

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO PIRES DE SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS E
MICROESTRUTURAIS DOS MOLDES EM AREIA DE SÍLICA
LIGADOS QUIMICAMENTE PELO PROCESSO DE CURA A FRIO EM
FUNDIÇÃO DE AÇO
(Defesa de Doutorado)**

NATAL, DEZEMBRO DE 2015

RICARDO PIRES DE SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS E
MICROESTRUTURAIS DOS MOLDES EM AREIA DE SÍLICA
LIGADOS QUIMICAMENTE PELO PROCESSO DE CURA A FRIO EM
FUNDIÇÃO DE AÇO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na área de Tecnologia de Materiais

Orientador: Carlos Alberto Paskocimas, Dr.

NATAL, DEZEMBRO DE 2015

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Souza, Ricardo Pires de Souza.

Otimização de parâmetros mecânicos e microestruturais dos moldes em areia de sílica ligados quimicamente pelo processo de cura a frio em fundição de aço. / Ricardo Pires de Souza. – Natal, RN, 2015.

123 f. : il.

Orientador: Carlos Alberto Paskocimas, Dr.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

1. Fundição – Tese. 2. Otimização – Tese. 3. Planejamento – Experimentos – Tese. 4. Moldes de areia – Tese. I. Paskocimas, Carlos Alberto. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.74

RICARDO PIRES DE SOUZA
GRADUADO EM ENGENHARIA FÍSICA – UFSCAR, 2006
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – UFRN 2012

Defesa de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Mecânica**

Ricardo Pires de Souza - Doutorando

APROVADO POR:

Prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas. (PPGEM/UFRN) – Orientador, Presidente

Prof. Dr. Daniel Araújo de Macedo (UFPB) – Examinador Externo

Prof. Dr. Márcio Luiz Varela Nogueira de Moraes. (IFRN) – Examinador Externo

Prof. Dr. Mauricio Roberto Bomio Delmonte. (UFRN) – Examinador Interno

Prof. Dr. Rubens Maribondo do Nascimento – (UFRN) – Examinador Interno

**Dedico este trabalho a minha família
que me incentiva e me encoraja na
trajetória da minha vida.**

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese de doutorado contou com importantes apoios e incentivos, os quais não possibilitaria a concretização desse trabalho.

Agradeço inicialmente ao professor Dr. Carlos Alberto Paskocimas por aceitar o desafio de me orientar durante a vigência do estudo. Orientação clara, direta e eficaz.

Agradeço também aos professores Dr. Daniel Macedo, Márcio Varela, Mauricio Bomio e Rubens Maribondo por comporem a banca e pelas contribuições.

Agradeço a toda a equipe do laboratório do departamento de materiais da UFRN que me apoiaram na realização dos testes, em especial Roberto e Grazielle.

Por fim agradeço a toda a equipe da Simisa, por aceitar o desafio do estudo e estar de portas abertas para a integração universidade empresa. Agradecimento especial ao Edson Junqueira, Luís Henrique Remigio e Valdir Vieira pelo acolhimento e ensinamentos.

“Seu trabalho vai ocupar grande parte de sua vida, a única forma de estar realmente satisfeito com ele é fazer o que acredites ser um grande trabalho. E a única forma de fazer um trabalho genial é amar o que você faz. Se você ainda não o encontrou, continue procurando, nunca se detenha. Igualmente como todos os assuntos do coração, você saberá quando o encontrares. E, como qualquer grande relação, somente ficará melhor e melhor com o passar dos anos. Então, continue a busca até que o encontres, nunca te detenhas. ”

Steve Jobs

RESUMO

Defeitos superficiais em peças de aços oneram os custos das indústrias de fundição devido a necessidade de retrabalhos. Os moldes de areia são os mais utilizados em indústrias de fundição e um dos grandes responsáveis por proporcionar os defeitos superficiais. Este estudo tem como objetivo otimizar os níveis das variáveis do processo de moldagem visando minimizar a ocorrência de defeitos superficiais nas peças de aço fundidas em moldes de areia de sílica ligados quimicamente por processo de cura a frio. Na metodologia utilizou-se o planejamento de experimentos com parcelas subdivididas, sendo considerados no estudo os fatores de porcentagem de resina na formulação do molde, adição de óxido de ferro, tipo de tinta, método da aplicação de tinta, quantidade de camadas de tinta, utilização de ar quente nos moldes e tempo de espera do molde antes do vazamento. Foram analisados como variáveis respostas os defeitos de erosão, inclusão de areia, penetração, porosidade e acabamento superficial. Foram realizados ensaios de resistência à tração para avaliar a influência dos fatores nos parâmetros mecânicos e para os parâmetros microestruturais foram realizadas as análises de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análises térmicas (TG/DSC/dilatometria). Os resultados elucidam que para o defeito de erosão, o único fator significativo, com nível de confiança de 95%, foi o tipo de tinta, sendo que a tinta à base de alumina obteve resultados superiores. Para o defeito de inclusão de areia, houve três fatores significativos, sendo os melhores resultados alcançados com a tinta à base de alumina aplicados com spray e a utilização de ar quente no molde antes do vazamento do metal. Para o defeito de penetração, houve quatro fatores significativos, sendo os melhores resultados alcançados com 0,8% de resina e adição de óxido de ferro na formulação do molde, com a tinta sendo aplicada com pincel e tempo de espera de 24 horas antes do vazamento. Para o defeito de porosidade, com nível de confiança de 95%, não houve fatores significativos. Para o defeito de acabamento superficial, os melhores resultados foram alcançados com 0,8% da resina na formulação do molde e aplicação da tinta com pincel. Visando obter os níveis dos fatores que otimizem todos os defeitos simultaneamente, efetuou-se uma média ponderada dos resultados de cada tipo de defeito, concluindo-se que os melhores níveis dos fatores foram: 0,8% de resina e adição de óxido de ferro na formulação da molde, aplicação de duas camadas de tinta aplicadas com pincel ou spray, com a utilização de ar quente no molde antes do vazamento e 24 horas de espera do molde pronto antes do vazamento. Esses níveis dos fatores otimizados foram utilizadas em um experimento de confirmação que ratificaram os resultados obtidos, auxiliando para a redução dos retrabalhos e consequentemente na redução dos custos das peças de aço fundidas.

Palavras-chaves: Fundição; Otimização; Planejamento Experimentos; Moldes de Areia.

ABSTRACT

Surface defects on steel parts borne costs of smelting industries due to the need of rework. Sand molds are frequently used in foundry industries and largely responsible for providing surface defects. This study aims to optimize the levels of the molding process variables to minimize the occurrence of surface defects in steel castings in silica sand molds chemically linked by cold cure process. The methodology used the experimental design with split plot, being considered in the study the resin percentage factors in the mold formulation, addition of iron oxide, type of paint, the paint application method, amount of ink layers, use of hot air along the lines and waiting time of the mold before casting. They were analyzed as response variables erosion defects, sand inclusion, penetration, porosity and surface finish. Tensile strength tests were performed to evaluate the influence of factors on mechanical parameters and the microstructural parameters were carried out the analysis of X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM) and thermal analysis (TG / DSC / dilatometry). The results elucidate that for the faulty erosion, the only significant factor with a 95% confidence level was the type of ink and the ink alumina-based superior results obtained. For the sand inclusion of defect, there were three significant factors, with best results obtained with alumina-based paint and spray applied using hot air in the mold before casting the metal. For the defect penetration, there were four significant factors, the best results being achieved with 0.8% of resin and addition of iron oxide in the molding formulation, the paint being applied by brush and standby time of 24 hours before leak. For the defect porosity with a 95% confidence level, no significant factors. For the defect surface finish, the best results were achieved with the 0.8% formulation of the resin in the mold and application of the paint brush. To obtain the levels of the factors that optimize all defects simultaneously, we performed a weighted average of the results of each type of fault, concluding that the best levels of the factors were: 0.8% resin and addition of iron oxide in the formulation of the template, application of two coats of paint applied with a brush or spray, using hot air in the mold before casting and 24 hours of waiting ready the mold before casting. These levels of the optimized factors were used in an experiment to confirm that ratified the results, helping to reduce rework and consequently reducing costs of cast steel parts.

Keywords: Foundry; Optimization; DOE; Sand Molds

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação percentual das causas dos defeitos de inclusões em liga de aço.....	14
Figura 2: Distribuição da produção de fundidos de aço por país	15
Figura 3: Evolução da produção de fundidos de aço no mundo	16
Figura 4: Representação esquemática do processo de fundição	18
Figura 5: Moldagem em areia com placa dupla face.....	20
Figura 6: Campos de estabilidade dos principais polimorfos cristalinos naturais de SiO ₂ em função da temperatura e pressão	21
Figura 7: Curvas de expansão livre por choque térmico de diferentes tipos de areia	22
Figura 8: Formas típicas de grãos de areia.....	23
Figura 9: Efeito do aumento da quantidade de catalisador (Parte B) no tempo de banca	26
Figura 10: Componentes da tinta para moldes de areia	31
Figura 11: Aplicação de tinta em moldes de areia	35
Figura 12: Medição da camada de espessura úmida de um revestimento de tinta	36
Figura 13: Defeito de erosão e inclusão de areia	38
Figura 14: Visão esquemática de formação da camada não metálica na fronteira do metal – molde.....	39
Figura 15: Defeitos de porosidade	40
Figura 16: Defeito <i>Pinholes</i>	42
Figura 17: Quantidade de gases liberados por processo de fabricação dos moldes.....	44
Figura 18: Defeito de penetração do metal no molde	45
Figura 19: Categorias dos fatores.....	49
Figura 20: Roteiro para realização de experimentos.....	50
Figura 21: Gráfico dos efeitos principais de um planejamento fatorial 2 ^k	54
Figura 22: Gráficos de efeitos de iteração	55
Figura 23: Estrutura de um planejamento de experimentos com parcelas subdivididas da agricultura	58
Figura 24: Regiões de rejeição e não rejeição para o teste F bicaudal.....	60
Figura 25: Divisão da variação de um modelo fatorial de dois fatores	61
Figura 26: Sequência do estudo	65
Figura 27: Representação de curva normal com $\alpha = 0,05$	69
Figura 28: Bagaceira de moenda	70
Figura 29: Moenda	70

Figura 30: Desenho técnico e ilustração da caixa de macho	71
Figura 31: Sequência da fabricação das caixas de machos	71
Figura 32: Desenho do molde de areia para fabricação de 4 corpos de prova em uma bagaceira de moenda	72
Figura 33: Molde de areia com os machos para os experimentos.....	72
Figura 34: Misturador pneumático para obtenção das formulações dos moldes	73
Figura 35: Aplicação da tinta nas caixas de machos (moldes)	74
Figura 36: Tipos de tinta utilizada no estudo	74
Figura 37: Insuflador de ar quente	75
Figura 38: Controle da temperatura nos moldes	76
Figura 39: Peça desmoldada com as amostras anexadas	76
Figura 40: Reforço da identificação das amostras.....	77
Figura 41: Avaliação dos defeitos nas amostras	77
Figura 42: DRX para verificação da composição das tintas.....	81
Figura 43: Amostra pintada com tinta à base de zirconita (1 camada com spray)	82
Figura 44: MEV para determinação da espessura da camada de tinta com aplicação de spray	83
Figura 45: Amostra pintada com tinta à base de zirconita 1 camada com pincel.....	83
Figura 46: MEV para determinação da espessura da camada de tinta aplicada com pincel....	84
Figura 47: Imagens MEV superfícies das tintas	85
Figura 48: Análise dos tamanhos dos poros das camadas de tinta	85
Figura 49: TG e DSC da tinta à base de zirconita	87
Figura 50: TG e DSC mistura molde (areia de sílica + resina + Fe_2O_3).....	87
Figura 51: Dilatação térmica das tintas	88
Figura 52: Comparativo da dilatação térmica das tintas	89
Figura 53: Análise superfície da tintas após aquecimento	89
Figura 54: Esquema de propagação da radiação dentro dos moldes de areia	90
Figura 55: Principais fatores que interferem na resistência a tração.....	91
Figura 56: Efeito da mudança de nível dos fatores para resistência a tração	91
Figura 57: Efeito do AFS na resistência à tração	93
Figura 58: Relação módulo finura-AFS x tamanho de grãos	94
Figura 59: Evolução da temperatura durante aplicação do ar quente nos moldes antes do vazamento.....	95
Figura 60: Dispersão dos valores obtidos para o defeito de Erosão de areia	97
Figura 61: Principais fatores que interferem Defeito de Erosão de areia	98

Figura 62: Efeitos principais para defeito de Erosão	99
Figura 63: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de erosão	99
Figura 64: Dispersão dos valores obtidos para o defeito de inclusão de areia.....	100
Figura 65: Principais fatores que interferem defeito de inclusão de areia.....	101
Figura 66: Efeito do ar quente no defeito de inclusão de areia	102
Figura 67: Efeitos principais para defeito de inclusão de areia.....	102
Figura 68: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de inclusão de areia .	104
Figura 69: Dispersão dos valores obtidos para o defeito de penetração do metal no molde	104
Figura 70: Principais fatores que interferem defeito de penetração de metal no molde	105
Figura 71: Efeitos principais para defeito de penetração do metal no molde.....	106
Figura 72: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de penetração do metal no molde	107
Figura 73: Dispersão dos valores obtidos para o defeito porosidade	108
Figura 74: Principais fatores que interferem defeito de porosidade	108
Figura 75: Efeitos principais para defeito de porosidade	109
Figura 76: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de porosidade	110
Figura 77: Dispersão dos valores obtidos para o defeito acabamento superficial	110
Figura 78: Principais fatores que interferem no defeito de acabamento superficial.....	111
Figura 79: Efeitos principais para defeito de acabamento superficial	112
Figura 80: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de acabamento superficial.....	112
Figura 81: Dispersão dos valores obtidos para o analise unificada dos defeitos.....	113
Figura 82: Principais fatores que interferem nas respostas dos defeitos unificados	114
Figura 83: Efeitos principais para defeitos unificados	114
Figura 84: Amostra dos experimentos de confirmação.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tamanho das aberturas das peneiras para classificação de areias	24
Tabela 2: Papel dos diferentes processos de formação de gases no molde (% em relação a quantidade total de gases gerados).....	43
Tabela 3: Caso Geral para experimentos com dois fatores	52
Tabela 4: Matriz de planejamento fatorial 2^3	53
Tabela 5: Número de tratamento por quantidade de fatores com 2 níveis	56
Tabela 6: Análise de variância para o modelo fatorial de dois fatores.....	62
Tabela 7: Valores pré-fixados nos experimentos	66
Tabela 8: Planejamento experimental fracionado, nível III com 2 réplicas	67
Tabela 9: Níveis dos fatores analisados	68
Tabela 10: Valores atribuídos a cada amostra para cada tipo de defeito	96
Tabela 11: Composição química do aço da primeira corrida dos experimentos	97
Tabela 12: Composição química do aço da segunda corrida dos experimentos	97
Tabela 13: Composição química do aço dos experimentos de confirmação	116

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1.	Evolução da produção da fundição de aço no mundo	15
2.2.	Fundição	16
2.3.	Moldes de areia	19
2.4.	Processo de cura a frio – <i>No-Bake</i>	25
2.5.	Tinta para moldes	29
2.6.	Classificação dos defeitos relacionados com o molde	37
2.7.	Planejamento de Experimentos (<i>Design of Experiments – DOE</i>)	47
2.8.	Análise de variância (ANOVA)	59
3.	METODOLOGIA	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1.	Difração de Raios X (DRX)	81
4.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	82
4.3.	Análises térmicas	86
4.4.	Resistência à tração	90
4.5.	Análise da influência do ar quente nos moldes antes do vazamento	94
4.6.	Planejamento de experimentos fracionados com parcelas subdivididas	95
4.6.1.	Defeito de erosão de areia	97
4.6.2.	Defeito de inclusão de areia	100
4.6.3.	Defeito de penetração do metal no molde	104
4.6.4.	Defeito de porosidade	107
4.6.5.	Defeito de acabamento superficial	110
4.6.6.	Análise unificada dos defeitos	113
5.	CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	119

1. INTRODUÇÃO

Com a redução das barreiras comerciais mundiais, a competição entre as empresas tornou-se mais intensa, forçando-as a buscar novas formas de competitividade para sobreviver. Os consumidores começaram a exigir maior qualidade de produtos e serviços a preços mais baixos (PINTO; CARVALHO; HO, 2006). A nova forma de competição global exige que as empresas estejam comprometidas com o contínuo e completo aperfeiçoamento de seus produtos, processos e colaboradores (ROBLES JÚNIOR, 2003).

Não fugindo a regra de outros setores industriais, as empresas de fundição estão inserida em um ambiente altamente competitivo, pois os clientes buscam produtos com qualidades superiores com orçamentos cada vez mais restrito (SHIROYA NIKUNJ; SHAH, 2014). Grande parte dos custos das fundições são devidos a problemas de qualidade das peças, as quais necessitam de retrabalho ou são refugadas. Muitas fundições não possuem conhecimento das principais causas de retrabalhos e refugo, pois não conseguem manter um sistema de controle de qualidade satisfatório, resultando no incremento dos seus custos. Os custos da qualidade em uma fundição podem variar entre 3% e 15% do total do volume de vendas (ARASU, 2010), sendo os custos de falhas internas e externas respondendo por cerca de 70% do custo da qualidade (THAKARE; TIDKE, 2013), assim a redução desses custos estabelece muitos benefícios para esse setor industrial.

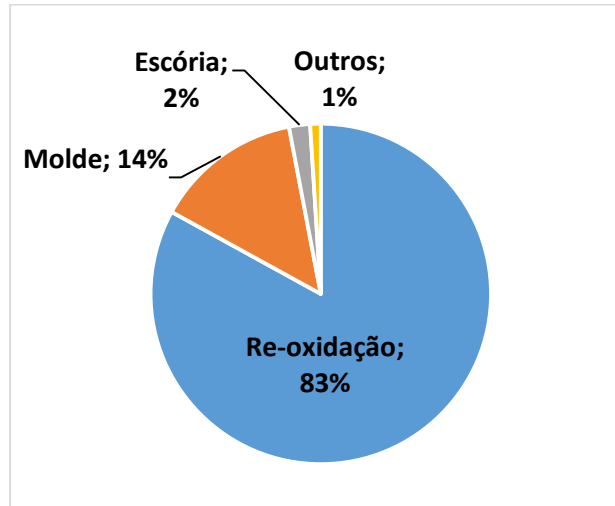
Nas indústrias de fundição, apesar de avançadas tecnologias, o molde em areia continua sendo um dos mais utilizados devido ao baixo custo das matérias primas, grande variedade de forma e a possibilidade de reciclagem da areia de moldagem (SAIKAEW; WIENGWISSET, 2012). Reduzir custos em fundições de aço que utilizam processos de moldagem em areia de sílica, requer a redução da variabilidade do processo, sendo necessário conhecer o máximo possível dos fatores dos moldes que afetam a qualidade superficial da peça.

Dentro do processo de fundição de aço em moldes de areia, os defeitos dos tipos inclusões podem ser classificados como endógenas ou exógenas. A inclusões endógenas são atribuídas ao processamento do metal líquido, e as inclusões exógenas são atribuídas a causas externas (reação metal/molde) que é o foco desse trabalho.

Segundo Zhang e Thomas (2003) as principais causas de defeitos de inclusões exógenas são oriundas da reoxidação do metal seguidas pelos defeitos devido a reação metal/molde. Esta última é uma fonte muito comum de grandes defeitos, que são tipicamente sólidos relacionados com os materiais do próprio molde.

Monroe e Blair (2005) demonstram que 14% dos defeitos superficiais de inclusão são oriundos da reação metal/molde, conforme Figura 1.

Figura 1: Participação percentual das causas dos defeitos de inclusões em liga de aço.



Fonte: Adaptado de Monroe e Blair (2005)

Neste sentido, o presente trabalho, tem como principal objetivo otimizar as variáveis da fabricação dos moldes de areia, visando minimizar a ocorrência de defeitos superficiais e subsuperficiais nas peças de aço fundidas em moldes de areia de sílica ligados quimicamente por processo de cura a frio e vazamento por gravidade de peças grandes.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

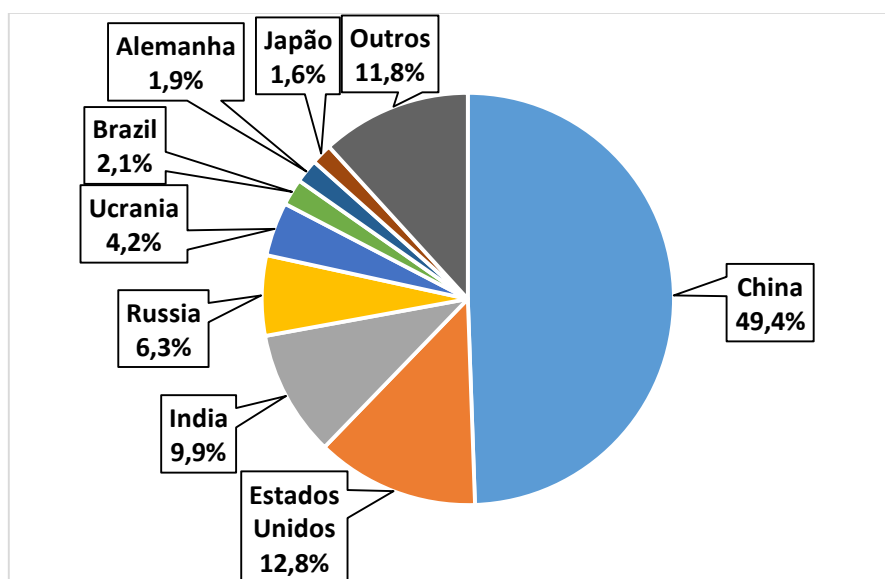
O capítulo aborda o cenário mundial da produção de fundidos de aço e a situação do Brasil perante seus concorrentes. Aborda também os conceitos e definições de processos de fundição e seus defeitos superficiais, bem como o planejamento de experimento, planejamento de experimentos fracionados com parcelas subdivididas para modelamento e otimização de processos.

2.1. Evolução da produção da fundição de aço no mundo

O setor de fundição é considerado um dos principais setores que influenciam o desenvolvimento da economia mundial (HOLTZER; DAŃKO; ŻYMANKOWSKA-KUMON, 2014). No ano de 2013 foram produzidos mais de 11 milhões de toneladas de fundidos de aço no mundo (*48th Census of World Casting Production*), sendo essa produção distribuída por vários países ao redor do mundo.

O maior produtor de peças fundidas de aço é a China, que concentra cerca de 50% de toda a produção mundial. O Brasil, considerando o último censo do setor (2013), ocupa a sexta posição atrás de países como: Estados Unidos, Índia, Rússia e Ucrânia (Figura 2).

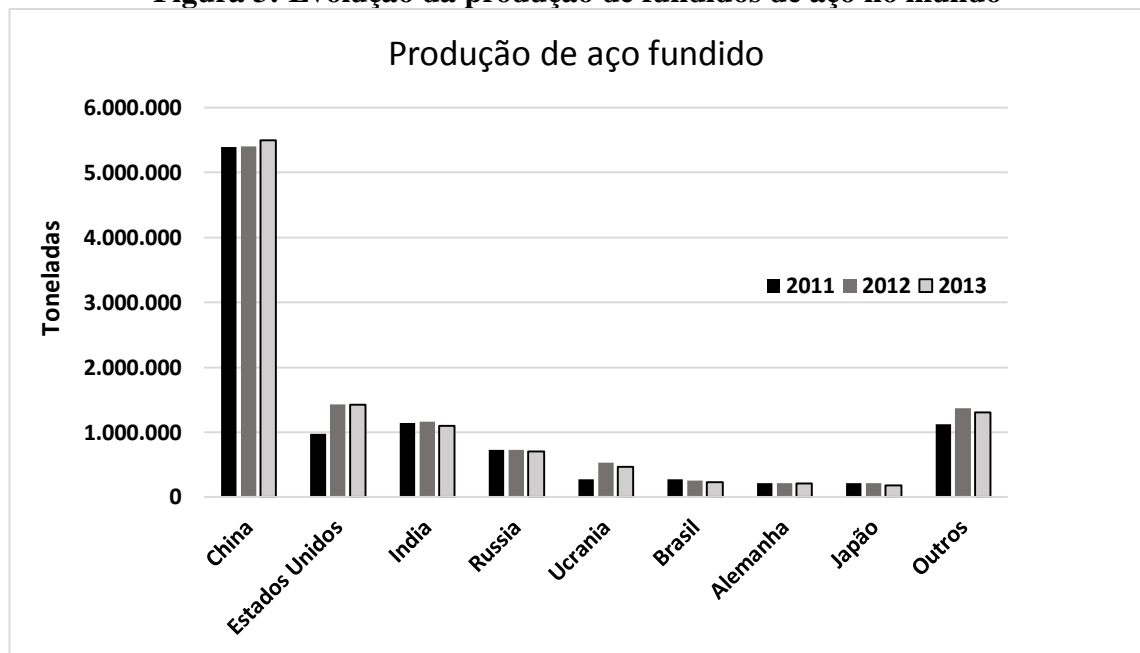
Figura 2: Distribuição da produção de fundidos de aço por país



Fonte: *48th Census of World Casting Production* (2013)

No ano de 2013 foram produzidas 11,1 milhões de toneladas de peças fundidas em aço no mundo todo, sendo o Brasil responsável pela produção de apenas 232,5 mil toneladas (2,1%). O Brasil vem perdendo mercado para outros países ano após ano e de 2011 para 2013 o Brasil perdeu cerca de 16 % do mercado de fundidos de aço (Figura 3).

Figura 3: Evolução da produção de fundidos de aço no mundo



Fonte: 46th 47th e 48th Census of World Casting Production (2013)

O Mercado de fundidos de aço aumentou a produção em mais de 7% de 2011 para 2013, sendo os Estados Unidos e a Ucrânia os países que tiveram os maiores incrementos da produção. A China se manteve sua produção praticamente estável e o Brasil perdeu o poder competitivo com a queda de produção. Holtzer, Danko e Zymankowska-Kumon (2014) destacam que o Brasil teve uma das maiores quedas de produção de fundidos de aço desde 2008. Essa queda em parte é justificada pela crise econômica que o Brasil vem enfrentando e a busca de melhoria de processos é fundamental para que as empresas brasileiras se mantenham competitivas neste setor tão importante para econômica nacional e mundial.

2.2. Fundição

O processo de produção por fundição é uma tecnologia muito antiga, sendo os objetos metálicos mais antigos elaborados por esse processo produzidos no período de 5.000 a 3.000 a.C (BALDAM; VIEIRA, 2013). Esses primeiros trabalhos foram desenvolvidos com cobre fundido, sendo os moldes feitos de pedra lascada. Já as primeiras peças desenvolvidas pelo

processo de fundição com aço são bem mais recentes e iniciou-se em 1740 com Benjamin Huntsman na Inglaterra.

O processo de fundição consiste na fabricação de um metal totalmente fundido através do derramamento no interior de uma cavidade de um molde que possui a forma desejada da peça (CALLISTER, 2002; KASSIE; ASSFAW, 2013). Com a solidificação, o metal assume a forma do molde, com um certo grau de encolhimento. Segundo Callister (2002, p.246) as técnicas de fundição são empregadas quando:

- A forma acabada é tão grande ou complicada que qualquer outro método seria impraticável;
- Uma liga específica possui uma ductilidade tão baixa que a conformação tanto a quente como a frio seria difícil;
- Em comparação a outros processos de fabricação, a fundição é o processo mais econômico.

