera como voláteis hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), como benzopireno (BaP), considerado carcinogênicos e as resinas contem formaldeído, prejudicial à saúde humana e meio ambiente (DICCINI, 2019; RIBEIRO, 2010).

Apesar do ligante ser fundamental para a plasticidade da massa, sempre busca-se utilizar a mínima quantidade possível, para assim garantir uma boa compactação e rápida cura da massa, além de minimizar a quantidade de voláteis nocivos durante a utilização da massa. A redução de ligantes também está associada à minimização de voláteis liberados após a injeção da massa, uma vez que esses podem promover alteração nas propriedades da massa, como o aumento na porosidade (WANG et al., 2017).

4.4 Gestão de Processos

Frente à alta competitividade de mercado do cenário atual as empresas são forçadas a concentrarem seus esforços na busca pela qualidade e padronização de seus processos, produtos e serviços, atendendo às demandas e necessidades do cliente (HÖRBE et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2014). Nesse contexto surge a gestão de processos, ferramenta existente com o objetivo de otimizar e melhorar o desempenho dos processos empresariais, assegurando a melhoria contínua do desempenho da organização (CONTADOR et al., 2005; HÖRBE et al., 2015). Dentre os benefícios da utilização dessa abordagem estão o aumento de satisfação do cliente, redução de custos, melhor qualidade e padronização do produto ou serviço e maior compreensão sobre a empresa e suas atividades (IRITANI et al., 2015).

Entretanto para que seja possível a aplicação de gestão de processo é necessário que se tenha conhecimento dos processos e suas variáveis, um método de se obter esse conhecimento é a partir de ferramentas estatísticas (ECHEVESTRE, 1997).

Durante a execução de um processo existem diversas variáveis, denominadas de variáveis de processo, que influenciam na qualidade do produto, assim é interessante a identificação, análise e controle dessas variáveis, para assegurar a qualidade e padronização do produto. Em sua maioria os processos industriais são processos multivariados, a análise multivariada é utilizada quando existem diversos parâmetros com efeitos que podem não ser independentes (MENDONÇA SOUZA; HELENA RIGÃO, 2005). Para a análise de sistemas multivariados ênfase é dada aos planejamentos fatoriais, por possibilitaram a análise simultânea de grande número de variáveis a partir de um número reduzido de ensaios (PERALTA-ZAMORA; MORAIS; NAGATA, 2005).

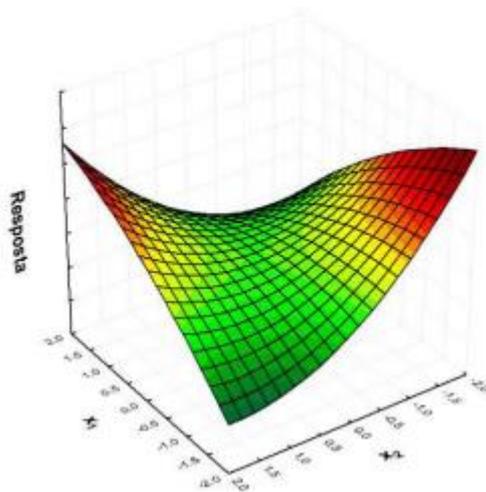
4.5 Planejamento Composto Central

O planejamento experimental é uma ferramenta utilizada no estudo do efeito conjunto de vários fatores sobre uma variável resposta de interesse. O planejamento fatorial é uma das técnicas mais conhecidas, no qual estão envolvidos k fatores, variáveis, cada um deles presente em diferentes níveis. O objetivo dos planejamentos fatoriais é a otimização e podem ser amplamente utilizados com segurança na avaliação da influência de variáveis de processo, de modo a fornecer o efeito individual e das possíveis interações entre as variáveis selecionadas, assim, todas as variáveis são estudadas de maneira simultânea, o que possibilita a melhor interpretação dos resultados (DA PONTE et al., 2017; SILVA, 2008).

Com o tempo foram criadas novas metodologias a fim de reduzir o número de pontos experimentais dos delineamentos de tratamentos mais complexos, dentre as técnicas criadas está a que utiliza os delineamentos compostos, desenvolvida inicialmente por Box e Wilson. Dentre os planejamentos padrões o planejamento composto central é considerado um delineamento ótimo, eficiente e que requer poucos ensaios para a sua realização (MATEUS; BARBIN, 2001).

O planejamento composto central é um delineamento fatorial completo, de segunda ordem e simétrico, composto de duas partes, o fatorial 2^k , com um ponto central e suas repetições, e a parte axial, de modo geral é uma extensão do modelo linear 2^k (MATEUS; BARBIN, 2001; SILVA, 2008; VICENTINI et al., 2011). O planejamento pode posteriormente ser transformado em uma superfície de resposta como a da figura 2.

Figura 2 – Superfície De Resposta



Fonte: Diccini, 2019

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

Para a produção das massas de tamponamento todas as matérias-primas e equipamentos para a análise necessários foram fornecidos pela Saint Gobain, Vinhedo - SP, as formulações das massas não foram descritas por questões de sigilo empresarial, sendo apenas denominadas de formulação X, Y e Z. Foram selecionadas essas três formulações de diferentes plasticidades comerciais, porém composição semelhante, para avaliar se existia uma diferença na intensidade da influência do tempo de batida e da quantidade de ligante em formulações consideradas comercialmente como normal, X, dura, Y, e mole, Z.

5.2 Metodologia

O projeto foi dividido em 5 etapas, a primeira foi a de planejamento do fatorial tipo CCD, após análise de produções anteriores foi escolhido o ponto central e a partir desse foram construídos os pontos do planejamento fatorial, buscando uma variação para os pontos fatoriais de no máximo uma amplitude de 2% de ligante e 10 minutos do tempo de batida. Após determinado os pontos do planejamento, pôde ser iniciada a segunda etapa, a produção das massas e aferição de suas plasticidades por meio dos índices de extrusão e trabalhabilidade. Após finalizada a produção das massas elas foram queimadas à 800°C e à 1350°C por 3 horas e em seguida foram analisadas as propriedades físicas, etapa 3, e mecânicas, etapa 4. Com exceção da formulação Z na qual apenas a queima a 800°C foi analisada. Por fim os dados obtidos serão analisados em uma superfície de resposta no software Statistica.

O preparo das misturas de massa de tamponamento e as suas análises, de densidade e porosidade aparente, assim como os ensaios mecânicos de resistência à flexão e à compressão foram todos efetuados na Saint Gobain unidade PCR em Vinhedo, SP, com o apoio dos funcionários do Departamento Técnico de Refratários, DTR, e do Departamento de Processos.

5.2.1 Análise Bibliométrica

Inicialmente foi realizado um estudo de análise bibliométrica. A bibliometria ou análise bibliométrica é uma análise estatística utilizada para avaliar a disseminação do conhecimento científico em determinada base, para esse trabalho foi escolhida a base SCOPUS, por ser uma das bases científicas mais ricas possível de encontrar no portal da CAPES, além de possibilitar em sua própria plataforma algumas análises.

O termo de busca utilizado para a análise foi “taphole clay” considerando que as massas de tamponamento são o foco do trabalho, assim foram analisados todos artigos científicos, excluindo os documentos publicados no ano de 2022, que possuíssem o termo da busca presente no seu título, resumo e/ou palavras-chave.

5.2.2 Planejamento Composto Central (PCC)

O Planejamento Composto Central (PCC) com dois fatores foi aplicado para analisar a influência das condições operacionais na produção de massas de tamponamento. Conforme apresentado nas tabelas 1 a 3 para as formulações X, Y e Z, respectivamente, as variáveis do estudo foram: quantidade de ligante (X_1) e tempo de batida (X_2). Como parâmetro de resposta serão analisados, o índice de extrusão, índice de trabalhabilidade, densidade aparente, porosidade aparente, resistência à flexão e resistência à compressão à temperatura ambiente. O planejamento resultou em um total de 12 experimentos, sendo 4 dos pontos axiais, 4 dos pontos fatoriais e 4 repetições no ponto central para a formulação X, as formulações Y e Z tiveram apenas 3 repetições no ponto central.

As variáveis foram codificadas nos níveis inferiores e superiores de -1 a +1, respectivamente, para os pontos fatoriais, e 0 para os pontos centrais. No caso dos pontos axiais os valores dos níveis inferiores e superiores foram de -1,4 e +1,4, respectivamente, segundo a metodologia de um planejamento PCC rotacional.

Tabela 1 – Planejamento Fatorial PCC Para A Formulação X

Variáveis	Símbolo	Nível				
		-1,4	-1	0	+1	+1,4
Quantidade de Ligante (%)	X_1	14,7	15	17	19	19,3
Tempo de Batida (min)	X_2	31	35	45	55	59

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 2 – Planejamento Fatorial PCC Para A Formulação Y

Variáveis	Símbolo	Nível				
		-1,4	-1	0	1	1,4
Quantidade de Ligante (%)	X_1	14,7	15	17	19	19,3
Tempo de Batida (min)	X_2	23	25	30	35	37

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 3 – Planejamento Fatorial PCC Para A Formulação Z

Variáveis	Símbolo	Nível				
		-1,4	-1	0	1	1,4
Quantidade de Ligante (%)	X ₁	14,4	15	16,5	18	18,6
Tempo de Batida (min)	X ₂	18	20	25	30	32

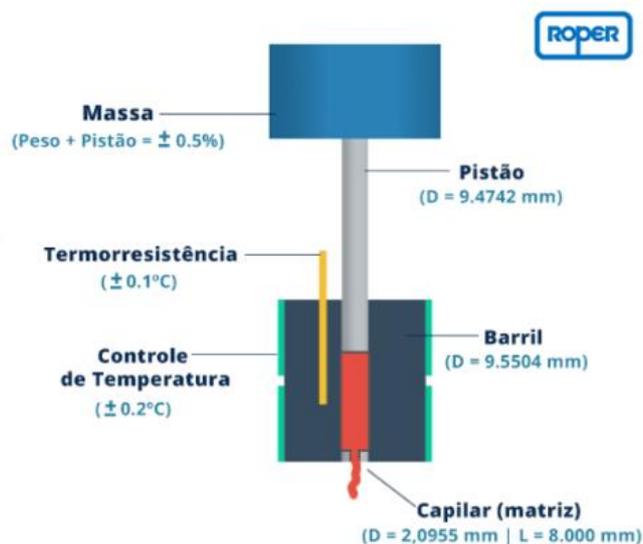
Fonte: Do autor (2022).

5.2.3 Produção das Massas

As massas foram produzidas em um misturador de escala de laboratório, sendo que cada batida produz 10 Kg de massa. O índice de extrusão, parâmetro de controle, foi mensurado logo após o término da produção de cada massa, segundo a norma ABNT NBR 9881:2012, assim como o índice de trabalhabilidade, seguindo a norma ABNT NBR 6368:2011 com a ligeira alteração de que a medida foi realizada com a massa aquecida a 60°C, de modo que os dados obtidos do índice de extrusão e trabalhabilidade pudessem ser comparados sem a influência da temperatura.

A medida do índice de extrusão é realizada em um equipamento semelhante a um plastômero, como o da figura 3, a massa é inserida em uma cavidade e um pistão exerce uma força compressiva a fim de extrudar uma certa quantidade de massa por um orifício de dimensões pré-estabelecidas, desse modo o índice de extrusão é uma medida da pressão necessária para extrudar uma certa quantia de massa, uma massa comercialmente dura, apresenta um alto índice de extrusão.

Figura 3 – Esquema De Funcionamento De Um Plastômero



Fonte: digitrol.com.br (2022).

Já o índice de trabalhabilidade é mensurado com base na deformação da massa quando sofre uma força de impacto. A altura da massa é medida em um determinado momento inicial e posteriormente é medida a altura da massa após o impacto do pistão, sendo assim, o índice de trabalhabilidade é um coeficiente que expressa a facilidade de deformação da massa, equação 1, uma massa comercialmente dura, apresenta um baixo índice de trabalhabilidade.

$$\text{Índice de Trabalhabilidade (IT)} = \frac{H_{\text{pós deformação}} - H_{\text{inicial}}}{H_{\text{inicial}}} \quad (1)$$

Posteriormente essas massas foram prensadas a 8,5 MPa por 10 segundos para que fossem produzidos os corpos de prova para os subseqüentes ensaios mecânicos e físicos, seguindo a norma ABNT NBR 11220:2010.

5.2.4 Densidade e Porosidade Aparente

Os ensaios de densidade e porosidade aparente foram realizados conforme a norma ABNT NBR 16661:2017. Na qual utiliza-se o peso a seco, imerso e saturado do corpo de prova, conforme o esquema na figura 4 e as equações 2 e 3. Sendo que a porosidade analisada especificamente é referente aos poros abertos.

Figura 4 – Sistema De Mensuração Da Densidade e Porosidade Aparente



Fonte: Do autor (2022).

$$\text{Densidade Aparente (DA)} = \frac{\text{Peso Seco}}{\text{Peso Saturado} - \text{Peso imerso}} \quad (2)$$

$$\text{Porosidade Aparente (PA)} = \frac{\text{Peso Saturado} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Saturado} - \text{Peso Imerso}} \quad (3)$$

5.2.5 Ensaio Mecânico de RFTA e RCTA

Os ensaios mecânicos de resistência à flexão em temperatura ambiente, RFTA, e resistência à compressão em temperatura ambiente, RCTA, foram realizados em uma máquina de ensaios universal, modelo KRATOS, figura 5. Segundo a norma ABNT NBR 11222:2010.

Figura 5 – Máquina De Ensaio Universal Modelo KRATOS



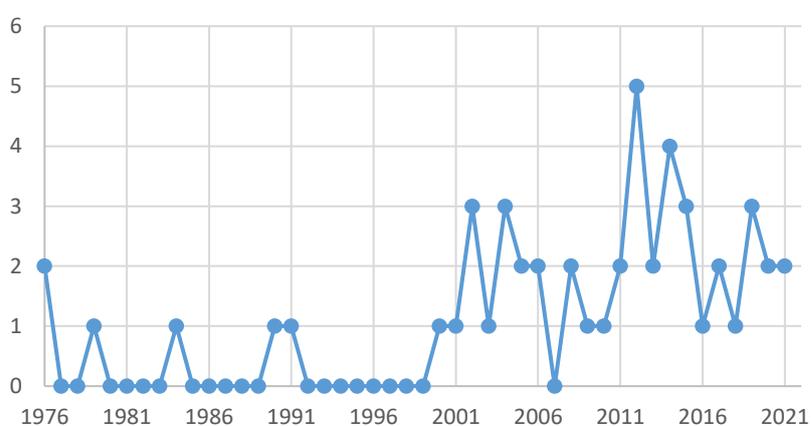
Fonte: Do autor (2022).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da bibliometria foi possível inferir em um primeiro momento que não há muitas publicações no tema de massas de tamponamento especificamente, sendo obtidos apenas 50 documentos na busca da base, o que é corroborado pela baixa média de artigos publicados por ano, indicando uma oportunidade para elaboração de estudos e pesquisas mais aprofundados sobre o tema.

Dos dados obtidos da primeira análise de bibliometria é a de quantidade de artigos por ano desde o ano de 1976 até 2021, figura 6.

Figura 6 – Relação Entre Artigos e Ano De Publicação

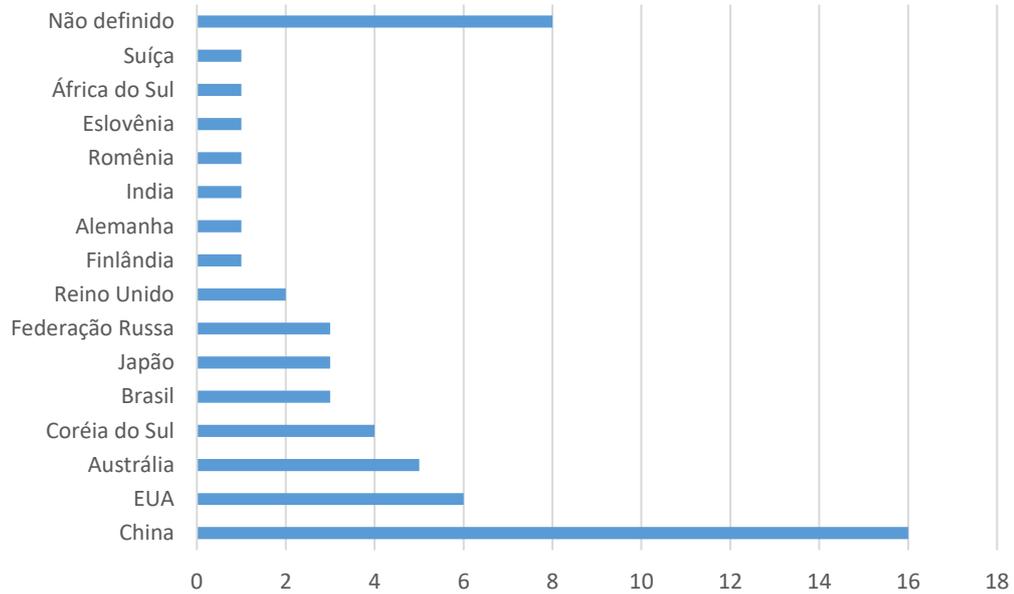


Fonte: Do autor (2022).

Observa-se então que houveram no máximo 5 publicações em um ano, em 2012, e uma média de 1 artigo por ano, sendo interessante observar que 88% dos artigos publicados são dos últimos 20 anos.

Na figura 7 é possível analisar a origem mais frequente dos artigos publicados sobre massas de tamponamento, assim vemos que a China é o país com maior domínio sobre o tema, tendo produzido 16 artigos sobre o tema, representando 28% de todo o conteúdo existente na base, o Brasil está localizado em quinto lugar junto com o Japão e a Federação Russa, é interessante denotar que os 5 países com maior detenção da criação de conteúdo sobre o tema também são países conhecidos pela sua presença marcante na produção mundial de aço.

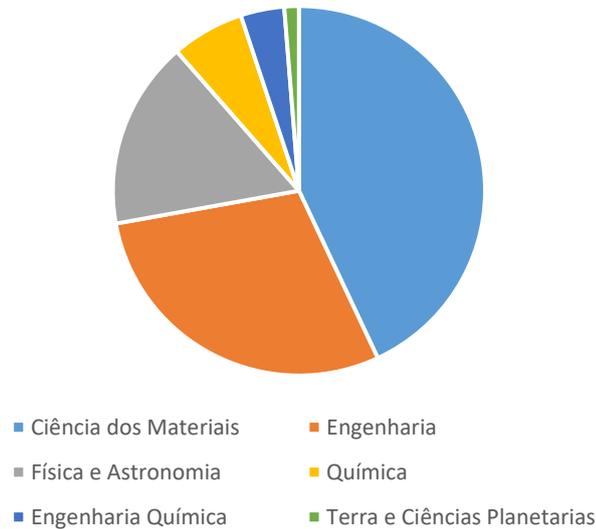
Figura 7 – Relação Entre Artigos e Território De Origem



Fonte: Do autor (2022).

No quesito de áreas de conhecimento avaliando a figura 8 observa-se que a área de Ciências dos Materiais é a área predominante na pesquisa sobre o tema compreendendo 43% dos artigos, seguida por engenharia com 29,1%.

Figura 8 – Relação Entre Artigos Por Área Do Conhecimento



Fonte: Do autor (2022).

6.1 Formulação X

Na tabela 4, a seguir, seguem os dados obtidos dos experimentos realizados com a formulação X, considerada a formulação de plasticidade mediana dentre as formulações analisadas.

Tabela 4 – Resultados Para A Formulação X

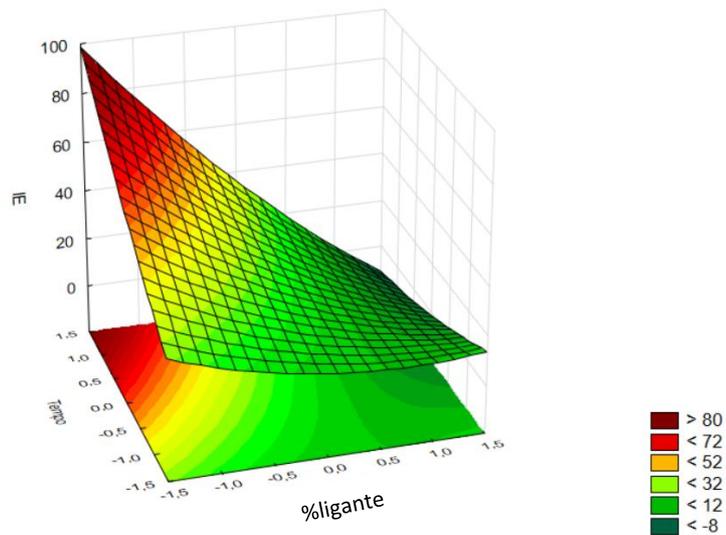
Formulações	Variáveis Independentes		IE	IT	DA (800)	PA (800)	RFTA (800)	RCTA (800)	DA (1350)	PA (1350)	RFTA (1350)	RCTA (1350)
	% Ligante	Tempo de Batida (min)										
1	15	35	38,75	5,77	2,15	0,22	9,80	20,12	2,19	0,20	17,79	26,91
2	15	55	77,32	6,90	2,19	0,21	5,68	25,56	2,23	0,20	8,99	42,13
3	17	45	30,12	11,43	2,14	0,23	7,03	19,75	2,14	0,20	11,61	28,27
4	17	45	16,26	11,69	2,11	0,24	7,92	16,49	2,17	0,20	11,10	28,25
5	17	45	22,36	10,96	2,12	0,24	6,48	20,98	2,15	0,19	12,12	29,50
6	17	45	21,69	13,51	2,09	0,25	6,80	17,79	2,15	0,19	13,23	31,21
7	17	31	12,12	15,38	2,06	0,26	8,61	16,82	2,09	0,20	12,47	31,59
8	17	59	29,43	8,27	2,14	0,22	6,26	20,87	2,19	0,20	7,62	34,25
9	19	35	5,72	15,79	1,95	0,30	7,29	17,11	1,96	0,22	14,80	30,51
10	19	55	2,46	75,86	1,87	0,33	9,42	17,12	1,91	0,22	15,05	33,29
11	14,7	45	45,88	7,80	2,14	0,24	6,46	20,43	2,20	0,20	11,54	39,27
12	19,3	45	4,45	40,33	1,96	0,29	7,75	13,19	1,99	0,21	11,54	26,73

Fonte: Autoria Própria

A primeira resposta analisada foi o índice de extrusão, podendo ser considerado a resposta mais importante, uma vez que é o atual parâmetro de controle da produção. O índice de extrusão foi mensurado logo após a produção da massa, antes da sua prensagem e queima, conforme descrito na metodologia.

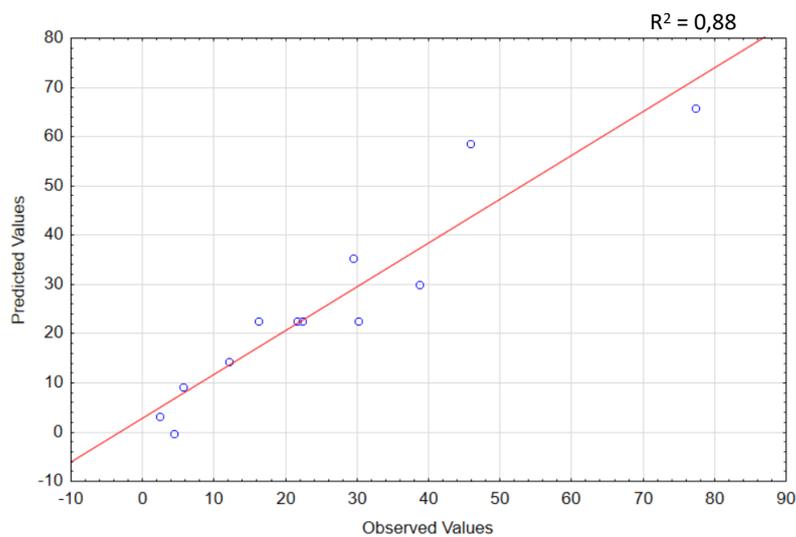
A partir dos dados de índice de extrusão pôde ser obtida a superfície de resposta, figura 9, já o gráfico da figura 10 foi utilizado para analisar a qualidade de ajuste do modelo proposto, sendo possível notar que há pouca diferença entre os valores propostos e os valores observados, o que implica em uma baixa quantidade de resíduos e em um bom ajuste, justificado pelo coeficiente de determinação R^2 de 0,88.

Figura 9 – Superfície De Resposta Do Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

Figura 10 – Ajuste Do Modelo

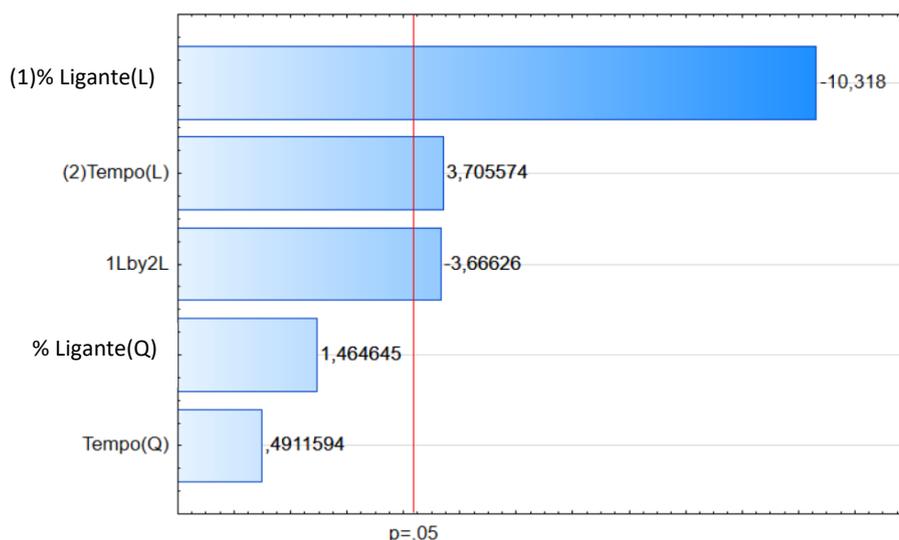


Fonte: Do autor (2022).

Pela observação da superfície de resposta confirmou-se, como esperado, a relação inversamente proporcional entre adição de ligante e índice de extrusão, assim como o efeito diretamente proporcional do tempo de batida. Uma maior quantidade de ligante implica em uma massa mais plástica, logo uma pressão de extrusão menor, acredita-se que a influência do tempo de batida ser inversamente proporcional à pressão de extrusão é devido a perda do ligante adicionado, quanto mais tempo de mistura da massa após a adição do ligante mais seca ela se torna.

Dentre os efeitos considerados no modelo da superfície pode ser avaliados quais foram os mais significativos a partir do diagrama de Pareto, figura 11, assim, pode-se observar que os efeitos mais significativos são as componentes lineares do ligante e do tempo de batida, assim como o termo de interação entre esses.

Figura 11 – Diagrama De Pareto Do Índice De Extrusão

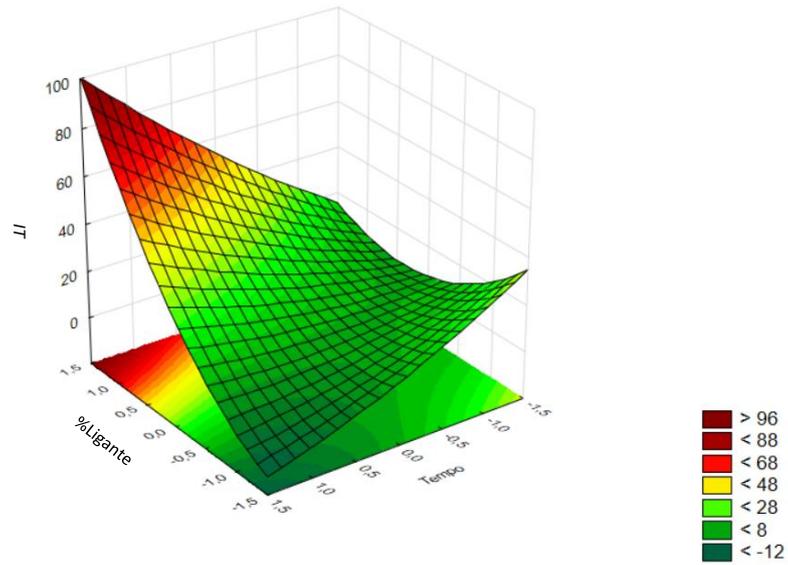


Fonte: Do autor (2022).

O índice de trabalhabilidade, assim como o índice de extrusão, também é uma resposta da plasticidade da massa. Desse modo, seu estudo foi importante para verificar a possibilidade de sua utilização como parâmetro de controle secundário. O ensaio foi realizado conforme descrito na metodologia para fins de comparação com o índice de extrusão.

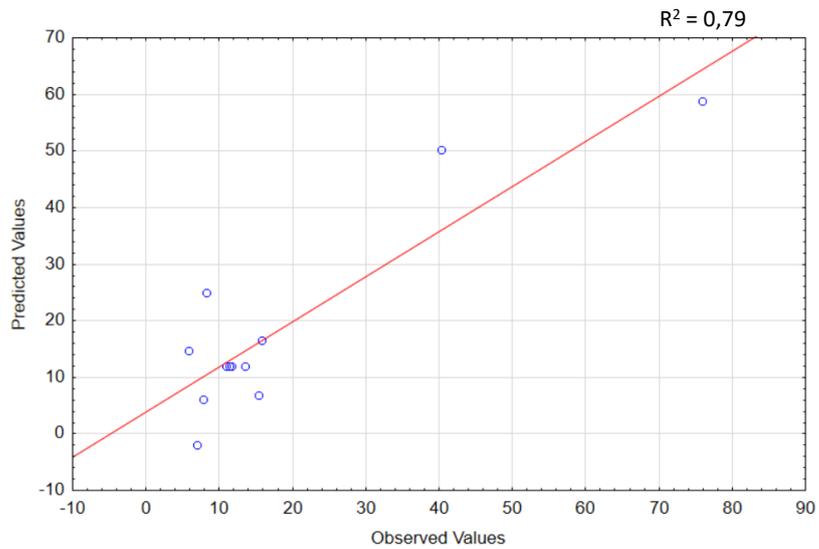
A superfície de resposta obtida para o índice de trabalhabilidade, figura 12, o modelo não apresentou um ajuste tão bom quanto o do índice de extrusão, com R^2 de 0,79 figura 13, pela análise do modelo pode-se verificar que as relações entre os fatores analisados, quantidade de ligante e tempo de batida, e o índice de trabalhabilidade foram opostos ao que foi observado para o índice de extrusão. Algo esperado, considerando que o índice de extrusão é uma medida da pressão necessária para a extrusão da massa por determinada matriz e o índice de trabalhabilidade é uma quantificação da deformação da massa quando sujeito a impactos. Sendo assim, uma massa com alto índice de extrusão é uma massa que necessita de uma maior pressão para passar por uma determinada matriz, ou seja, uma massa dada como “dura”, essa mesma massa deformaria pouco sobre impacto, o que resultaria em um baixo índice de trabalhabilidade.

Figura 12 – Superfície De Resposta Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

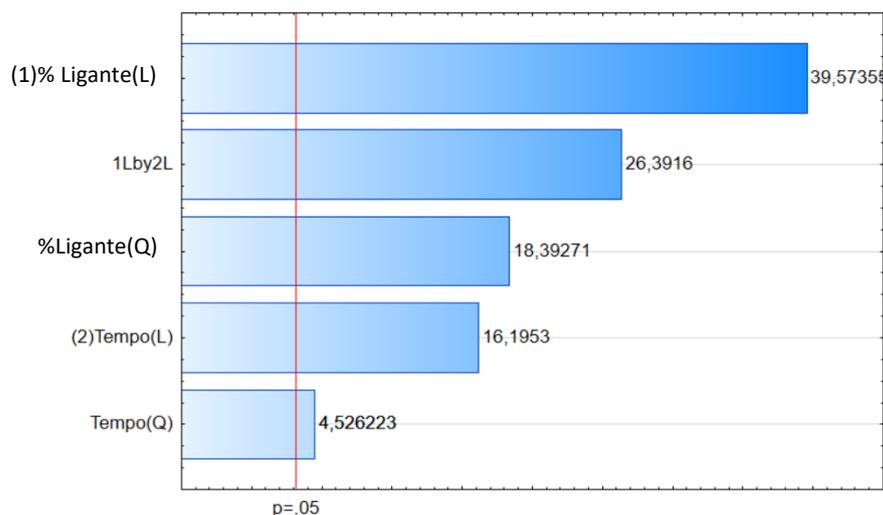
Figura 13 – Ajuste Do Modelo



Fonte: Do autor (2022).

O diagrama de Pareto para o índice de trabalhabilidade está apresentado na figura 14 e todos os efeitos analisados pelo modelo foram dados como significativos.

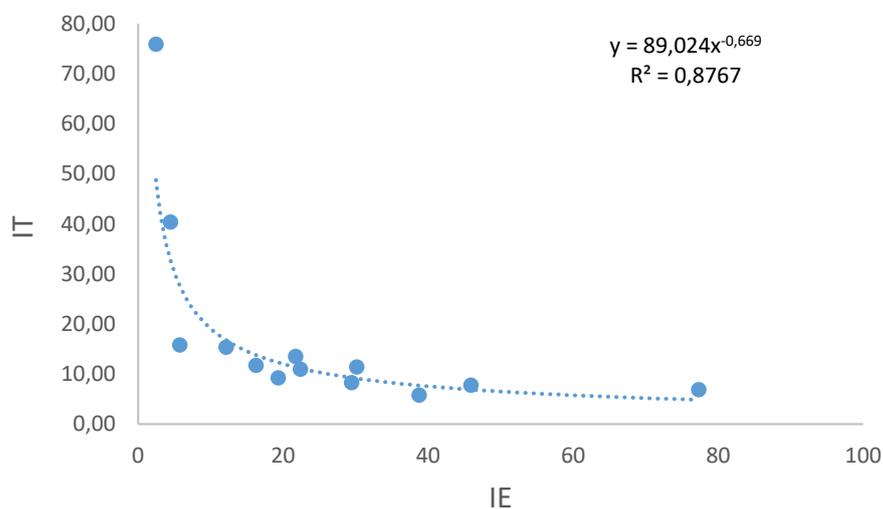
Figura 14 – Diagrama De Pareto Do Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

Para avaliar a relação entre o índice de extrusão e de trabalhabilidade foi plotado um gráfico com seus valores, figura 15, e a relação encontrada aparenta ter um caráter de decaimento exponencial.

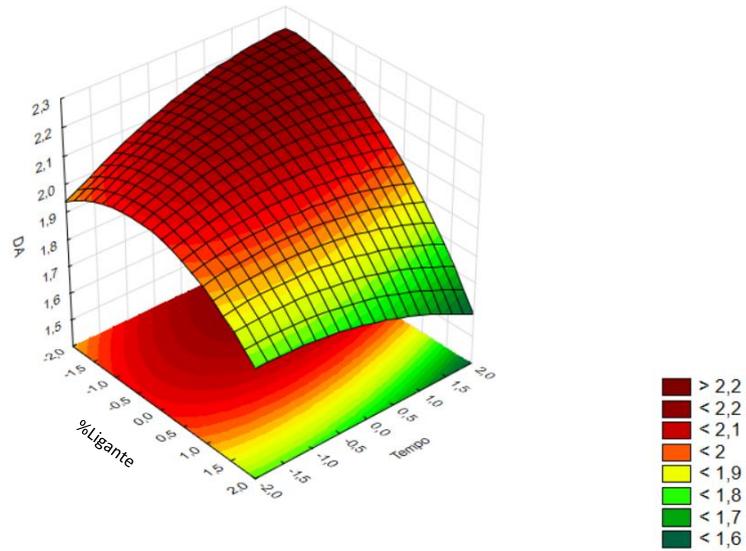
Figura 15 – Correlação Entre Índice De Extrusão e Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

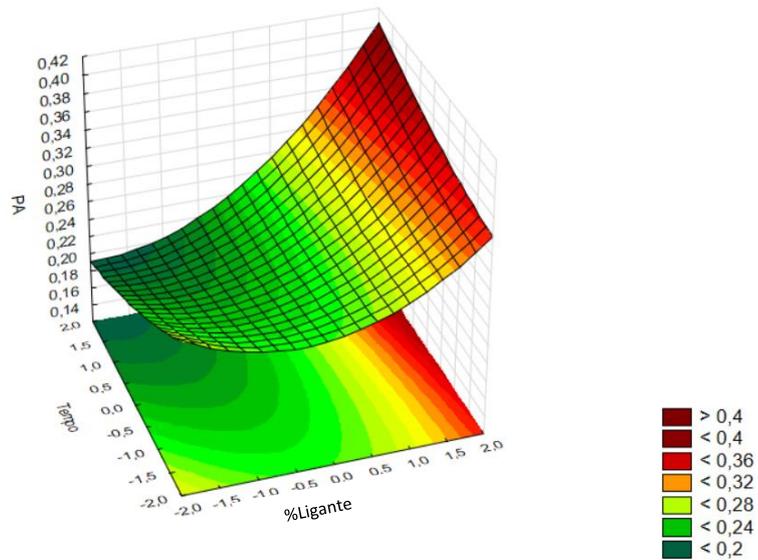
Quanto aos ensaios de densidade e porosidade aparente obtiveram as superfícies representadas nas figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

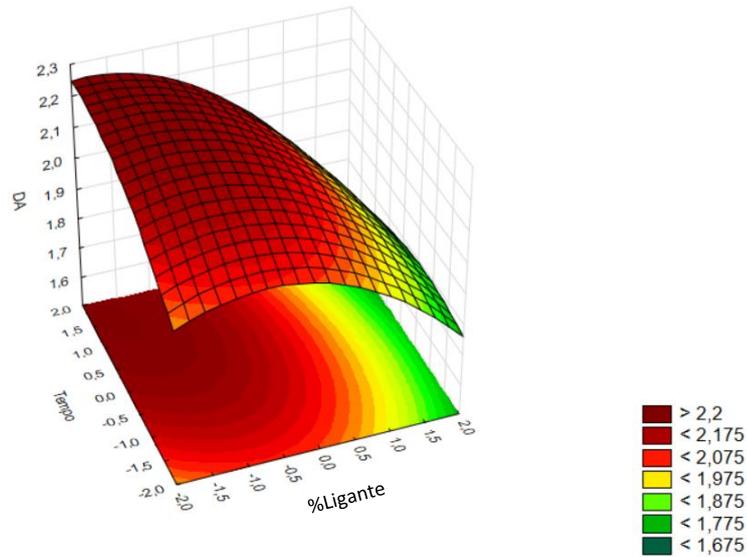
Figura 17 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

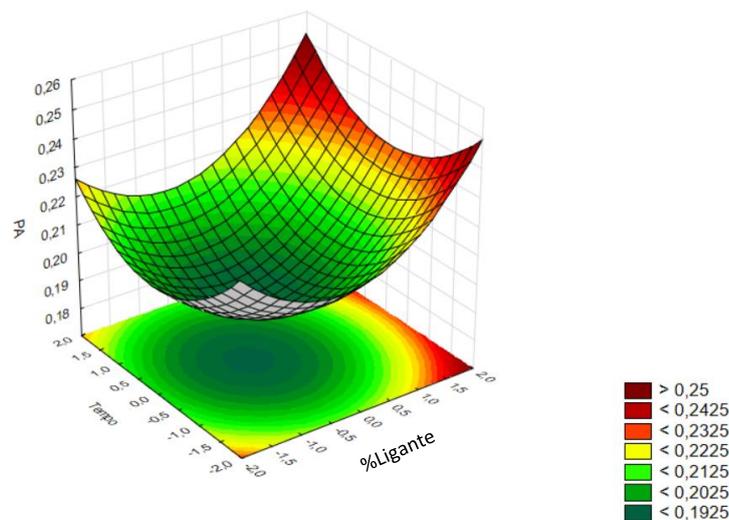
Assim como previsto, os resultados para porosidade e densidade aparente foram inversos, casos com maior presença de ligante na composição resultam em massas com maior porosidade e menor densidade. O mesmo foi observado também para a queima a 1350°C, figuras 18 e 19.