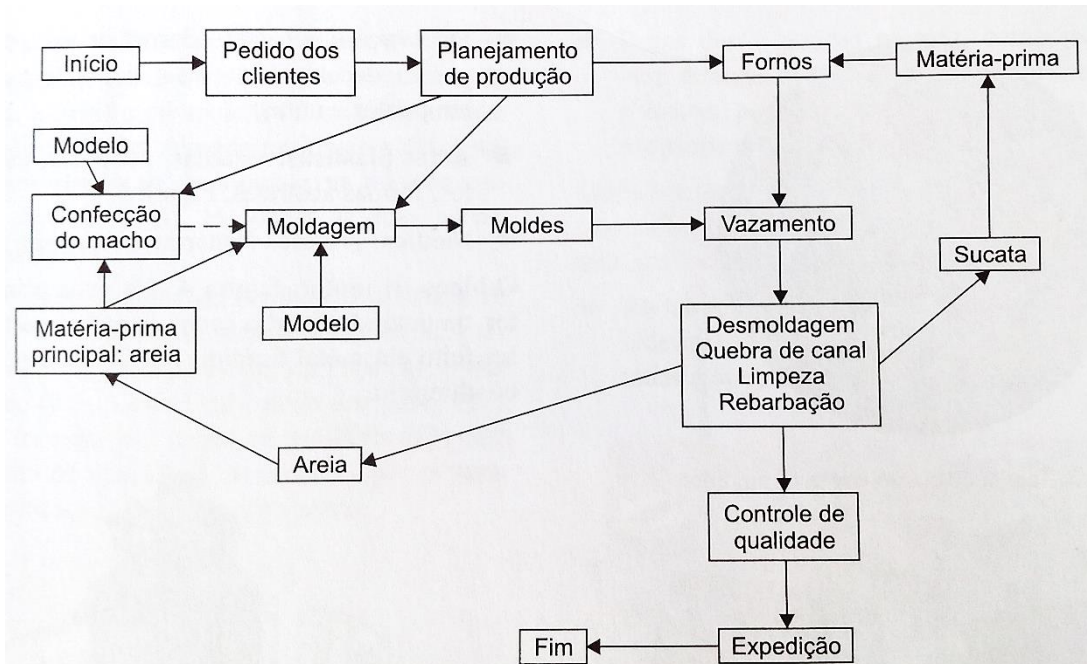
Segundo Baldam e Vieira (2013, p 22), algumas características da fundição a colocam numa posição estratégica pois é o caminho mais curto entre a liga metálica líquida e a peça pronta, tornando o processo atrativo economicamente para muitas situações e por não haver limites para confecção de formas de moldes de conjuntos fundidos, sendo considerado o processo com maior liberdade de formas disponíveis. Alves (2009) complementa argumentando que a maioria das ligas comerciais, tais como aços, ferros fundidos, ligas de cobre, alumínio, ouro, prata, dentre outros, podem ser produzidas pelo processo de fundição, tornando o processo ainda mais atrativo.

O processo de fundição exige, pelo menos, os seguintes setores (SENAI, 1987):

- De projetos;
- De confecção e reparação de modelos;
- De fundição (preparação do metal líquido)
- Da preparação dos moldes;
- Confecção dos machos;
- Vazamento do metal líquido nos moldes;
- Acabamento peças (rebarbação, limpeza, usinagem e soldagem).

A Figura 4 demonstra, esquematicamente, o processo de fundição e suas diversas etapas.

Figura 4: Representação esquemática do processo de fundição



Fonte: Baldam e Vieira (2013, p.24)

Em um processo de fundição cada etapa é de extrema importância, pois uma falha em cada parte do processo, pode causar a rejeição da peça final, assim esforços devem ser empregados desde da análise da matéria prima, passando pela modelagem, moldagem, fornos, vazamento e acabamento da peça.

Existem inúmeros processos de fundição, porém Baldam e Viera (2013, p29) e Callister (2002, p. 246) cita como principais processos:

- Moldagem em areia;
- Moldagem em casca;
- Sob pressão;
- *Shell molding*;
- *Cold box*;
- Fundição de precisão
- Centrífuga;
- Alta precisão.

Todas as técnicas são utilizadas na fundição dos metais, sendo a escolha do processo adequado dependente do tamanho e da geometria das peças a serem produzidas, da qualidade superficial desejada, valor econômico, dentre outros parâmetros (BUDINSKI; BUDINSKI, 2010).

O método mais tradicional utilizado em fundição é o de moldes de areia (BALDAM; VIEIRA, 2013; CALLISTER, 2002; SHACKELFORD, 2008) e o que será abordado neste trabalho.

2.3. Moldes de areia

O processo de moldagem de areia consiste em construir o molde com areia em que será vazado o metal líquido. Esses moldes podem ser construídos com areia verde, areia seca, areia-cimento e areia de macho (BALDAM; VIEIRA, 2013). Na confecção do molde e do macho são utilizadas geralmente três matérias primas principais:

- Areia base (sílica, zirconita, cromita, sílica vítrea);
- Ligantes (argila, resinas, silicato de sódio, cimento);
- Produtos de adição (carvão mineral, serragem, óxido de ferro).

A escolha da matéria prima influencia diretamente nas propriedades dos moldes, tais como: facilidade de manuseio, comportamento inerte em relação ao metal vazado, facilidade de desmoldagem, resistência, permeabilidade e refratariedade (BALDAM; VIEIRA, 2013; SILVA, 1971). Assim a escolha adequada do método de fundição e também da matéria prima que irá compor os moldes são fundamentais para que a peça final adquira as propriedades mecânicas e requeridas no projeto.

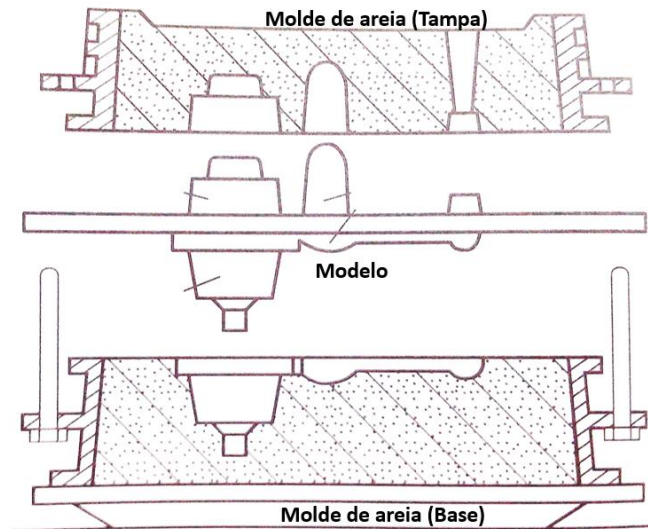
O processo de moldagem também tem forte influência nas variáveis que controlam a solidificação, tais como: taxa de resfriamento e acabamento superficial das peças (SHACKELFORD, 2008).

Normalmente para fabricação de peças de médio e grandes portes uma boa resistência dos moldes e machos e uma boa permeabilidade dos gases são essenciais, assim neste tipos de produção os moldes em areia a seco são mais recomendados (BALDAM; VIEIRA, 2013). Neste processo a areia normalmente é seca em estufas, sendo recomendadas areias do tipo sintético ou semissintético com a adição de aglomerantes orgânicos a fim de atingir as resistências necessárias sem comprometer a colapsibilidade do molde.

A produção do molde de areia, necessita inicialmente da confecção do modelo que deverá ter as mesmas dimensões da peça final, o molde é feito em duas partes (tampa e base),

pois após a cura do molde, o modelo é retirado para que o espaço para o metal fundido possa ser alocado. A Figura 5 demonstra um exemplo das partes de um molde de areia.

Figura 5: Moldagem em areia com placa dupla face



Fonte: Adaptado de Baldam e Vieira (2013, p.218)

Para a construção dos moldes de areia, a areia base é o elemento que está presente em maior proporção (BALDAM; VIEIRA, 2013). As areias bases podem ser de sílica (quartzo), cromita, zirconita e olivina (MARIOTTO, 1986) e algumas propriedades são importante, tais como: pureza, presença de orgânicos, forma de grãos, granulometria, expansibilidade, densidade e ponto de fusão. Uma análise da composição química e mineralógica, da forma da superfície, do tamanho e distribuição granulométrica dos grãos da areia são fatores importantes no julgamento da qualidade da areia (MARIOTTO, 2005)

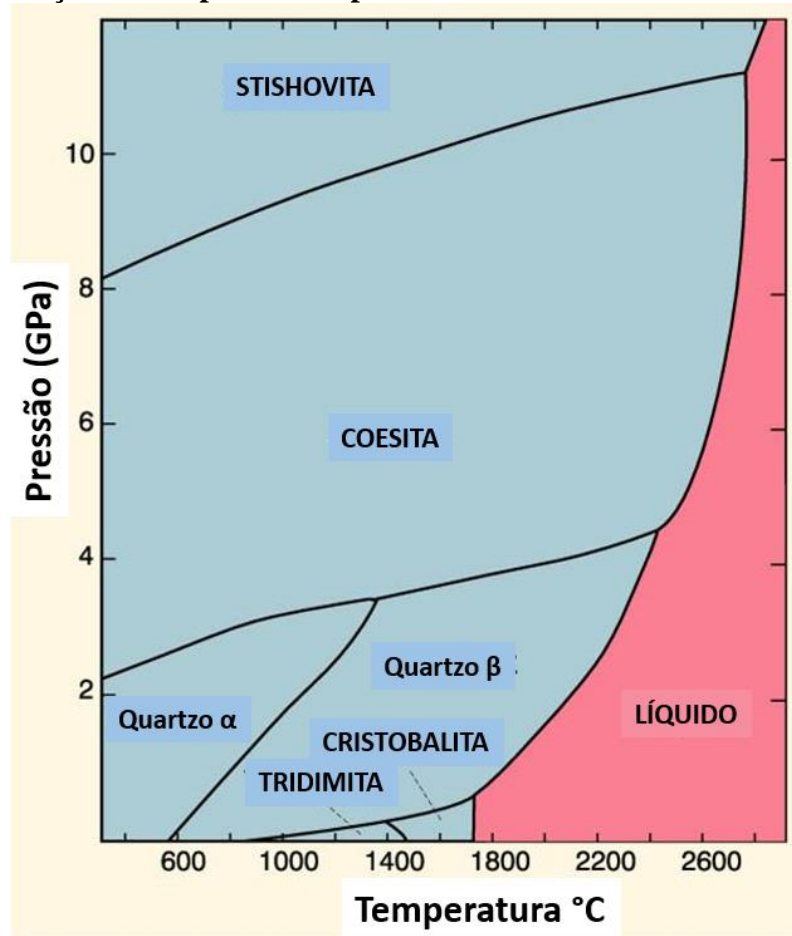
A areia de sílica é a mais utilizada nas fundições, pois o silício é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre. As areias de sílica são constituídas quase que exclusivamente por quartzo, cujo o ponto de fusão é de 1728°C. As impurezas presentes variam com a procedência da areia, sendo as mais comuns feldspatos, argilas e óxidos de ferro (MARIOTTO, 1986)

Uma característica importante apresentada pela sílica e que não pode deixar de ser observada no desenvolvimento do processo de moldagem é o fenômeno da alotropia, na qual diversas transições de fase podem estar presentes durante o processo de fundição. A sílica, no estado sólido, a temperatura ambiente se encontra na forma de quartzo α e quando aquecido

expande-se de forma aproximadamente uniforme até 573°C, quando ocorre a transformação reversível do quartzo α para quartzo β (BALDAM; VIEIRA, 2013).

Acompanhada dessa transformação ocorre uma expansão repentina, que ao continuar o aquecimento, o quartzo β sofrerá uma contração repentina. Outras transformações do quartzo podem ocorrer como verificado na Figura 6.

Figura 6: Campos de estabilidade dos principais polimorfos cristalinos naturais de SiO_2 em função da temperatura e pressão



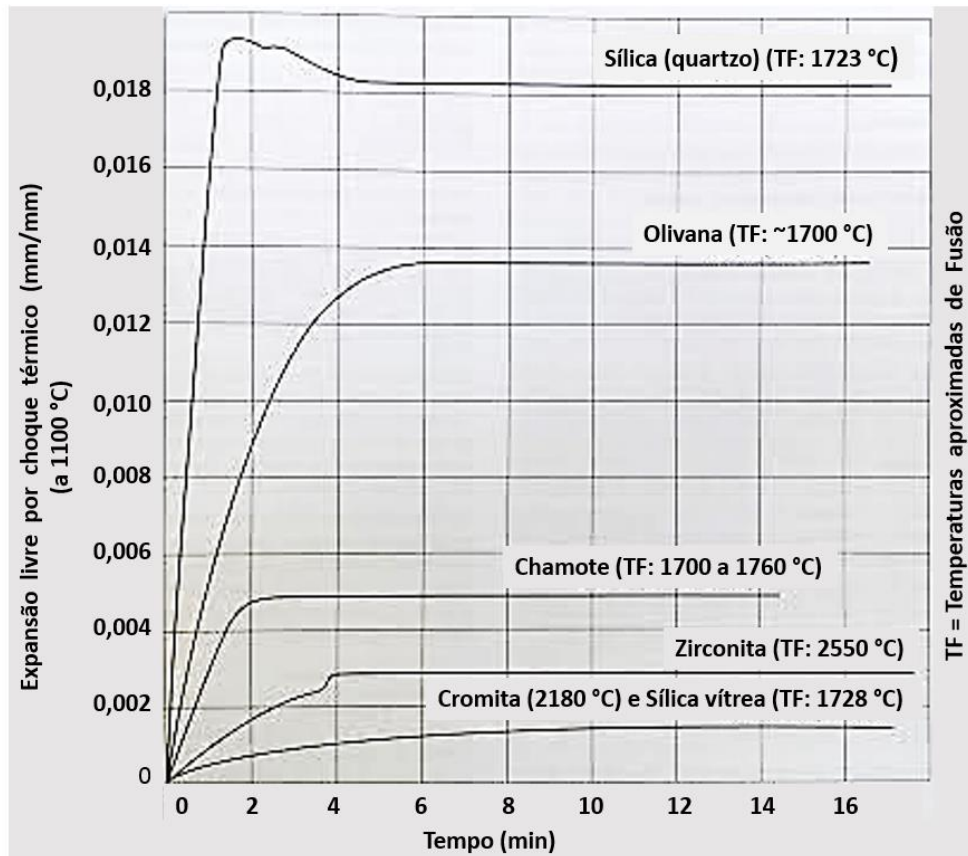
Fonte: Adaptado de Klein e Hurlbut Jr. (1993)

Apesar de ocorrer as transformações a temperaturas superiores, tais como quartzo β em tridimita e tridimita em cristobalita, essas transformações são difíceis de ocorrer (BALDAM; VIEIRA, 2013) e pode-se ter quartzo aquecido acima de 867°C por horas ou dias. Nos moldes de fundição, apenas uma pequena parcela de areia é aquecida a temperaturas superiores a 867°C e o tempo de permanência a essas temperaturas é relativamente curto, assim uma parcela desprezível de grãos de areia podem transformar-se em tridimita ou cristobalita.

Os fenômenos de expansão e contração podem causar defeitos tais como: descascamento, veiamento, penetração e dimensional incorreto, aumentando o custo da

produção (NWAOGU et al., 2011). A areia de sílica é uma das que apresenta maior expansão livre por choque térmico, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Curvas de expansão livre por choque térmico de diferentes tipos de areia

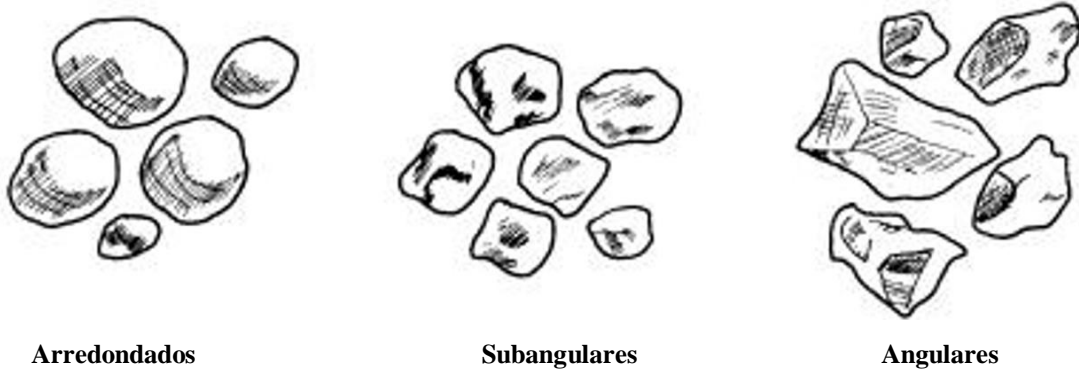


Fonte: Adaptado de Baldam e Vieira (2013, p. 195)

Visualiza-se na Figura 7 que a areia de sílica tem maior expansão livre por choque térmico dentre diversas areias-base utilizadas em fundição. Esse ponto desfavorece a utilização desse tipo de areia, porém como a areia de sílica é mais facilmente encontrada, o custo favorece sua utilização.

Além do tipo da areia ser fundamental para fabricação dos moldes em empresas de fundição, entender o formato de grãos da areia também é crucial para o processo, pois os grãos de areia podem ser arredondados, subangulares e angulares e essa característica influencia diretamente no consumo de ligantes, saída de gases e na escoabilidade da areia.

Visualiza-se na Figura 8 as formas de grãos de areias típicos.

Figura 8: Formas típicas de grãos de areia

Fonte: Adaptado de Mariotto (1986)

Os grãos arredondados compactam-se melhor e necessitam de menor quantidade de aglomerante para proporcionar uma dada resistência a frio (ensaio de tração) ao molde. Por outro lado, proporcionam menor permeabilidade e produzem moldes de alta densidade e resistência. Os grãos arredondados oferecem a melhor condição para evitar a reação metal/molde por utilizar quantidade menores de resina e catalisadores. Grãos subangulares proporcionam moldes com boa permeabilidade e permitem uma melhor acomodação das dilatações e contrações da areia e são os preferidos no processo de fundição de peças de médio e grande porte, produzem molde de média densidade. Já os grãos angulares proporcionam menor resistência e levam à obtenção de moldes com baixa densidade e alta permeabilidade, além de proporcionarem menos problemas com as dilatações térmicas (MARIOTTO, 1986).

Além de buscar o tipo de areia utilizado no processo de moldagem e o tipo de grãos da areia, outro fator importante é o tamanho de grãos. A Sociedade Americana de Fundição – AFS (*American Foundrymen's Society*) desenvolveu o módulo de finura AFS, que visa verificar uma distribuição normal do tamanho médio dos grãos dos componentes da areia. O módulo de finura indica aproximadamente o número de aberturas por polegada da peneira a qual permitiria a passagem de partículas da amostra se esta possuísse todos os grãos de tamanho uniforme, ou seja, o módulo de finura é correspondente ao tamanho médio dos grãos na amostra (SANDERS, 1973). O índice é calculado através da equação (MARIOTTO, 1986; SANDERS, 1973)

$$\mathbf{M} = \frac{\sum (g_i \cdot m_i)}{\sum g_i} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

g_i = quantidade, em gramas, de material retido na peneira i ;

m_i = coeficientes arbitrários definidos pela AFS;

Para determinar a especificação da areia, a Associação Brasileira de Fundição – ABIFA, através da Comissão de Estudos de Matérias Primas – CEMP, criou um processo de padronização para encontrar o tamanho médio dos grãos de areia. Esse ensaio denominado ensaio de determinação da distribuição granulométrica (CEMP - 081), consiste na determinação do percentual de retenção do material granular em duas ou mais peneiras da série padrão (ABNT), compreendida na abertura das peneiras com malhas entre 0,053mm a 3,40mm, conforme demonstrado na Tabela 1:

Tabela 1: Tamanho das aberturas das peneiras para classificação de areias

Número da Peneira (#Mesh - AFS)	Abertura Nominal (mm)
3	3,40
5	1,70
10	0,84
20	0,60
30	0,42
40	0,30
50	0,21
70	0,15
100	0,105
140	0,075
200	0,053
300	Prato

Fonte: ABIFA-CEMP, 1982

Uma boa areia de moldagem deve conter uma porcentagem e distribuição de grãos de vários tamanhos, incluindo grãos finos e grossos. O módulo de finura AFS dá uma indicação do diâmetro médio do grão em um determinado lote de areia, sendo que valores altos correspondem a partículas de diâmetros pequenos (SANDERS, 1973). Com a análise do módulo de finura pode-se controlar o teor de finos. Esse indicativo na areia deve ser controlado como característica crítica, pois a presença de finos na areia em quantidade acima de 2% tem um impacto direto no consumo de ligantes requeridos para cobrir sua superfície, devido a estas partículas de areia possuírem uma área superficial muitas vezes maior quando comparada à área dos grãos médio em análise (CAREY; SWARTZLANDER, 1995). Os autores salientam ainda que o teor de finos acima de 2% tem influência direta na resistência a frio do molde, em caso de molde de médio e grande porte pode ocorrer a quebra durante o manuseio.

A distribuição do tamanho de grãos de areia no moldes são fundamentais, pois quando o metal líquido entra em contato com o molde, vapores e outros gases dos ligantes orgânicos decompostos são gerados e devem sair pelos poros dos moldes (PEIXOTO, 2003). Os moldes devem possuir poros suficientes para a liberação dos gases e vazios não muito grandes, para que o metal não penetre no molde.

Além da areia de base, outro elemento para fabricação dos moldes em processos de fundição são os ligantes, que é um produto utilizado para unir os grãos de areia de base, sendo a argila o mais utilizado (BALDAM; VIEIRA, 2013). Com a evolução do setor, outros ligantes como resinas sintéticas passaram a ser utilizados, tais como:

- Resinas fenólica;
- Resinas uréica-formol;
- Resinas furânicas;
- Resinas uréica-furânica;
- Resinas fenólica-furânica;
- Resinas uréica-fenólica-furânica;
- Resinas fenólica-uretânica;
- Resinas alquídica-uretânica.

2.4. Processo de cura a frio – *No-Bake*

Para eliminar a necessidade de aquecimento do molde para a cura, um sistema com uma serie de resinas foi desenvolvido. Esse sistema recebeu o nome de cura a frio ou *No-Bake*. Esse tipo de processo é considerado pelas indústrias de fundição como o segundo mais utilizado na produção de peças fundidas, sendo a fabricação de moldes por esse processo adequada para produção de médio e baixo volume de peças complexas (AFS, 2015). Um incentivador para utilização desse sistema em especial está no baixo consumo energético.

Nesses sistemas, a areia é misturada com uma ou duas resinas líquidas e com um componente catalisador. Assim que a resina e o catalisador são adicionados na areia, uma reação química é iniciada no molde, originando o processo de endurecimento (PIWONKA, 1998).

As primeiras resinas eram conhecidas como resinas furânicas catalisadas por ácido. As resinas furânicas usadas em fundição são normalmente derivadas de álcool furfurílico-formaldeído modificado por ureia ou de condensados de álcool furfurílico-formaldeído. As

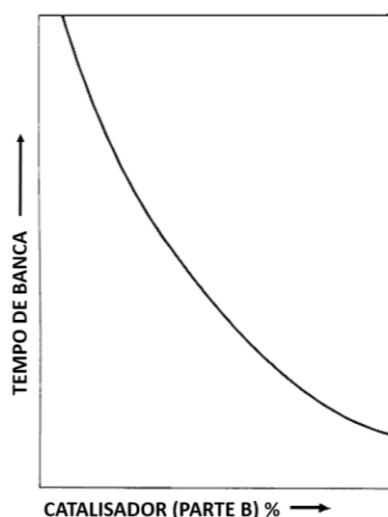
resinas furânicas curam a quente e são fortemente reativas à temperatura ambiente na presença de ácido forte. Elas curam por reação de condensação, sendo que a água é o subproduto primário (MARIOTTO, 2005; NARO, 1999).

Em 1965 as resinas alquídicas de Cura a Frio foram introduzidas no mercado (PILATO, 2010). Esse processo também é conhecido como resinas de óleo uretano, resina alquídica uretano ou poliéster-uretano e utiliza três componentes, sendo a parte A uma resina de óleo tipo alquídico, a parte B, um catalisador de amina / metálico líquido e a parte C um componente uretano denominado isocianato (PIWONKA, 1998).

Quando os três componentes são misturados em conjunto com areia base, inicia-se o processo de cura do molde ou do macho. Neste processo, a cura ocorre em duas etapas: inicialmente o isocianato (Parte C) reage e reduz a umidade da areia e reage com a resina alquídica (Parte A), que pode ter o tempo de cura controlado pelo catalisador (Parte B), formando uma ligação relativamente fraca, porém forte o suficiente para manuseio e retirada do modelo do molde ou do macho (JAIN, 2003; PIWONKA, 1998).

O tempo de trabalho (manuseio) da areia é controlado pela quantidade de catalisador (Parte B) adicionado a mistura, conforme ilustrado na Figura 9.

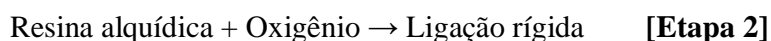
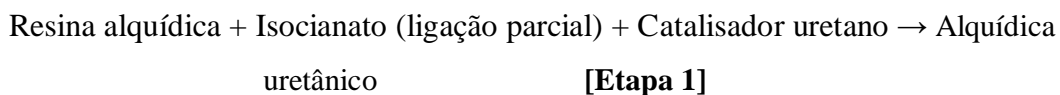
Figura 9: Efeito do aumento da quantidade de catalisador (Parte B) no tempo de banca



Fonte: Adaptado de Piwonka (1998, p.21)

Se a porcentagem de catalisador (Parte B) for alta, irá acelerar a reação química e o tempo de banca irá diminuir, podendo não haver tempo suficiente para produção do molde completo. Já se a porcentagem de catalisador (Parte B) for muito pequena, o tempo de banca será alto e a cura completa será muito lenta, comprometendo o processo para o vazamento do metal líquido.

A segunda etapa do processo envolve a reação dos óleos insaturados com oxigênio existente no ambiente, resultando na polimerização no núcleo do sistema, formando uma ligação resistente.



No primeiro estágio, o desenvolvimento de resistência suficiente para extração é conseguido por reação entre a resina alquídica e o isocianato na presença de catalisador metálico. No segundo estágio, que contribui com o dobro ou o triplo da resistência desenvolvida na reação do uretano, a resina alquídica forma ligações cruzadas pela combinação com ar da atmosfera. Secantes catalisam a oxidação do segundo estágio e aceleram a cura. Esta família de sistemas de resina tem ainda um extenso uso devido a suas excelentes propriedades de fabricação de machos e moldes. A excelente plasticidade, que possibilita e a facilidade de extração de machos e moldes, e a ausência de odores de formaldeído, estão entre as características mais atrativas destas resinas (NARO, 1999)

O teor ótimo de ligantes em cada caso particular depende fortemente da forma e da área superficial dos grãos de areia. Está comprovado que grãos arredondados exigem os menores teores de ligante, além de propiciarem melhor adensamento (MARIOTTO, 2005). O tamanho da partícula e sua distribuição têm uma influência significativa na resistência do molde depois do processo de cura

Piwonka (1998) destaca que a cura total do molde ou do macho irá depender do oxigênio, tamanho e forma da secção do molde, juntamente com a temperatura. Quando mais alta a temperatura, menor será o tempo de cura do processo. Jain (2003, p.136) adiciona que a temperatura da areia não pode ultrapassar 40°C, pois compromete o tempo de banca. O mesmo autor destaca que a quantidade de argila misturada a areia deve ser inferior a 0,5% e que a umidade afeta diretamente o processo, e que em estações de chuva com umidade relativa do ar alta, devem-se evitar estocar os moldes ou machos por um longo período antes do vazamento.

No processo *No-Bake*, a cura é exotérmica e o tempo de banca não deve ultrapassar 20 à 25 minutos, sendo que a retirada do macho da caixa pode ser feita em poucos minutos à temperatura ambiente; a resistência máxima é atingida em 4 ou 5 horas aproximadamente (JAIN, 2003).

A ASK CHEMICALS (2015a), um dos maiores fabricantes mundial de resinas alquídicas uretânicas destaca que as principais vantagens desse sistema são:

- Facilidade de produção dos moldes e machos;
- Excelente acabamento superficial;
- Excelente estabilidade dimensional dos machos e moldes.
- Excelentes características de desmoldagem;
- Menos sensível às variáveis de areia e fundição do que outros sistemas de cura a frio;
- Disponível com vida de banca/tempo de cura pré-determinado ou variável;
- Excelente alternativa para moldes muito grandes.