Figura 18 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (1350°C)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 19 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (1350°C)



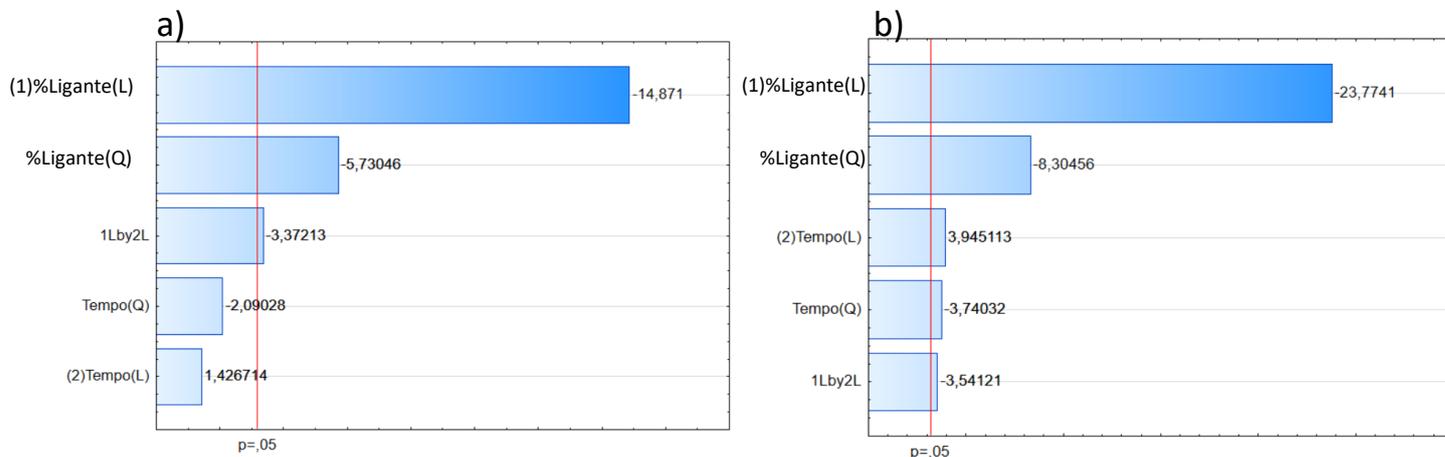
Fonte: Do autor (2022).

O aumento da quantidade de ligante reflete em uma maior porosidade em função da maior perda de voláteis durante a queima e implicando também em uma menor densidade. Essas propriedades físicas podem ser extremamente relevantes na aplicação da massa nos altos fornos, uma massa com uma alta presença de poros abertos é mais afetada pela corrosão, já que pode haver penetração da escória nesses poros.

Os diagramas de Pareto da densidade aparente para ambas as queimas, figura 20, mostram resultados divergentes, na queima a 1350°C todos os termos foram significativos,

diferente da queima a 800°C na qual as componentes referentes ao tempo de batida não foram significantes.

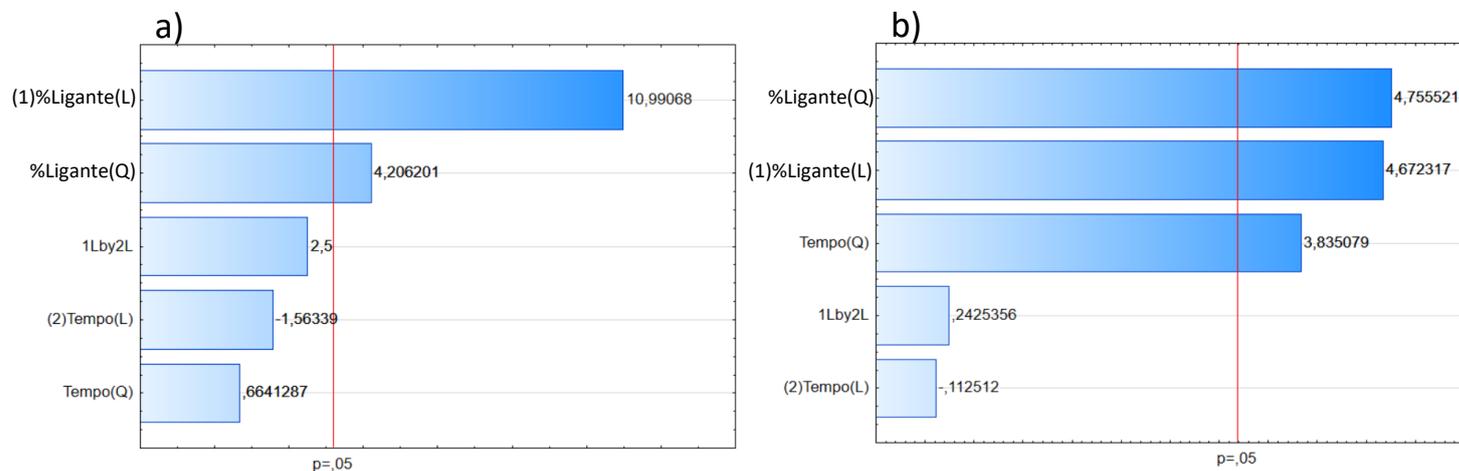
Figura 20 – Diagramas De Pareto Da Densidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b)



Fonte: Do autor (2022).

No caso da porosidade aparente os diagramas de Pareto da figura 21 mostram que os efeitos mais significativos na queima de 1350°C foram os mesmos da queima a 800°C com a adição da componente quadrática do tempo de batida.

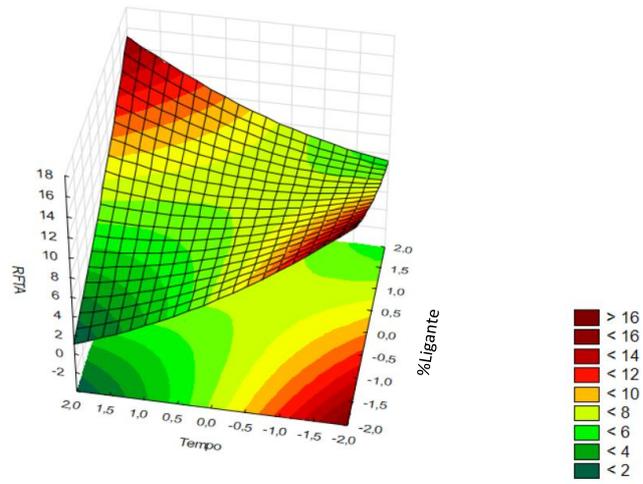
Figura 21 – Diagramas De Pareto Da Porosidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b)



Fonte: Do autor (2022).

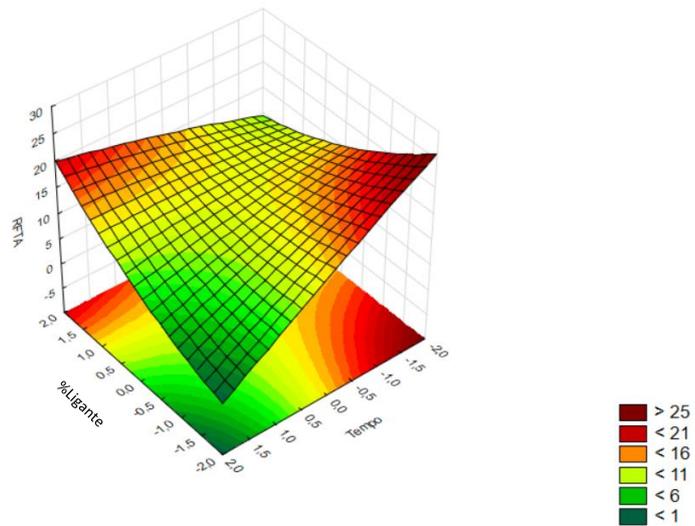
No geral o ajuste da porosidade foi melhor do que da densidade, como pode ser confirmado pelas figuras 22 e 23.

Figura 24 – Superfície De Resposta RFTA (800°C)



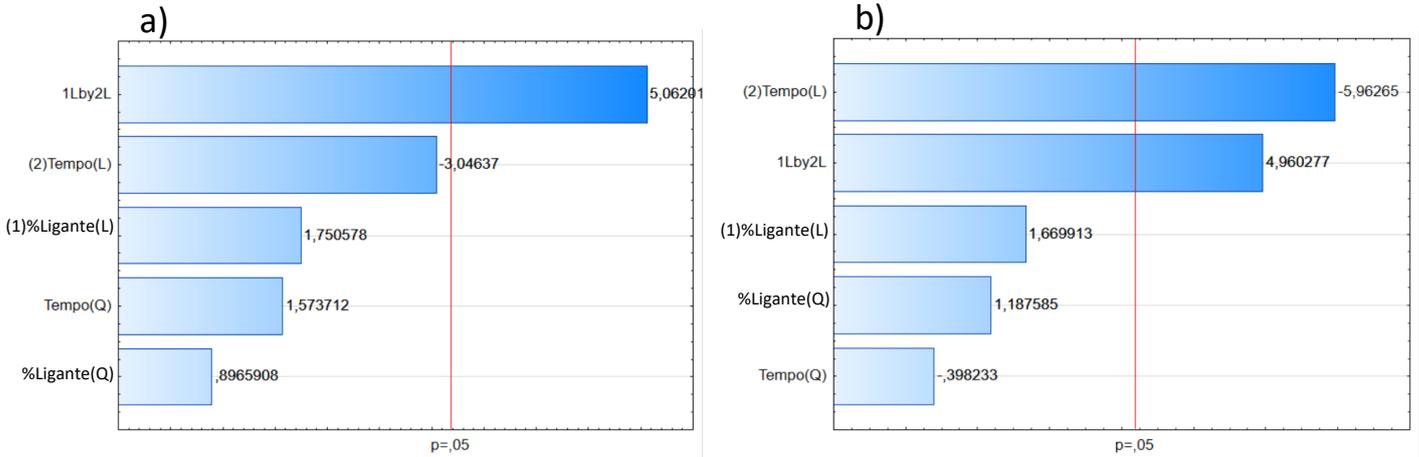
Fonte: Do autor (2022).

Figura 25 – Superfície De Resposta RFTA (1350°C)



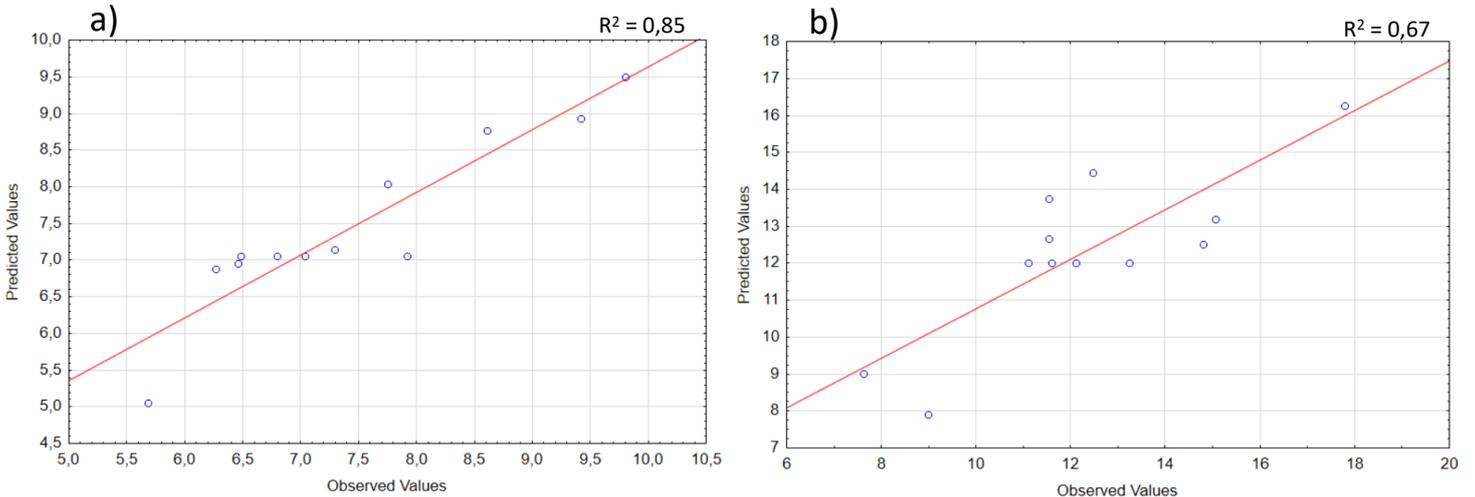
Fonte: Do autor (2022).

Figura 26 – Diagramas De Pareto RFTA a 800°C (a) e 1350°C (b)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 27 – Ajuste Do Modelo De RFTA a 800°C (a) e 1350°C (b)

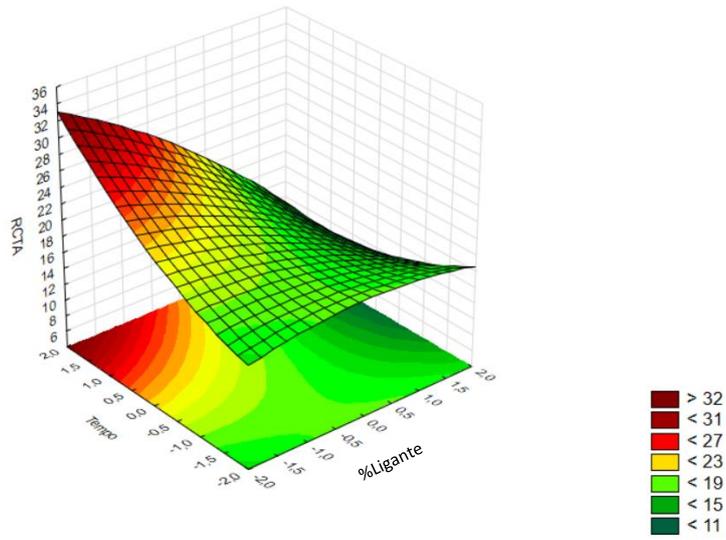


Fonte: Do autor (2022).

No caso da resistência à flexão, as superfícies obtidas em ambas as queimas apresentam o mesmo perfil, figuras 24 e 25, com os pontos de maior resistência sendo as situações com simultaneamente o mínimo de ligante e tempo de batida ou nas situações com o máximo de ligante e tempo de batida. Quanto aos termos significantes, a 1350°C o tempo de batida passou a ser o termo mais significativo a frente do termo de interação que foi o único significativo na queima a 800°C, figura 26. Porém, ressaltando que o ajuste da queima a 1350°C foi menor, figura 27.

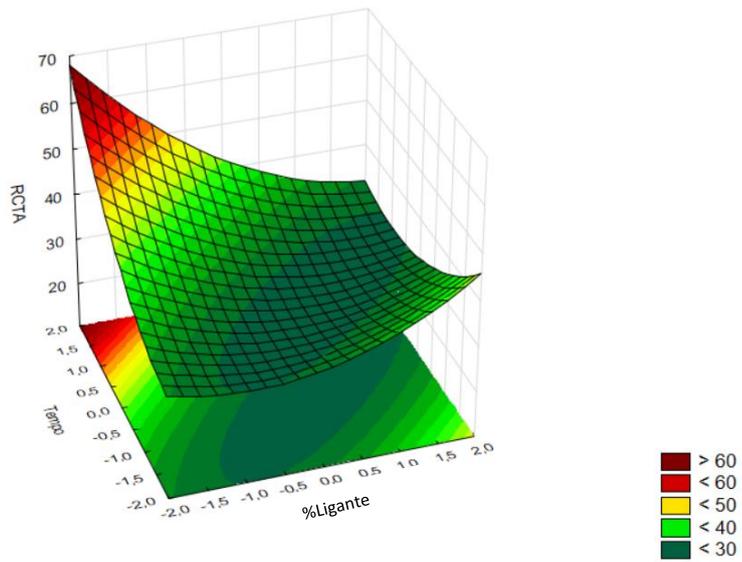
Já os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão se encontram nas figuras 28 a 31.

Figura 28 – Superfície De Resposta RCTA (800°C)



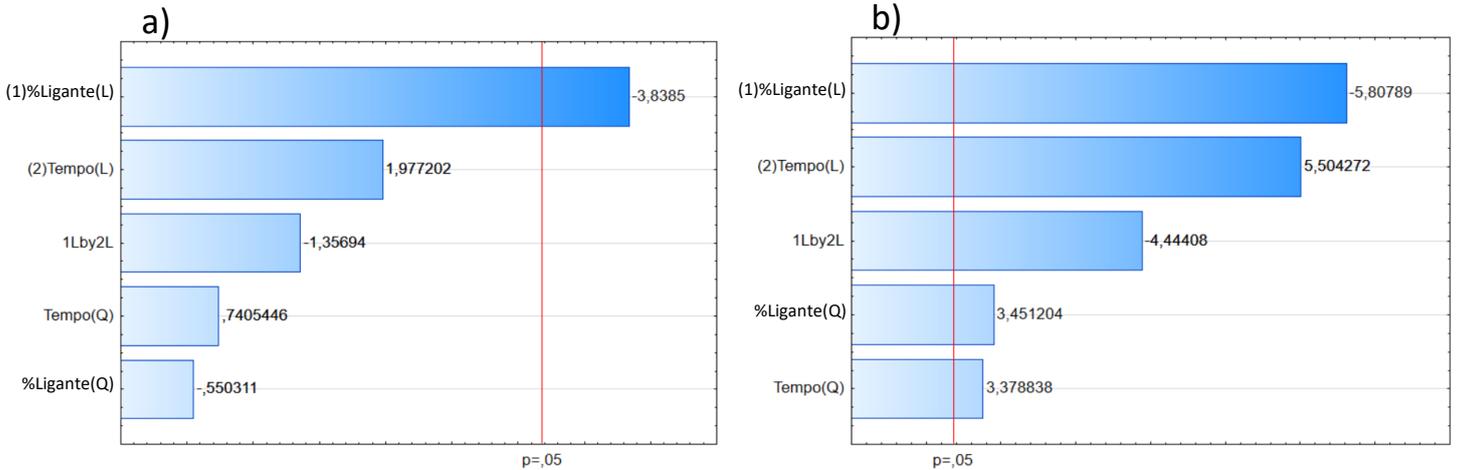
Fonte: Do autor (2022).

Figura 29 – Superfície De Resposta RCTA (1350°C)



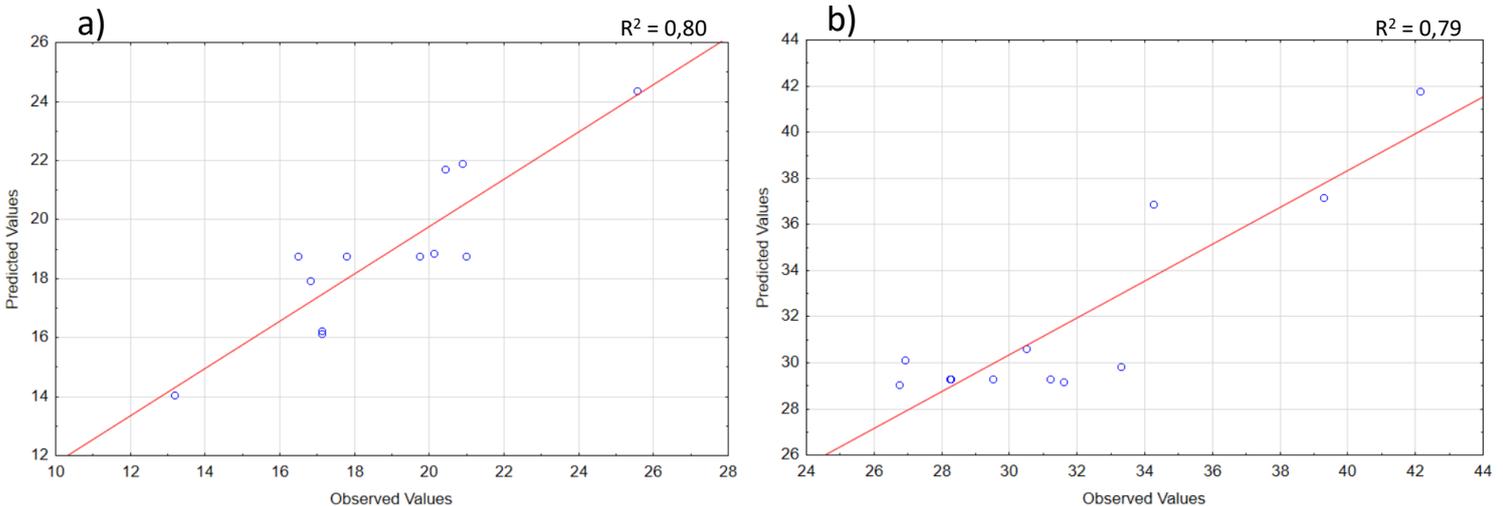
Fonte: Do autor (2022).

Figura 30 – Diagramas De Pareto RCTA a 800°C (a) e 1350°C (b)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 31 – Ajuste Do Modelo De RCTA a 800°C (a) e 1350°C (b)



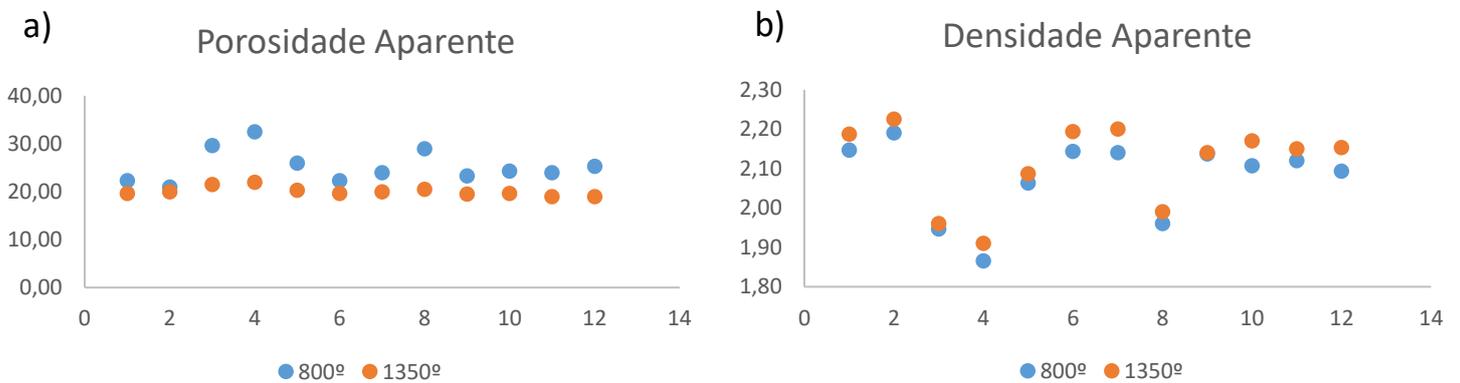
Fonte: Do autor (2022).

Para a resistência a compressão, o perfil das curvas também foi semelhante, figuras 28 e 29, com ponto de resistência máxima na situação de mínima quantidade de ligante e máximo tempo de batida. Na queima a 800°C o único efeito significativo foi a variante linear do ligante, enquanto na queima a 1350°C todas as componentes foram significativas, figura 30. Pode ser observado então, conforme esperava-se, que um aumento da quantidade de ligante implica em uma redução da resistência à compressão, visto que nesse caso a porosidade é maior, como foi analisado anteriormente nas figuras 17 e 19. E de maneira inversa, a situação de menor quantidade de ligante obtém-se a maior resistência à compressão. Uma alta porosidade implica em uma queda da resistência mecânica no geral uma vez que os poros são facilitadores para a propagação da trinca.

Para os ensaios de densidade, porosidade e os ensaios mecânicos de resistência à flexão e compressão foram analisadas ainda a relação entre os resultados obtidos na queima a 800°C e a 1350°C, esse estudo não pode ser realizado para os índices de extrusão e trabalhabilidade uma vez que esses são obtidos antes das queimas das massas.

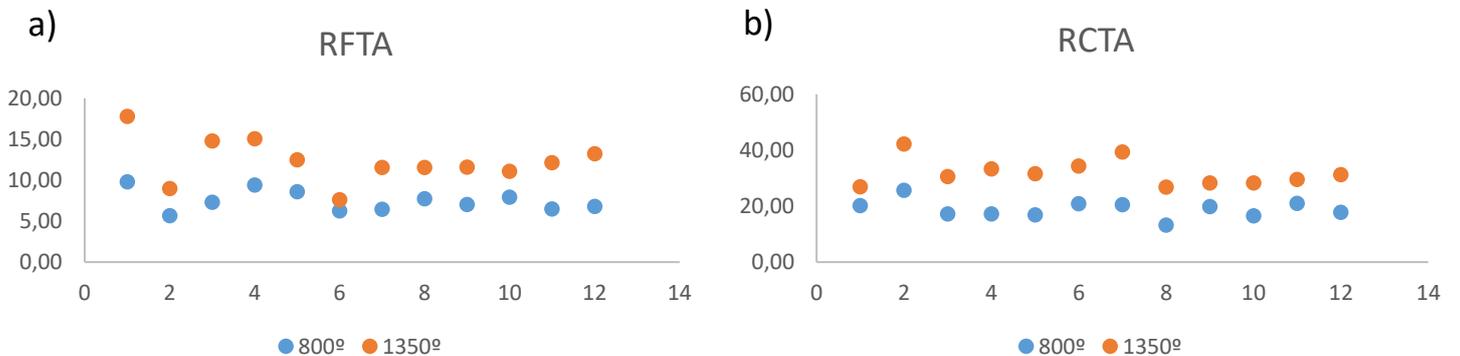
Na figura 32 estão os comparativos das porosidades e densidades aparentes entre as queimas em diferentes temperaturas, conforme previsto a queima a 1350° obteve as menores porosidades e maiores densidades em todas as situações analisadas quando comparada à queima a 800°C. Acredita-se que isso ocorreu devido a sinterização, cuja consequência direta é a densificação do material, provavelmente os corpos de prova que foram queimados a 800°C não tiveram a sua sinterização concluída, enquanto as massas que foram queimadas também a 1350°C tinham a sua disposição tempo e energia suficientes para terminar sua densificação, resultando em massas com maiores densidades e menores porosidades.

Figura 32 – Comparativo Entre As Queimas Da Porosidade Aparente (a) e Densidade Aparente (b)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 33 – Comparativo Entre As Queimas Da RFTA (a) e RCTA (b)



Fonte: Do autor (2022).

Para os ensaios mecânicos de resistência à flexão e à compressão de maneira análoga a queima a 1350°C obteve as maiores resistências, figura 33, visto que as massas que foram queimadas a 1350°C eram mais densas e menos porosas, suas resistências mecânicas também foram maiores.

6.2 Formulação Y

A tabela com todos os dados obtidos na análise da formulação Y, considerada dentre as formulações analisadas uma massa “dura” se encontram na tabela 5.

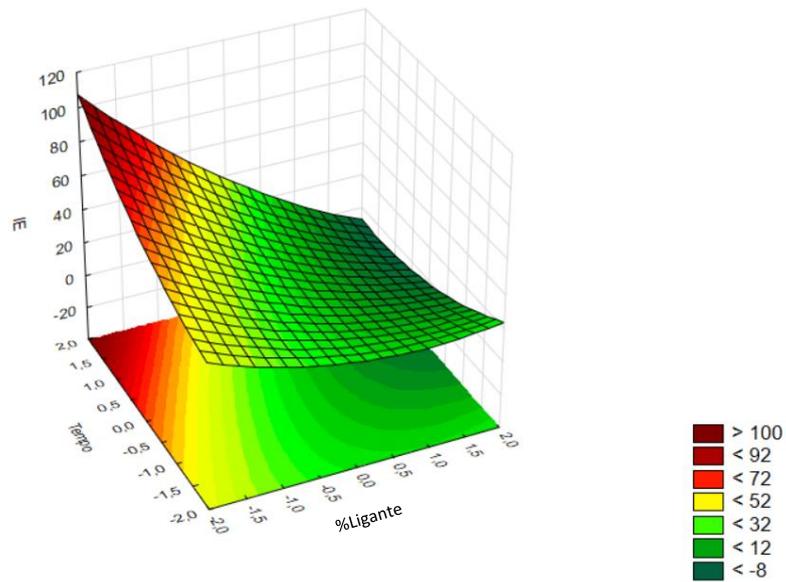
Tabela 5 – Resultados Da Formulação Y

Formulações	Variáveis Independentes		IE	IT	DA (800)	PA (800)	RFTA (800)	RCTA (800)	DA (1350)	PA (1350)	RFTA (1350)	RCTA (1350)
	% Ligante	Tempo de Batida (min)										
	1	17										
2	17	30	26,92	17,88	2,17	0,25	9,61	22,89	2,20	0,19	13,55	36,50
3	17	30	17,05	9,74	2,15	0,24	8,94	18,20	2,18	0,21	17,27	34,45
4	15	25	37,81	12,00	2,19	0,23	9,40	21,67	2,23	0,19	16,07	42,28
5	15	35	60,26	8,00	2,21	0,22	9,76	23,99	2,24	0,20	18,10	47,93
6	19	25	7,17	22,26	2,08	0,27	10,52	25,28	2,11	0,22	13,70	33,32
7	19	35	6,48	25,80	2,01	0,28	9,04	17,95	2,07	0,23	15,31	30,95
8	17	22,9	21,07	11,03	2,17	0,23	8,94	21,77	2,22	0,20	17,33	42,87
9	17	37	26,52	10,00	2,18	0,23	10,85	19,62	2,24	0,20	14,79	36,48
10	14,7	30	43,27	9,42	2,20	0,23	10,37	23,87	2,24	0,19	15,08	42,91
11	19,3	30	6,36	30,00	2,06	0,27	10,50	17,52	2,13	0,21	15,55	36,09

Fonte: Do autor (2022).

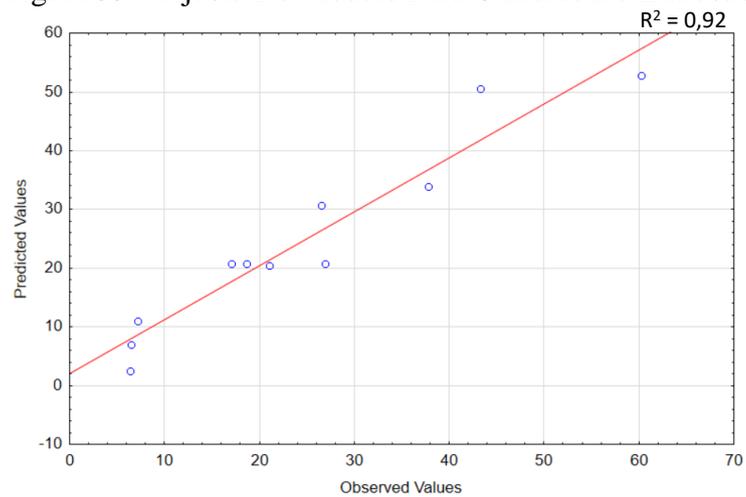
Iniciando a análise com o índice de extrusão foi possível observar que assim como ocorreu para a formulação anterior, X, o comportamento inversamente proporcional entre o índice de extrusão e a quantidade de ligante e diretamente proporcional entre o parâmetro e o tempo de batida. O perfil das superfícies em si foi bem semelhante para ambos os casos, figuras 9 e 34. Ou seja, a intensidade de influência das variáveis analisadas, quantidade de ligante e tempo de batida, na plasticidade da massa não é significativamente diferente em massas consideradas comercialmente normais, X, e duras, Y.

Figura 34 – Superfície De Resposta Do Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

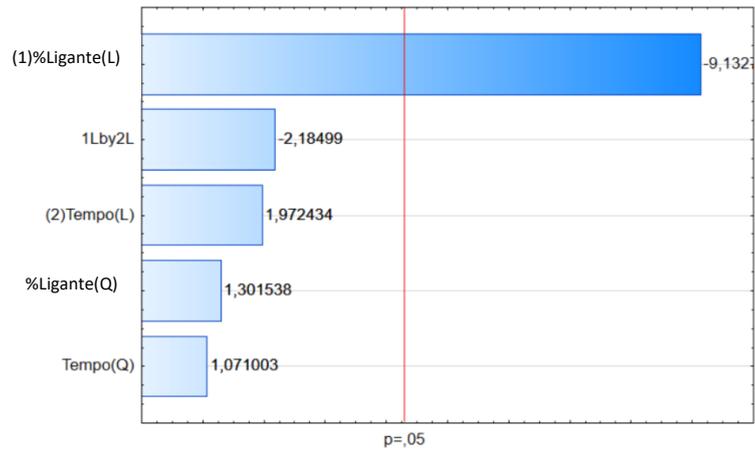
Figura 35 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

Quanto ao ajuste do modelo utilizado, figura 35, temos que o R^2 foi de 0,92 indicando um bom ajuste, até melhor do que o da formulação X. O diagrama de Pareto, figura 36, mostra que o efeito mais significativo é a componente linear da quantidade de ligante adicionada à mistura.

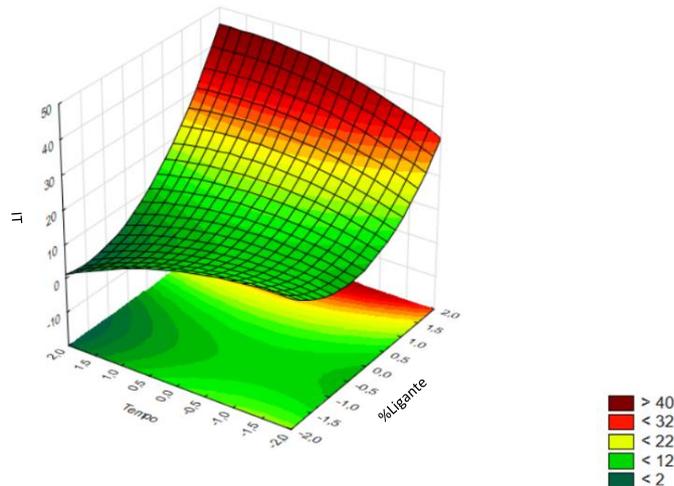
Figura 36 – Diagrama De Pareto Do Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

Também foi analisado o índice de trabalhabilidade para a formulação Y para verificar se o comportamento observado na formulação X se repete para Y. A superfície de resposta está representada na figura 37. De fato, as relações obtidas para o índice de trabalhabilidade com as variáveis quantidade de ligante e tempo de batida foram as mesmas obtidas na análise da formulação X, uma variação diretamente proporcional para a quantidade de ligante e inversamente proporcional para o tempo de batida. Novamente comprovando que mesmo em massas de plasticidade comerciais diferentes a influência das variáveis analisadas é a mesma.

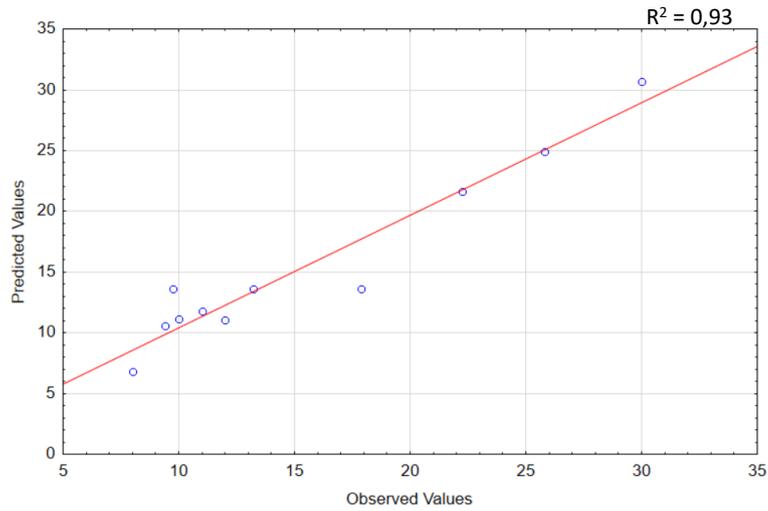
Figura 37 – Superfície De Resposta Do Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

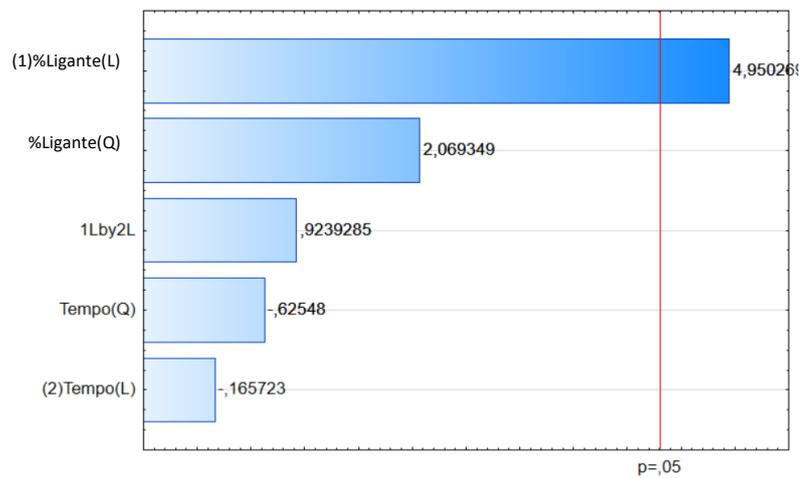
O ajuste do modelo foi bom com um R^2 de 0,93 como pode ser visualizado na figura 38. O diagrama de Pareto, figura 39, mostra que o fator mais significativo foi a componente linear da quantidade de ligante.