O teor de resina (Parte A) empregado neste processo é de 0,8 a 2,0% do peso da areia. O catalisador (Parte B) é adicionado separadamente e deve ser considerado a quantidade da resina adicionada. Normalmente se utiliza 2 a 10% de catalisador sobre o peso da parte A. Já o isocianato (Parte C) deve-se utilizar entre 18 e 20% do peso da parte A (PIWONKA, 1998).

Jain (2003, p.136) corrobora com Piwonka (1998) porem destaca que 5% da parte B sobre o peso da Parte A é considerado ponto ótimo do sistema e que se a umidade do ambiente estiver alta, a porcentagem do isocianato (Parte C) pode ser aumentada para 25%.

Para a preparação da mistura do molde é recomendada que a resina alquídica (Parte A) e o catalisador (Parte B) sejam pré misturados e depois adicionados a areia. Alguns fabricantes, como a ASK Chemicals disponibilizam o produto já pré misturado com o tempo de banca especificado para cada produto, ou seja, cada produto tem uma certa quantidade de catalisador, sendo especificada em tempo de banca.

Em produção de peças fundidas de aço de grandes proporções (20 a 40 toneladas), existe a necessidade de maior variação no tempo de banca dependendo de cada molde a ser fabricado, assim são disponibilizados também os três componentes do processo independentemente. O processo de cura a frio – *No-Bake* com resina alquídica-uretânica é muito empregado em fundições de aço de grandes peças, pois a atmosfera do gás no molde durante o vazamento tem um efeito fortemente redutor (MARIOTTO, 2005).

Devido a areia de cura a frio normalmente apresentar uma boa flexibilidade os moldadores têm se descuidado com a compactação neste processo, o que tem aumentado os defeitos próprios da deficiência de adensamento (penetração). Para garantir um bom adensamento da areia, além do controle dos parâmetros de cura, é importante utilizar uma

técnica de compactação que não dependa em grande parte da habilidade do operador. Recomenda-se o uso de um vibrador acoplado ao modelo ou caixa de macho (MARIOTTO; GOULART, 1978).

Os moldes e machos produzidos pelo processo *No-Bake*, após a cura total, pode receber uma camada de tinta na superfície com a finalidade de proteger a areia do molde buscando evitar a reação metal-molde durante o vazamento.

2.5. Tinta para moldes

A produção de peças fundidas é um processo complexo e de diversos estágios. Um dos estágios é a proteção dos moldes e machos com uma camada protetiva (JAMROZOWICZ; ZYCH; KOLCZYK, 2015), essas camadas protetivas representam uma importante parte dentro das indústrias de fundição, pois formam uma barreira refratária entre o substrato areia e a metal líquido durante o vazamento (AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ, 2012)

Para um bom acabamento superficial das peças, alguns fatores são necessários, tais como a seleção adequada da areia, classificação correta do módulo de finura, resina utilizada dentre outros. Porém nem sempre é factível achar a areia ideal para o processo de fundição, sendo os revestimentos dos moldes uma forma de ajudar no incremento da qualidade da peças (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

O uso de tintas para moldes e machos em processos de fundição com moldes de areia buscam a obtenção de uma ótima qualidade superficial da peça, com a redução de defeitos, tais como: veamento, porosidade, inclusões, distorções, defeitos de expansão dentre outros.(CHEAH; RAMRATTAN, 2004; JAMROZOWICZ; ZYCH; KOLCZYK, 2015; NWAOGU; TIEDJE, 2011; SHI, 2012).

A primeira utilização de revestimentos em moldes de areia com a finalidade de melhorar a qualidade superficial ocorreu no século XIX, quando um revestimento denominado “Revestimento Preto”, com base em grafite foi utilizado (SHI, 2012). Com o passar do tempo e a evolução dos processos de fabricação dos moldes com a utilização de resinas, forçou o desenvolvimento de novos revestimentos, com a utilização de misturas de materiais cerâmicos em solventes com agente de suspensão e de ligação (SHI, 2012).

Associado ao papel de minimizar os defeitos superficiais com a aplicação de tintas nas paredes dos moldes, onde atuam como barreira entre o metal e molde de areia, essas tintas também atuam como um indicador de qualidade para verificar se a secagem está completa com a mudanças de cor visual. Essa confirmação de cor também pode indicar má compactação da

areia, pois essas áreas irão absorver mais umidade do revestimento e demorar mais tempo para secar (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

As tintas de fundição podem ser divididas em dois grupos, os aplicados secos e os aplicados úmidos. Os aplicados a seco só podem ser aplicados em moldes de areia verde (NWAOGU; TIEDJE, 2011), já os aplicados úmidos podem ser utilizados tanto em moldes de areia verde como em moldes de areia seco ou ligados quimicamente por processo de cura a frio. Em termos de propriedades físicas, existem alguns tipos de revestimentos úmidos (SHI, 2012):

- Revestimento líquido baseado em solventes orgânicos, como isopropanol e etanol;
- Revestimentos com água;
- Revestimentos semilíquidos (pastas) baseado em solventes orgânicos;
- Revestimento semilíquidos (pastas) com água.

Dentre as tintas que são aplicadas úmidas, existe três grandes classes (NWAOGU; TIEDJE, 2011; SHI, 2012):

- A classe com base de grafite ou algum outro tipo de carbono (revestimentos de grafite);
- A classe com base em materiais altamente refratários (revestimentos cerâmicos);
- A classe com base em uma mistura de carbono e ingredientes altamente refratários (revestimentos misturados).

Revestimentos de grafite são agentes contendo grafite ou materiais semelhantes como um material de enchimento refratário. Os revestimentos cerâmicos são agentes contendo materiais cerâmicos bem moídos, tais como zircônia, quartzo, chamote, magnesita, olivina, cromita, talco, mica, alumina e outros (HORAK, 1990).

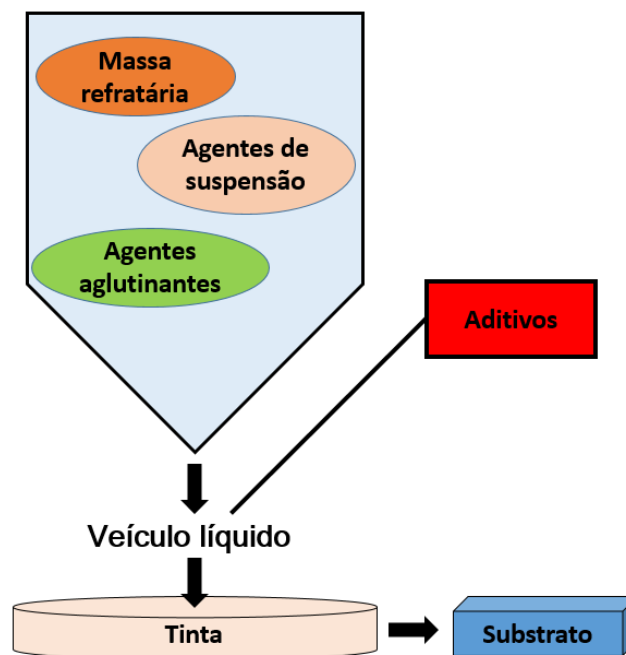
Segundo Nwaogu e Tiedje (2011), um revestimento refratário no molde ou macho deve ter as seguintes características:

- Propriedades refratárias suficientes para lidar com o metal que está sendo derramado;
- Boa adesão ao substrato para evitar desprendimento;
- Seja permeável para minimizar o aprisionamento de ar;
- Seja rápido na secagem;

- Nenhuma tendência à formação de bolhas ou rachaduras;
- Boa suspensão e propriedades de mistura;
- Assegurar a proteção adequada contra a penetração de metal;
- Boa estabilidade no armazenamento;
- Bom poder de cobertura;
- Boas propriedades de aplicação através do método utilizado;

Para as tintas alcançarem essas características, elas devem ser compostas, por massa refratária, veículo líquido, agentes de suspensão, agentes aglutinantes e aditivos (Figura 10).

Figura 10: Componentes da tinta para moldes de areia



Fonte: Adaptado de Nwaogu e Tiedje (2011)

O material refratário é o componente mais importante dos revestimentos cerâmicos (SHI, 2012) e é composto por substâncias ou minerais que têm pontos de fusão elevados. Eles são processados em alta temperatura e / ou destinados a aplicações de alta temperatura. Nas tintas, os materiais refratários estão dispersos no ligante e formam o esqueleto da película do revestimento. Eles aumentam a densidade, viscosidade e dureza do revestimento e reduzem a permeabilidade (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

Nas fundições de aço, a zircônia tem sido muito empregada como material refratário e para manter uma boa qualidade deve ter no mínimo 64% de óxido de zircônia, de 30 a 35,5% de sílica e no máximo 0,5 % de $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

Os agentes aglutinantes são responsáveis por manter firmemente aderido o material refratário na superfície do molde ou macho após o veículo líquido secar. A quantidade a ser utilizada desse agente vai depender do tamanho das partículas do material refratário (SHI, 2012).

Os agentes de suspensão têm como finalidade evitar a precipitação de partículas do material refratário, o que está ligado diretamente com a qualidade do revestimento. Um aumento da densidade das tintas pode causar um excesso de material refratário, causando dificuldade na aplicação da tinta e gerando riscos de fissuras nas camadas mais espessas (SHI, 2012).

Já o papel do veículo líquido é dissolver e transportar o material refratário para a superfície de areia sob a forma de película. Em geral, são usados três tipos: água, álcool (líquidos inflamáveis) e hidrocarbonetos clorídricos. O veículo líquido é escolhido em função de vários fatores, tais como: tipo de mistura da areia, método de aplicação, fator ecológico, tipo de ciclo de produção ditando o tempo permitido para a secagem e aplicação (AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ, 2012)

O principal veículo líquido utilizado é a água, pois é o mais barato, não tóxico e seguro para o uso. Incremento de custos de aplicação para este tipo de revestimento é devido ao consumo de energia para o processo de secagem e de revestimento para eliminação da água nas camadas aplicadas.

Solventes como misturas de álcoois com água pura são frequentemente líquidos inflamáveis. A vantagem do álcool sobre a água é uma secagem mais rápida, o que é importante para os moldes de areia, porém exigem atenção especial no manuseio e estoque devido a ser um material inflamável, podendo gerar danos ao meio ambiente (AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ, 2012; NWAOGU; TIEDJE, 2011).

Outro componente importante para garantir a qualidade superficial das peças fundidas é o modo de aplicação das tintas. Nwaogu e Tiedje (2011) destacam que existem diversas formas de aplicação, e para cada forma devem ser considerados alguns aspectos como:

- Geometria do grão de areia;
- Tamanho do grão de areia;
- Taxa de produção;
- Tipo de resina utilizada no molde;

➤ Restrições das instalações.

Aspectos como viscosidade da tinta, espessura da camada de revestimento final, complexidade do molde, números de demãos, formas de secagem e método de aplicações são fundamentais neste processo. Segundo Nwaogu e Tiedje (2011) e Soares (2000), os métodos de aplicação das tintas nos moldes mais utilizados nas indústrias de fundição são:

- Pincel ou broxa;
- Spray;
- Imersão;
- Lavagem

O método de aplicação de tinta em moldes de areia com a utilização de pincel ou broxa é muito aplicado nas fundições, o esforço mecânico produzido pelo contato do pincel com o molde ajuda a forçar o material refratário a penetrar nos poros da superfície dos moldes, o que é uma característica desejável. Esse método tem como pontos negativos, a espessura irregular da camada de tinta, gerando dependência grande do operador (PURSALL, 1970).

A aplicação de tinta por pulverização (*spray*) é um dos métodos mais rápidos na aplicação e também um dos mais utilizados nas fundições. Este método exige um cuidado especial, pois não há tanto esforço mecânico para forçar o material refratário a penetrar nos grãos de areia. Esses métodos utilizam pistolas com um fluxo de ar para pulverizar a tinta sobre a superfície dos moldes e machos (AFS, 2000). A viscosidade da tinta nestes métodos deve ser criteriosamente verificada visando uma boa qualidade da cobertura da tinta. Esse método ainda depende do tipo de equipamento utilizado e do operador, sendo o posicionamento vertical das peças antes da aplicação (GIETECH; HENDERIECKX, 2005).

Técnicas de pintura por imersão podem ser descritas como um processo em que o substrato a ser revestido é imerso na tinta e em seguida extraído com uma velocidade, temperatura e condições atmosféricas controladas. Quanto maior a velocidade de retirada do substrato, maior será a espessura da camada, isto ocorre pois não há tempo para a suspensão fluir de volta para o tanque onde foi mergulhado. O revestimento por imersão é usado geralmente para machos e moldes de tamanho pequenos e médios, sendo bem adequado para aplicações automáticas (AFS, 2000). O revestimento por imersão aumenta a uma taxa de produção elevada e de alta eficiência de transferência (quase 100 %) e é necessária relativamente pouco trabalho (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

A pintura por lavagem é um método que pode ser descrito como molhagem dos moldes ou machos com uma mangueira a baixa pressão. Esse método de pintura é normalmente utilizado em peças grandes ou de forma irregular que são difíceis de serem mergulhas no tanque. A pintura por lavagem é rápida e fácil, requer pouco espaço, envolve um custo relativamente baixo de instalação, requer pouca manutenção, e tem uma baixa exigência de trabalho, não sendo necessário muita habilidade do operador (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

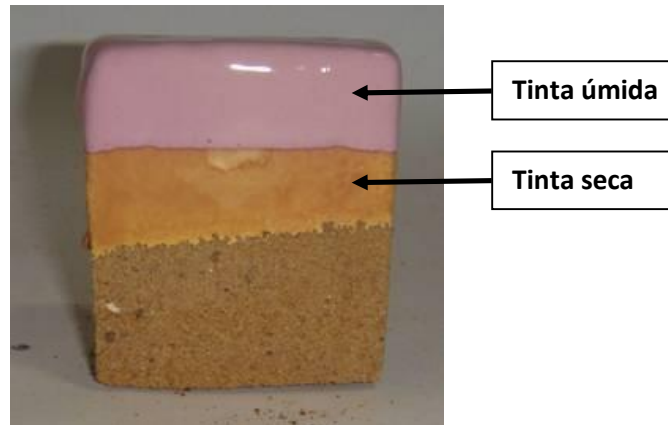
Além da forma de aplicação das tintas nos moldes de areia, o processo de secagem é considerado fator importante, pois pode gerar alguns defeitos superficiais nas peças, tais como: formação de bolhas, porosidade, penetração do metal e redução da resistência do molde ou macho. Os métodos de secagem dependem do veículo líquido utilizado na tinta, sendo atenção despendida para tintas à base de água que são as mais utilizadas (GIETECH; HENDERIECKX, 2005; NWAOGU; TIEDJE, 2011).

As tintas à base de água requerem maiores tempo de secagem, assim técnicas como secagem por sopro de ar quente e fornos são empregados. A temperatura de secagem deve ser superiores a 100°C para eliminação da água e não podem ultrapassar 250°C, pois pode destruir os componentes aglutinantes presentes na tinta. Outras técnicas de secagem estão sendo utilizadas tais como: luzes de alta intensidade, micro-ondas, secagem em túneis e fornos infravermelhos.

Nwaogu e Tiedje (2011) destacam que os fornos de infravermelhos secam os moldes pintados rapidamente sem danificar as areias, gerando uma redução no tempo de secagem da ordem de 85%. Essa técnica é eficiente, pois com a capacidade de controle do forno de infravermelho, consegue-se atingir a temperatura desejada na superfície do molde. Menos calor é dissipado para o ambiente e pode-se secar cavidades profundas de maneira eficiente, contribuindo para a melhor qualidade da superfície da peça fundida.

Dentro de processo de secagem das tintas à base de água, uma evolução permitiu um maior controle. As tintas atualmente contêm um recurso em que há uma mudança de cor quando tinta está seca ou quando esta úmida. Essa evolução serve para um melhor controle de qualidade e alerta também para verificação da umidade excessiva do molde em pontos onde a tinta demora mais para secar. A Figura 11 ilustra a mudança de cor alcançada quando a tinta úmida passa para seca.

Figura 11: Aplicação de tinta em moldes de areia



Fonte: Shamlax Meta-Chem (2003)

Na Figura 11 pode-se perceber duas tonalidades de cor da tinta aplicada a uma amostra de molde de areia. Quando a tinta ainda está úmida o tom é mais rosa. A medida que a tinta vai secando, ou seja, que a água vai evaporando a tinta tende para o amarelo.

Após a tinta secar, algumas características devem ser observadas, pois podem interferir diretamente na qualidade da peça fundida. Segundo Jamrozowicz; Zych e Kolczyk (2015) e Nwaogu e Tiedje (2011), deve-se analisar os seguintes fatores para não comprometer a qualidade da peça:

- Espessura da camada de tinta;
- Profundidade de penetração da tinta no molde;
- Permeabilidade da tinta;
- Degradação do molde.

A espessura do revestimento da tinta é geralmente medida usando um ensaio destrutivo. Até o momento, nenhum teste não destrutivo de confiança está sendo aplicado pela indústria de fundição para medir a consistência da espessura da camada de revestimento aplicado a moldes e machos. Em alguns testes, amostras são seccionadas e as medições são feitas usando um microscópio. Em alguns outros métodos, o revestimento é removido a partir de uma superfície plana sobre uma amostra e a diferença da superfície com substrato e a superfície revestida é medida.

Existe uma forte correlação entre a viscosidade do revestimento e a espessura do revestimento (BAKER, 2002). No entanto, a medição da espessura da tinta depositada no molde quando seco é difícil de se medir, sem a utilização de equipamentos de laboratórios, assim pode-

se estimar a espessura da tinta seca ainda com a tinta molhada com o apoio de um *elcometer* (Figura 12)

Figura 12: Medição da camada de espessura úmida de um revestimento de tinta



Fonte: Bamr (2011) apud Nwaogu e Tiedje (2011)

Neste processo, utiliza-se um pente com vários tamanhos de dentes. Deve-se pressionar o pente perpendicular ao substrato e a leitura do maior valor deverá ser anotada. A medida da espessura da camada de tinta úmida é relacionada com a espessura da camada de tinta seca. Normalmente utiliza-se a regra de que a espessura da camada de tinta seca é de 50% da espessura do revestimento úmido (BAMR, 2011).

Outro aspecto importante a ser verificado nos revestimentos de substratos é a profundidade de penetração da tinta nos moldes. Uma tinta que se encontra inteiramente na superfície dos moldes, não está ancorada de forma adequada e provavelmente irá se desprender do substrato. Porém uma tinta que penetra muito profundamente no substrato irá degradar ao longo do molde. Uma avaliação da penetração da tinta é feita através da análise de um corte transversal de uma amostra. A referência usual é medida em relação aos grãos de areia. Um nível normal de penetração está entre 2 e 4 grãos de areia (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

A profundidade de penetração da tinta no molde também está relacionado com a tensão superficial do molde de areia, assim se a tensão superficial do molde for baixa, uma maior profundidade de penetração será verificada e consequentemente terá uma camada mais fina na superfície, sendo necessário o controle da profundidade de penetração um fator importante a ser considerado (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

O terceiro fator importante a ser analisado após a tinta secar é a permeabilidade. Esse fator irá verificar a quantidade de gás que pode passar através da tinta. Esse fator está diretamente relacionado com alguns defeitos superficiais, pois se a tinta tiver uma baixa permeabilidade, os gases terão dificuldade para sair do molde e consequentemente causará alguns tipos de defeitos superficiais. Tintas com alta permeabilidade por outro lado irão reduzir

o tempo necessário para a remoção dos produtos de degradação e aumentará a velocidade de enchimento do metal, muitas vezes causando defeitos com bolhas (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

O quarto fator a ser considerado é a degradação do molde, que pode variar de tinta para tinta e quanto mais tempo o molde ficar molhado maior será sua degradação. Nwaogu e Tiedje (2011) destacam que a melhor pratica é colocar os molde e machos pintados em zona de calor o mais rápido possível, pois a maioria das tintas utilizam agentes surfactantes que alteram a tensão superficial da água, piorando a degradação dos moldes. Gietech e Henderieckx (2005), complementam enfatizando que um molde ou macho pintado com tintas à base de álcool pode perder aproximadamente 30% da sua resistência e um molde ou macho pintado com tintas à base de água chega a perde até 50 % da sua resistência.

2.6. Classificação dos defeitos relacionados com o molde

A tendência geral para aumentar a qualidade de peças de aço fundidas e melhorar suas propriedades também inclui a melhoria da qualidade das superfícies, eliminando retrabalhos e minimizando os custos (KALANDYK; ZAPAŁA; RAKOWSKA, 2009). Esses defeitos podem ser de ordem metalúrgica, relacionadas com o processo de vazamento e relacionadas com os moldes de areia (BALDAM; VIEIRA, 2013).

Dentre os defeitos relacionados com os moldes de areia destacam-se:

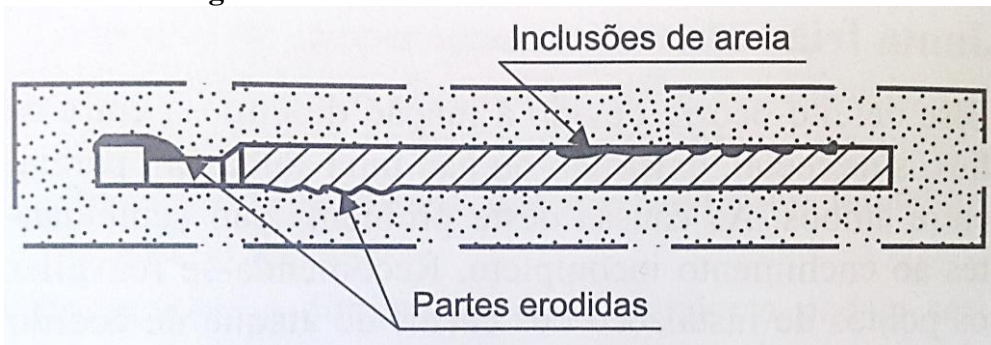
- Erosão de areia;
- Inclusão de óxidos e areia;
- Porosidades / Gases
- Penetração do metal no molde;

Erosão de areia

Neste defeito o metal líquido estraga a superfície das paredes da cavidade, particularmente nas proximidades dos ataques ou aparecendo ao longo do percurso do metal líquido. Os grãos de areia arrastados formam inclusões em outras partes da peça (BALDAM; VIEIRA, 2013).

A erosão ocorre geralmente em áreas de fluxo turbulento, especialmente quando combinado com a reoxidação, altas temperaturas de vazamento e reações químicas (ZHANG; THOMAS, 2003). A Figura 13 ilustra o defeito de erosão em uma cavidade.

Figura 13: Defeito de erosão e inclusão de areia



Fonte: Baldam e Vieira (2013, p. 336)

Quando ocorre a erosão do molde devido ao ataque do metal líquido, a areia despreendida é transportada pelo metal líquido e solidificada junto com o metal formando outro defeito superficial denominado inclusão de areia.

Inclusão de óxidos e areia

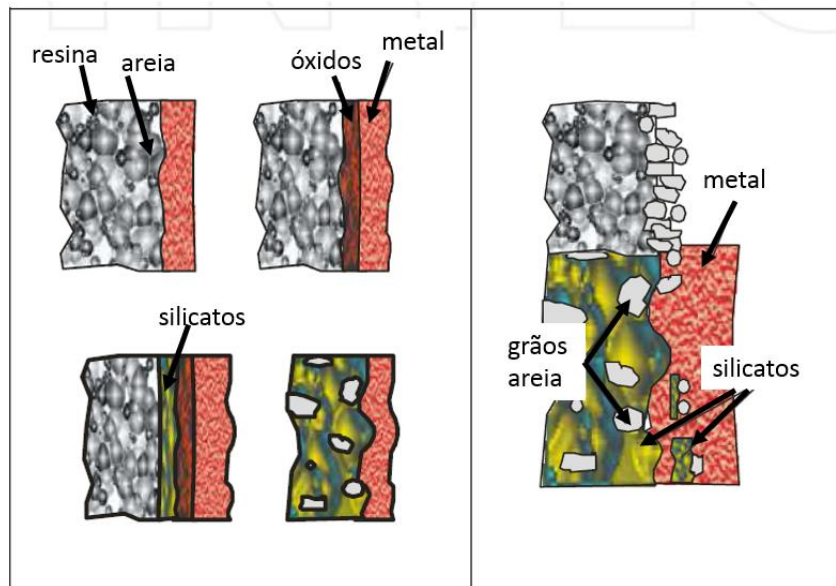
Inclusões de areia é um dos defeitos de fundição mais comuns. Este defeito é formado durante o desgaste da superfície do molde pelo metal que flui. As forças de compressão e de cisalhamento atuam nas seções do molde e do macho, levando ao deslocamento de grãos individuais ou até mesmo seções maiores. As inclusões de areia são frequentemente acompanhadas de bolhas de monóxido de carbono (CO) e inclusões de óxido (LEXICON-FOUNDRY, 2015a). As inclusões de areias podem ser facilmente confundidas com inclusões de óxidos quando analisada visualmente, no entanto com ajuda de um aparelho com ampliação em torno de 50 vezes, fica fácil identificar a presença dos grãos de areia aderido ao metal. Normalmente a inclusão de areia fica do lado oposto ao da erosão, conforme observado na Figura 13.

Inclusão de óxido é uma inclusão não metálica de forma irregular, com aspecto de escória de forno de fusão e/ou panela de vazamento e um produto de tratamento do banho e ou re-oxidação no sistema de canal, situado nas regiões da tampa ou partes inferiores dos machos (ZHANG; THOMAS, 2003).

Durante a fundição em moldes de areia, uma atmosfera de oxidação prevalece dentro da cavidade do molde, influenciando primeiramente os componentes de liga para oxidar e logo após reações entre óxidos metálicos e os componentes dos moldes ocorrem. Quando o metal líquido penetra nos poros do molde, reações complexas de natureza química ocorrem.

Os óxidos metálicos entram em contato com os poros dos moldes de areia e originam defeitos superficiais denominados inclusão por oxidação (Figura 14).

Figura 14: Visão esquemática de formação da camada não metálica na fronteira do metal – molde



Fonte: Adaptado de AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ (2012, p. 264)

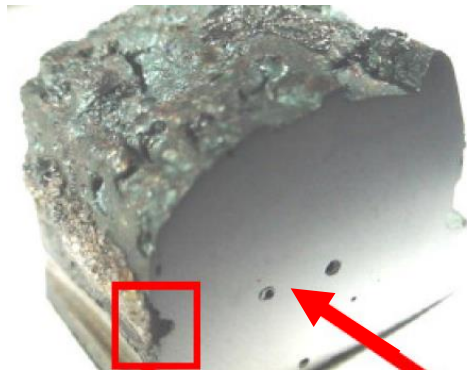
Observa-se na Figura 14 que o óxido de ferro reagiu com os grãos de areia, formando um silicato facilmente fundível.

Porosidade / Gases

A porosidade pode ser considerada um dos defeitos mais comuns em empresas de fundição, sendo umas das principais causas da preocupação da qualidade e confiabilidade da peça fundida, pois compromete a resistência da peça (MONROE, 2005).

A porosidade também é conhecida como gases ou bolhas e tem as paredes lisas, ligeiramente esféricas, sem comunicação com o exterior. A maioria da porosidade aparece isolada, podendo aparecer em todas as regiões da peça (Figura 15).

Figura 15: Defeitos de porosidade



Fonte: Simisa (2015)

Segundo Monroe (2005, p.1) e Habibullah (2011, p.8), a porosidade em fundidos ocorre devido a bolhas aprisionadas durante a fusão, vazamento e solidificação, sendo as principais fontes de porosidade:

- Ar aprisionado durante o enchimento;
- Contração (rechupe) na linha de centro;
- Bolhas de machos sem saída de gás;
- Reações na parede do molde;
- Gases dissolvidos a partir da fusão;
- Escórias que contêm porosidade de gás.

Considerando a origem dos gases, a porosidade (bolhas), pode ser classificada em três categorias: exógenas, endógenas e *pinholes*. A categoria de porosidade oriundas de causas endógenas, são devido a reações de gases atmosféricos dissolvidos (usualmente oxigênio) dentro do volume de metal fundido, ocorrendo durante a fusão, fundição e solidificação (HABIBULLAH, 2011).