Figura 38 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

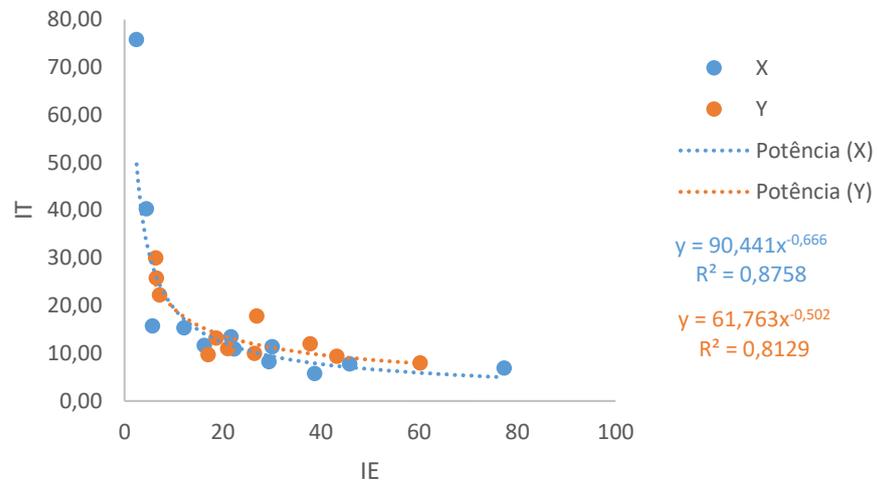
Figura 39 – Diagrama De Pareto Do Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

Ademais, foi feito um gráfico comparativo, figura 40, dos valores obtidos da plasticidade da massa mensurada pelo índice de extrusão e pelo índice de trabalhabilidade nas duas formulações analisadas e a tendência de decaimento exponencial se mantem.

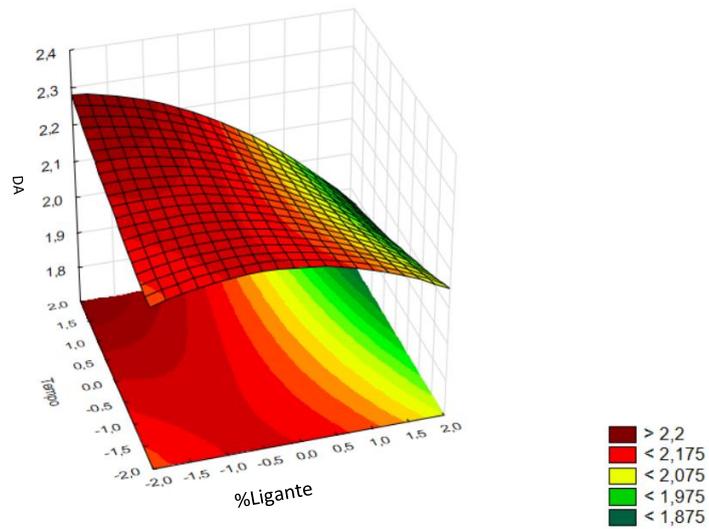
Figura 40 – Índice De Trabalhabilidade X Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

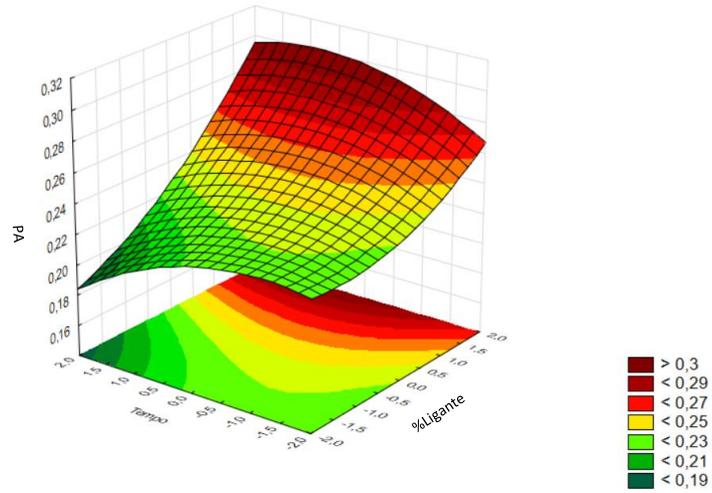
As superfícies de resposta referentes aos ensaios de densidade e porosidade aparente estão localizadas nas figuras 41 e 42, respectivamente.

Figura 41 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

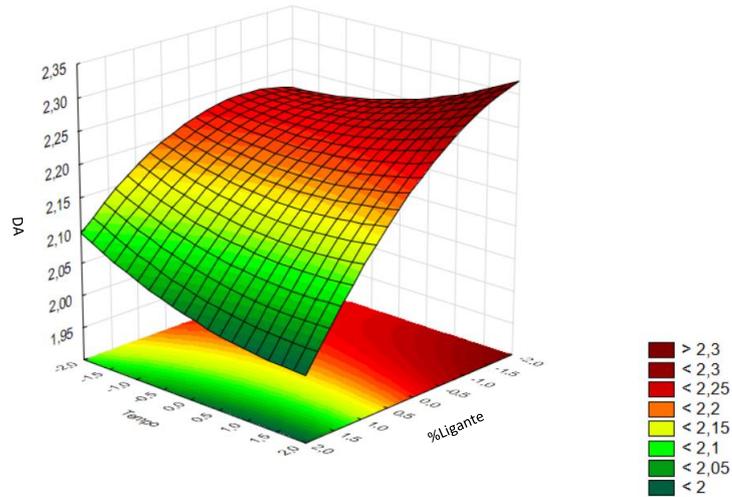
Figura 42 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

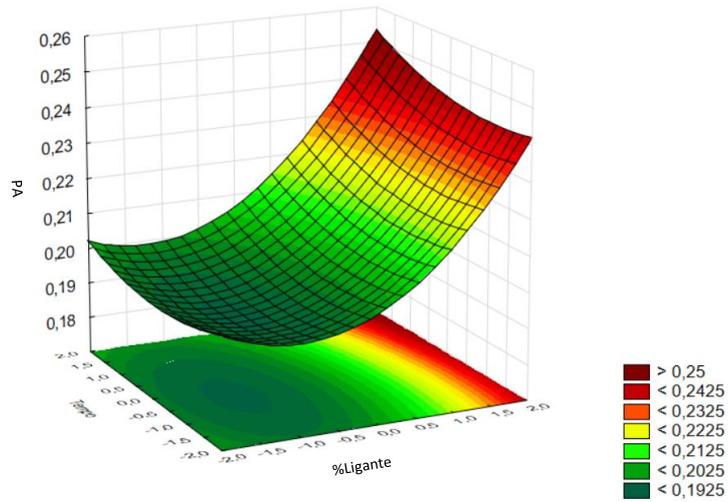
Como já era esperado pela literatura as respostas de densidade e porosidade foram opostas, conforme foi observado e discutido para a formulação X. O mesmo resultado pode ser observado na queima a 1350°C, figuras 43 e 44.

Figura 43 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente (1350°C)



Fonte: Do autor (2022).

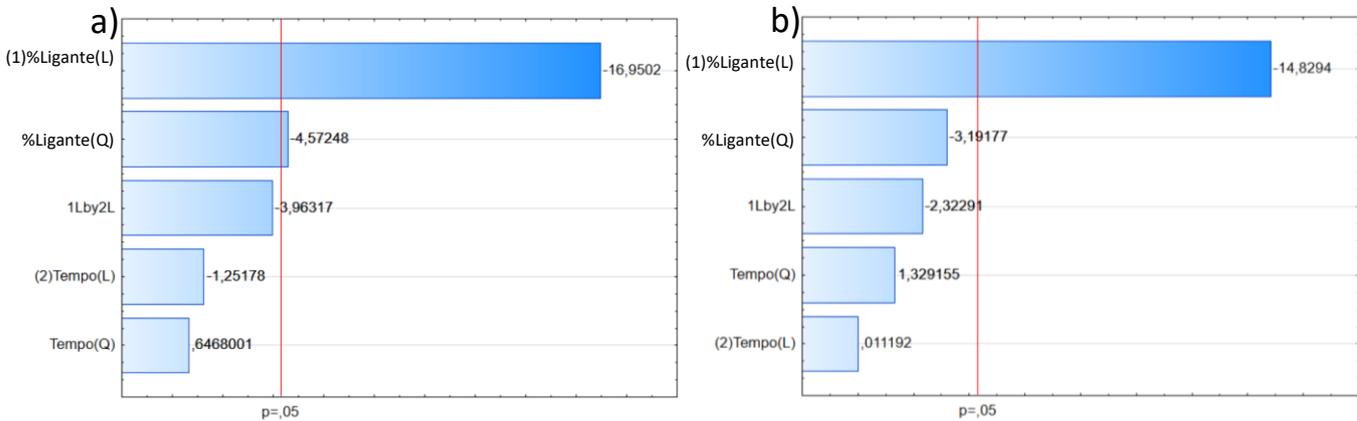
Figura 44 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente (1350°C)



Fonte: Do autor (2022).

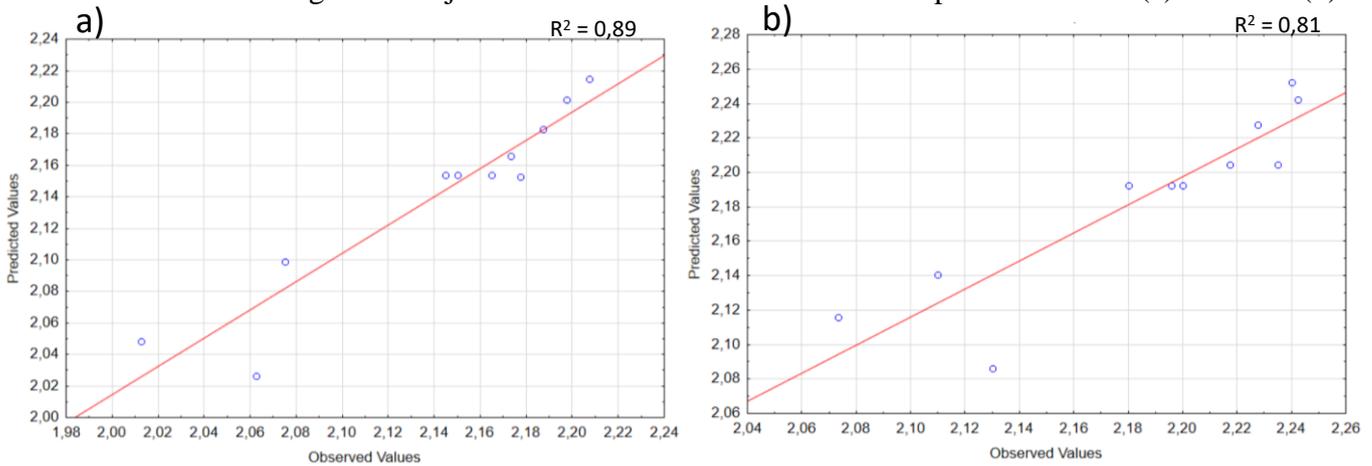
Os diagramas de Pareto da densidade aparente em ambas as queimas se encontram na figura 45. Em ambas as situações a componente linear da quantidade de ligante foi a mais significativa, mesmo que na queima a 800°C a componente quadrática também tenha apresentado significância.

Figura 45 – Diagramas De Pareto Da Densidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 46: Ajuste Do Modelo Para A Densidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b)

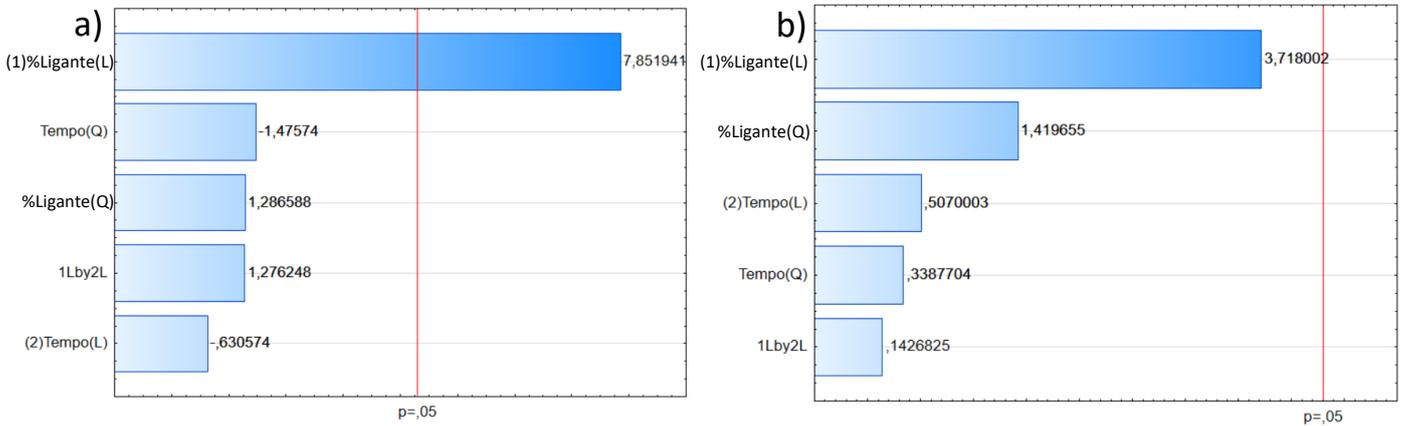


Fonte: Do autor (2022).

O ajuste do modelo de ambas as queimas foi adequado, figura 46, com R^2 de 0,89 e 0,81 para a queima a 800°C e 1350°C, respectivamente.

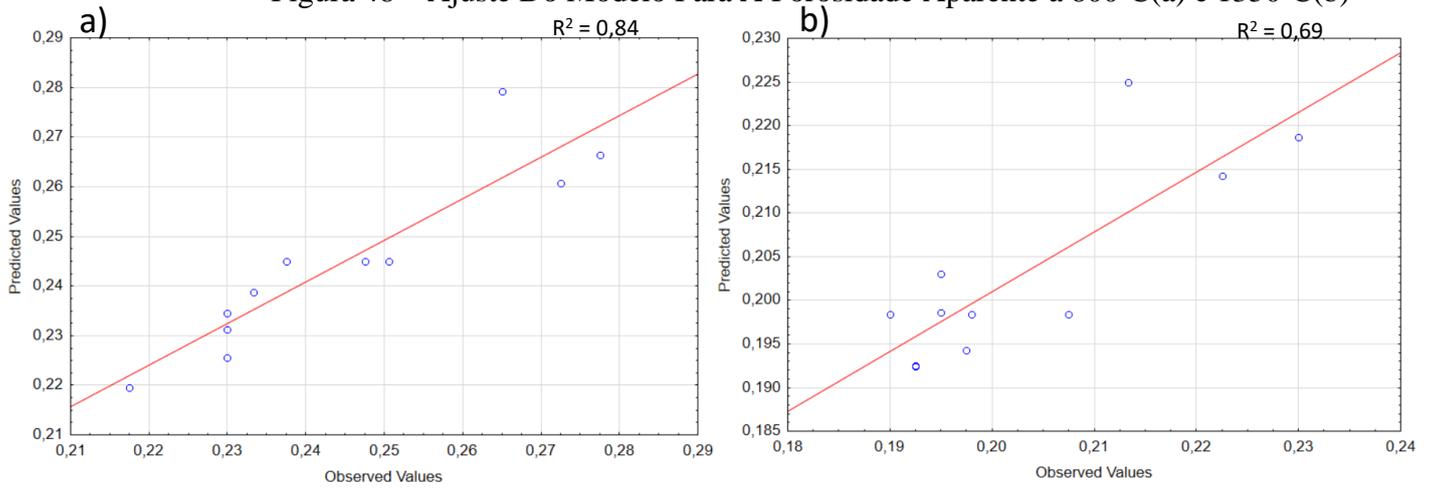
Quanto a porosidade aparente os diagramas de Pareto e os ajustes estão apresentados nas figuras 47 e 48. Os ajustes da porosidade foram menores do que os da densidade para ambas as queimas, oposto do que foi observado na situação anterior da formulação X. Na queima a 800°C a componente linear do ligante foi a mais significativa e na queima a 1350°C não houve um termo mais significativo.

Figura 47 – Diagramas De Pareto Da Porosidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b)



Fonte: Do autor (2022).

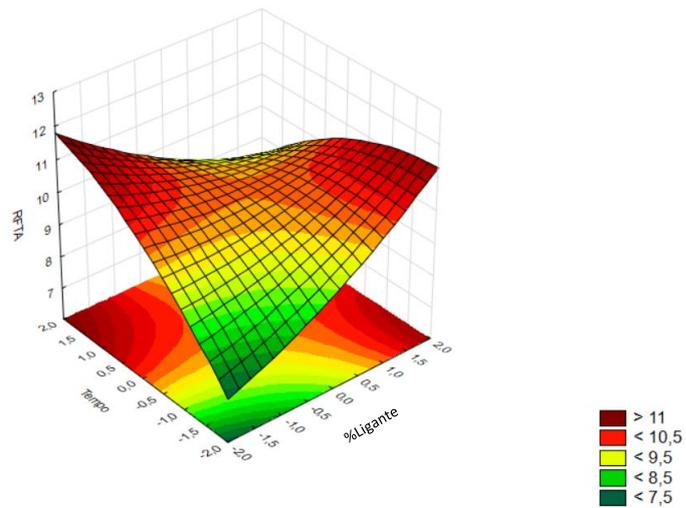
Figura 48 – Ajuste Do Modelo Para A Porosidade Aparente a 800°C(a) e 1350°C(b)



Fonte: Do autor (2022).

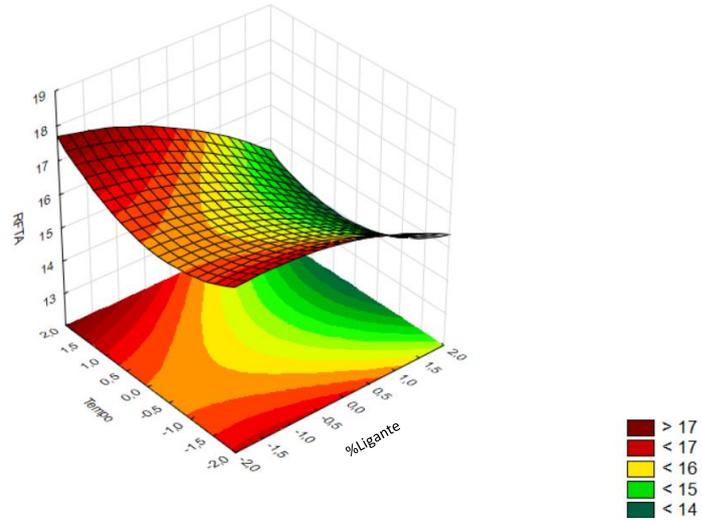
O ensaio de resistência à flexão a temperatura ambiente, RFTA, tem os resultados apresentados nas figuras 49 e 50.

Figura 49 – Superfície De Resposta RFTA (800°C)



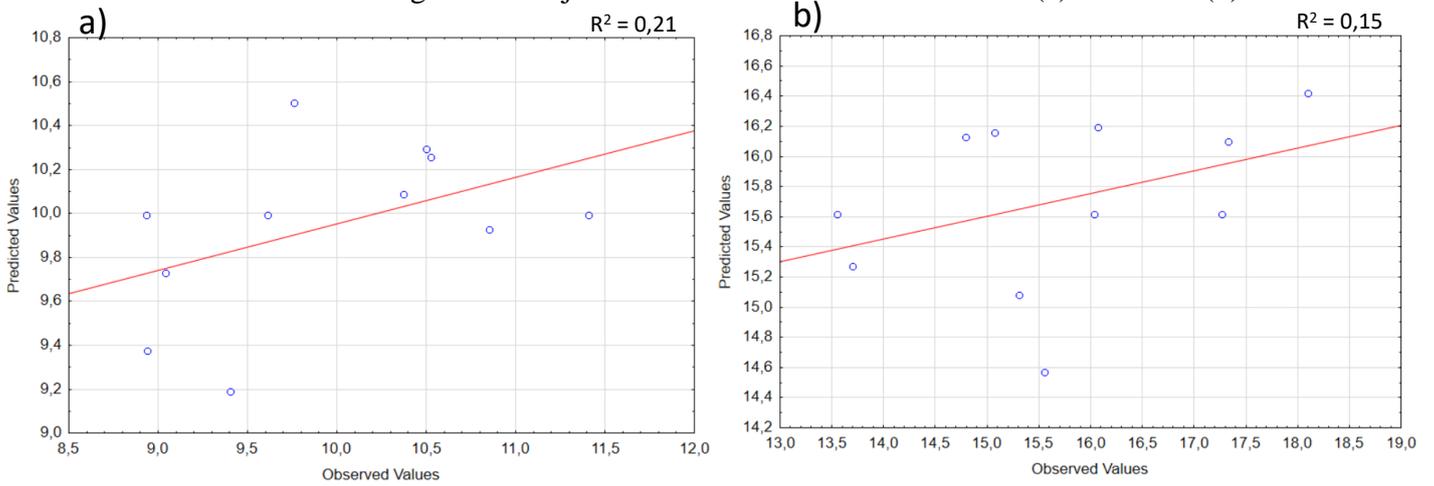
Fonte: Do autor (2022).

Figura 50 – Superfície De Resposta RFTA (1350°C)



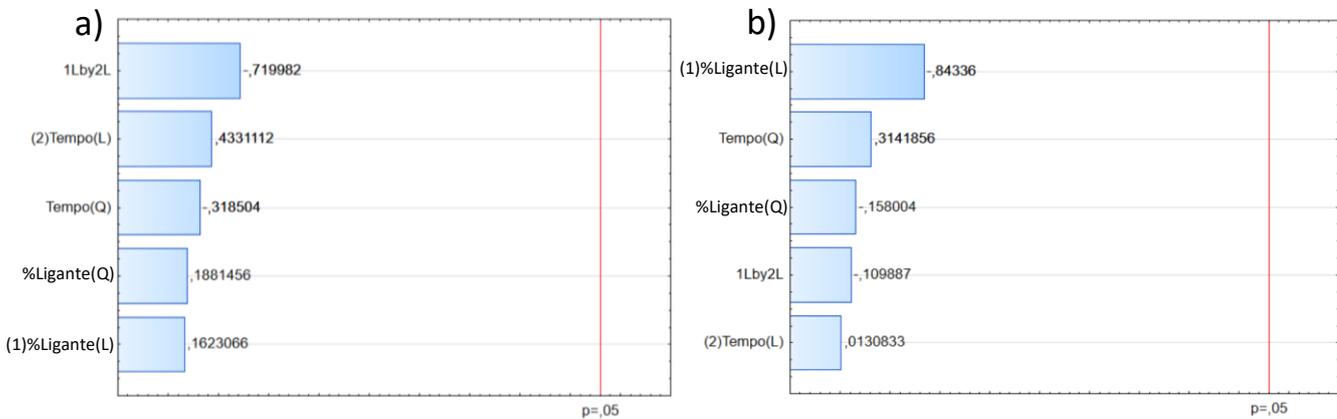
Fonte: Do autor (2022).

Figura 51 – Ajuste Do Modelo De RFTA a 800°C (a) e 1350°C (b)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 52 – Diagramas De Pareto RFTA a 800°C (a) e 1350°C (b)

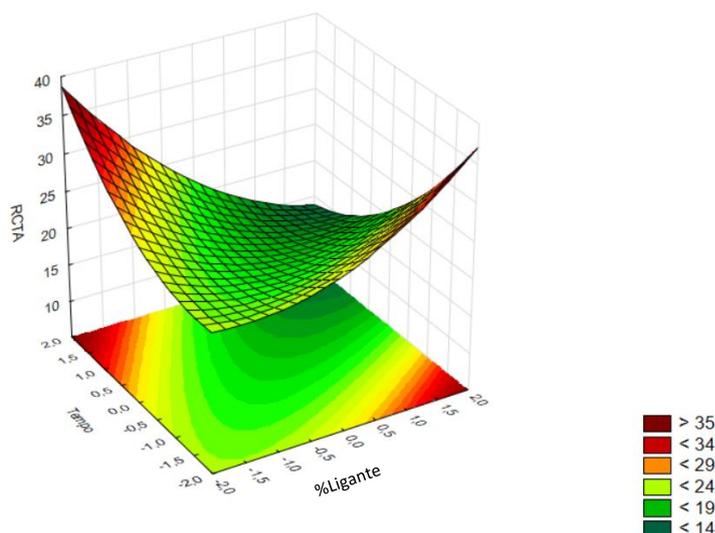


Fonte: Do autor (2022).

Percebe-se que os resultados de resistência à flexão para a formulação Y não foram satisfatórios, apresentando um ajuste não adequado e aparentemente sem termos significantes, figuras 51 e 52. Contudo, as tendências do comportamento da resposta ainda podem ser analisadas, na situação pós queima a 800°C o perfil de resposta se apresenta semelhante ao que foi observado para a formulação X no sentido de que os máximos pontos de resistência se dão em pontos de interação entre as variáveis, entretanto, no caso da formulação Y esses pontos são opostos aos vistos anteriormente. Já na queima a 1350°C as situações de maior resistência são aquelas com menor quantidade de ligante.

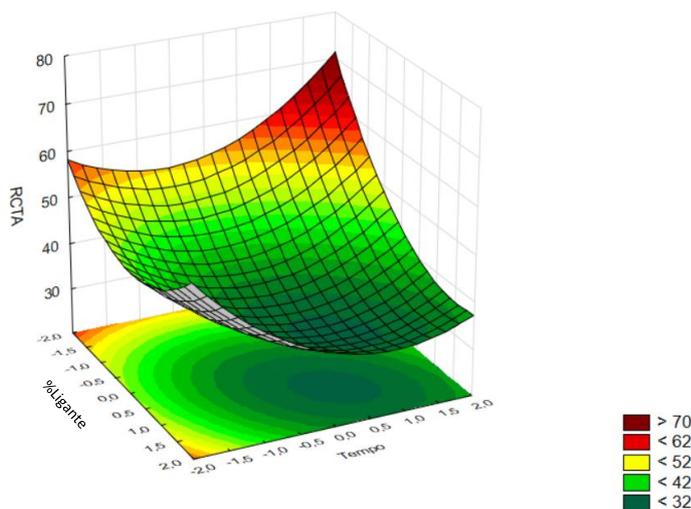
As superfícies obtidas para os ensaios de resistência à compressão, RCTA, estão apresentados nas figuras 53 e 54.

Figura 53 – Superfície De Resposta RCTA (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

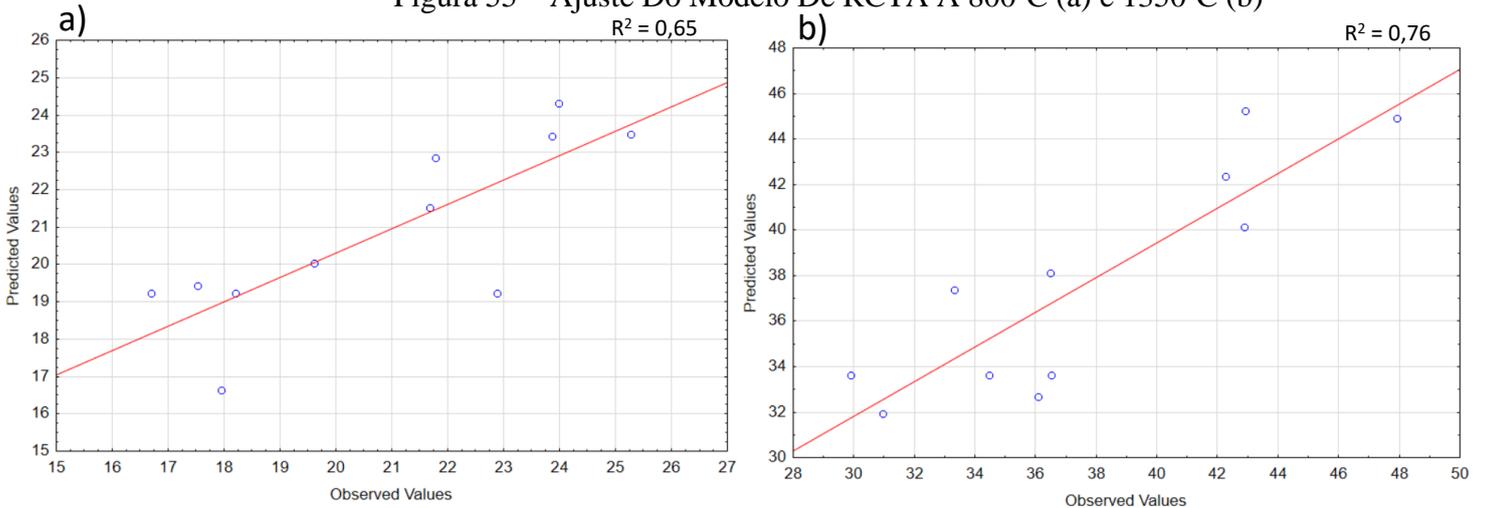
Figura 54 – Superfície De Resposta RCTA (1350°C)



Fonte: Do autor (2022).

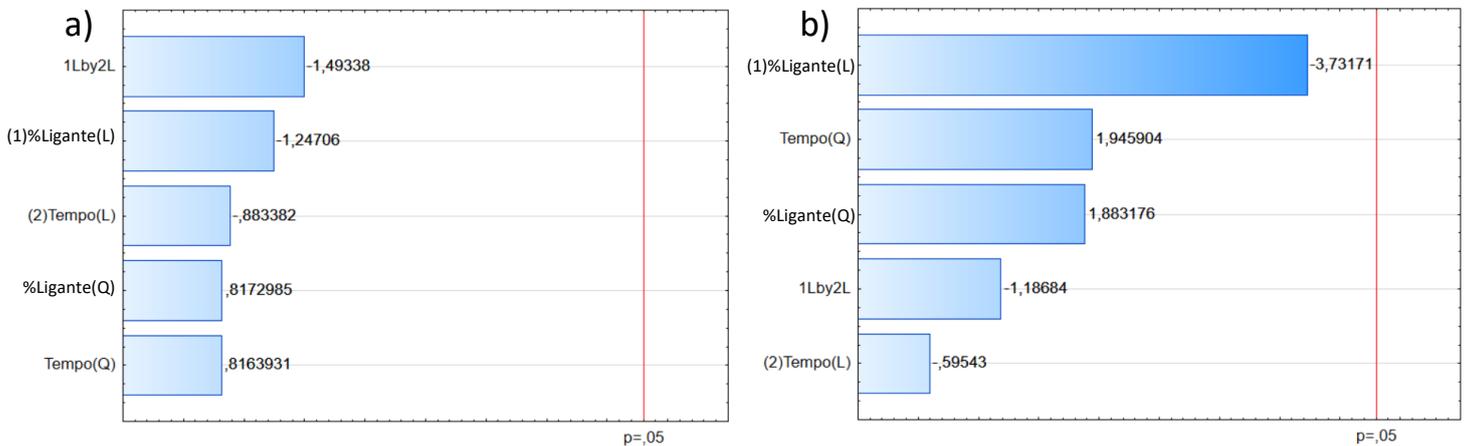
A mesma situação observada para os ensaios mecânicos de flexão é recorrente nos ensaios de resistência à compressão os ajustes não são satisfatórios, figura 55, e não há um termo expressamente significativo, figura 56. Também é possível observar a tendência de resistências maiores em situações com quantidade mínima de ligante contudo, particularmente pós a queima a 800°C observa-se que houve uma situação de máximo de ligante e mínimo de tempo de batida que também apresentou uma alta resistência à compressão.

Figura 55 – Ajuste Do Modelo De RCTA A 800°C (a) e 1350°C (b)



Fonte: Do autor (2022).

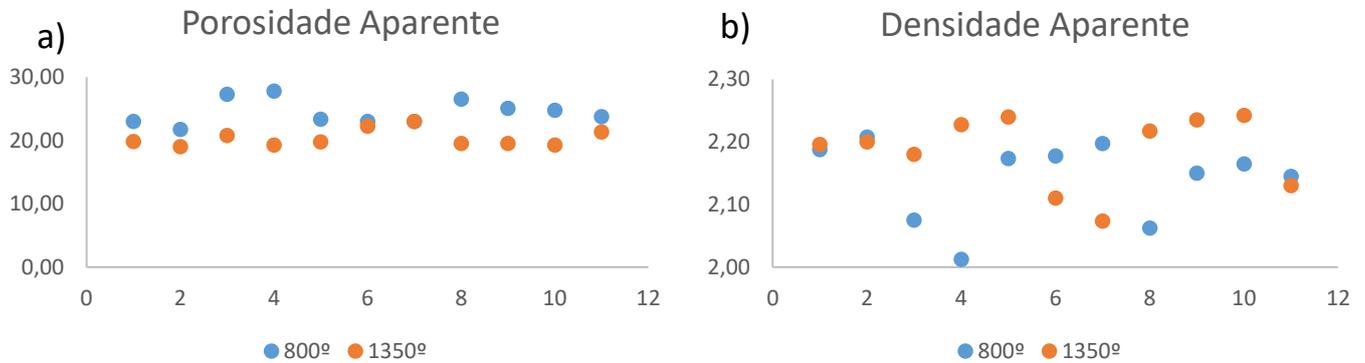
Figura 56 – Diagramas De Pareto RCTA A 800°C (a) e 1350°C (b)



Fonte: Do autor (2022).

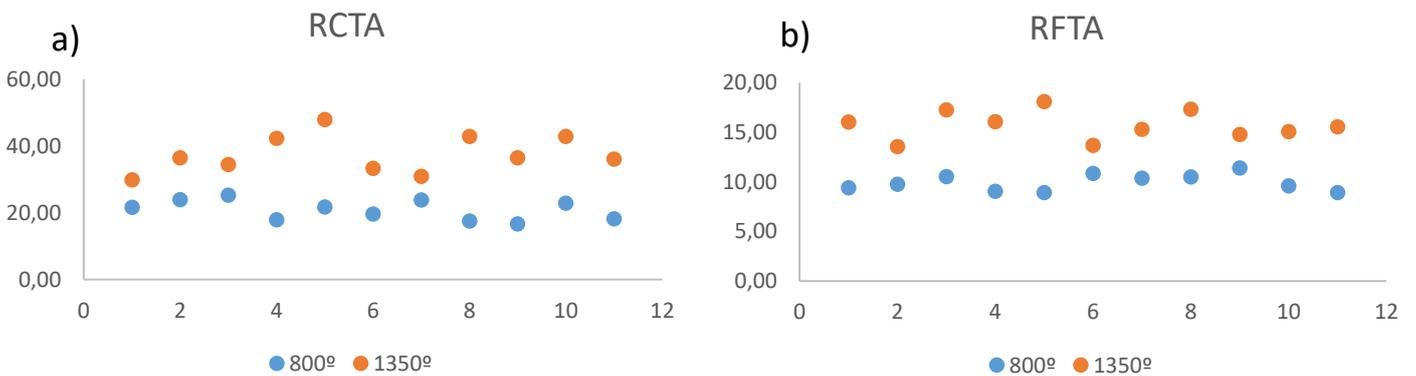
Quanto às observações obtidas da análise comparativa dos resultados para as queimas a 800°C e 1350°C temos que, assim como ocorreu na formulação X em todos os casos as resistências na queima a 1350°C foram superiores, figura 58, o mesmo aconteceu com a porosidade aparente que na queima a 1350°C foi menor do que na queima a 800°C, apenas a densidade aparente não seguiu a tendência observada na formulação X e não foi possível obter uma análise adequada, figura 57.

Figura 57 – Comparativo Entre As Queimas Da Porosidade Aparente (a) e Densidade Aparente (b)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 58 – Comparativo Entre As Queimas Da RCTA (a) e RFTA (b)



Fonte: Do autor (2022).

A instabilidade, falta de fatores significativos e ajuste ruim das respostas mecânicas pode ser justificada pelo fato de que as variáveis analisadas, quantidade de ligante e tempo de batida, apenas influenciam nessas propriedades indiretamente, especificamente a quantidade de ligante na porosidade e densidade, que por sua vez influenciam as propriedades mecânicas. Outros fatores não analisados podem ser mais influentes diretamente nessas propriedades.

6.3 Formulação Z

Os resultados obtidos da última formulação analisada, Z, considerada dentre as formulações analisadas a massa mais “mole” comercialmente se encontram na tabela 6. Nota-se que não foram analisadas as respostas após uma queima a 1350°C, após deliberações e também por uma questão de tempo foi decidido a não realização das análises pós queima a 1350°C.

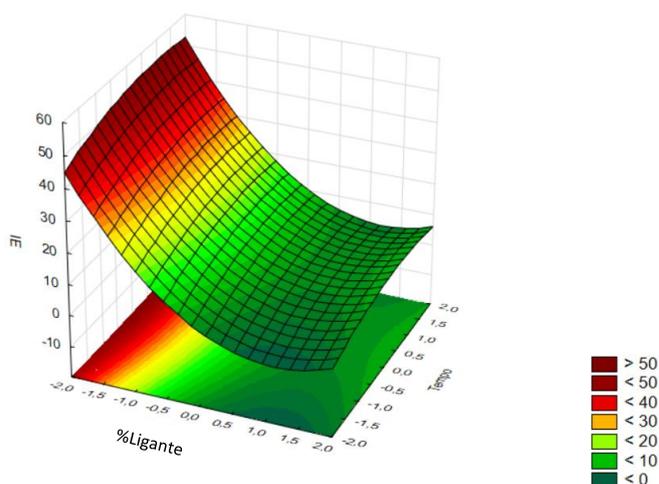
Tabela 6 – Resultados Para A Formulação Z

Formulações	Variáveis Independentes		IE	IT	DA (800)	PA (800)	RFTA (800) MPa	RCTA (800) MPa
	% Ligante	Tempo de Batida (min)						
1	18	20	3,23	44,62	2,06	0,22	4,78	8,24
2	15	20	22,37	1,5	2,2	0,19	4,2	15,57
3	16,5	25	10,69	23,23	2,14	0,19	4,71	13,09
4	16,5	25	12,95	25,6	2,09	0,2	3,48	10,52
5	16,5	25	9,01	28,84	2,06	0,21	3,62	8,9
6	16,5	18	7,79	21,05	2,07	0,22	3,02	8,99
7	15	30	27,93	12,77	2,16	0,25	3,07	14,22
8	18	30	7,94	36,31	2,02	0,29	2,9	8,82
9	14,4	25	37,38	9,34	2,17	0,23	2,95	14,46
10	16,5	32	8,94	10,28	2,15	0,24	3,92	13,27
11	18,6	25	1,85	46,76	2,06	0,26	4,45	9,7

Fonte: Do autor (2022).

Para o índice de extrusão, figura 59, pôde ser observado o comportamento usual do aumento do índice com a redução da quantidade de ligante na mistura, nesse caso, contudo a influência do tempo de batida não pôde ser analisada com clareza estando mascarada pela influência da quantidade de ligante.