A categoria de porosidade oriundas de causas exógenas, são devido a gases produzidos pela reação metal/molde e a categoria denominada *pinholes* por sua vez são bolhas de pequeno tamanho que se concentram na superfície da peça em grande áreas e são devidas a reações metal-molde (HABIBULLAH, 2011).

Quando o aço líquido flui na superfície do molde, os gases evoluem fortemente a partir da superfície do molde, por decomposição térmica do material volátil presente no molde. Se a

pressão do gás liberado for maior do que a aplicada na superfície do molde pelo metal líquido, os gases penetram no metal líquido e formam a porosidade, ou seja, se a pressão do gás local, em um molde ou macho exceder a pressão metalostática local do líquido, uma bolha irá ser soprada para dentro do metal líquido causando a porosidade (MONROE, 2005).

A porosidade é o defeito que mais ocorre pela evolução do gás na interface metal-molde e se deve por um complexo processo físico-químico que é formado durante o contato do metal líquido e a superfície do molde, sendo alguns deles citados por Habibullah (2011, p.11):

- A evaporação da água e de outras substâncias voláteis;
- Queima de materiais orgânicos presentes no molde;
- Decomposição de minerais presentes na areia de moldagem (por exemplo: carbonatos);
- Dissociação de gases produzidos pelo material utilizados como ligantes nos moldes (CH₄, NH₃, etc)
- Dilatação do ar presente nos poros do molde e machos;
- Decomposição de substâncias orgânicas (hidrocarbonetos, resinas, óleos, etc);
- Reações físico químicas que ocorrem no contato do metal líquido e molde, tais como: $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$; $\text{FeO} + 2\text{H} \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$

Sendo o foco deste estudo os fatores relacionados com os machos e moldes, maior atenção será despendida nas categorias de porosidade oriundas de fontes exógenas e *pinholes*. Essas fontes de porosidade são oriundas de causas externas, podendo ser considerada como as algumas das principais causas:

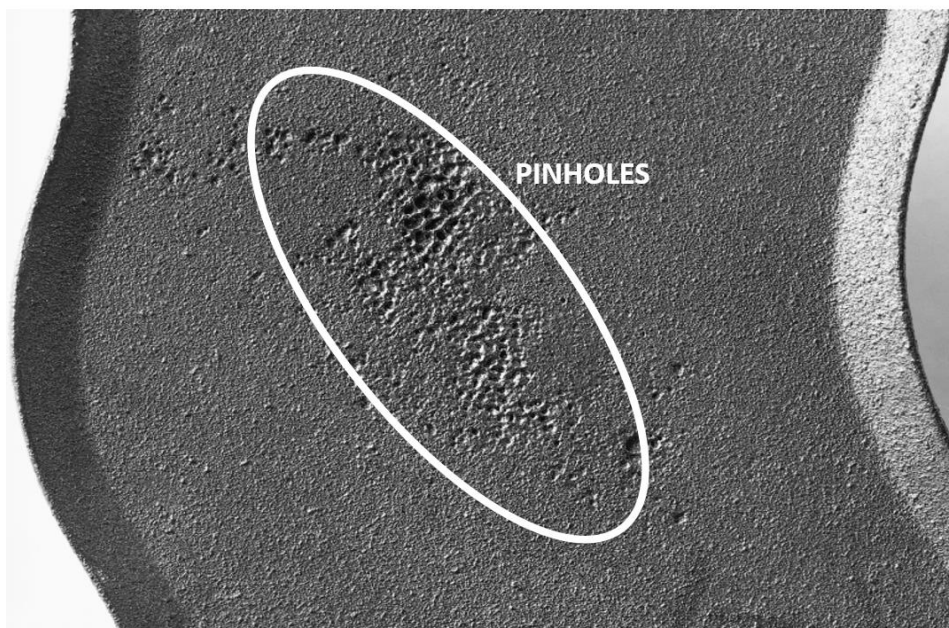
- Elevada umidade de moldes e machos;
- Aglomerantes com elevada tendência em desprender gases;
- Elevada porcentagem de aditivos que contenham carboneto de hidrogênio;
- Pintura com forte tendência de liberação de gases;
- Saída insuficiente de gases;
- Baixa permeabilidade da areia do molde e machos.

A água é uma das principais substâncias responsáveis pela decomposição do hidrogênio, que é um dos elementos responsáveis por formação de porosidade principalmente do tipo *Pinholes*. Para evitar *pinholes* em aço, o conteúdo de hidrogênio deve permanecer sobre controle em 6 ppm (partes por milhão) ou 0,0006%, acima de 9 ppm já inicia o processo de formação de porosidade (HABIBULLAH, 2011).

Um outro elemento que é causador dos *pinholes* é o nitrogênio e muito presente na areia de moldagem deve ser investigado e controlado (ASK CHEMICALS, 2015b). Um limite crítico para a formação de *pinholes* por nitrogênio é da ordem 80 a 100 ppm.

Habibullah (2011, p.9), destaca a importância de diferenciar os *pinholes* de outros tipos de porosidade, pois a busca da causa se torna mais efetiva. O mesmo autor destaca que *pinholes* sempre tem seções transversais triangular, já as porosidades (bolhas) contem forma redonda e superfícies lisas (Figura 16).

Figura 16: Defeito *Pinholes*



Fonte: Lexicon-Foundry (2015a)

Visualiza-se, na Figura 16, os defeitos de *pinholes* em uma peça. Normalmente esse tipo de defeito fica ao lado oposto do canal de alimentação, pois normalmente os vapores de gases são menos densos e são deslocados para a parte oposta da alimentação. Teores de umidade mais elevados em areias de moldagem ou até mesmo uma alta umidade relativa do ar poder ocasionar esse tipo de defeito, sendo os orifícios da ordem de 1 a 2 mm de diâmetro (HABIBULLAH, 2011).

Outra causa provável de porosidade em peças fundidas é aglomerante com elevada tendência em desprender gases. Os moldes são compostos por algumas substâncias que podem desprender gases quando aquecidos. Essas substâncias podem ser de origem orgânica e que ao serem aquecidos se tornam menos voláteis e tornam-se gases.

Impurezas presentes na areia de sílica utilizados para a fabricação de moldes e machos podem se decompor quando aquecidos e podem liberar gases e vapor. Alguns minerais encontrados na areia de sílica tais como carbonato de magnésio e quantidade de argila devem ser controlados (HABIBULLAH, 2011).

A pintura das paredes dos moldes também pode ser um elemento causador de porosidade nas peças, pois pode liberar alguns gases ou até mesmo se a pintura não estiver completamente seca, pode gerar vapor de água e causar defeitos de porosidade.

Habibullah (2011, p.22) demonstrou que gases causadores de defeitos nas peças fundidas de aço podem ter diversas origens e a frequência dessas origens é exposta na tabela abaixo (Tabela 2):

Tabela 2: Papel dos diferentes processos de formação de gases no molde (% em relação a quantidade total de gases gerados)

Processo da origem dos gases	Moldes de areia seco
Evaporação de água dos moldes e da mistura de areia	8 - 12 %
Queima de material orgânico	5 - 8 %
Separação de material orgânico	45 - 65%
Ejeção de água a partir da estrutura mineral	15 - 25 %
Decomposição do mineral (impurezas)	1 - 5 %
Dilatação e deslocamento do ar	< 1%
Dissociação dos gases	8 - 12%

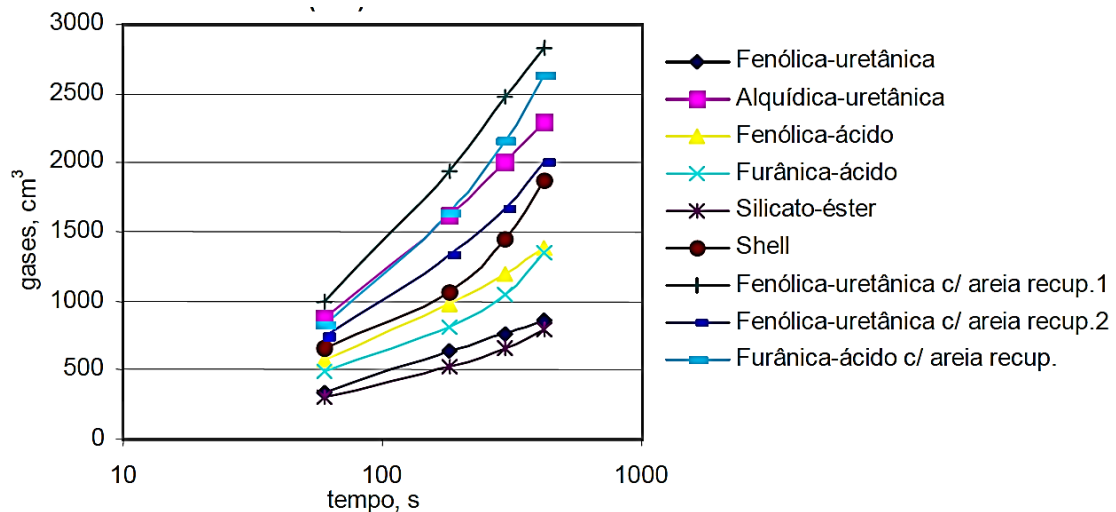
Fonte: Adpatado de Habibullah (2011, p.22)

Na Tabela 2 observa-se que a separação de substâncias orgânicas é uma das causas que mais contribuem para formação de porosidade. Essa separação se inicia no aquecimento e na gaseificação dos compostos orgânicos, na ausência de ar. Quando o material do molde é aquecido, algumas substâncias tais como monóxido de carbono ou dióxido de carbono podem se separar do material orgânico e iniciar o defeito de porosidade da peça (HABIBULLAH, 2011).

Um outro fator importante é permeabilidade do molde, pois se tiver uma boa permeabilidade, esses gases que foram separados dos materiais orgânicos poderão sair facilmente pelos poros dos moldes de areia de sílica, assim um controle da quantidade de ligantes para a construção do molde deve sempre ser realizado de forma a manter uma boa permeabilidade para que os gases do processo de fundição possam sair e não gerar defeitos. O uso de respiros pode ser uma forma mais barata de minimizar defeitos devidos a liberação de gás.

Mariotto (2005) destaca (Figura 17) os resultados da liberação de gases dos moldes medidos por um funil cerâmico junto a face interna de um molde vazado com aço comum no *Southern Research Institute (SRI)*. Esses resultados trazem a quantidade de gases liberada por molde sendo considerados diferentes processos para a fabricação dos moldes.

Figura 17: Quantidade de gases liberados por processo de fabricação dos moldes



Fonte: Mariotto (2005)

Na Figura 17 consegue-se verificar que o sistema (*No-Bake*) de ligante químico alquídica-uretânica, que está presente no estudo é um dos que mais liberam gases, podendo comprometer a qualidade superficial da peça fundida.

A quantidade de ar retida dentro dos poros dos moldes de areia de sílica são fatores importantes também no combate dos defeitos de porosidade, pois dependendo da porosidade do molde, o volume de ar no molde poderá estar entre 20 e 35% do volume total. No aquecimento do molde durante o vazamento do metal, o ar presente nos poros do moldes irá dilatar e poderá gerar defeitos de porosidade (HABIBULLAH, 2011).

Alguns autores demonstram em seus trabalhos que a adição de óxido de ferro vermelho ou preto nos moldes de areia de sílica podem evitar a formação de defeitos de porosidade (ALVES, 2009; MONROE, 2005).

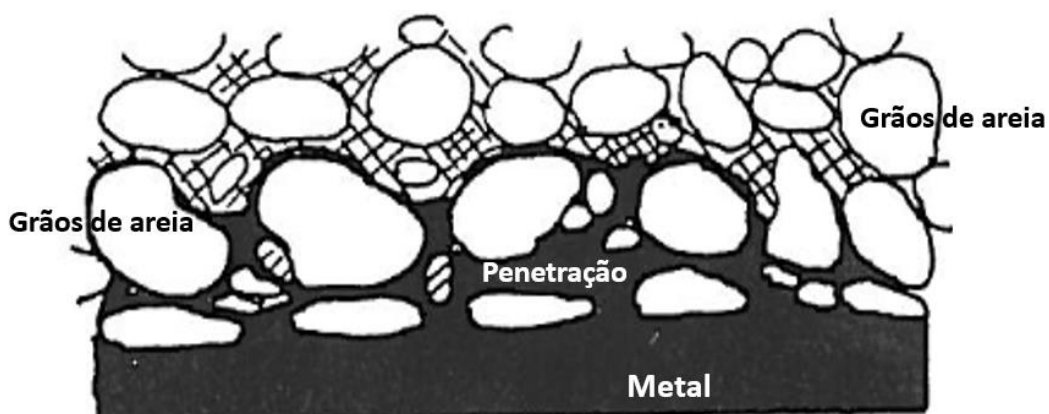
Ribeiro, Alves e Silva (2007) relatam que adições de óxido de ferro na areia de moldagem tendem a aumentar sua densidade e capacidade de troca de calor durante a solidificação. Em processos de moldagem, utilizando ligantes químicos do tipo fenólicos uretânicos (*NoBake*), a adição de óxido de ferro pode ser uma maneira de aumentar a resistência a quente devido a maior capacidade de o molde trocar calor e, conseqüentemente, acelerar o processo de solidificação, evitando defeitos superficiais relativos a expansão da areia de sílica.

O percentual de óxido de ferro normalmente empregado varia de 2 a 4% sobre o peso da areia (ALVES, 2009; RIBEIRO; ALVES; SILVA, 2007).

Penetração do metal no molde

A penetração de metal é definida com uma condição em que o metal líquido entra nos poros dos moldes ou machos, além do ponto médio dos grãos de areia da superfície (DRAPER; GAINDHAR, 1975). A penetração dos aços em moldes de areia pode ser devido a penetração mecânica ou reação química (LANE et al., 2001). A visualização do defeito pode ser esquematizada na Figura 18.

Figura 18: Defeito de penetração do metal no molde



Fonte: Adaptado de Draper e Gaindhar (1975)

A penetração mecânica é originada do fato do metal líquido, sob a ação de sua própria pressão (metalostática ou de solidificação), ser forçada para dentro dos poros do molde. Outras causas que contribuem para a penetração do metal no molde são o uso de areia base de baixa refratariedade, pois elevadas temperaturas de vazamento podem sinterizar parcialmente os grãos de areia e aumentar os vazios intergranulares do molde, fazendo com que o metal penetre no molde (HAYES et al., 1997). O uso de camadas muito finas de tinta também podem fazer com que a tinta não resista ao vazamento e abra caminho para a penetração do metal.

Já a penetração devido a reação química ocorre quando uma reação química entre o metal e o molde altera algumas variáveis do molde, facilitando a penetração do metal. Como exemplo de uma reação que pode ocorrer envolve o oxigênio e o ferro (HAYES et al., 1997)



A partir da equação 2, quando o metal líquido oxidado com o oxigênio do ar, reagir com a areia do molde formando uma nova reação química (Equação 3)



O substância formada depois da reação visualizada na Equação 3 é denominada faialita, essa dissolução da sílica aumenta o tamanho dos poros dos moldes de areia e conseqüentemente aumenta a penetração do metal (HAYES et al., 1997; LANE et al., 2001). Outras reações com outros gases também podem trazer defeitos de penetração, tais como a reação com hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) (HAYES et al., 1997; LANE et al., 2001)

Um outro ponto muito importante na identificação da penetração do metal no molde é verificar o ângulo de contato entre o metal líquido e o molde de areia. Esse ângulo é utilizado na equação que define a pressão de penetração:

$$P_{pen} = \frac{2\sigma\cos\theta}{r_p} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

P_{pen} : pressão de penetração;

σ : Tensão superficial do metal líquido;

θ : ângulo de contato entre metal líquido e o molde de areia;

r_p : tamanho dos poros do molde de areia

O óxido de ferro (FeO) tem ângulo de contato (21°) muito menor que o ângulo de contato do Fe (154,5°). Esta mudança no valor do ângulo de contato devido a reação que exposta na equação 2, pode provocar a penetração do metal no molde (HAYES et al., 1997).

Hayes *et al* (1997, p.6) destaca que o FeO e Fe₂SiO₄ têm pontos de fusão mais baixos do que o ferro ou sílica, fazendo com que a penetração possa ocorrer mesmo após a peça estar solidificada. A faialita (Fe₂SiO₄) é muitas vezes encontrada na superfície das peças fundidas com defeito de penetração, tornando uma evidencia que a penetração foi de origem química.

A penetração em aço pode variar de fundição para fundição, sendo que em alguns casos a remoção do material pode ser fácil e em outros extremamente difícil, podendo exigir operações mais demoradas e conseqüentemente aumentando o custo do processo.

Um forma eficiente de prevenir o defeito por penetração é a inserção de um camada de revestimento nos moldes, tais como tintas (LANE et al., 2001).

2.7. Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*)

A necessidade crescente de otimização de processos, produtos e sistemas, minimizando custos e tempos ou maximizando lucros, rendimento e produtividade tem levado muitos engenheiros a buscarem técnicas de planejamento de experimentos (RODRIGUES; LEMMA, 2005). Essa necessidade de otimização de processos também se faz presente nas indústrias de fundições.

Nos processos de fabricação das indústrias de fundição existem vários fatores e níveis de regulagens, que influenciam as características de qualidade dos produtos. O estudo simultâneo da verificação dos efeitos desses fatores com diferentes níveis de regulagens é fundamental para melhorar a qualidade do processo, auxiliando os tomadores de decisões (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Para produzir resultados significativos e não tendenciosos, o estudo deve ser cuidadosamente planejado e executado (LARSON; FARBER, 2010) e a solução do problema pode ser alcançada com mais facilidade quando o estudo é planejado e as respostas analisadas com métodos ou técnicas estatísticas (ANTONY; KATE; FRANGOU, 1998).

Barker (1985) ressalta que ao realizar as atividades (definição dos objetivos, parâmetros do produto ou processo de fabricação, seleção dos fatores de controle e variáveis de resposta, seleção da matriz experimental, realização do experimento, análise de dados, interpretação dos resultados e elaboração de relatórios) dos experimentos industriais de forma planejada, as informações obtidas dos produtos ou dos processos de fabricação tornam-se mais confiáveis e, com isso ações de melhoria mais eficientes podem ser tomadas pelos gestores.

Para o desenvolvimento do planejamento de experimentos, o conhecimento dos conceitos gerais de experimentação é fundamental. Assim são apresentados esses conceitos:

- **Variáveis de resposta:** são as variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositalmente nos fatores que

regulam ou ajustam os processos de fabricação. Nos experimentos, podem existir uma ou mais variáveis de resposta (y) que são importantes de se avaliar.

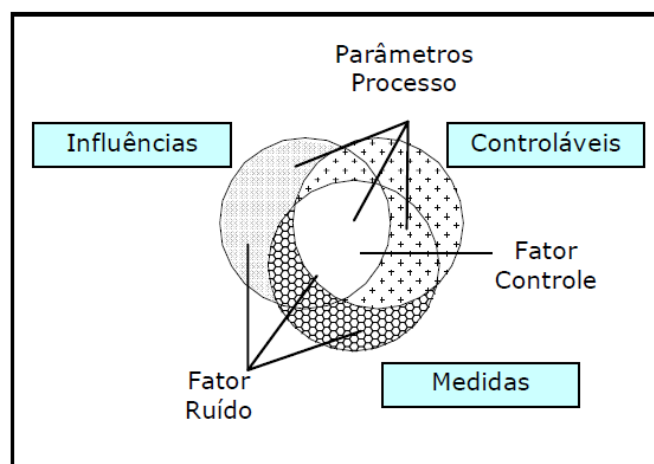
- **Fatores de Controle:** estes são os fatores alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal de introduzir estímulos nos fatores de controle é avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso poder determinar os principais fatores do processo.
- **Fatores de Ruído:** são os fatores, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. Cuidados especiais devem ser tomados na hora de realizar os testes com esses fatores, pois, é importante evitar que os efeitos produzidos pelos fatores de controle, fiquem misturados ou mascarados com os efeitos provocados pelos fatores de ruído.
- **Níveis dos fatores:** são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Os níveis são identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1).
- **Tratamentos ou experimento:** é a combinação dos níveis de fatores de controle, isto significa que cada uma das corridas do experimento representará um tratamento.
- **Efeito principal:** é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado.
- **Efeito de interação:** é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator.
- **Matriz de experimentos:** é o plano formal construído para conduzir os experimentos. Nesta matriz são incluídos os fatores de controle, os níveis e tratamentos do experimento.
- **Aleatorização:** é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental, através de sorteios ou por limitações específicas dos testes. Esse

conceito também se refere ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições experimentais. A aleatorização nos experimentos é realizada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não-controláveis nas respostas analisadas e para se atender aos requisitos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes (MONTGOMERY; RUNGER, 2009)

- **Repetição:** é o processo de repetir cada uma das combinações (linhas) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação. Segundo Montgomery (2013) este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental, que é utilizado para determinar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas.
- **Blocos:** é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não-controláveis) dos experimentos. Com esta técnica procura-se criar um experimento (grupo ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

Em um planejamento de experimentos, existem parâmetros do processo que podem ser controlados e os que não podem ser controlados (ruídos), as influências do meio, as medidas que serão coletadas e os fatores de controle (COLEMAN; MONTGOMERY, 1993). Todos esses componentes são fundamentais para um bom planejamento de experimentos (Figura 19).

Figura 19: Categorias dos fatores



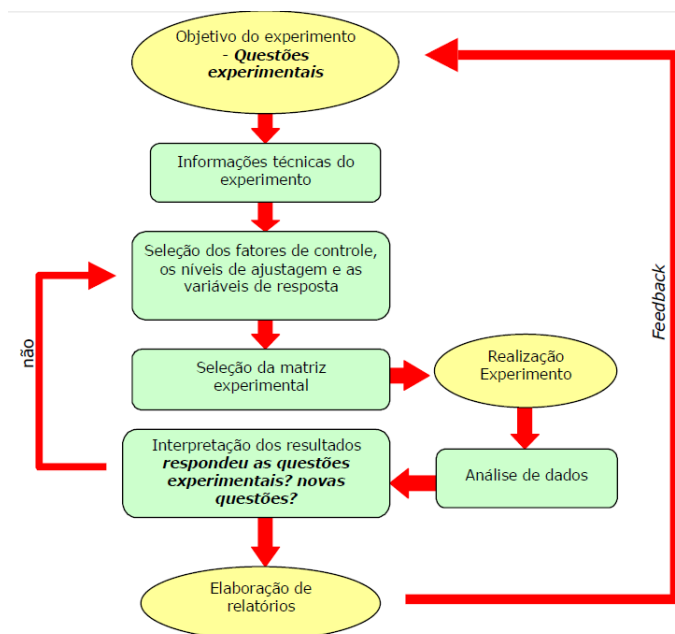
Fonte: Coleman e Montgomery (1993)

Os fatores denominados de ruídos, na Figura 19, são aqueles em que o experimentador não consegue controlar, porém Montgomery e Runger (2009) ressaltam que um bom experimento deve minimizar ao máximo esses fatores de ruídos.

Para a realização de um estudo que envolva o planejamento estatístico de experimentos, um roteiro bem estruturado, que busque classificar quais são as variáveis respostas, os fatores de controle, os fatores de ruídos e outros, deve ser seguido a fim de se obter o sucesso ao final do estudo (ANTONY; KATE; FRANGOU, 1998).

Galdámez (2002) esquematizou um roteiro para a realização de um estudo de planejamento estatístico de experimentos de forma bem simples e representativa (Figura 20).

Figura 20: Roteiro para realização de experimentos



Fonte: Galdámez (2002, p.17)

Para a realização do planejamento de experimentos necessita-se iniciar com a formulação dos objetivos do experimento e uma equipe que será responsável pelo processo de experimentação. Algumas técnicas tais como o *Brainstorming* (tempestade mental) podem ser utilizadas (COLEMAN; MONTGOMERY, 1993).

Após os objetivos bem claros por todos os integrantes da equipe, deve se iniciar a coleta das informações técnicas do processo, tais como: fatores de controle, fatores de ruído, níveis de ajuste dos fatores e variáveis resposta. Nesta etapa as informações técnicas podem resultar da combinação entre o conhecimento prático e o teórico (MONTGOMERY, 2013).

A equipe, com as informações técnicas em mãos, deve selecionar os fatores de controle que serão analisados, os níveis e as variáveis resposta do estudo. Assim estará apta a montar a matriz de experimentos que deve considerar a aleatoriedade na coleta dos dados, visando minimizar os fatores de ruídos e as possíveis iterações que podem ocorrer entre os fatores analisados (MONTGOMERY, 2013).

Em seguida inicia-se a realização dos experimentos. Nesta etapa o experimentador deve estar atento a todas as mudanças que possam alterar os resultados do estudo. Montgomery (2013) considera esta etapa como um processo iterativo, pois as informações coletadas nos primeiros testes devem ser utilizadas nos próximos testes, visando otimizar os experimentos.

Após a realização dos experimentos os dados coletados devem ser analisados com auxílio de programas estatísticos afim de verificar a análise de variância e a iteração entre os fatores e variáveis do processo. Esses dados analisados serviram de base para a tomada de decisão do experimentador e para a inferência estatística do processo a ser analisado. (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Ao fim a equipe que conduziu os experimentos devem elaborar um relatório contendo os resultados alcançados, as limitações dos estudos e recomendações para trabalhos futuros (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Para a realização do planejamento de experimentos, existem diversas técnicas, sendo as mais utilizadas as de planejamento fatorial completo e planejamento fatorial fracionado (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2007; MONTGOMERY, 2013; RODRIGUES; LEMMA, 2005).

Planejamento Fatorial Completo

Muitos experimentos envolvem estudos de efeitos de dois ou mais fatores. Um planejamento fatorial completo busca-se conhecer cada uma das possibilidades de combinações possíveis dos níveis dos fatores investigados (MONTGOMERY, 2013). Por exemplo, se um fator A tem a níveis e um fator B tem b níveis, cada replicação do planejamento fatorial completo deve conter todas as combinações.

O efeito da mudança de nível do fator é medido na variável resposta que se busca estudar no planejamento de experimentos. A matriz de experimentos desse caso de dois fatores de controle (Fator A e B) e dois níveis de cada fator a e b é representada na Tabela 3:

Tabela 3: Caso Geral para experimentos com dois fatores

		Fator B			
		Níveis	1	2	...
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	:	:	:	:	:
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013)

A Tabela 3 representa o caso geral do experimento fatorial de dois fatores para uma resposta (y_{ijk}) observada quando o fator A está no i -ésimo nível ($i=1,2,\dots,a$), sempre destacando que as observações dos experimentos devem ser realizadas de forma aleatória, a fim de minimizar a interação entre os fatores (MONTGOMERY, 2013).

Apenas um nível de cada fator deve ser alterado em cada tratamento a fim de verificar a real mudança na variável resposta causada pela mudança de nível efetuada. As observações dos experimentos fatoriais podem ser descritas por um modelo. Existem diversas forma de escrever o modelo, porem Montgomery (2013, p 167) descreve como:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo que,

μ é a média dos resultados,

τ_i é o efeito principal do fator A,

β_j é o efeito principal do fator B,

$(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos fatores A e B,

ϵ_{ijk} é o erro experimental.

Para resolução do modelo exposto acima pode-se utilizar regressão linear, teste de hipóteses ou análise de variância (RODRIGUES; LEMMA, 2005), sendo esta última técnica explicada mais adiante.

Na técnica planejamento fatorial completo é usual utilizar 2 ou 3 níveis de cada fator, assim temos as técnicas para resolver planejamento fatorial completo 2^k , onde o estudo terá k fatores e 2 níveis em cada fator ou 3^k com k fatores e 3 níveis cada fator.

O planejamento fatorial completo 2^k visa realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida, determinar e interpretar os efeitos principais e de interações dos fatores investigados, possibilitando identificar as melhores condições do sistema avaliado.

Para ilustrar o procedimento dessa técnica considere um experimento com três fatores (x_1 , x_2 e x_3), sendo cada fator testado em dois níveis diferentes (-1, +1). Esse exemplo é apresentado por diversos autores que estudam o assunto (MONTGOMERY; RUNGER, 2009; MONTGOMERY, 2013; RODRIGUES; LEMMA, 2005).