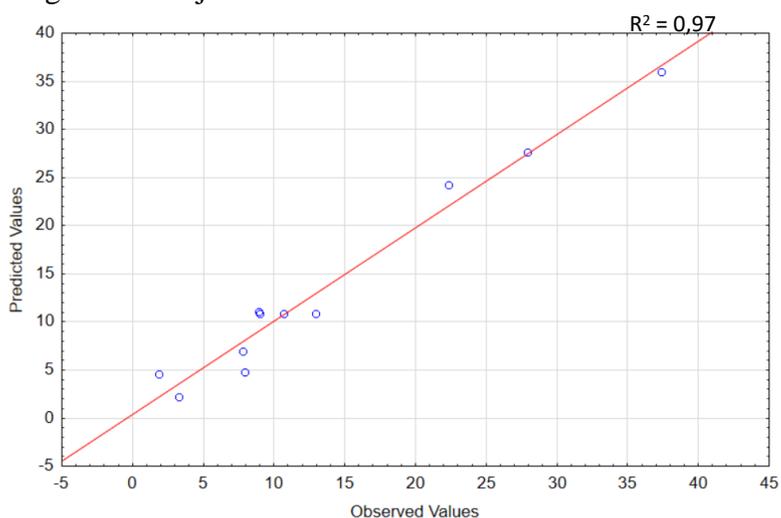
Figura 59 – Superfície De Resposta Do Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

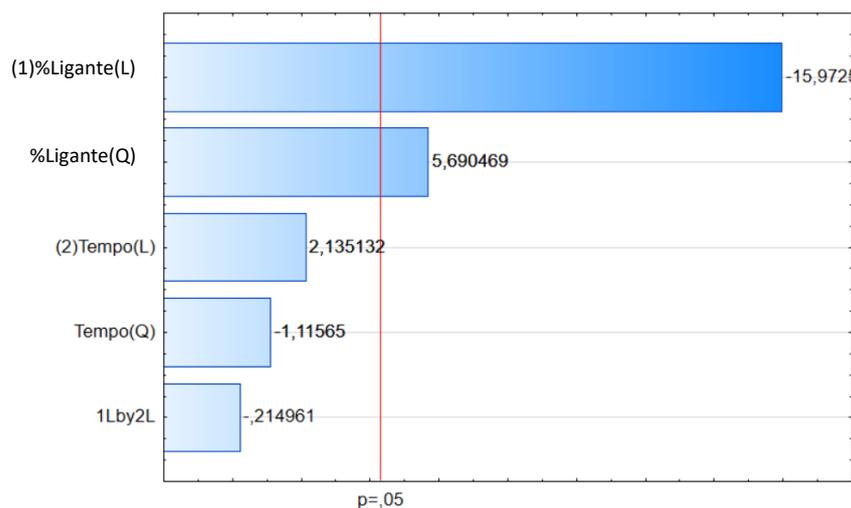
O ajuste do modelo, figura 60, foi adequado com um R^2 de 0,97 e analisando o diagrama de Pareto, figura 61, vemos que ambas as componentes linear e quadrática da quantidade de ligante foram significantes.

Figura 60 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

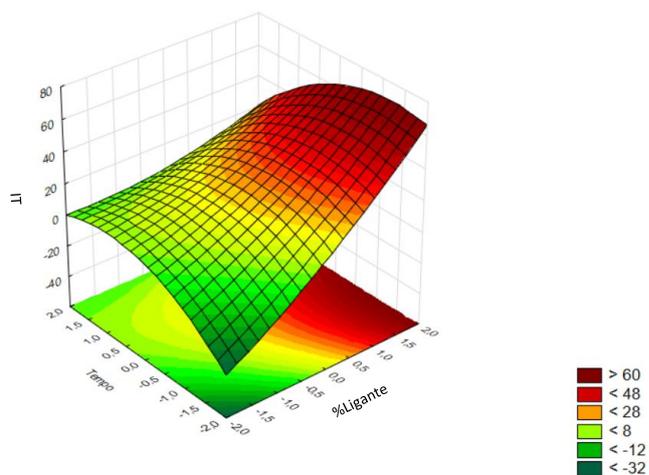
Figura 61 – Diagrama De Pareto Para O Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

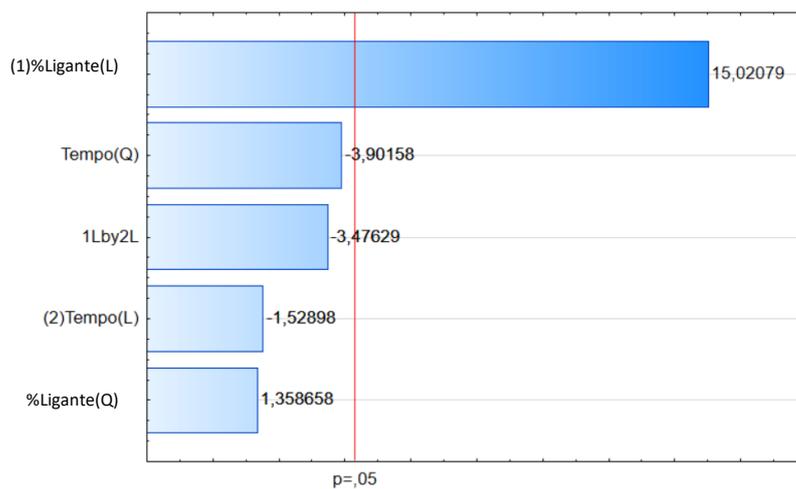
A análise do índice de trabalhabilidade encontra-se na figura 62, a influência da quantidade de ligante assim como nas formulações anteriores segue sendo a mais impactante e de mesma correlação, um aumento na quantidade de ligante implica em um aumento no índice de trabalhabilidade, curiosamente, diferente das outras formulações a influência do tempo de batida parece mais quadrática do que nas análises anteriores, além de apresentar um comportamento oposto ao observado anteriormente, apresentando-se agora diretamente proporcional. Entretanto o termo mais significativo permanece sendo a quantidade de ligante, conforme pode ser confirmado no diagrama de Pareto, figura 63. O ajuste do modelo mostrou-se adequado com R^2 de 0,96 que pode ser visto na figura 64.

Figura 62 – Superfície De Resposta Do Índice De Trabalhabilidade



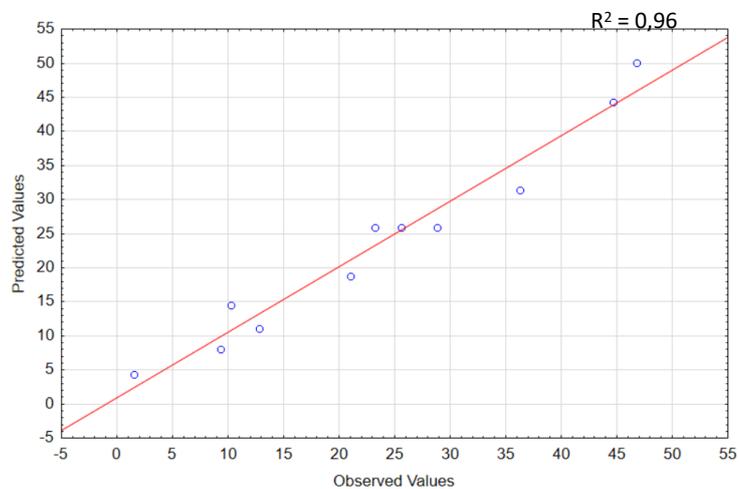
Fonte: Do autor (2022).

Figura 63 – Diagrama De Pareto Para O Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

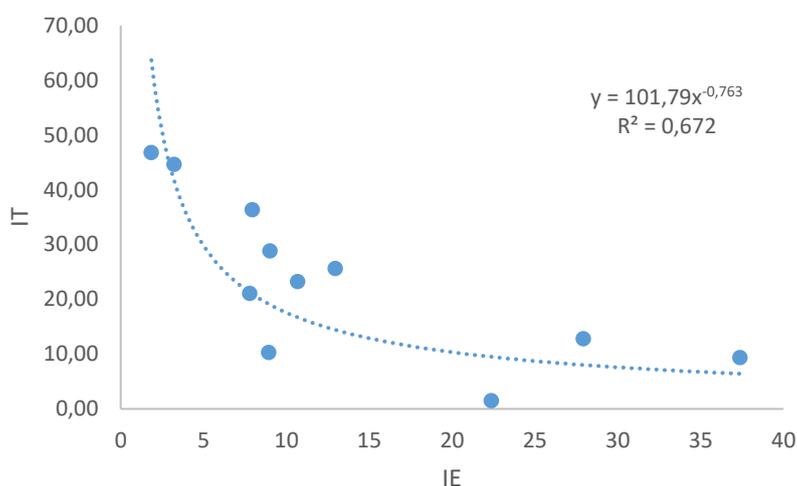
Figura 64 – Ajuste Do Modelo Para O Índice De Trabalhabilidade



Fonte: Do autor (2022).

Acredita-se, contudo, que ocorreu algum erro durante a coleta de dados de índice de trabalhabilidade, o que poderia justificar essa diferença de comportamento quando comparado às outras formulações analisadas, corroborando essa hipótese têm-se a análise da relação entre índice de trabalhabilidade e extrusão, figura 65. Foi visto anteriormente, com alto grau de ajuste que existe uma relação de decaimento exponencial entre esses dois parâmetros para as duas formulações analisadas, figura 40. Contudo, ainda que pode ser observada vagamente essa relação na figura 65 percebe-se também que existem muitos pontos fora da conformidade, ocasionando um ajuste inadequado, R^2 de 0,4672. Provavelmente o ajuste realizado de aquecer a massa para a medida do índice de trabalhabilidade foi o que causou essa diferença no comportamento comparado às formulações anteriores, uma vez que a formulação Z já era mais plástica pode ser que essa alteração tenha mascarado as respostas.

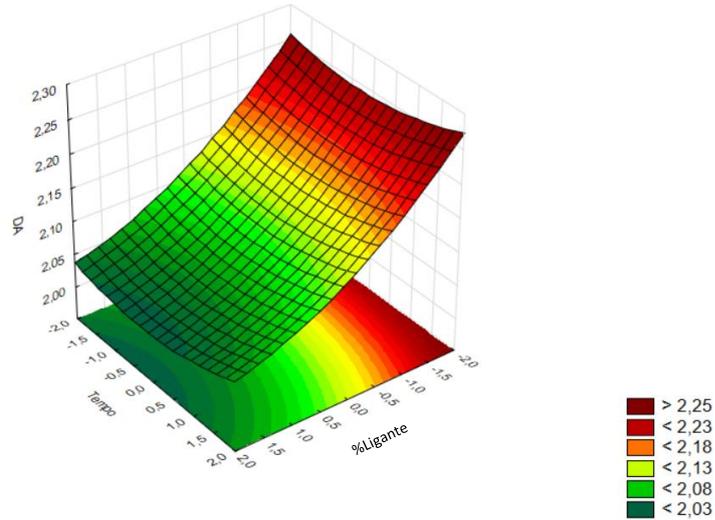
Figura 65 – Relação Entre Índice De Trabalhabilidade E Índice De Extrusão



Fonte: Do autor (2022).

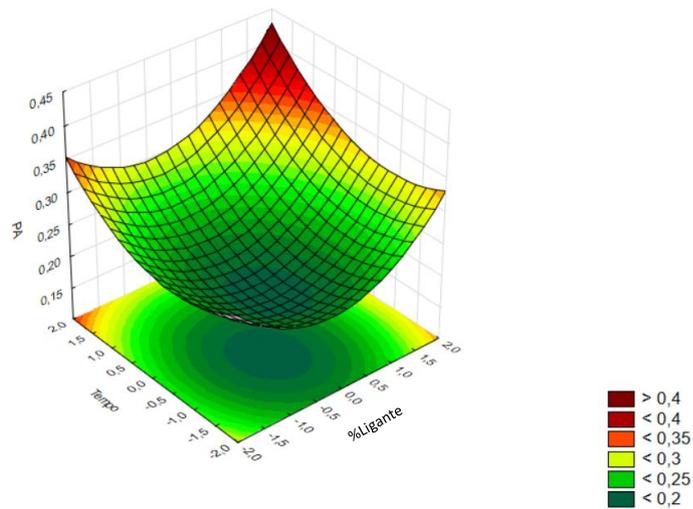
As superfícies de resposta referentes a densidade e porosidade aparente se encontram nas figuras 66 e 67, respectivamente.

Figura 66 – Superfície De Resposta Da Densidade Aparente



Fonte: Do autor (2022).

Figura 67 – Superfície De Resposta Da Porosidade Aparente

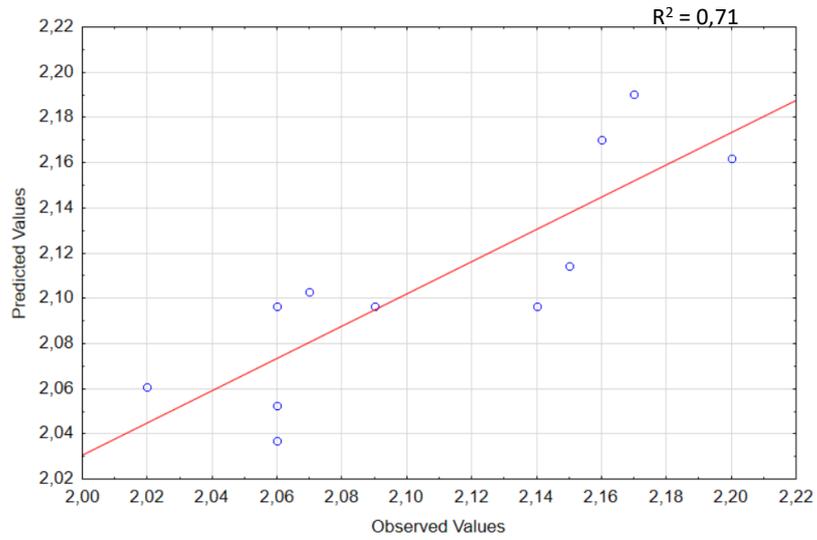


Fonte: Do autor (2022).

Em ambos os casos a tendência esperada e observada para as outras formulações se mantêm, a densidade aparente apresentando maiores respostas nas situações nas quais a quantidade de ligante está em seu mínimo e a porosidade aparente apresentando maiores resultados no ponto de máximo de ligante, o perfil obtido inclusive é muito semelhante ao obtido para a situação pós queima a 1350°C da formulação X, figura 19.

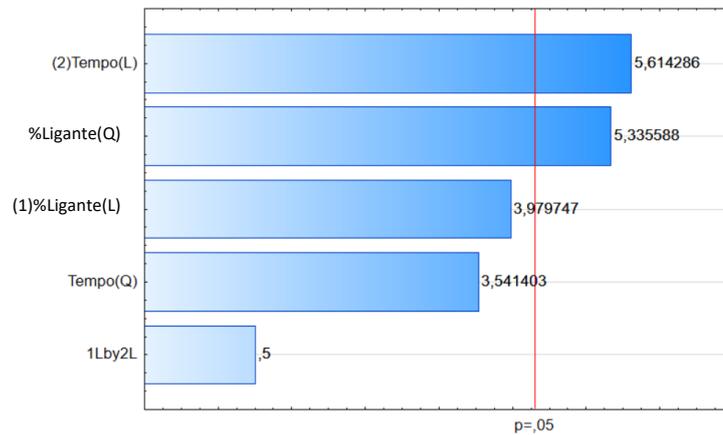
O ajuste do modelo para a resposta da densidade aparente não foi tão adequado com R^2 0,71, figura 68, e como pode ser visto no diagrama de Pareto não houve nenhum termo com alta significância, figura 69.

Figura 68 – Ajuste Do Modelo Para A Densidade Aparente



Fonte: Do autor (2022).

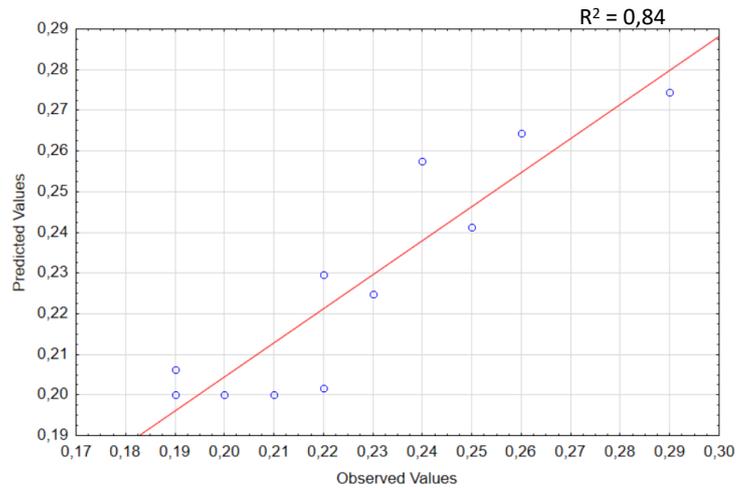
Figura 69 – Diagrama De Pareto Para A Densidade Aparente



Fonte: Do autor (2022).

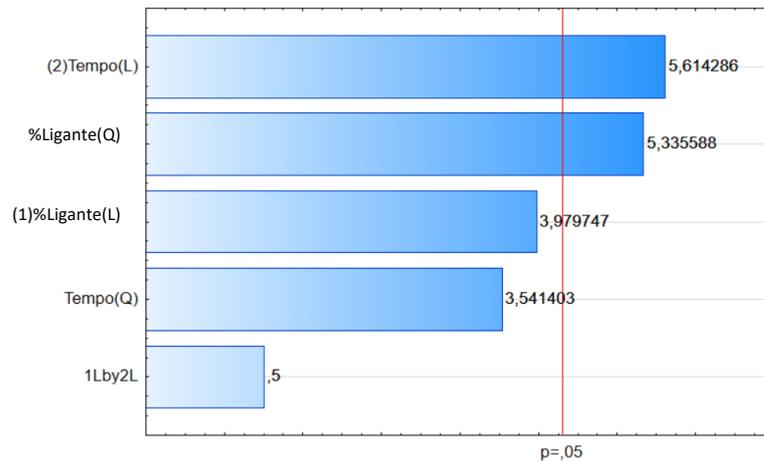
O ajuste da porosidade aparente por outro lado foi mais adequado com R^2 de 0,84, figura 70, foram significantes a variável linear do tempo e a quadrática da quantidade de ligante, figura 71.

Figura 70 – Ajuste Do Modelo Para A Porosidade Aparente



Fonte: Do autor (2022).

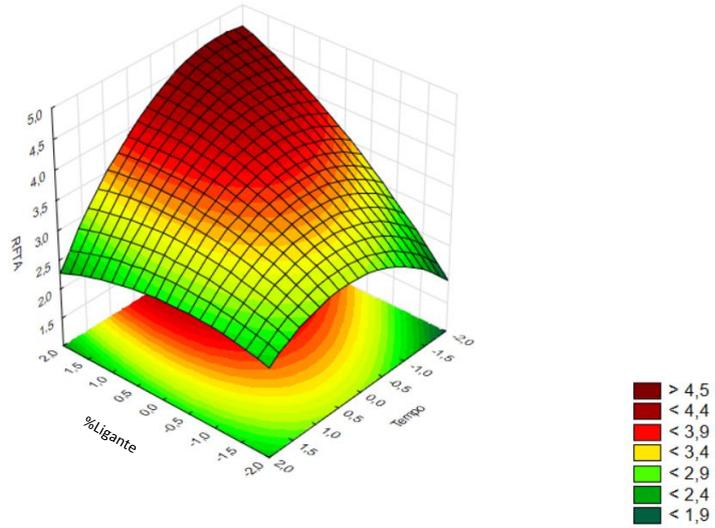
Figura 71 – Diagrama De Pareto Para A Porosidade Aparente



Fonte: Do autor (2022).