Dessa maneira, a matriz de planejamento para o experimento fatorial completo com $k=3$ (fatorial 2^3) é representada pela Tabela 4. As respostas de cada tratamento são descritas na coluna y_i .

Tabela 4: Matriz de planejamento fatorial 2^3

N Teste	Fatores de controle			Ordem do Teste	Resposta (y_i)
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	-1	6	y_1
2	+1	-1	-1	8	y_2
3	-1	+1	-1	1	y_3
4	+1	+1	-1	2	y_4
5	-1	-1	+1	5	y_5
6	+1	-1	+1	3	y_6
7	-1	+1	+1	4	y_7
8	+1	+1	+1	7	y_8

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013, p 216)

A forma de organizar o experimento é denominada forma padrão, e usualmente utiliza-se o menor valor do nível de cada fator como negativo, não sendo necessariamente uma regra (RODRIGUES; LEMMA, 2005). Ainda com a forma padrão, pode-se garantir que todas as colunas da matriz sejam ortogonais entre si. Com esse tipo de planejamento é possível determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem nas variáveis respostas.

Segundo Montgomery (2013) neste planejamento será determinado os efeitos principais de cada fator (x_1 , x_2 e x_3) e os efeitos de interação entre os fatores (x_{12} , x_{13} , x_{23} e x_{123})

Um método generalizado dentro do planejamento fatorial é denominado método dos sinais, onde os efeitos principais correspondem a mudança da resposta média quando o nível

de um fator é alterado de (-1) para (+1), sempre mantendo os outros fatores constantes. O procedimento consiste em multiplicar os resultados da coluna y_i pelos valores +1 e -1 associados a coluna x_i da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja encontrar.

Os efeitos são definidos como a mudança ocorrida na resposta quando se muda o nível inferior (-1) para o nível superior (+1), ou seja, são as quantificações da influência do fator naquela determinada resposta e são calculados pela diferença entre a média das respostas quando o fator estava no nível superior e a média das respostas quando o fator estava no nível inferior. A equação 6 demonstra o cálculo dos efeitos (MONTGOMERY, 2013; RODRIGUES; LEMMA, 2005)

$$E_A = \frac{y^{1(+)} + y^{2(+)} + y^{3(+)} + \dots + y^{n(+)}}{n^{(+)}} - \frac{y^{1(-)} + y^{2(-)} + y^{3(-)} + \dots + y^{n(-)}}{n^{(-)}} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

E_A = efeito do fator A

$y^{1(+)}, y^{2(+)}, y^{3(+)}, \dots, y^{n(+)}$ = respostas encontradas no nível (+)

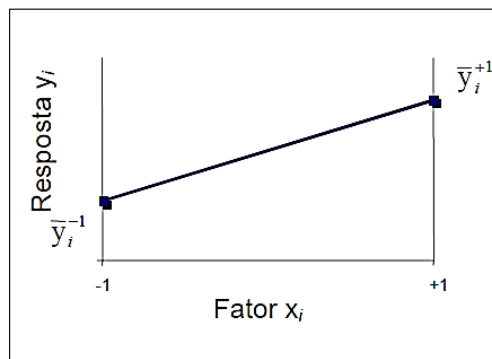
$y^{1(-)}, y^{2(-)}, y^{3(-)}, \dots, y^{n(-)}$ = respostas encontradas no nível (-)

$n^{(+)}$ = número de condições experimentais no nível (+)

$n^{(-)}$ = número de condições experimentais no nível (-)

A forma gráfica do efeito principal E_A é representado pela Figura 21.

Figura 21: Gráfico dos efeitos principais de um planejamento fatorial 2^k

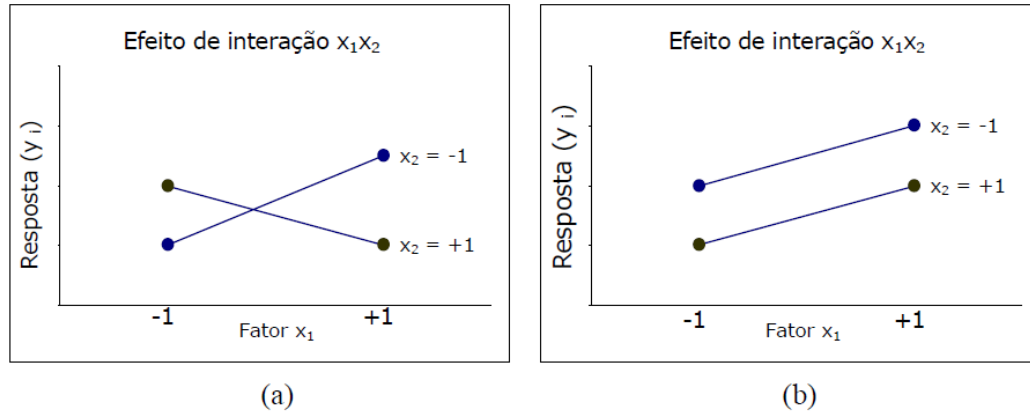


Fonte: Galdamez (2002, p. 25)

A Figura 21 ilustra o efeito da variação do nível do fator x_i de (-1) para (+1). Essas variações no nível resultaram em um acréscimo no valor da variável resposta y_i . As mudanças na variável resposta podem ser tanto positivas ou negativas, ou seja, a mudança de certo nível de um determinado fator pode aumentar ou diminuir o valor na variável resposta. Além dos

efeitos principais existem também os efeitos de interação entre as variáveis do estudo (Figura 22).

Figura 22: Gráficos de efeitos de interação



Fonte: Galdamez (2002, p. 25)

Os efeitos de interação, conforme visualizado na Figura 22, são aqueles oriundos da interação entre dois fatores principais, ou seja, as interações entre dois fatores principais podem interferir na variável resposta (MONTGOMERY, 2013). Em qualquer planejamento experimental sempre existirá o fator ruído e com isso um erro associado a metodologia aplicada. Os erros podem ser sistemáticos ou aleatórios.

Os erros sistemáticos são causados por fontes identificáveis, causando uma alteração no resultado experimental acima ou abaixo do real. Esse erro pode ser causado por instrumentos utilizados para controlar o experimento, tais como: cronômetro, micrômetro, termômetro, etc. Já os erros aleatórios são as flutuações que ocorrem de uma repetição para outra, porém, todos os possíveis resultados estão inseridos em um intervalo de valores. Esse tipo de erro afeta a precisão das medidas. Segundo Button (2001) nem sempre é possível identificar as fontes que causam esse tipo de erro. Entretanto esse tipo de erro pode ser tratado com o auxílio de métodos estatísticos.

Quando a quantidade de fatores cresce dentro de um planejamento fatorial completo a quantidade de experimentos cresce exponencialmente, tornando muitas vezes inviáveis o estudo (Tabela 5).

Tabela 5: Número de tratamento por quantidade de fatores com 2 níveis

Fator	Níveis	Número mínimo de tratamento
2	2	4
3	2	8
4	2	16
5	2	32
6	2	64
10	2	1024

Fonte: Montgomery (2013)

Quando a quantidade de fatores é grande, pode-se utilizar o planejamento fatorial fracionado para auxiliar a reduzir o número de tratamentos a serem observados.

Planejamento Fatorial Fracionado (2^{k-p})

Essa técnica de planejamento de experimentos possibilita analisar os efeitos sobre uma variável resposta de interesse, de k fatores com dois níveis cada um, em 2^{k-p} combinações de testes. Dependendo da escolha do experimentador, pode se reduzir a quantidade de tratamentos pela metade (caso em que $p=1$) ou até mesmo reduzir para $\frac{1}{4}$ a quantidade de tratamentos (caso em que $p=2$). Montgomery (2013 p.302) salienta que quando há um certa quantidade de fatores, é muito comum a utilização de planejamento fatorial fracionado 2^{k-2} . Essa redução na quantidade de tratamentos, contudo não compromete significativamente a precisão das conclusões decorrentes das análises dos resultados e reduz significativamente os custos e o tempo de duração dos tratamentos.

Segundo Abraham; Chipman e Vijayan (1999) quando são utilizados os planejamentos fatoriais fracionados 2^{k-p} , assume-se que os efeitos de interação de ordem superior são desprezíveis. Montgomery (2013) descreve três importantes pontos que justificam a utilização de experimentos fatoriais fracionados:

- Dispersão dos efeitos: o processo é influenciado por apenas alguns efeitos principais;
- Propriedade de projeção: Os experimentos fatoriais fracionados podem ser planejados em matrizes maiores, que podem ser construídas a partir de um subconjunto de fatores significativos.
- Experimentação sequencial: Pode-se combinar as corridas de dois ou mais experimentos fatoriais fracionados.

Nos planejamentos de experimentos fatoriais fracionados ocorre o efeito de “confundimento” (MONTGOMERY, 2013; RODRIGUES; LEMMA, 2005), pois nesta técnica a variação do nível do primeiro fator se confundirá com a interação dos outros fatores. Não haverá efeito de “confundimento” entre os efeitos principais, apenas em relação aos efeitos secundários.

Quando se trabalha com interações de segunda ordem, não se tem efeito principal confundido com efeito principal. Mas, pode-se ter fator principal confundido com interação de segunda ordem que, estatisticamente, pode ser significativa. Neste caso, diz-se que se trabalha em uma baixa resolução. As baixas resoluções são empregadas em análise exploratória, onde se avalia uma grande quantidade de variáveis e se selecionam as principais por meio de um “*screening*” (MONTGOMERY, 2013).

Para auxiliar os experimentadores na escolha da melhor técnica de planejamento de experimentos fatorial fracionado, Montgomery (2013) destaca alguns possíveis tipos de resolução:

- **Resolução III** – Deve ser utilizado em estudos com muitos fatores, porém com poucos que realmente podem ser importantes. Neste caso, o efeito principal não é confundido com outro efeito principal, mas existe efeito principal confundido com interação de 2ª ordem, e também interação de 2ª ordem confundida com interação de 2ª ordem. Geralmente é aplicado em condições exploratórias. Sua representação é 2_{III}^{k-p} .
- **Resolução IV** – Não se verifica efeito principal confundido com efeito principal ou com interações de 2ª ordem. Porém as interações de segunda ordem estão confundidas entre si. Sua representação é 2_{IV}^{k-p} .
- **Resolução V**: Estes são os planejamentos em que nenhum efeito principal ou qualquer interação de segunda ordem estão associados com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda ordem. Porém, interações de terceira ordem estão associadas com interações de terceira ordem. Sua representação é 2_V^{k-p} .

Montgomery (2013) destaca que a escolha da resolução se deve ao que o experimento quer atingir. Assim se a ideia é mapear os principais fatores dentro de um conjunto de muitos

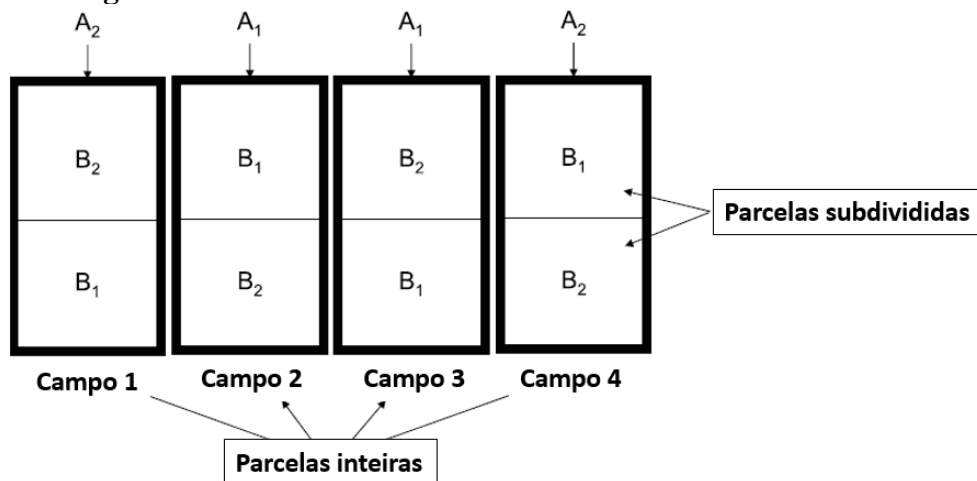
fatores, as resoluções III e IV são suficientes, porem o mesmo autor destaca que quando maior a resolução, melhor será o experimento.

Planejamento Fatorial em parcelas subdivididas (Split-Plot)

No planejamento de experimentos, busca-se a aleatorização dos experimentos, porem em muitos casos práticos, existe um ou mais fatores que são difíceis de serem alterados de nível, trazendo uma dificuldade para a realização aleatória dos experimentos. Assim, Fisher (1925) desenvolveu os experimentos com parcelas subdivididas, sendo estes tipos de experimentos realizados em blocos.

Fisher (1925) utilizou pela primeira vez o planejamento de experimentos em parcelas subdivididas para verificar a resposta do tipo de irrigação e do tipo de fertilizante, sendo que era difícil aplicar diferentes tipos de irrigação em pequenos campos. Assim o autor criou alguns blocos, onde utilizou a mesma irrigação e sub-blocos onde alterou os níveis dos fertilizantes, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23: Estrutura de um planejamento de experimentos com parcelas subdivididas da agricultura



Fonte: Adaptado de Jones e Nachtsheim (2009)

As parcelas inteiras ilustrada na Figura 23 refere-se ao tipo de irrigação aplicado em um determinado campo que teve o fator dos fertilizantes em cada campo como parcelas subdivididas.

Segundo Jones e Nachtsheim (2009), o planejamento de experimentos com parcelas subdivididas tem três grandes pontos a serem considerados: Custo, Eficiência e Validação.

Normalmente o custo de se rodar os experimentos com parcelas subdivididas é menor do que o custo de rodar um experimentos semelhante totalmente randomizada.

Considerando a Eficiência, Ju e Lucas (2002) salientam que existe uma maior eficiência do planejamento para a parcela subdividida, com exceção das parcelas inteiras, sendo muito viável para utilização em casos aplicados, principalmente em indústrias.

Jones e Nachtsheim (2009) destaca que as considerações sobre a presença de fatores de difícil mudança e seu potencial impacto sobre a randomização utilizada deve ser uma parte do planejamento de cada experiência industrial, sendo a validade da experiência comparada com um experimento totalmente aleatório muito próximas.

Assim como no planejamento de experimentos fracionados com ou sem parcelas subdivididas, a análise da variância é essencial para a conclusão dos resultados.

2.8. Análise de variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é um método estatístico utilizado para interpretar os dados experimentais nas tomadas de decisões e para testar estatisticamente as médias dos resultados, em suas diferentes condições (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Com a ANOVA, pode-se comparar três ou mais fatores e suas interações, podendo ser utilizada complementarmente ao método Taguchi, fazendo uso do teste F, para comprovar quais são os fatores realmente significantes no processo (CORREIA; CARDOZA, 2011).

Com os dados analisados matematicamente e com os testes planejados corretamente é possível rejeitar ou aceitar as hipóteses formuladas pela equipe responsável por conduzir o experimento industrial, sendo esse processo estudado pela estatística inferencial (LEVINE et al., 2011; MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

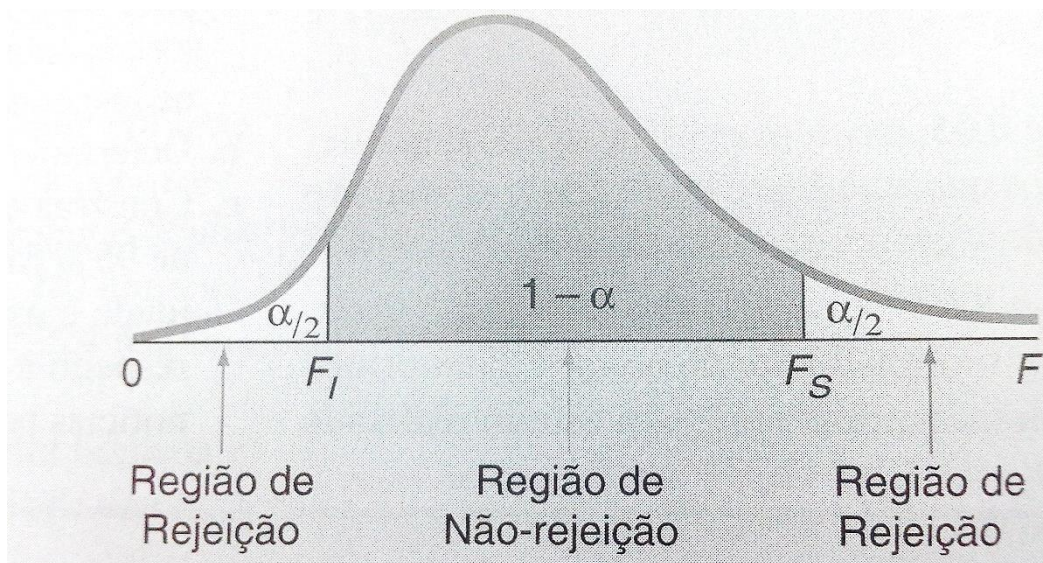
Esse método estatístico esta fundamentando no teste de hipóteses que necessitam de alguns conceitos fundamentais:

- **Formulação das hipóteses:** Deve-se escolher a hipótese nula (H_0). Essa hipótese parte do princípio que não existe diferença significativa entre os fatores analisados de uma população e será sempre a testada no experimento. A hipótese alternativa (H_1) será verdadeira caso a hipótese nula não puder ser comprovada estatisticamente.
- **Valor crítico da estatística teste:** ao desenvolver as hipóteses dos experimentos industriais é necessário o cálculo da estatística específica que será utilizada. O

valor crítico dependerá da distribuição estatística escolhida (*t-student*, F-Fisher, Z-Standard, Normal).

- **Nível de significância:** é a probabilidade de se cometer rejeitar uma hipótese nula dado que ela é verdadeira (Erro tipo I). O nível de significância é representado pela letra α e pode ser controlado pelo experimentador de acordo com suas necessidades. Normalmente o valor do nível de significância utilizado é 1%, 5% ou 10 % (LEVINE et al., 2011). Com o valor do nível de significância estipulado o experimentador pode determinar a região de rejeição da hipótese nula do experimento e consequentemente a região de não rejeição, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24: Regiões de rejeição e não rejeição para o teste F bicaudal



Fonte: Levine et al. (2011, p. 348)

- **Coefficiente de confiança:** é o complemento da probabilidade do nível de significância ($1 - \alpha$). O nível de confiança demonstra a área da Figura 24 onde se aceitaria a hipótese nula. Normalmente o nível de confiança utilizado é de 90%, 95% e 99%. Conforme maior o nível de confiança maior o intervalo de confiança do experimento. (MONTGOMERY; RUNGER, 2009)

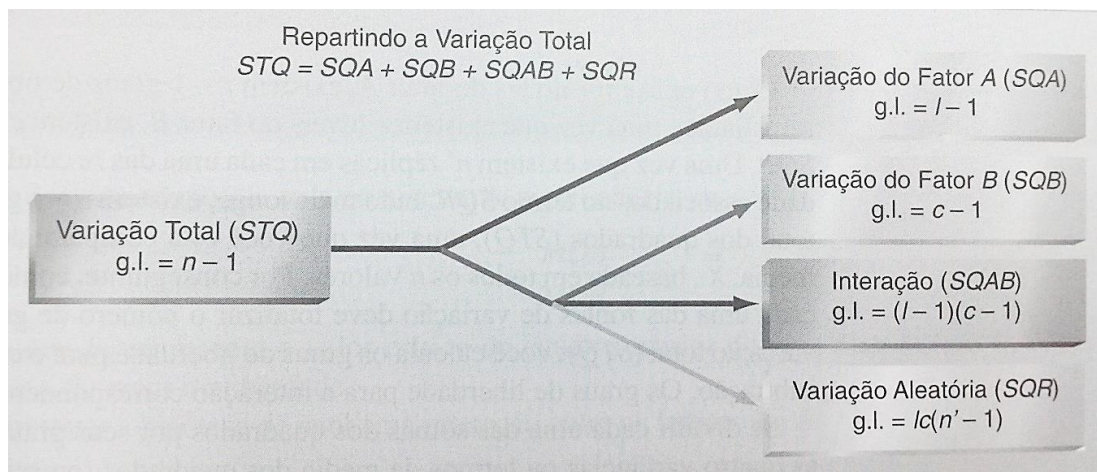
De conhecimento de alguns conceitos fundamentais do teste de hipóteses, pode-se dizer que a análise de variância é utilizada para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses

investigadas com os experimentos industriais. O principal objetivo é analisar a variância da média dos resultados dos testes e verificar quais os fatores que realmente produzem efeitos significativos na variável resposta.

Nos experimentos fatoriais, a análise de variância tem cálculos complexos, e Levini *et al* (2011) recomenda a utilização de programas estatísticos, tais como o EXCEL, MINITAB, STATITISCA.

A Figura 25, demonstra a forma de um estudo fatorial com dois fatores

Figura 25: Divisão da variação de um modelo fatorial de dois fatores



Fonte: Levine *et al.* (2011, p. 383)

Na ANOVA deve-se calcular a Soma Total dos Quadrados (STQ) que representa a variação total entre todos os valores em torno da grande média.

$$STQ = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^{n'} (x_{ijk} - \bar{\bar{x}})^2 \quad \text{Equação 7}$$

$$STA = cn' \sum_{i=1}^r (x_{i..} - \bar{\bar{x}})^2 \quad \text{Equação 8}$$

$$STB = rn' \sum_{j=1}^c (x_{.j.} - \bar{\bar{x}})^2 \quad \text{Equação 9}$$

$$STAB = n' \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (\bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{i..} - \bar{x}_{.j.} + \bar{\bar{x}})^2 \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

r = número de níveis do fator A

c = número de níveis do fator B

n' = número de valores (réplicas) para cada célula (combinação de um determinado nível do fator A com um determinado nível do fator B)

n = número de valores em todo o experimento (em que n= rcn')

X_{ijk} = valor da k-ésima observação para o nível i do fator A e para o nível j do fator B

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^{n'} x_{ijk}}{rcn'} = \text{grande média.}$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^{n'} x_{ijk}}{cn'} = \text{média aritmética do i-ésimo nível do fator A.}$$

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^{n'} x_{ijk}}{rn'} = \text{média aritmética do j-ésimo nível do fator B.}$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n'} x_{ijk}}{n'} = \text{média aritmética da célula ij, a combinação do i-ésimo nível do fator A com o j-ésimo nível do fator B.}$$

Tabela 6: Análise de variância para o modelo fatorial de dois fatores

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados (Variância)	F
A	r-1	SQA	$MQA = \frac{SQA}{r-1}$	$F = \frac{MQA}{MQR}$
B	c-1	SQB	$MQB = \frac{SQB}{c-1}$	$F = \frac{MQB}{MQR}$
AB	(r-1)(c-1)	SBAB	$MQAB = \frac{SQAB}{(r-1)(c-1)}$	$F = \frac{MQAB}{MQR}$
Erro	rc(n'-1)	SQR	$MQ_{Erro} = \frac{SQR}{rc(n'-1)}$	
Total	n-1	STQ		

Fonte: Adaptado de Levine *et al.* (2011, p. 385)

Para testar a hipótese de nenhuma diferença decorrente do fator A, utilizamos o teste de hipóteses

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_r$$

Contra a hipótese alternativa

$$H_1 = \text{nem todas as } \mu_i \text{ são iguais}$$

Deve-se rejeitar a hipótese nula no nível α de significância se:

Teste F para o efeito do fator A

$$F = \frac{MQA}{MQR} > F_s \quad \text{Equação 11}$$

Em que F_s representa o valor crítico da cauda superior de uma distribuição F, com $r-1$ e $rc(n'-1)$

graus de liberdade

O mesmo procedimento deve ser efetuado para o fator B

Teste F para o efeito do fator B

$$F = \frac{MQB}{MQR} > F_s \quad \text{Equação 12}$$

Em que F_s representa o valor crítico da cauda superior de uma distribuição F, com $c-1$ e $rc(n'-1)$ graus de liberdade

Para testar a hipótese de nenhuma interação entre os fatores A e B:

$$H_0 = \text{Interação entre A e B é igual a zero}$$

Contra a hipótese alternativa

$$H_1 = \text{Interação entre A e B não é igual a zero}$$

Utiliza-se a estatística F

Rejeita-se a hipótese nula no nível de significância α se:

$$F = \frac{MQAB}{MQR} > F_s \quad \text{Equação 13}$$

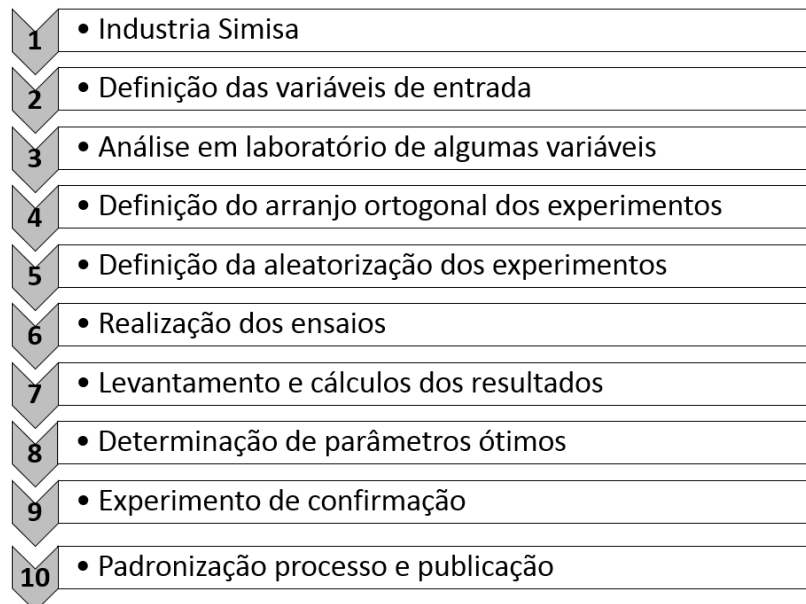
Em que F_s representa o valor crítico da cauda superior de uma distribuição F, com $(r-1).(c-1)$ e $rc(n'-1)$ graus de liberdade.

A estatística F permite inferir, ao mudar o nível de um fator, se estatisticamente ocorre uma mudança na variável resposta em estudo. O mesmo pode ser inferido com relação a interações entre os fatores analisados.

3. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido em dez etapas, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26: Sequência do estudo



Fonte: Do autor (2015)

Parte dos estudos foram realizados na indústria Simisa que está instalada em um parque industrial de 44.000m² com 18.000m² de área construída em modernas instalações, localizada na região metropolitana de Recife-PE. Seu processo de fabricação conta com equipamentos robustos, desde máquinas de usinagem com capacidade de até 40 tons a fornos de fusão com capacidade de metal líquido de 32 tons, fornos de tratamentos térmicos automatizados e pontes rolantes com capacidade até 40 tons.

Em 2015, a indústria possuía a capacidade de produção de 20.000 toneladas/ano de peças em aço carbono, baixa / média liga e ferro fundido cinzento e nodular, com peso máximo de até 24 toneladas para aço e 28 toneladas para ferro fundido, atendendo clientes no Brasil e no exterior nos setores de mineração, automobilístico, siderurgia, hidro geração, usinas de açúcar e álcool, máquinas e equipamentos em geral.

Durante a vivência dentro da indústria, engenheiros e operadores foram questionados visando um melhor entendimento prático do processo de fundição utilizando moldes de areia de sílica ligados quimicamente pelo processo de cura a frio para fabricação de peças de aço médio carbono. A definição das variáveis foi estipulada em conjunto com a empresa, sendo consideradas as mais relevantes para o presente estudo, visando identificar os fatores referentes

aos moldes de areia de sílica que influenciam a qualidade superficial das peças de aço. Abordagem semelhante foi feita por (KASSIE; ASSFAW, 2013; RIBEIRO; ALVES; SILVA, 2007; UPADHYE; KESWANI, 2012).