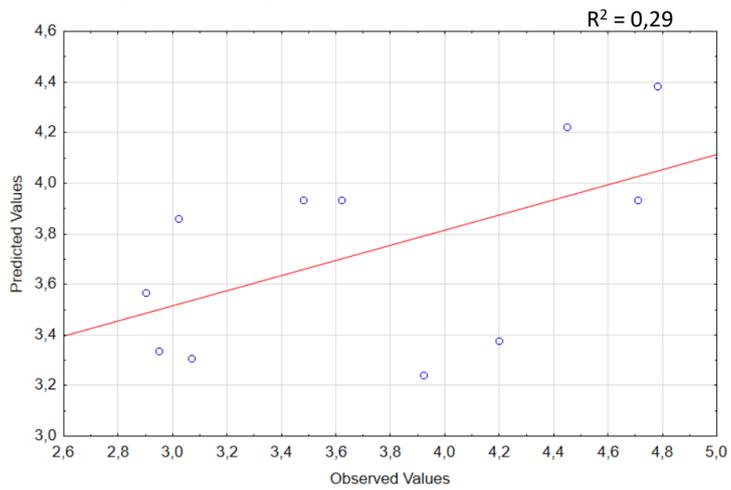
Assim como ocorreu com a formulação Y os resultados obtidos para os ensaios mecânicos não foram satisfatórios, ajustes inadequados e nenhum termo sendo expressamente significativo. Os resultados dos ensaios de resistência à flexão encontram-se nas figuras 72 a 74 e os de resistência à compressão nas figuras 75 a 77. Sendo que a tendência observada para a resistência à flexão, figura 72, é oposta ao que se espera, tendo seu ponto de máxima resistência na situação de máxima quantidade de ligante. A resistência à compressão, figura 75, por outro lado, apresenta a mesma tendência observada anteriormente para outras formulações com seu ponto de máximo nos pontos de mínimo de quantidade de ligante.

Figura 72 – Superfície De Resposta Para RFTA



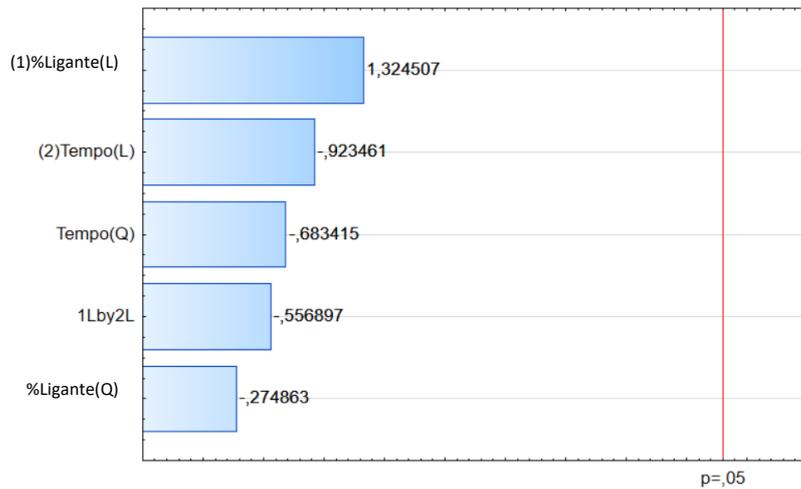
Fonte: Do autor (2022).

Figura 73 – Ajuste Do Modelo Para RFTA



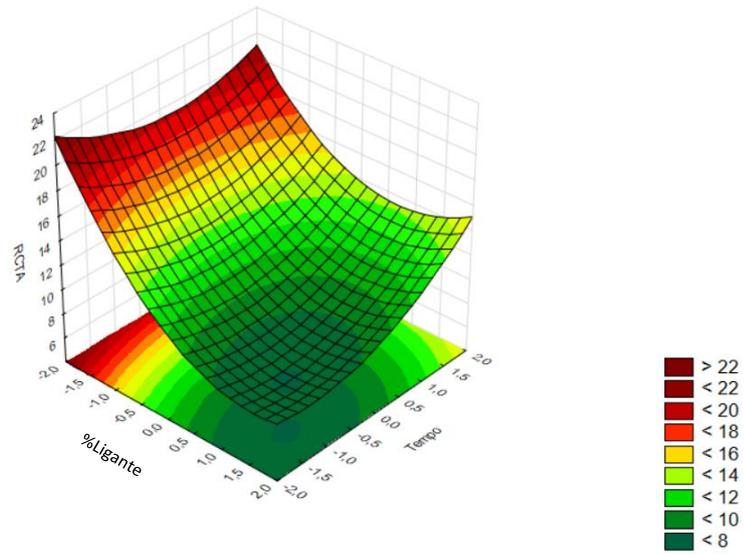
Fonte: Do autor (2022).

Figura 74 – Diagrama De Pareto Para RFTA



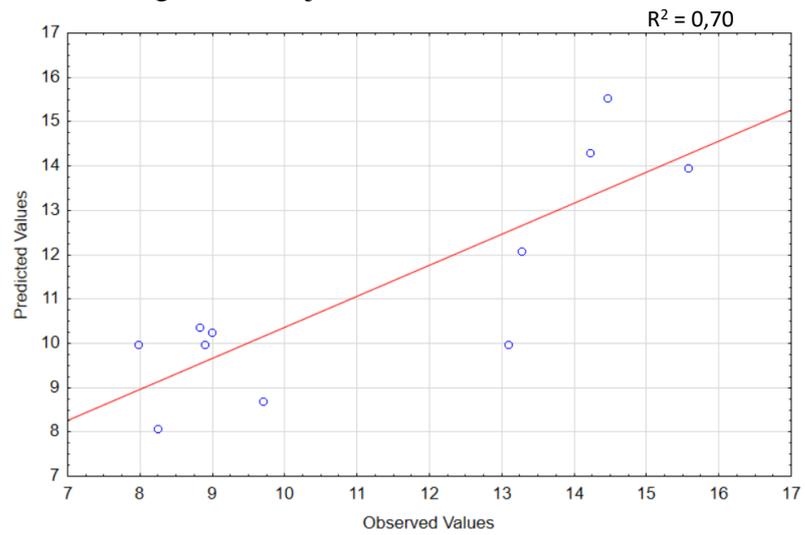
Fonte: Do autor (2022).

Figura 75 – Superfície De Resposta Para RCTA



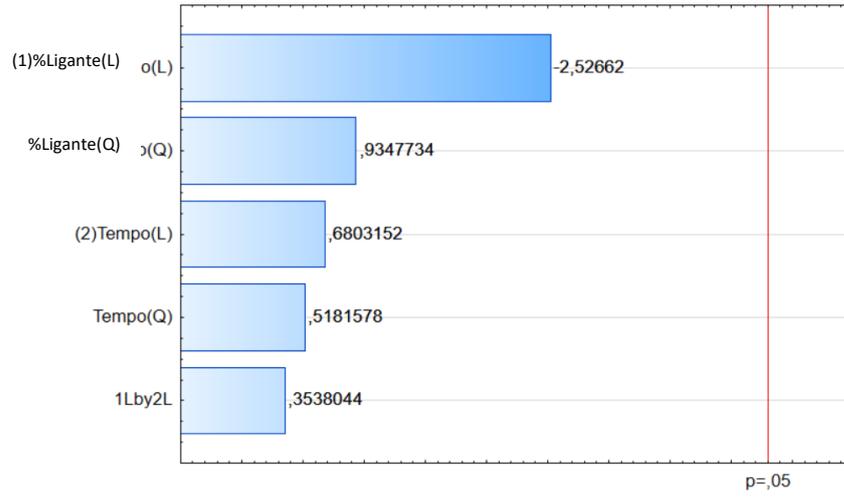
Fonte: Do autor (2022).

Figura 76 – Ajuste Do Modelo Para RCTA



Fonte: Do autor (2022).

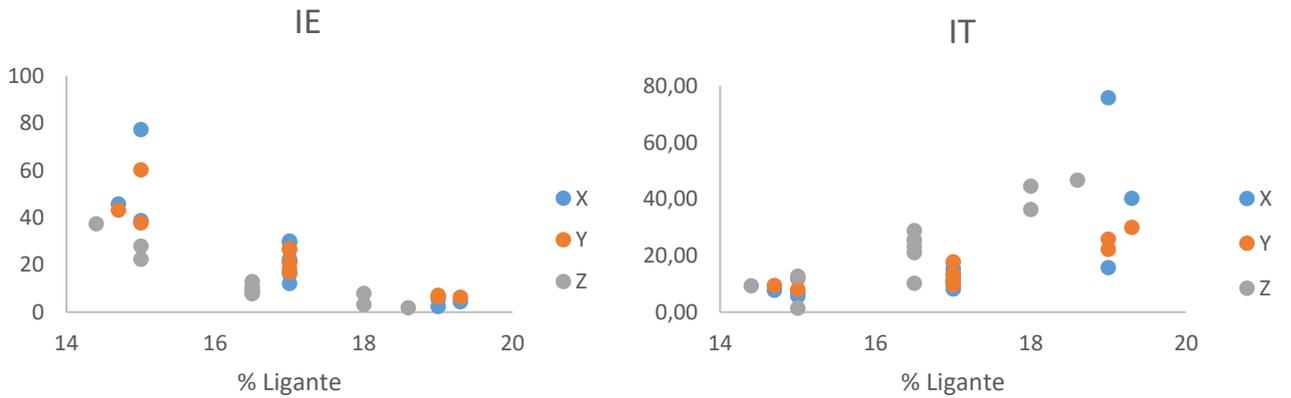
Figura 77 – Diagrama De Pareto Para RCTA



Fonte: Do autor (2022).

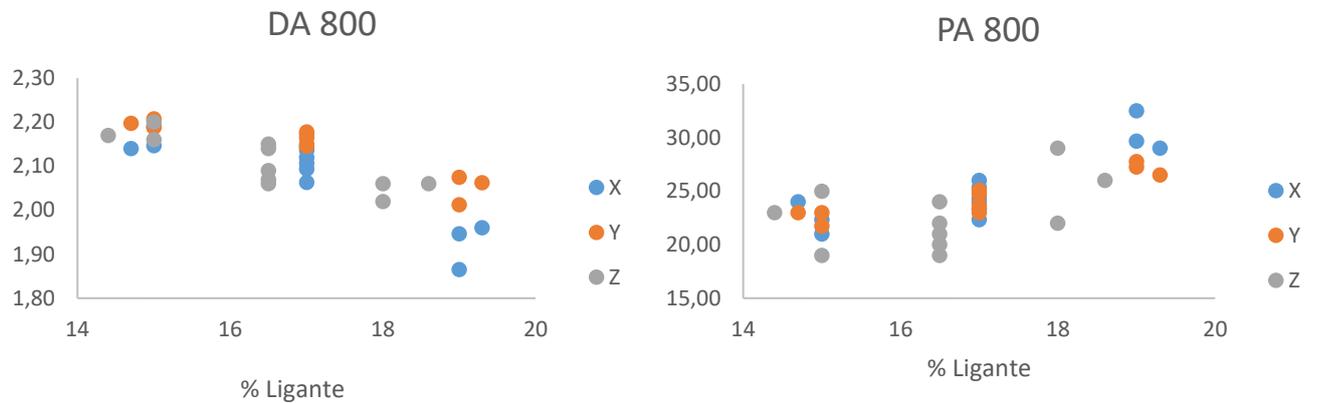
Ao fim foi realizada uma comparação das respostas nas três situações analisadas, figuras 78, 79 e 80.

Figura 78 – Comparação Da Plasticidade Das Massas



Fonte: Do autor (2022).

Figura 79 – Comparação Da Densidade e Porosidade Aparente (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

Figura 80 – Comparação Das Resistências Mecânicas (800°C)



Fonte: Do autor (2022).

Da análise comparativa das massas pode ser observado mais claramente a relação oposta dos índices de extrusão e trabalhabilidade referente à quantidade de ligante na mistura, figura 78. O mesmo pode ser visto na figura 79 para a densidade e porosidade aparente, porém de modo menos intenso. Na figura 80 têm-se que no geral a formulação Z é a menos resistente das formulações estudadas, o que é esperado segundo à ficha técnica da formulação pela empresa, similarmente a formulação Y aparenta ser a massa mais resistente das formulações analisadas, segundo as fichas técnicas esperava-se que a formulação X fosse a massa mais resistente, contudo como a diferença esperada entre a as formulações X e Y segundo à ficha técnica é menor que uma unidade e suas respostas de resistência no geral foram bem próximas é um resultado aceitável.

7 CONCLUSÃO

Dentre as duas variáveis de processo analisadas a que apresentou no geral uma influência mais significativa nas respostas foi a quantidade do ligante, sendo a variável analisada que mais teve suas componentes lineares e/ou quadráticas como significantes nos diagramas de Pareto.

No caso especial do parâmetro de controle, índice de extrusão, é importante observar a quantidade de ligante adicionada à mistura já que impacta intensamente no índice obtido, uma maior quantidade de ligante tornou as massas mais plásticas implicando em uma menor pressão de extrusão, esse efeito ocorreu em todas as três formulações de diferentes plasticidades comerciais analisadas. Quanto ao tempo de batida foi confirmada a existência de fato de uma relação da variável com o índice de extrusão, no caso, de direta proporcionalidade nas formulações X e Y, na formulação Z o efeito do tempo de batida foi mascarado pelo efeito da quantidade de ligante.

Na análise das propriedades físicas a influência da quantidade de ligante adicionada à massa também foi mais relevante, pelo fato da sua presença implicar diretamente na perda de voláteis durante a queima e impactar assim a densidade e porosidade, uma maior presença de ligante durante a queima implica em uma maior perda de voláteis, ou seja, existem mais espaços vazios, provocando uma maior porosidade e inversamente uma menor densidade. Para as propriedades mecânicas as relações não foram tão claras, mas pode-se afirmar que em situações com uma menor quantidade de ligante espera-se maiores resistências, no geral a instabilidade desses resultados se deu pela relação indireta entre as variáveis escolhidas e as propriedades mecânicas, assim sua influência não era tão significativa quanto a de outros fatores.

Pôde ser comprovada a existência de uma relação entre índice de extrusão e índice de trabalhabilidade, contudo, não necessariamente é viabilizada a utilização do índice de trabalhabilidade como parâmetro de controle secundário, seria interessante um estudo maior nesse quesito, envolvendo mais formulações e uma melhor análise da influência da temperatura da massa durante a aferição desses índices.

Quanto a ferramenta de análise estatística escolhida, o estudo estatístico do tema se provou eficiente e informativo, sendo inclusive interessante a análise de outras variáveis de processo para o estudo de como podem influenciar em ainda mais propriedades.

8 REFERÊNCIAS

- BORGES, R. A. A. **Análise multivariada dos principais fatores que afetam o desgaste (vida) do revestimento refratário das painéis de transporte de aço na Aciaria da Usina de Cubatão-Usiminas.** São Paulo: [s.n.].
- BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C. Refratários contendo carbono: propriedades, características e variáveis em sua composição. **Cerâmica**, v. 59, p. 84–114, 2013a.
- BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C. Refratários contendo carbono: propriedades, características e variáveis em sua composição. **Cerâmica**, v. 59, n. 349, p. 84–114, 2013b.
- BRAGANÇA, S. R. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia. Parte I: Propriedades microestruturais. **Cerâmica**, v. 58, p. 280–285, 2012.
- CONTADOR, J. C. et al. GESTÃO DO CONHECIMENTO APLICADA À GESTÃO POR PROCESSOS: IDENTIFICAÇÃO DE FUNCIONALIDADES REQUERIDAS ÀS SOLUÇÕES DE BUSINESS PROCESS MANAGEMENT SYSTEM (BPMS). **Revista de Administração e Inovação - RAI**, v. 2, n. 2, p. 5–18, 2005.
- DA PONTE, F. A. F. et al. Planejamento Composto Central Aplicado a Sistema De Obtenção De Bioquerosene Via Catálise Heterogênea. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 3, p. 418–435, 2017.
- DASH, S. R. **Development of Improved Tap Hole Clay for Blast Furnace Tap Hole.** [s.l.] National Institute of Technology Rourkela, 2009.
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ PARA USO COMO MATÉRIA-PRIMA NA FABRICAÇÃO DE REFRAATÓRIOS DE SÍLICA. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 778–782, 2001.
- DICCINI, G. L. **Estudo Comparativo Entre Massas De Tamponamento Com Ligante Alcatrão/Resina Fenólica.** [s.l.] USP, 2019.
- ECHEVESTE, M. E. S. **Planejamento da Otimização Experimental de Processos Industriais.** Porto Alegre: [s.n.].
- FU, L. et al. **Design, fabrication and properties of lightweight wear lining refractories: A review** *Journal of the European Ceramic Society* Elsevier Ltd, , 1 mar. 2022.
- HÖRBE, T. et al. Gestão por Processos: Uma Proposta Aplicável a uma Pequena Empresa do Ramo de Alimentação. **Sistemas & Gestão**, v. 10, n. 2, p. 226–237, 2015.
- IRITANI, D. R. et al. Análise sobre os conceitos e práticas de gestão por processos: Revisão sistemática e bibliometria. **Gestao e Producao**, v. 22, n. 1, p. 164–180, 1 jan. 2015.
- LEE, W. E.; MOORE, R. E. Evolution of in Situ Refractories in the 20th Century. **Journal of American Ceramic Society**, v. 81, n. 6, p. 1385–1410, 1998.
- MATEUS, N. B.; BARBIN, D. Viabilidade de uso do delineamento composto central Viability of center composite design. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 23, n. 6, p. 1537–1546, 2001.
- MENDONÇA SOUZA, A.; HELENA RIGÃO, M. Identification of out-of-control variables in a multivariate productive process. **Revista Produção**, v. 15, n. 1, p. 74–086, 2005.

NELSON, L. R.; HUNDERMARK, R. J. The tap-hole - key to furnace performance. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 116, n. 5, p. 465–490, 2016.

OTSUBO, Y. et al. High Performance Taphole Clay For Blast Furnace. **IREFCON**, 2014.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L. DE; NAGATA, N. POR QUE OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA? **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 106–110, 2005.

RIBEIRO, A. S. **Análise Sistêmica Das Massas De Tamponamento Para Altos-Fornos**. [s.l.] UFSCar, 2010.

RIBEIRO, A. S. et al. Técnicas de caracterização para o desenvolvimento de massas de tamponamento para altos-fornos. **Cerâmica**, v. 59, n. 349, p. 47–58, 2013.

SHATOKHIN, I. M.; ZIATDINOV, M. KH.; MANASHEVA, É. M. Refractories In Heating Units SHS Ferrosilicon Nitride Nitro-Fesil TL As A New Tap-Hole Clay Refractory Component For Blast Furnaces. **Refractories and Industrial Ceramics**, v. 54, n. 5, p. 345–349, 2014.

SILVA, A. DA. Avaliação Da Secagem Do Bagaço De Cajá Usando Planejamento Fatorial Composto Central. p. 69, 2008.

SIVA KUMAR, R.; MOHAMMED, R.; SRINIVASA RAO, K. Experimental Study on Environment Friendly Tap Hole Clay for Blast Furnace. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 330, n. 1, 2018a.

SIVA KUMAR, R.; MOHAMMED, R.; SRINIVASA RAO, K. Studies to overcome the manufacturing problems in blast furnace tap hole clay of Integrated Steel Plants: Experimental approach. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 330, n. 1, 2018b.

STEENKAMP, J. D.; MNISI, M.; SKJELDESTAD, A. The workability index of three tap-hole clays. **Proceedings of the 15th International Ferro-Alloys Congress, INFACON 2018**, v. 1, n. February, p. 249–258, 2018.

TEIXEIRA, P. C. et al. Standardization and improvement of production processes in bakeries: A multi-case study. **Revista Produção**, v. 24, n. 2, p. 311–321, 2014.

VICENTINI, F. C. et al. Planejamento fatorial e superfície de resposta: Otimização de um método voltamétrico para a determinação de Ag(I) empregando um eletrodo de pasta de nanotubos de carbono. **Química Nova**, v. 34, n. 5, p. 825–830, 2011.

WANG, L. et al. Effects of pitch addition on the properties of environmental-friendly tap-hole clay. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, v. 125, n. 1, p. 12–18, 2017.