Os fatores identificados para serem analisados foram:

- Porcentagem de resina utilizada na formulação dos moldes de areia;
- Óxido de ferro adicionado na formulação dos moldes de areia;
- Tipo de tinta utilizada nas paredes dos moldes;
- Quantidade de camadas de tinta;
- Tipo de aplicação da tinta;
- Utilização de sopro de ar quente no molde antes do vazamento;
- Tempo de espera do molde pronto antes do vazamento.

Alguns fatores relacionados com os moldes de areia, tais como: módulo de finura (AFS), geometria dos grãos de sílica, porcentagem de finos na areia; porcentagem de catalisador; umidade da areia; temperatura da mistura da areia na modelagem do molde serão padronizados neste estudo, pois esses fatores já foram abordados em diversos trabalhos na literatura (ALVES, 2009; MONROE, 2005; NARO, 1999, 2002; RIBEIRO; ALVES; SILVA, 2007). Os valores pré-fixados estão agrupados na Tabela 7.

Tabela 7: Valores pré-fixados nos experimentos

Teste	Valor
Módulo Finura - AFS	53,18
Concentração das 4 peneiras	90,82 %
Porcentagem de Finos	1,38%
Umidade	0,06 %
Forma dos grãos de areia	Subangulares

Planejamento Estatístico de Experimentos

No presente estudo, sete fatores foram estudados, cada fator com 2 níveis, assim se a opção fosse por um planejamento de experimentos completos, seria necessário a realização de $2^7 = 128$ experimentos. Portanto para se conhecer os fatores mais relevantes nos moldes de areia que afetam a qualidade superficial das peças optou-se por um planejamento experimental fracionado com parcelas subdivididas.

Com auxílio do programa estatístico Minitab[®], foi elaborado a tabela de experimentos visando a orientação para a realização dos experimentos. Foi escolhido a resolução tipo III para a realização dos experimentos, pois como o estudo visava mapear os principais fatores, essa resolução iria trazer um resultado satisfatório com um menor custo. No planejamento experimental fracionado com parcelas subdivididas utilizando a resolução III, os fatores principais não serão confundidos com os outros principais, porem os efeitos principais podem ser confundidos com as interações de 2ª ordem, e também as interação de 2ª ordem podem ser confundidas entre si, porem consegue-se determinar os fatores vitais no processo (BOX, 1992).

Inicialmente visando minimizar os erros de amostragem, foi definido que cada experimento fosse realizado 3 vezes, para se obter a média dos valores e o desvio padrão, porem devido à crise econômica vivenciada pelo setor de fundição no ano de 2015, foi possível a realização de apenas 2 réplicas de cada experimento. Assim a tabela de experimentos é demonstrado abaixo.

Tabela 8: Planejamento experimental fracionado, nível III com 2 réplicas

FATORES							
Identificação Amostra	% Resina	Óxido Ferro	Camada de tinta	Tipo tinta	Ar Quente	Forma aplicação tinta	Tempo de espera do molde pronto antes do vazamento
1	-	+	-	-	+	-	+
2	-	+	-	-	+	-	+
4	-	+	+	-	-	+	-
5	-	+	+	-	-	+	-
7	-	-	+	+	-	-	+
8	-	-	+	+	-	-	+
B	-	-	-	+	+	+	-
C	-	-	-	+	+	+	-
E	+	+	+	+	+	+	+
F	+	+	+	+	+	+	+
H	+	+	-	+	-	-	-
I	+	+	-	+	-	-	-
L	+	-	-	-	-	+	+
M	+	-	-	-	-	+	+
O	+	-	+	-	+	-	-
P	+	-	+	-	+	-	-

Foram realizados 16 experimentos a fim de mapear os principais fatores que influenciam a qualidade superficial das peças de aço de médio carbono (SAE1050).

Foi atribuído dois níveis para cada um dos 7 fatores estudados, assim o Tabela 9 elucida os níveis de cada fator que foi abordado no presente estudo.

Tabela 9: Níveis dos fatores analisados

Fator	Nível 1 (-)	Nível 2 (+)
Porcentagem de resina na formulação do molde	0,80%	1,20%
Adição de Óxido de Ferro na formulação molde	Não	Sim
Número de camadas de tinta	2	5
Tipo de tinta aplicado na superfície do molde	Alumina	Zirconita
Utilização de ar quente no molde antes do vazamento	Não	Sim
Forma de aplicação da tinta	Pincel	Spray
Tempo de espera do molde pronto antes do vazamento	24 horas	72 horas

O planejamento de experimentos fracionados foi realizado considerando sete fatores obteve como variáveis respostas seis defeitos. Os defeitos considerados foram:

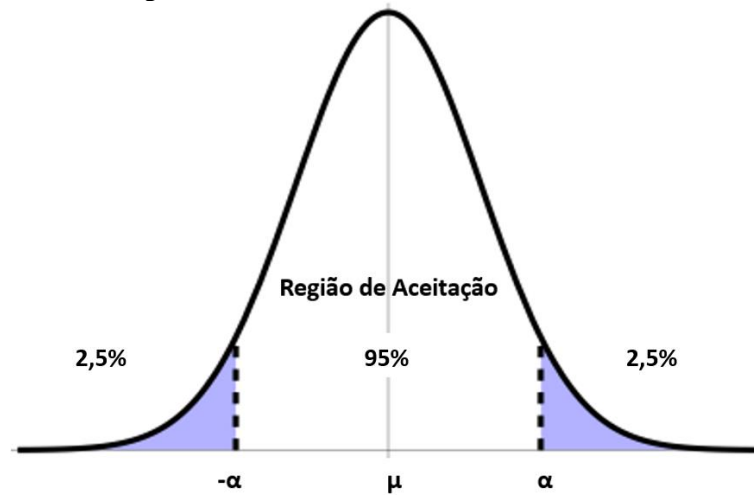
- Erosão.
- Inclusão de areia;
- Penetração do metal no molde;
- Porosidade;
- Acabamento superficial;
- Média Geral dos defeitos.

Inicialmente foi demonstrado, independentemente, o resultado de cada variável resposta. Em seguida foi considerado os resultados agrupados com o intuito de se obter os valores ótimos dos fatores que minimizam os defeitos em conjunto.

Foi considerado na análise Anova o nível de significância de 0,05. O nível de significância do teste de hipótese que é a base para o planejamento de experimentos remete o resultado com certeza de 95% e um incerteza de 5%. (Figura 27).

O planejamento de experimentos busca testar a hipótese acerca da mudança dos níveis dos fatores na alteração da média dos defeitos analisados.

Figura 27: Representação de curva normal com $\alpha = 0,05$



Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2009)

Se os valores pelo teste de hipóteses (valor p) resultar em valores menores que 0,05, considera-se que está fora da região de aceitação e assim considera-se que há interferência na variável resposta com a mudança de nível do fator analisado. Caso o valor p estiver dentro da região de aceitação, considera-se que a mudança de nível do fator analisado não interfere na variável resposta. Assim estudou-se os seis defeitos superficiais mais recorrentes na indústrias de fundição de aço, iniciando-se pelo defeito de erosão de areia.

Produção dos corpos de prova

Visando minimizar os custos e otimizar o processo dentro da indústria, utilizou-se pequenos corpos de prova anexado a produção de uma peça da linha normal de produção. A peça escolhida foi a bagaceira de moenda, que é utilizado em indústria de açúcar e álcool. A peça é ilustrada na Figura 28.

Figura 28: Bagaceira de moenda



Fonte: Simisa (2015)

A escolha da peça se deu após a consulta a carteira de pedidos, pois a mesma tinha uma quantidade razoável, permitindo a realização dos experimentos.

O bagaceira de moenda é uma peça essencial utilizada em usinas de açúcar e álcool e faz parte do conjunto denominado moenda, demonstrada na Figura 29

Figura 29: Moenda



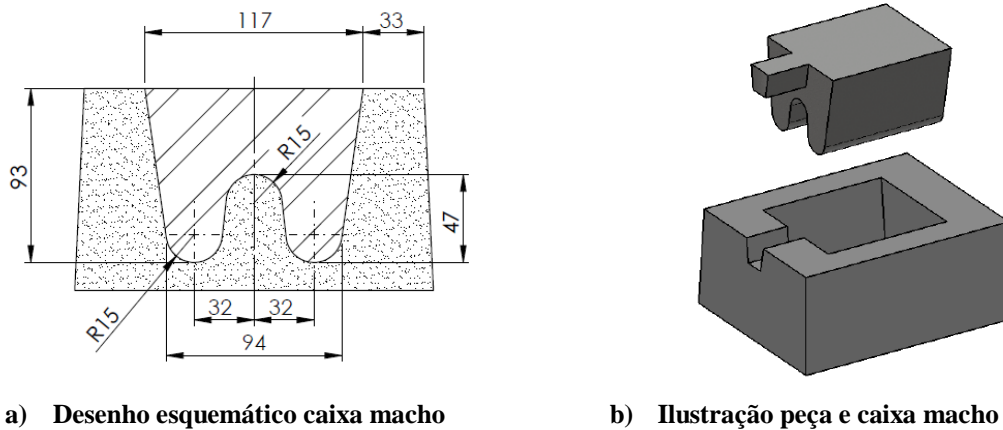
Fonte: Simisa (2015)

Esse conjunto tem como finalidade extrair o caldo da cana de açúcar. Durante o processo, a cana de açúcar é inserida no meio dos cilindros grandes, na qual são esmagadas. O

papel da bagaceira é o de não deixar o bagaço da cana se misturar com o caldo. Assim é uma peça de extrema importância no processo.

Para a realização dos experimentos, foi utilizado as mesmas caixas de macho utilizadas na indústria para a fabricação dos corpos de prova. O desenho técnico pode ser visualizado na Figura 30a e a ilustração em 3D da peça fundida e da caixa de macho pode ser visualizado na Figura 30b.

Figura 30: Desenho técnico e ilustração da caixa de macho



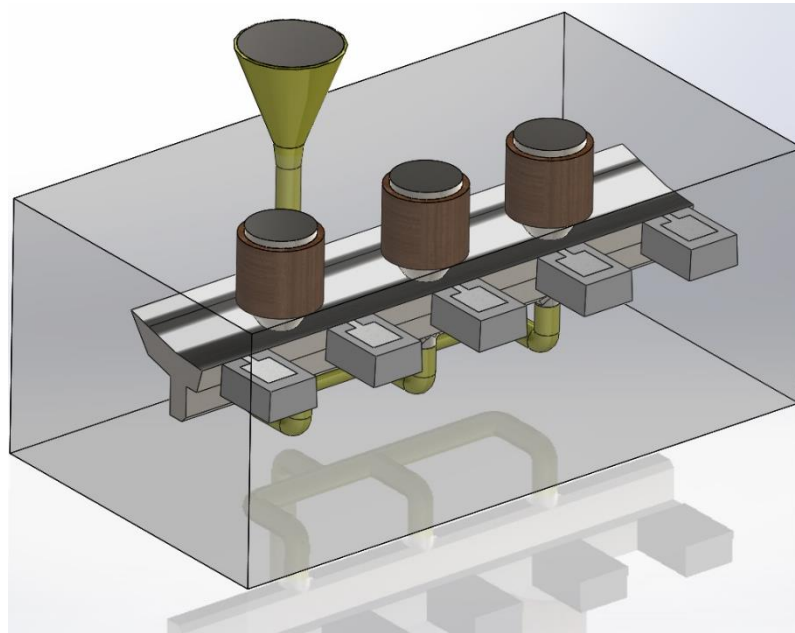
A realização da fabricação dos machos para os experimentos foi desenvolvida seguindo a Tabela 8 e a Figura 31 ilustra a sequência de fabricação.

Figura 31: Sequência da fabricação das caixas de machos



Foram fabricados 16 machos para fabricação dos corpos de prova, seguindo as configurações dos níveis dos fatores especificados nas Tabelas 8 e 9. Foram disponibilizados quatro amostras em cada molde para minimizar os efeitos de ruídos além do próprio corpo de prova da bagaceira, assim o desenho esquemático do molde de areia é visualizado na Figura 32.

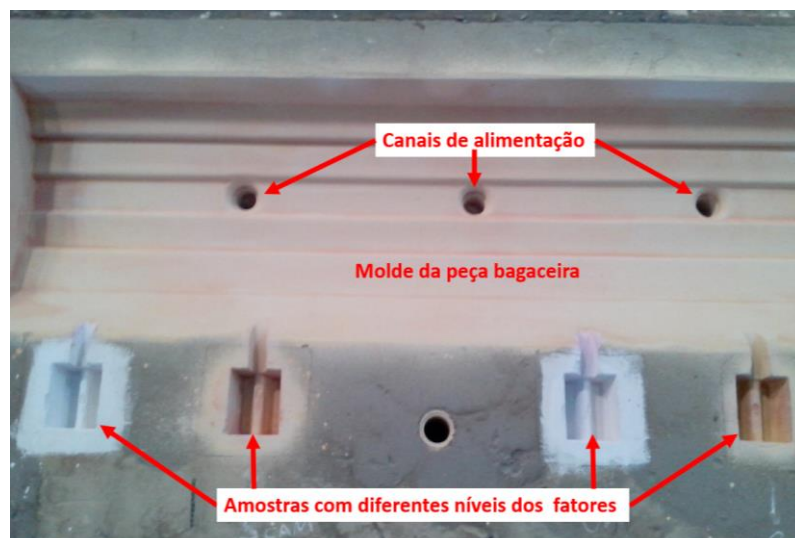
Figura 32: Desenho do molde de areia para fabricação de 4 corpos de prova em uma bagaceira de moenda



Fonte: Simisa (2015)

As parcelas subdivididas do experimento fracionado foi disponibilizada de forma aleatória. Na Figura 33, visualiza-se os machos para corpos de prova referentes as amostras, os quais tiveram diferentes níveis de fatores pré-estabelecidos.

Figura 33: Molde de areia com os machos para os experimentos



Fonte: Do autor (2015)

As amostras foram inseridas em quatro moldes, sendo dispostas nas seguintes configurações. O símbolo * indica o canal de alimentação e CP o corpo de prova usualmente

utilizado na produção da peça de aço. As marcações (letras e números) de cada amostra indicam os níveis das variáveis utilizadas conforme exposto na Tabela 8.

Molde 1 / Corrida 1

O	E	*	1	B	CP
---	---	---	---	---	----

Molde 2 / Corrida 1

CP	L	H	*	7	4
----	---	---	---	---	---

Molde 3 / Corrida 2

CP	8	5	*	I	M
----	---	---	---	---	---

Molde 4 / Corrida 2

F	C	2	*	P	CP
---	---	---	---	---	----

Em todas as corridas foram utilizados o aço de médio carbono SAE-1050, sendo verificado a sua composição química, a temperatura de vazamento e o tempo de vazamento de cada molde.

Os fatores de porcentagem de resina e óxido de ferro inseridos nas formulações dos moldes foram realizados com o auxílio misturador pneumático. Esse equipamento foi calibrado nos dias que foram coletadas as amostras, visando minimizar os efeitos de ruído. A temperatura da coleta das amostras dos moldes também foi verificada, pois se a mistura tiver uma temperatura acima de 30°C, o tempo de cura é acelerado comprometendo a moldagem das amostras. A Figura 34 ilustra o equipamento no qual foram feitas as receitas das amostras e a temperatura da areia no momento da mistura.

Figura 34: Misturador pneumático para obtenção das formulações dos moldes



a) Misturador pneumático



b) Verificação da temperatura da areia

A tinta aplicada sobre a superfície do molde para evitar a reação metal /molde foi um dos sete fatores estudados. Assim visualiza-se na Figura 35 a aplicação da tinta por meio de um pincel (a) por meio de spray de ar comprimido (b).

Figura 35: Aplicação da tinta nas caixas de machos (moldes)



a) Pincel



b) Spray

Um outro fator analisado no presente estudo foi o tipo de tinta, assim visualiza-se a tinta com material refratário de zirconita aplicada no molde (Figura 36a) e a tinta com material refratário de alumina (Figura 36b).

Figura 36: Tipos de tinta utilizada no estudo



a) Zirconita



b) Alumina

A tinta à base de Zirconita utilizada foi a Velva Água 277/A da empresa *Ask Chemicals* e a tinta à base de Alumina utilizada foi da empresa Profusa Produtos para Fundição Ltda. As duas tintas utilizadas no experimentos são a base de água e a densidade da tinta na hora da aplicação nos experimentos estava em 83°Be e temperatura ambiente de 29°C. A tinta a base

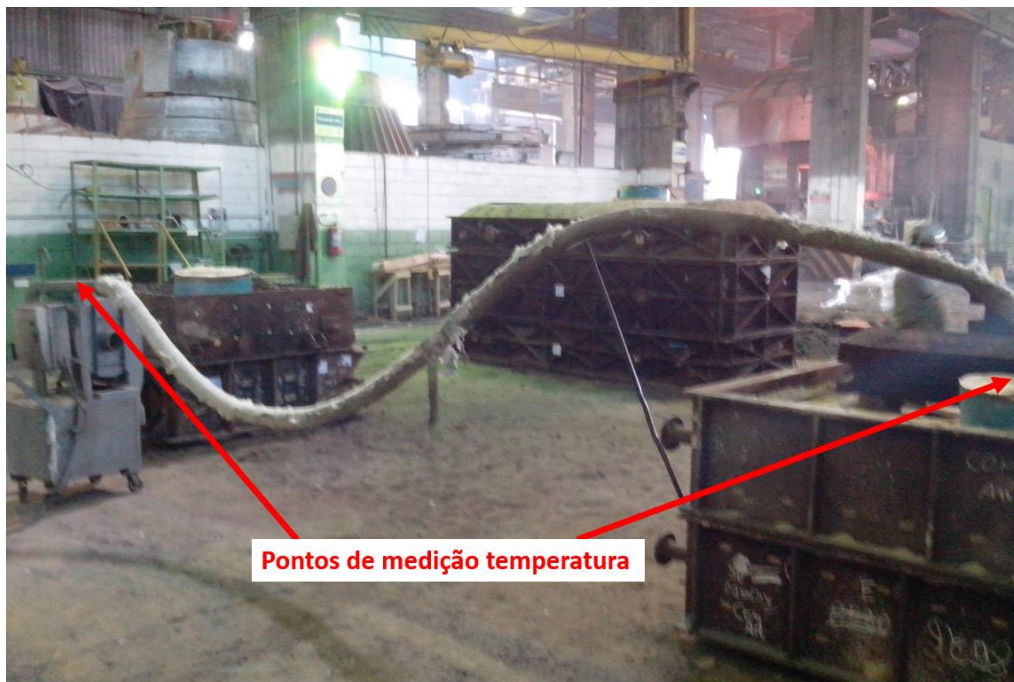
de Zircônia tem uma coloração rosa devido a um indicador de umidade, na qual o operador consegue visualizar quando a tinta seca.

O número de camada de tinta também foi analisado, assim seguindo a tabela de experimentos preparou-se algumas amostras com 2 camadas e outras com 5 camadas de tinta, visando verificar a influência desse fator na qualidade superficial das peças de aço.

O fator tempo de espera do molde pronto antes do vazamento com dois níveis (24 e 72 horas) foram planejadas com base na data para o vazamento. Assim parte dos machos ficaram prontos 24 horas antes e parte 72 horas antes do vazamento.

O fator de injetar ar quente nos moldes prontos antes do vazamento também foi considerado como um fator e fez-se uma análise mais detalhada para verificar as temperaturas e a umidade do ar dentro do moldes. O tempo de aplicação do ar quente nos experimentos foram de 3,5 horas e a temperatura e umidade do ar dentro do molde foram acompanhadas, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37: Insuflador de ar quente



Antes de iniciar a injeção de ar quente dentro dos moldes, fechou-se as maiores saídas de ar do molde (massalotes) para evitar a troca de calor com o ambiente.

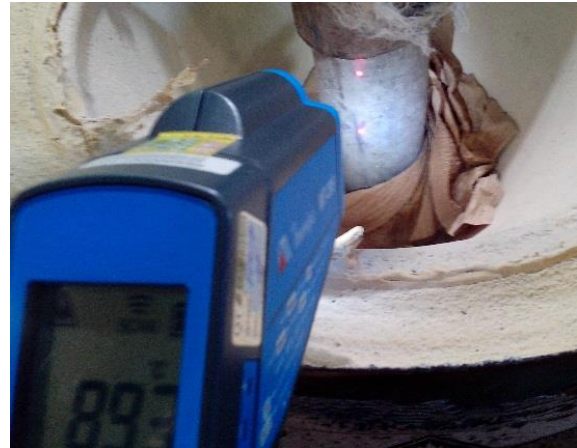
Para se controlar a temperatura, foi analisado a temperatura do ar dentro do molde (Figura 38a) fechado, no cano de saída de ar quente da máquina, no cano de entrada de ar quente do molde (Figura 38b) e da parede interna do molde. Além das temperaturas verificou-se

também o valor da umidade do ar dentro do molde após 3,5 horas de utilização da máquina. A injeção de ar quente dentro do moldes foi encerrada minutos antes do vazamento do metal líquido.

Figura 38: Controle da temperatura nos moldes



a) Temperatura da ar interno ao molde

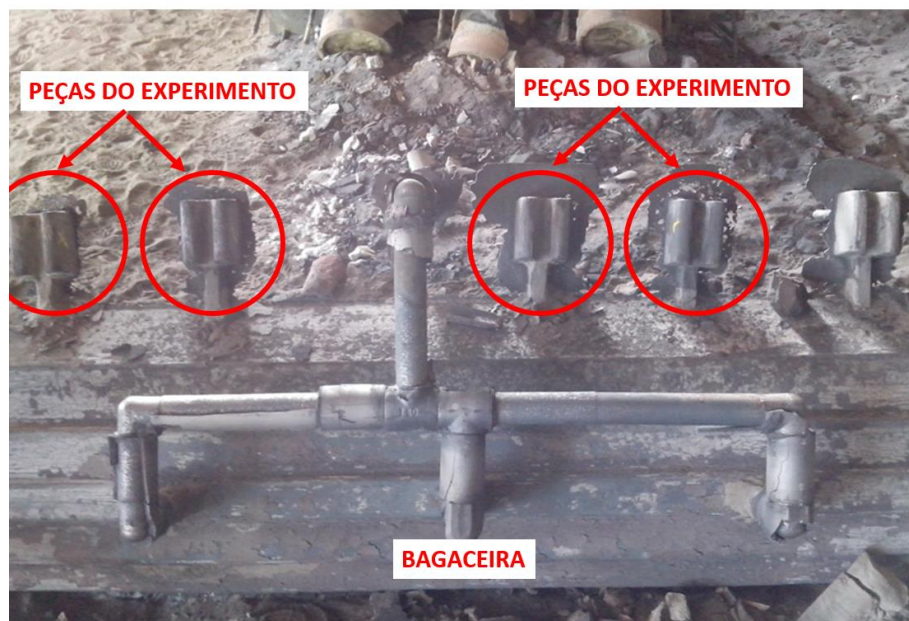


b) Temperatura da entrada do ar no molde

O equipamento para medição da temperatura do ar dentro do molde fechado e da umidade do ar foi o Minipa MT-240 com faixa de medição -50 a 70°C e na umidade do ar na faixa de 20 a 90%. Para a medição da temperatura da parede dos moldes e dos canos foi utilizado o pirômetro ótico Minipa MT-395 com faixa de medição do infravermelho entre $-60\sim 1500^{\circ}\text{C}$

Após o vazamento do metal líquido nos moldes, aguardou-se 48 horas para que a peça e as amostras perdessem calor e fossem desmoldadas. A Figura 39 ilustra a peça desmoldada com as amostras dos experimentos ainda ligadas a peça da linha de produção (bagaceira).

Figura 39: Peça desmoldada com as amostras anexadas



As amostras tiveram as identificações reforçadas (Figura 40) e em seguida com auxílio de um maçarico as amostras foram separadas da bagaceira, retirou-se os canais de respiro, alimentação e as rebarbas.

Figura 40: Reforço da identificação das amostras



Após a separação das amostras da peça produzida, as amostras foram limpas com jatos de ar e avaliadas com relação aos defeitos oriundos dos moldes, conforme ilustrado na Figura 41.

A análise da variável resposta (defeitos) foi realizada de forma qualitativa, pois é muito impreciso quantificar o tamanho dos defeitos devido à localização e formato. Assim para cada tipo de defeito verificado nas peças foi atribuído uma pontuação que variava de 0 a 5, onde 0 refere-se a nenhum defeito superficial e 5 refere-se a severos defeitos superficiais.

Figura 41: Avaliação dos defeitos nas amostras



A atribuição das pontuações foi efetuada pelo pesquisador em conjunto com a equipe de engenheiros e técnicos da indústria analisada.

As pontuações atribuídas foram:

- 0 – Nenhum defeito verificado;
- 1 – Poucos defeitos verificados;
- 2 – Poucos para moderados defeitos verificados
- 3 – Moderados defeitos verificados;
- 4 – Moderado para Muitos defeitos verificados;
- 5 – Muitos defeitos verificados.

A avaliação qualitativa pontuou a amostra com maior defeito com nota 5 e a amostra sem defeito com nota zero. Foram avaliados as peças para os seguintes defeitos:

- Erosão;
- Inclusão de areia;
- Porosidade;
- Penetração do metal no molde;
- Acabamento superficial (rugosidade).

Após a primeira avaliação, as amostras foram jateadas com granalha visando elucidar melhor os defeitos superficiais, assim uma nova avaliação após o jateamento com granalha foi realizado.

Os dados foram analisados com o programa estatístico Minitab[®], o qual auxiliou o entendimento dos fatores dos moldes de areia de sílica analisados que mais interferiram na qualidade superficial das peças de aço.

Antes e após a realização dos experimentos no ambiente industrial, algumas amostras foram caracterizadas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. As técnicas utilizadas foram:

Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Para realização dessa parte do estudo, foi utilizado o equipamento *Hitachi Tabletop Microscope TM-3000*, com o detector *High Sensitivity semiconductor backscattered electron*.

Inicialmente, duas amostras de molde de areia do mesmo lote foram coletadas. As amostras foram pintadas com as seguintes configurações:

- Amostra 1 – Uma camada de tinta a base de zirconita aplicada com spray;
- Amostra 2 – Uma camada de tinta a base de zirconita aplicada com pincel.

Ainda utilizando a mesma técnica, foram analisadas várias amostras de camadas de tinta (zirconita e alumina) antes e após o vazamento do metal líquido para visualizar os efeitos ocorridos.

Análise térmicas

Esse estudo objetivava conhecer o comportamento térmico das tintas e também das formulações dos moldes de areia. Foi realizada análise de termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) com o intuito de conhecer a perda de massa das amostras dos moldes com o aumento da temperatura, o ponto de fusão da resina e das tintas utilizadas no processo de fundição.

Para essa análise foi utilizada o equipamento modelo NETZSCH STA 449F3, com calibração em oxigênio.

Foi analisado também a dilatação térmica de cada tipo de tinta analisado no estudo. Essa análise teve como intuito verificar se a dilatação térmica pode ser um causador de trinca e possibilitando defeitos nas peças.

Para a realização das análises da dilatação térmica das tintas, foi coletado aproximadamente 250 ml de cada um dos tipos de tintas analisadas (alumina e zirconita). Retirou-se o veículo das tintas analisadas (água) em estufa a 90°C por 24 horas, possibilitando a obtenção do pó das tintas.

Após a obtenção dos pós, pequenas amostras foram confeccionadas com auxílio de uma matriz sendo aplicada apenas a pressão de 4 toneladas para compactação do pó. Em seguida as amostras foram colocadas no equipamento NETZSCH5 e aquecido a uma taxa de 10°C/min até 1400°C. Durante o aquecimento obteve-se a curva de dilatação térmica dos pós das tintas compactados.

Ensaio de tração

Para realização dos ensaios de tração foi utilizado o equipamento da Tecnofund MRUD para corpo de prova padronizado. Os corpos de prova fabricados com as formulações dos moldes utilizada na produção e os testes de tração efetuados 24 horas depois da fabricação dos corpos de prova.

Os resultados foram utilizados para orientar a produção, pois se os valores dos limites de tração dos corpos de prova forem baixos pode comprometer os molde, durante a retirada do modelo ou mesmo na movimentação dos moldes na planta fabril, gerando assim defeitos na peça de aço.

Foram utilizados diversas misturas e módulo de finura da areia para se entender os efeitos das variáveis diretamente dentro do processo. Inicialmente fez comparação dos resultados entre dois módulos de finura - AFS, sendo a areia oriunda de duas fontes diferentes.

Outra análise foi efetuada utilizando o mesmo módulo de finura - AFS e variando a porcentagem de resina para obtenção da formulação do molde. Os resultados nortearam a escolha dos valores das variáveis que será estuda mais adiante.

Ao final foram verificados os valores da resistência à tração de cada configuração das formulações dos moldes utilizada no planejamento de experimentos com parcelas subdividas, conforme Tabela 8.

Análise da granulometria da areia de sílica

Para análise da distribuição do tamanho de grãos, utilizou-se conjunto de peneiras Bertel (12 peneiras) e balança com precisão de 2 casas. Uma amostra da areia selecionada diretamente na linha de produção foi pesada e colocada na peneira mais alta do conjunto. Um vibrador na base das peneiras foi ligado por 10 minutos e ao fim do procedimento os grãos retidos em cada peneira foram pesados e criado uma distribuição de frequências para verificar a concentração nas peneiras.

A distribuição de frequência segue aproximadamente uma distribuição normal e para o processo foi definido que a concentração das peneiras (6 a 9) devem ser superiores a 70%, e a porcentagem de finos (peneiras 10 em diante) não deve ultrapassar 2%.

Dessa análise retirou-se o módulo de finura – AFS e a porcentagem de finos presente na areia. Essas informações foram cruciais para o processo como um todo. O módulo de finura foi calculado pela equação:

$$\mathbf{M} = \frac{\sum (g_i \cdot m_i)}{\sum g_i} \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

g_i = quantidade, em gramas, de material retido na peneira i ;

m_i = coeficientes arbitrários definidos pela AFS;

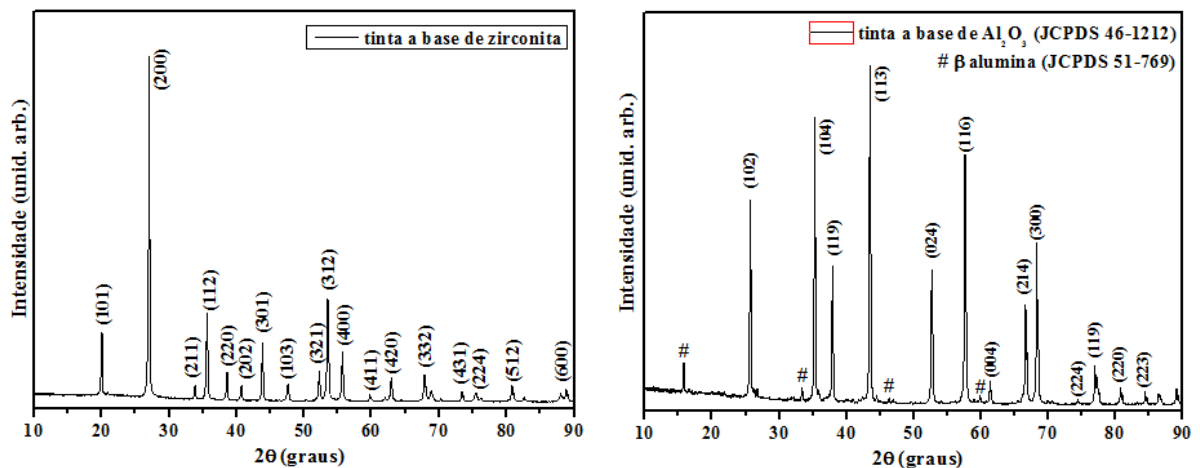
No próximo capítulo serão expostos os resultados e as discussões.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Difração de Raios X (DRX)

Para confirmar a composição da cada tipo de tinta, uma análise do pó oriunda da tinta seca foi efetuada com auxílio da técnica de difração de raios X (DRX), conforme ilustrado nas Figuras 42a e 42b.

Figura 42: DRX para verificação da composição das tintas



a) tinta a base de zirconita seca indexada conforme JCPDS (6-266)

b) tinta à base de alumina seca indexada conforme JCPDS (46-1212).

As Figuras 42a e 42b ilustram os difratogramas de raios x das tintas secas na temperatura de 90 °C por 24 h de zirconita e alumina, respectivamente. Os picos de difração da Figura 42a foram indexados somente como a fase tetragonal da $ZrSiO_4$ referente à ficha JCPDS (6-266). Este resultado está de acordo com a especificação do fabricante *Ask Chemicals*. A Figura 42b

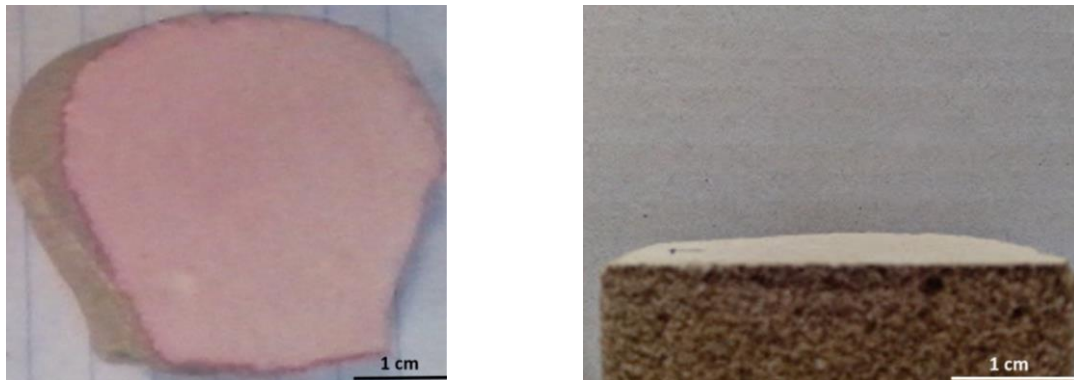
foi indexada somente picos de Al_2O_3 , a fase cristalina romboédrica foi predominante com presença β alumina em menor intensidade, conforme ficha JCPDS (46-1212).

4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para se conhecer o comportamento da aplicação da tinta que são utilizadas nas paredes dos moldes com a finalidade de diminuir as reações metal/molde, algumas caracterizações foram realizadas para determinar a espessura da camada de tinta.

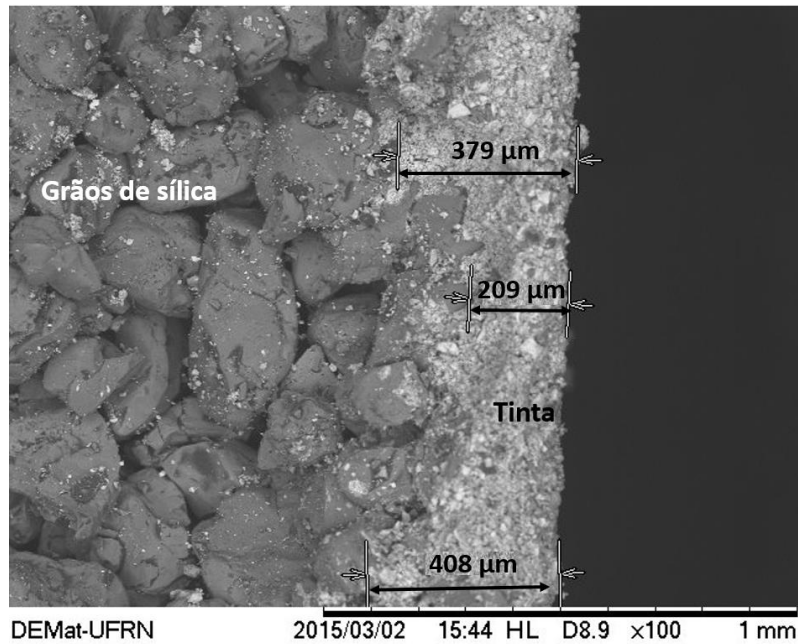
A tinta escolhida foi a base de zirconita. Verificou-se que a quando a tinta é aplicada com spray (sopro de ar comprimido) a camada apresenta a espessura média de $330\ \mu\text{m}$, porem a penetração da tinta não é muito eficiente, devido a pouca pressão exercida. A Figura 43 ilustra a amostra pintada e o corte transversal efetuado para análise da espessura.

Figura 43: Amostra pintada com tinta à base de zirconita (1 camada com spray)



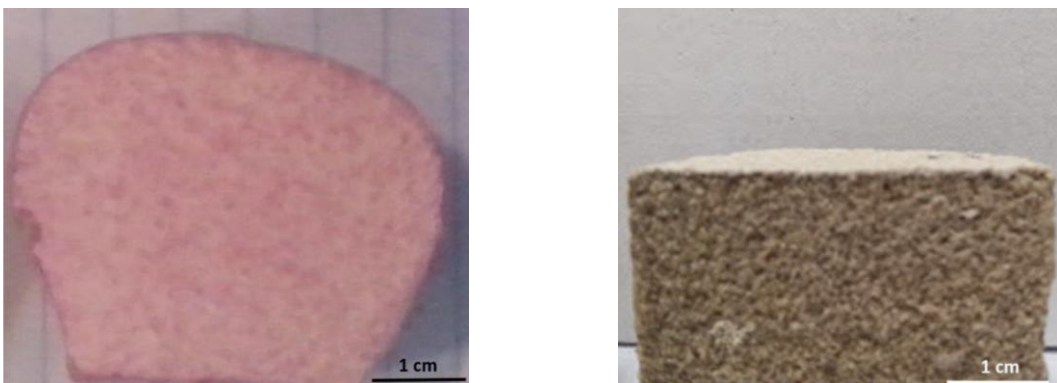
Foi verificado, de acordo com as análises de MEV, que houve baixa penetração da tinta entre os grãos de sílica e verificou-se que a espessura média da tinta foi aproximadamente de $330\ \mu\text{m}$ (Figura 44). A baixa penetração da tinta no molde, pode comprometer a ancoragem da mesma, ocasionando o seu desprendimento, resultando em defeitos nas peças fundidas (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

Figura 44: MEV para determinação da espessura da camada de tinta com aplicação de spray



O mesmo procedimento realizado com aplicação de tinta com spray foi realizado com aplicação de tinta com pincel. A Figura 45 ilustra a amostra do molde pintada com uma camada de tinta a base de zirconita e o corte transversal efetuada para análise da espessura. Verificou-se na microscopia eletrônica de varredura uma maior rugosidade na superfície da amostra a tinta foi aplicada com pincel.

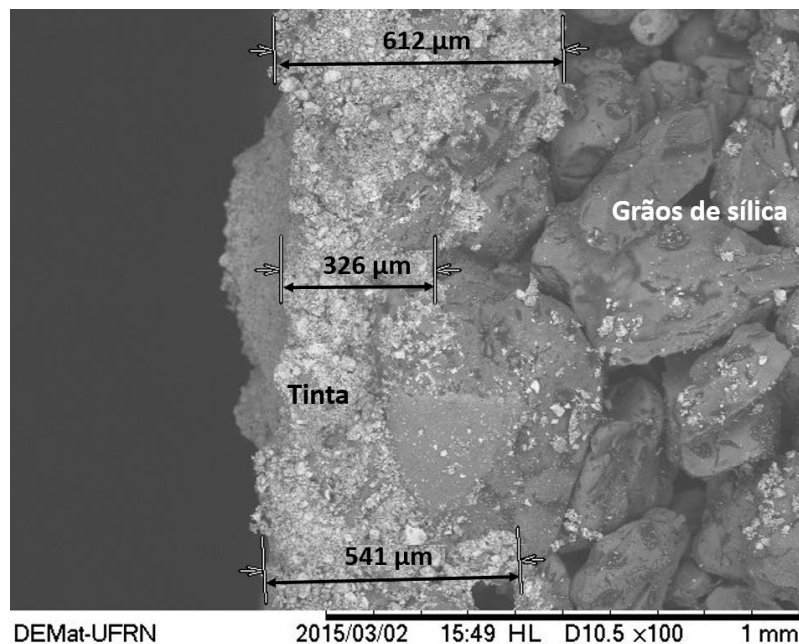
Figura 45: Amostra pintada com tinta à base de zirconita 1 camada com pincel



Para avaliar a espessura da camada de tinta, a amostra com corte transversal foi analisada no MEV. Nesta análise foi verificado que a tinta, quando aplicada com pincel, penetra mais entre os grãos de sílica e tem uma espessura média em torno de 493 μm (Figura 46). A maior espessura da camada de tinta quando aplicada com pincel se dá devido a força aplicada

pelo operador (NWAOGU; TIEDJE, 2011), porem este modo de pintura gera espessuras irregular da camada de tinta (PURSALL, 1970).

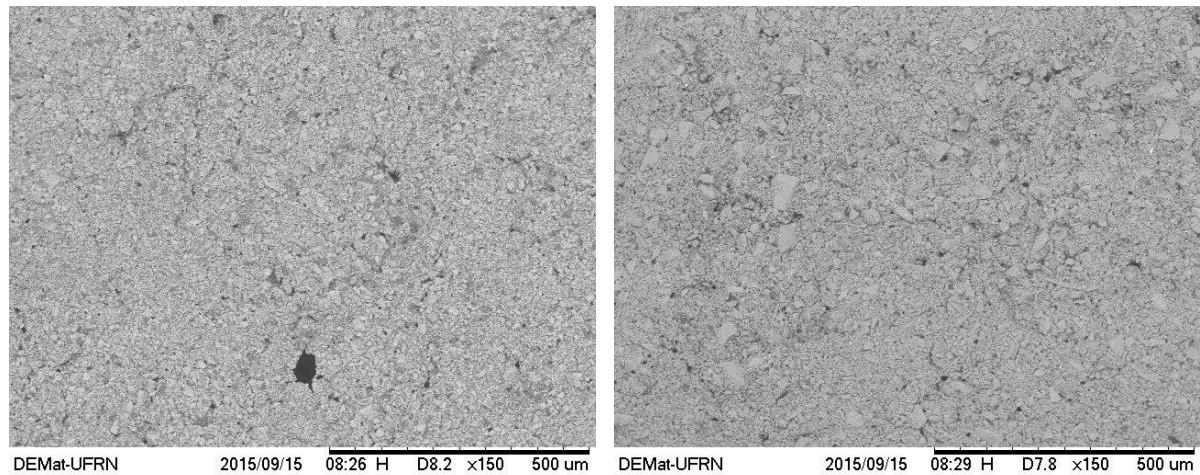
Figura 46: MEV para determinação da espessura da camada de tinta aplicada com pincel



Um dos fatores abordado no planejamento de experimentos foi a verificação da existência de melhoria na quantidade de defeitos superficiais das peças fundidas com a aplicação de 2 camadas de tinta ou 5 camadas de tinta, sendo considerado o modo de aplicação pincel e spray. Com análise estatística poder-se-á inferir se esses fatores (quantidade de camadas e tipo de aplicação) são significativos no processo.

Com o objetivo de analisar as diferenças entre os tipos de tinta, utilizou-se a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV para verificar o comportamento das superfícies da tintas. As Figuras 47a e 47b ilustram a superfície das camadas de tinta antes do vazamento do metal líquido.

Figura 47: Imagens MEV superfícies das tintas

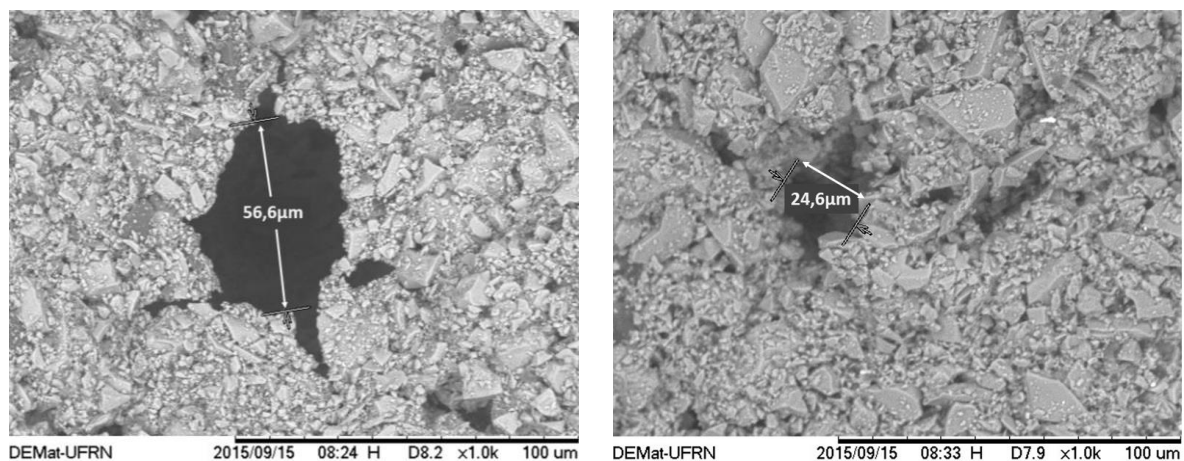


a) Zirconita

b) Alumina

Visualiza-se nas Figuras 47a e 47b que na camada de tinta à base de alumina há uma distribuição de poros mais uniforme e com poros menores, já na tinta à base de zirconita, os poros estão em menores quantidades, porém em tamanhos maiores. Nas camadas de tinta a base de zirconita foram encontrados poros da ordem de 50 µm, já os poros da tinta a base de alumina ficaram no máximo em 25 µm (Figura 48).

Figura 48: Análise dos tamanhos dos poros das camadas de tinta



a) Zirconita

b) Alumina

Nas Figuras 48a e 48b percebe-se a presença de poros maiores, onde podem influenciar diretamente nos defeitos superficiais analisados no presente estudo, pois os poros estão diretamente relacionados com a permeabilidade dos gases, onde esses podem ter dificuldade para sair do molde e conseqüentemente gerar alguns tipos de defeitos superficiais (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

4.3. Análises térmicas

As análises de termogravimetria – TG e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foram realizadas com a finalidade da compreensão do comportamento térmico das tintas e também do molde.

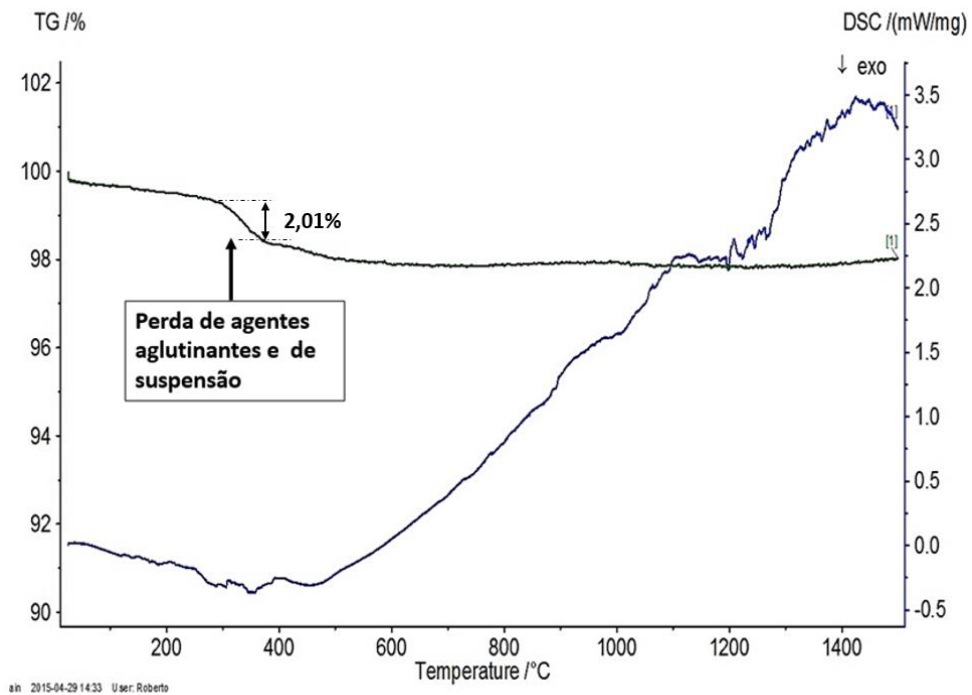
As seguintes amostras foram coletadas para as análises de TG e DSC:

- Tinta à base de Zirconita;
- Molde de areia de sílica ligados quimicamente com 1,2% de resina alquílica e 3% de óxido de ferro.

Essas amostras foram estudadas, pois são formulações recomendadas pelo fabricante e muito utilizadas pelas empresas de fundição.

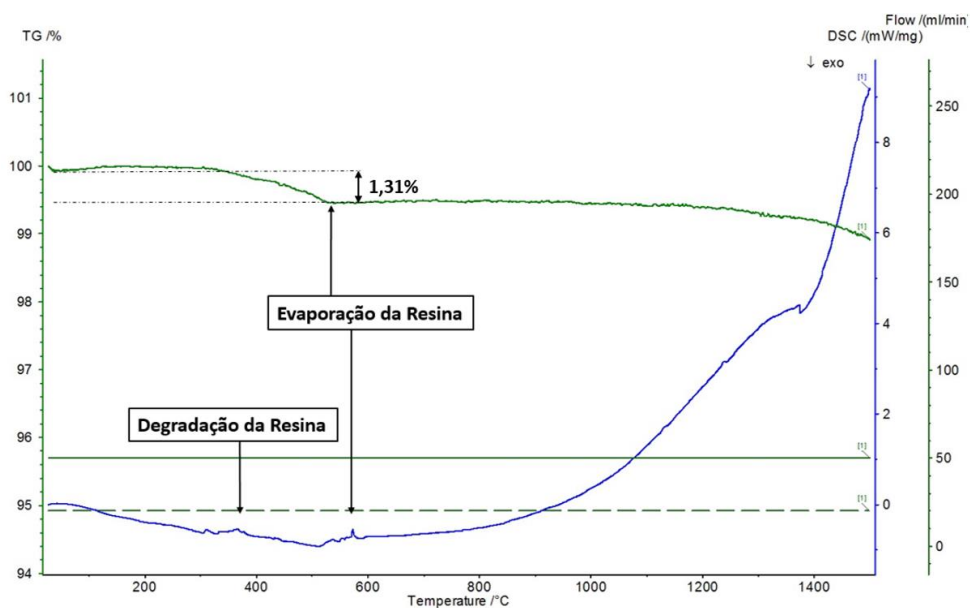
A Figura 49 ilustra o gráfico do comportamento térmico da tinta à base de zirconita. Percebe-se que a perda de massa da amostra ficou em 2,01%. Essa perda de massa, que ocorre na temperatura aproximada de 300°C, deve-se a perda principalmente dos agentes aglutinantes e de suspensão, que normalmente são materiais orgânicos (NWAOGU; TIEDJE, 2011). Na Figura 49 não ficou evidente um pico indicativo de fusão do material, pois a literatura demonstra que a temperatura de fusão da zirconita é aproximadamente 2500°C (AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ, 2012; LUZ; LINS, 2008), temperatura acima da limitação do equipamento (1500°C). Como esse material tem fusão a temperaturas mais altas, é muito aplicada em moldes de areia para fundição de peças de aço (SAMPAIO et al., 2001).

Figura 49: TG e DSC da tinta à base de zirconita



Assim como realizado na tinta refratária, foi efetuado a análise de DSC e TG para verificar o comportamento térmico da mistura do molde (areia de sílica + 1% resina + 3% Fe_2O_3), este comportamento é demonstrado na Figura 50.

Figura 50: TG e DSC mistura molde (areia de sílica + resina + Fe_2O_3)



Percebe-se, na Figura 50, que o pico na análise DSC em torno de 380°C refere-se a degradação da resina e o pico em torno de 580°C refere-se à evaporação da resina utilizada com

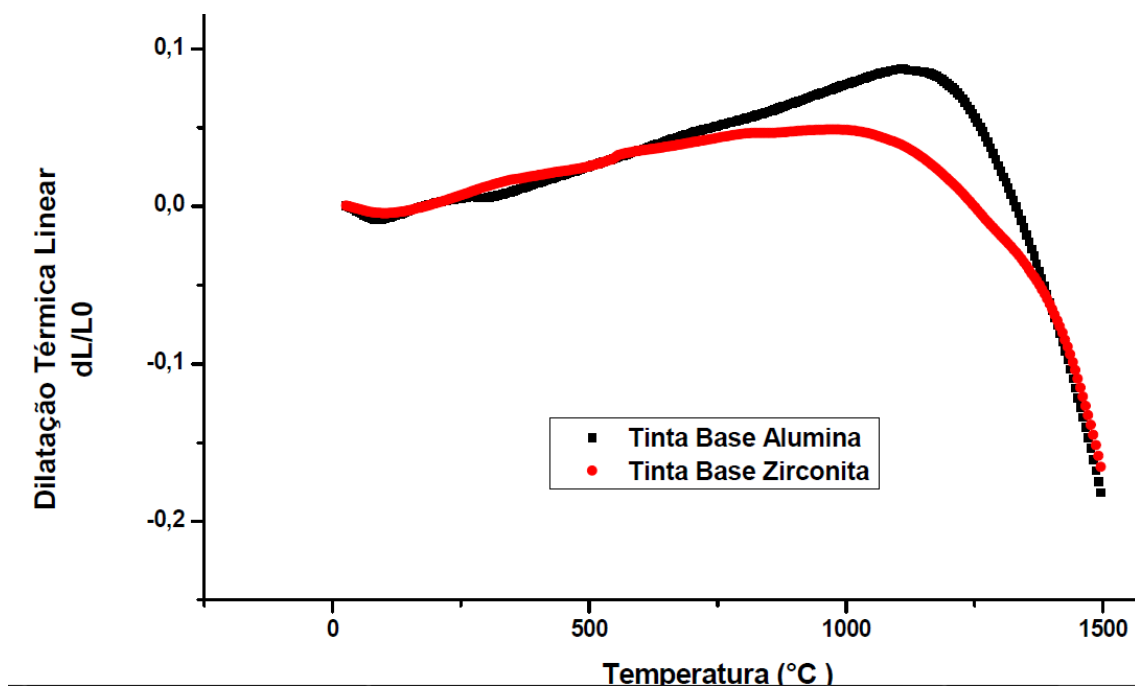
ligante durante a fabricação dos moldes. Nesta amostra a perda de massa ficou em 1,31%, e essa perda está relacionada com a degradação e posterior evaporação da resina alquídica e do catalisador.

Ainda na Figura 50 não foi possível verificar o pico característico de fusão da sílica, pois o a temperatura de fusão da sílica é de aproximadamente 1726°C (HLAVAC, 1982), temperatura acima da limitação do equipamento.

A sílica sofre diversas mudanças de fases ao longo do aquecimento, gerando expansão e retração dos grãos (BAKER; WERLING, 2003; THIEL, 2011) e a dilatação incompatível das tintas podem causar trincas e conseqüentemente afetar a qualidade da peças de aço fundida.

Assim outra análise térmica realizada foi a verificação da dilatação térmica das tintas e dos moldes. Visualiza-se na Figura 51 o comportamento da dilatação térmica das tintas.

Figura 51: Dilatação térmica das tintas

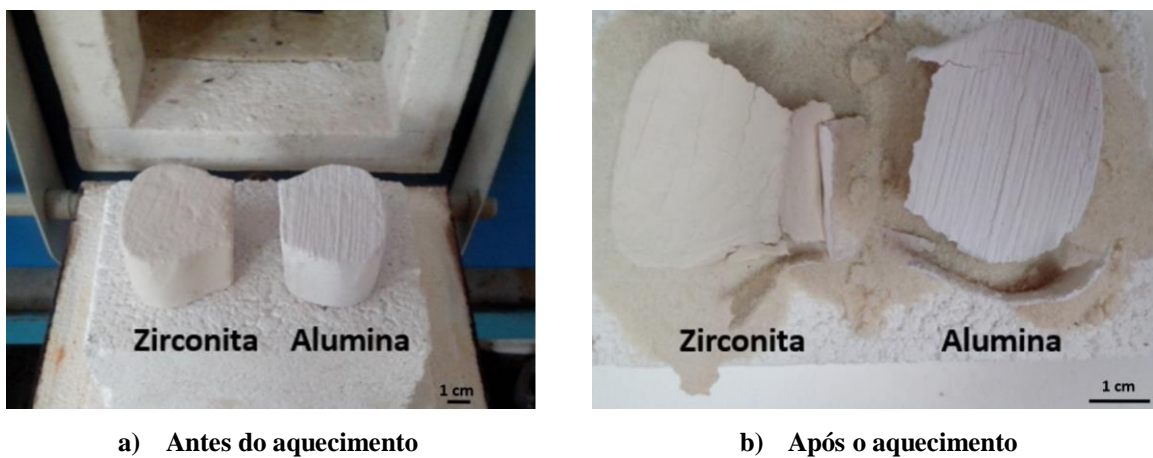


De acordo com a Figura 51, ficou evidente que em torno de 1200°C ocorre a maior diferença na dilatação dos tipos de tinta, sendo a tinta à base de alumina com maior dilatação, porem essa diferença está em 0,06.

Devido a limitações do equipamento, não se conseguiu verificar a dilatação térmica dos moldes de areia de maneira direta, pois a resina degrada a temperatura de aproximadamente

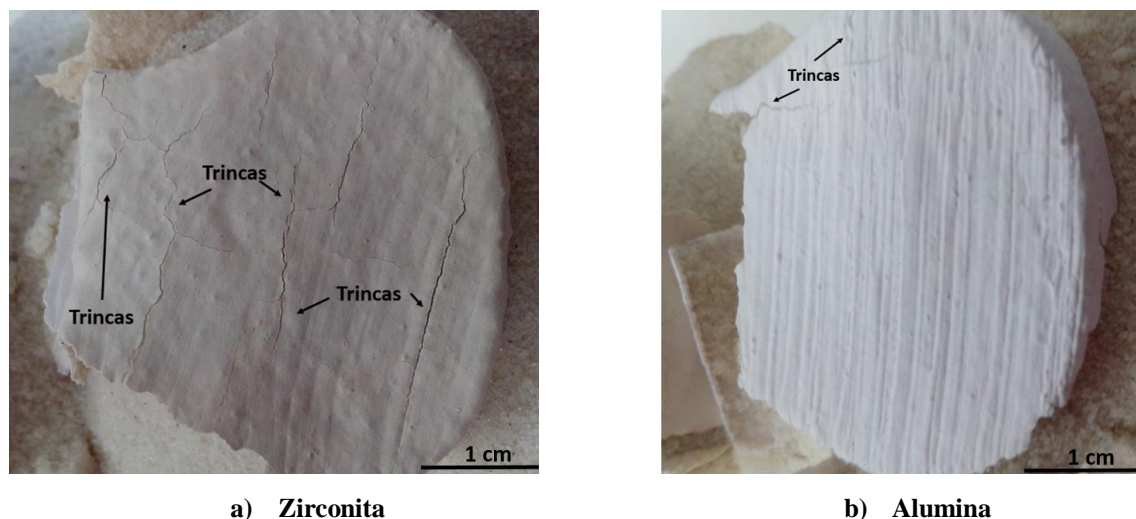
380°C. Um experimento de forma indireta foi realizado, onde uma amostra do molde de areia com 1,2% de resina e 3% de óxido de ferro foi revestido com duas camadas de tinta a base de zirconita e outra amostra com as mesmas configurações foi revestido com duas camadas de tinta a base de alumina. As amostras foram aquecidas em um forno até 1200°C. Após o resfriamento foi verificado, com auxílio de uma câmera fotográfica comum, a situação das camadas de tinta. A Figura 52a ilustra as amostras antes do aquecimento e a Figura 52b ilustra as amostras após o aquecimento.

Figura 52: Comparativo da dilatação térmica das tintas



Como a resina degrada a temperatura de 380°C, as amostras após o aquecimento colapsaram, conforme ilustrado na Figura 52b. Isso gerou o rompimento das camadas de tinta, tanto da tinta à base de zirconita como a base de alumina, porém ao visualizar mais a superfície das tintas, verificou-se que houve menos trinca na superfície da tinta que utilizava a alumina como material refratário, como visualizado na Figura 53.

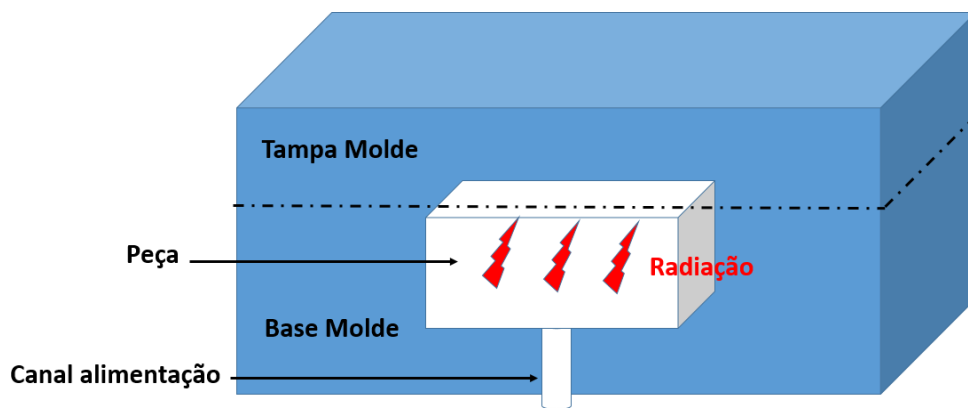
Figura 53: Análise superfície da tintas após aquecimento



Pode-se visualizar, com auxílio da Figuras 53a e 53b, a quantidade de trincas formadas na superfície após as mesmas serem submetidas ao aquecimento de 1200°C, com uma taxa de 10°C/min. É bem evidente que a tinta a base de zirconita (Figura 53a) formou mais trincas na superfície comparadas com a tinta a base de Alumina (Figura 53b). Essa presença de trincas pode estar relacionada com a diferença de expansão das tintas e dos moldes de areia e/ou devido a zirconita ser fortemente afetada pela radiação (PIRKLE; PODMEYER, [s.d.]; REINERS, 2005).

Muitos casos de defeitos visualizados neste estudo de caso ocorreram na tampa em partes da peça que correspondiam a tampa do molde. Estes defeitos podem estar diretamente relacionados com a radiação que ocorre no interior do molde. Quando peças grandes de aço são fundidas, o tempo de vazamento pode chegar ser da ordem de 3 a 5 minutos. Neste tempo a tampa do molde que é a última parte a receber o metal sofrerá o efeito de uma grande radiação térmica, podendo degradar a zirconita criando trincas na camada da tinta e consequentemente defeitos na peça final. A Figura 54 ilustra o processo de radiação ao qual a tampa é a mais afetada.

Figura 54: Esquema de propagação da radiação dentro dos moldes de areia



Fonte: Do Autor (2015)

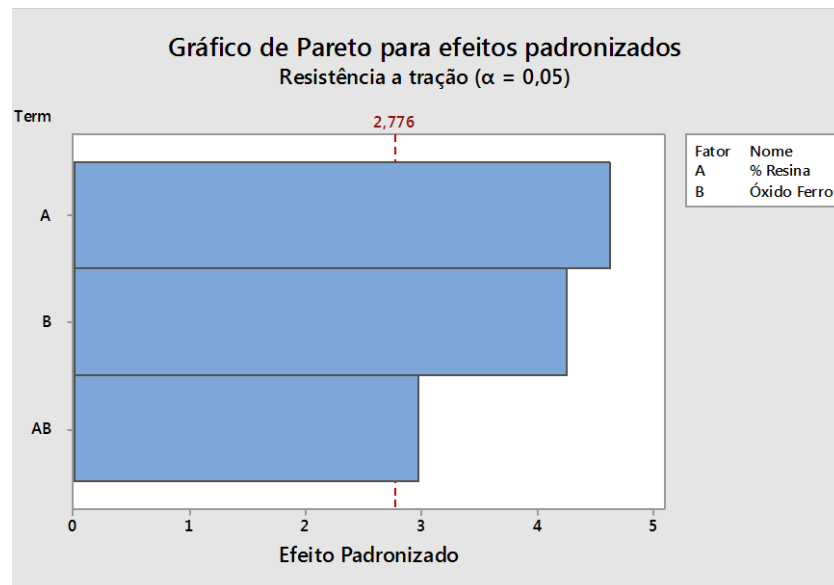
4.4. Resistência à tração

Outra análise preliminar realizada no ambiente fabril foi os ensaio de tração das amostras dos moldes. A variável resposta de interesse foi o valor da resistência a tração dos moldes, sendo as variáveis consideradas, o módulo de finura AFS e a adição de óxido de ferro na formulação (3%). Foi realizado um planejamento de experimentos completo com dois fatores com dois níveis de cada fator, sendo realizado duas repetições. Os níveis da porcentagem

de resina nas formulações dos moldes foram 0,8% e 1,2% sobre o peso da areia e os níveis do fator óxido de ferro foi considerado com ou sem.

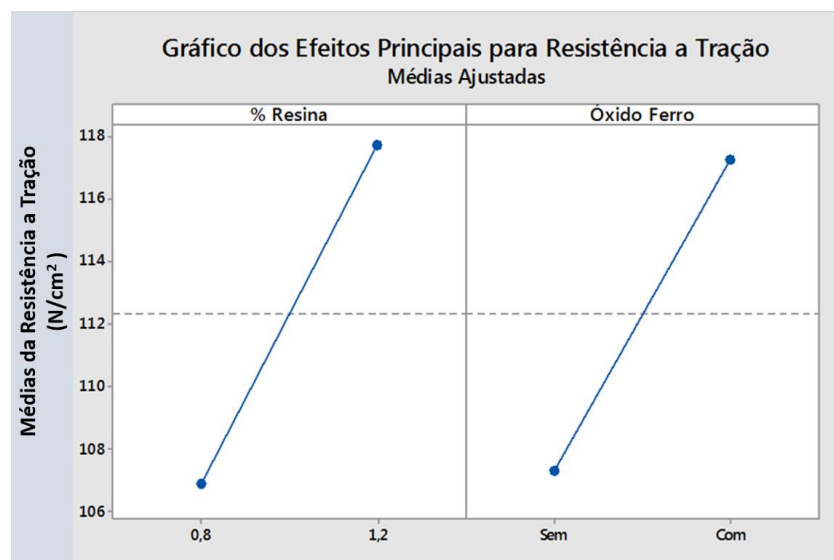
Com intermédio da Figura 55 pode-se visualizar que, com 95% de confiança, os dois fatores analisados interferem na variável resposta (resistência a tração). Também foi verificado que a interação (efeito de segunda ordem) dos fatores foram significativos.

Figura 55: Principais fatores que interferem na resistência a tração

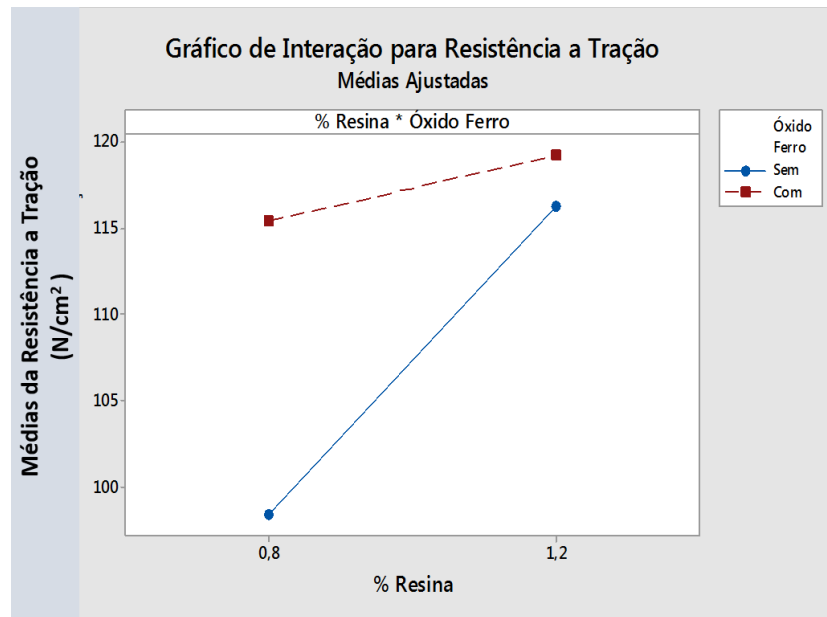


Os melhores níveis de cada fator esta apresentado na Figura 56a, sendo a porcentagem de resina em 1,2% refletindo em melhor resistência a tração e a adição de óxido de ferro na formulação dos moldes também refletiu em um aumento da resistência a tração.

Figura 56: Efeito da mudança de nível dos fatores para resistência a tração



(a) Efeito de primeira ordem



(b) Efeitos de interação

Visualiza-se na Figura 56b que a interação dos dois fatores também é significativa, ou seja, que a resistência a tração aumenta de forma mais acentuada quando não há presença de óxido de ferro na formulação. Assim essa interação deve ser considerada, pois a mudança de nível da porcentagem da resina na formulação do molde de 0,8% para 1,2% é muito mais sensível sem a presença do óxido de ferro.

O modelo para o planejamento de experimentos completo realizado foi:

$$\text{Resistência à tração} = 85,30 + 27*A + 22,35*B - 17,38*A*B$$

Onde,

A= Porcentagem de resina utilizada na formulação do molde

B= Adição de 3% de óxido de ferro na formulação do mole.

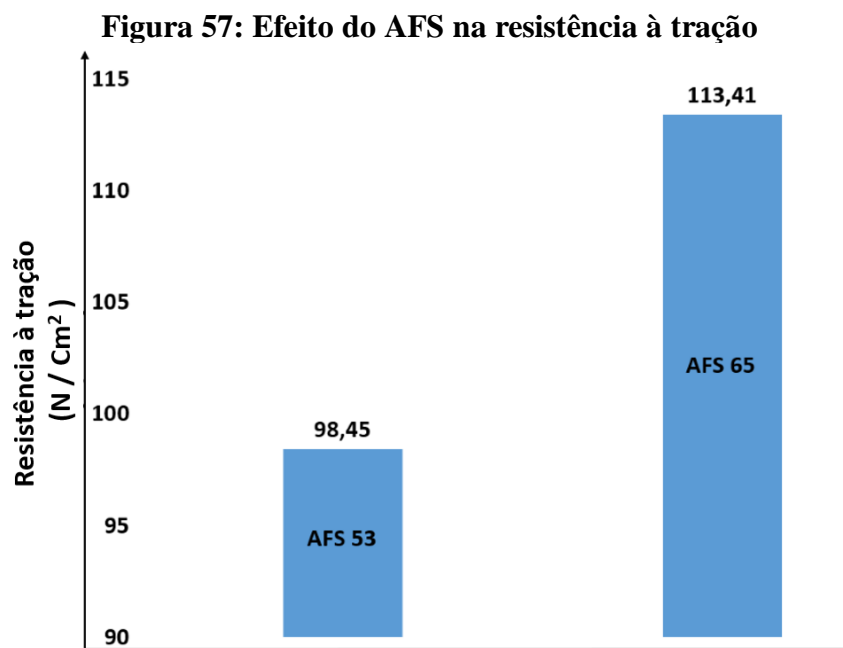
Esse modelo linear obteve o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,923, ou seja, 92,3% da variação da resistência a tração pode ser explicada pelas variáveis analisadas no estudo (% resina e adição de óxido de ferro)

Ainda buscando mais detalhes sobre a influência da areia no processo, uma boa areia de moldagem deve conter uma porcentagem e distribuição de grãos de vários tamanhos, incluindo grãos finos e grossos. O módulo de finura AFS dá uma indicação do diâmetro médio do grão

em um determinado lote de areia, sendo que valores altos correspondem a partículas de diâmetros pequenos (SANDERS, 1973)

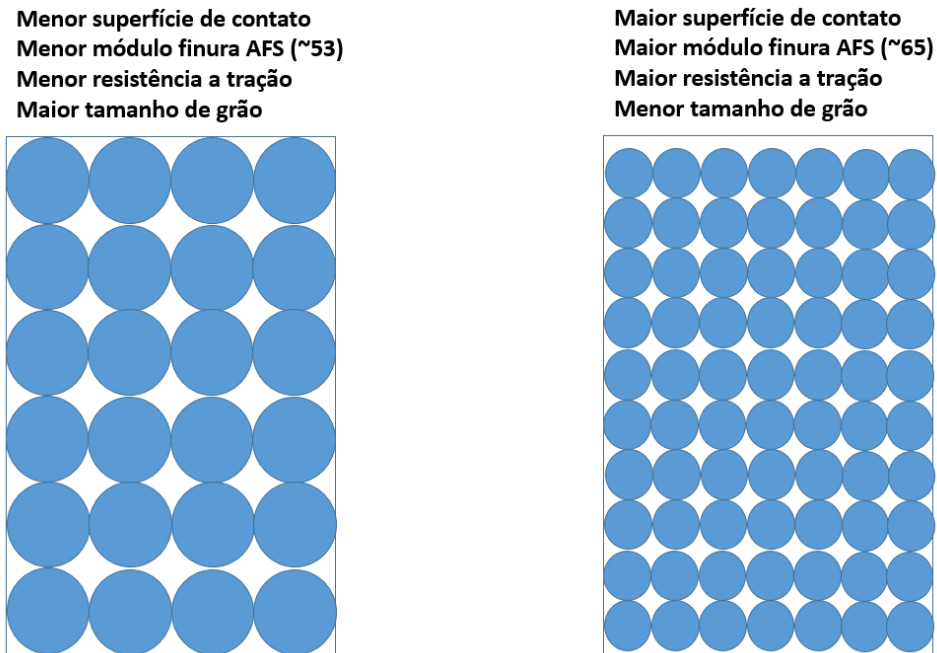
Visando verificar a interferência do módulo de finura AFS na resistência a tração, um experimento foi realizado com duas amostras com módulos de finuras diferentes (53 e 65).

Neste experimento alguns fatores foram fixados, tais como umidade (0,06%), teor de finos (1,05 %), sem adição de óxido de ferro, 0,8 % de resina na formulação do molde. Com isso foi possível verificar a real influência do tamanho de grão na resistência a tração de acordo com a Figura 57.



Foi verificado que as amostras com módulos de finura-AFS maiores resultam em maiores resistência a tração. Isso se dá, pois quanto menor o módulo de finura, maior o tamanho de grãos. Com grãos maiores, a superfície de contato entre os grãos diminui e conseqüentemente há uma diminuição da tensão a tração (CHASTAIN, 2004) . A Figura 58 demonstra uma ilustração que ocorre com a mudança do módulo de finura.

Figura 58: Relação módulo finura-AFS x tamanho de grãos



Fonte: Do autor (2015)

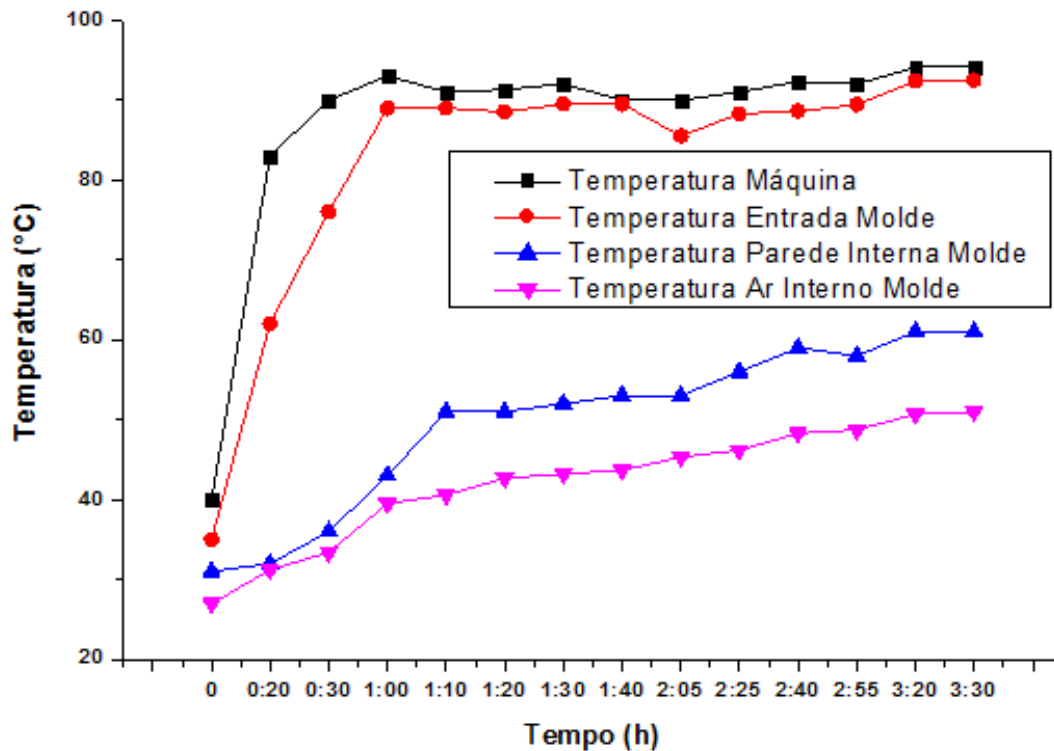
A função da resina é aderir um grão no outro e quando o tamanho de grão é menor, temos maior superfície de contato, e conseqüentemente uma maior resistência a tração, porém visando um ponto ótimo, não se pode ter grãos muito pequenos, pois exige maior consumo de resina, para cobrir todos os grãos (BEÑO et al., 2014).

Apesar de módulo finura maior resultar em um melhor resultado na resistência a tração, utilizou-se o módulo de finura AFS de 53 devido a limitação na obtenção de areia com outro módulo de finura de forma mais viável.

4.5. Análise da influência do ar quente nos moldes antes do vazamento

Outro fator analisado no planejamento de experimentos com parcelas subdivididas foi a presença do ar quente nos moldes antes do vazamento. Para se entender melhor esse fator, realizou-se um estudo mais detalhado. Assim analisou-se as temperaturas da saída de ar do equipamento, da entrada de ar do molde, da temperatura da parede interna do molde e também do ar no interior do molde. Os resultados foram agrupados na Figura 59.

Figura 59: Evolução da temperatura durante aplicação do ar quente nos moldes antes do vazamento



De acordo com a Figura 59, foi verificado que após uma hora de utilização a temperatura do ar na entrada do molde estabilizou em 90°C. Foi verificado também que apesar de uma distância de mais de 4 metros do aparelho até o molde, não há uma perda significativa, pois a mangueira tem uma camada isolante para evitar a perda de calor. Já a temperatura da parede do molde e do ar interno atingiram respectivamente as temperatura de 61 e 51°C ao longo de 3,5 horas de utilização do aparelho.

De acordo com as análises realizados verificou-se que a temperatura da parede do molde não é suficiente para se retirar uma umidade que por ventura venha a ficar aprisionada durante a pintura, sendo reforçado a atenção especial para a parte da secagem da tinta. A temperatura dentro do molde alcançou 51°C e com isso permitiu que a umidade do ar dentro do molde ficasse inferior a 20%. Isso pode contribuir com a eliminação de defeitos superficiais, uma vez que a umidade da planta fabril gira em torno de 70%.

4.6. Planejamento de experimentos fracionados com parcelas subdivididas

Os resultados de cada amostra do planejamento de experimentos foram agrupados na Tabela 10. Os dados agrupados elucidam a identificação da amostra, a réplica e o grau de cada

tipo de defeito (variável resposta), sendo 0 atribuída a amostra que não apresentou defeito e 5 a amostra que obteve maior severidade no defeito.

Tabela 10: Valores atribuídos a cada amostra para cada tipo de defeito

AMOSTRA	RÉPLICAS	IDENT. AMOSTRAS	DEFEITOS					
			EROSÃO	INCLUSÃO AREIA	POROSIDADE	PENETRAÇÃO	SUPERFÍCIE	UNIFICADO
1	1	1	1	1	2	0	1	1,00
1	2	2	2	0	5	0	1	1,43
2	1	4	1	0	0	1	3	0,86
2	2	5	2	0	0	1	2	1,00
3	1	7	3	4	3	1	1	2,71
3	2	8	2	3	2	0	0	1,71
4	1	B	2	2	2	1	4	2,14
4	2	C	1	1	1	1	3	1,29
5	1	E	4	1	2	3	3	2,57
5	2	F	3	2	3	4	5	3,14
6	1	H	3	3	2	0	4	2,57
6	2	I	5	5	2	0	2	3,43
7	1	L	0	3	0	5	4	2,14
7	2	M	1	1	0	3	4	1,57
8	1	O	2	2	1	3	3	2,14
8	2	P	4	2	0	2	2	2,29

Na Tabela 10, a coluna denominada unificado refere-se a média aritmética ponderada, em que os defeitos de erosão e inclusão de areia tiveram o peso 2 atribuídos. Os demais defeitos tiveram o peso 1. A atribuição do peso 2 aos defeitos de erosão e inclusão de areia ocorreu devido a esses tipos de defeitos resultarem em retrabalhos mais custosos, uma vez que necessita a utilização de soldas.

As amostras dos experimentos foram realizadas em duas corridas de aço SAE 1050 em dias diferentes, assim foram coletados os dados de vazamento e composição química do aço visando verificar a presença de fatores ruídos indesejados.

O metal utilizado nas corridas foi o Aço SAE1050, sendo a primeira corrida realizada em 19/08/2015. A temperatura de vazamento foi de aproximadamente 1563°C, sendo o primeiro molde vazado em 59 segundos e o segundo vazado em 55 segundos. A Tabela 11 elucida a composição química das peças obtidas na primeira corrida.

Tabela 11: Composição química do aço da primeira corrida dos experimentos

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,52	0,60	1,35	0,024	0,031	0,18	0,08	0,04	0,08	0,037

A segunda corrida ocorreu no dia 21/08/2015. Nesta corrida foram vazados os moldes 3 e 4 e sua composição química é representada na Tabela 12.

Tabela 12: Composição química do aço da segunda corrida dos experimentos

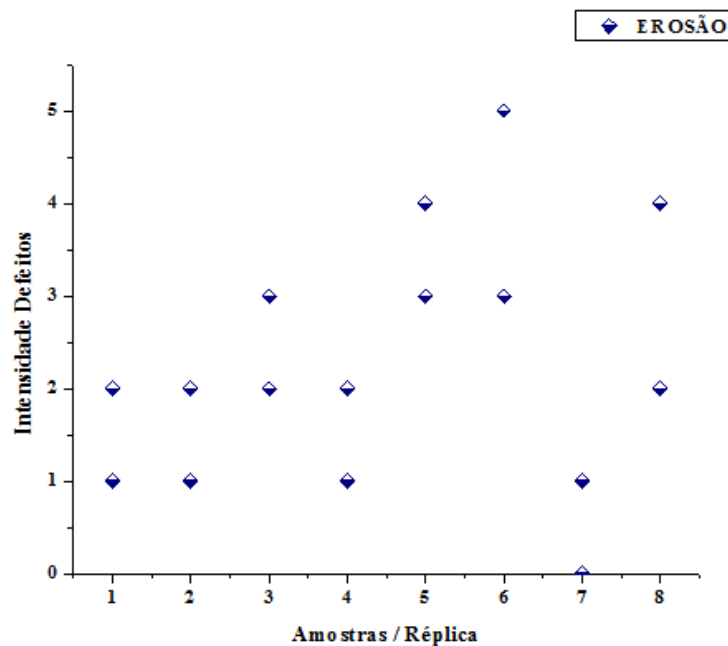
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,50	0,58	1,20	0,029	0,022	0,05	0,08	0,03	0,10	0,036

Na segunda corrida a temperatura de vazamento foi de aproximadamente 1564°C, sendo o primeiro molde vazado em 48 segundos e o segundo vazado em 46 segundos.

4.6.1. Defeito de erosão de areia

Neste defeito o metal líquido desgasta a superfície das paredes do molde, formando imperfeições na superfície da peça vazada após a solidificação. A erosão ocorre geralmente em áreas de fluxo turbulento, especialmente quando combinado com a reoxidação, altas temperaturas de vazamento e reações químicas (ZHANG; THOMAS, 2003).

Inicialmente verificou-se a dispersão dos valores dos defeitos de cada amostra e cada réplica, conforme ilustrado na Figura 60.

Figura 60: Dispersão dos valores obtidos para o defeito de Erosão de areia

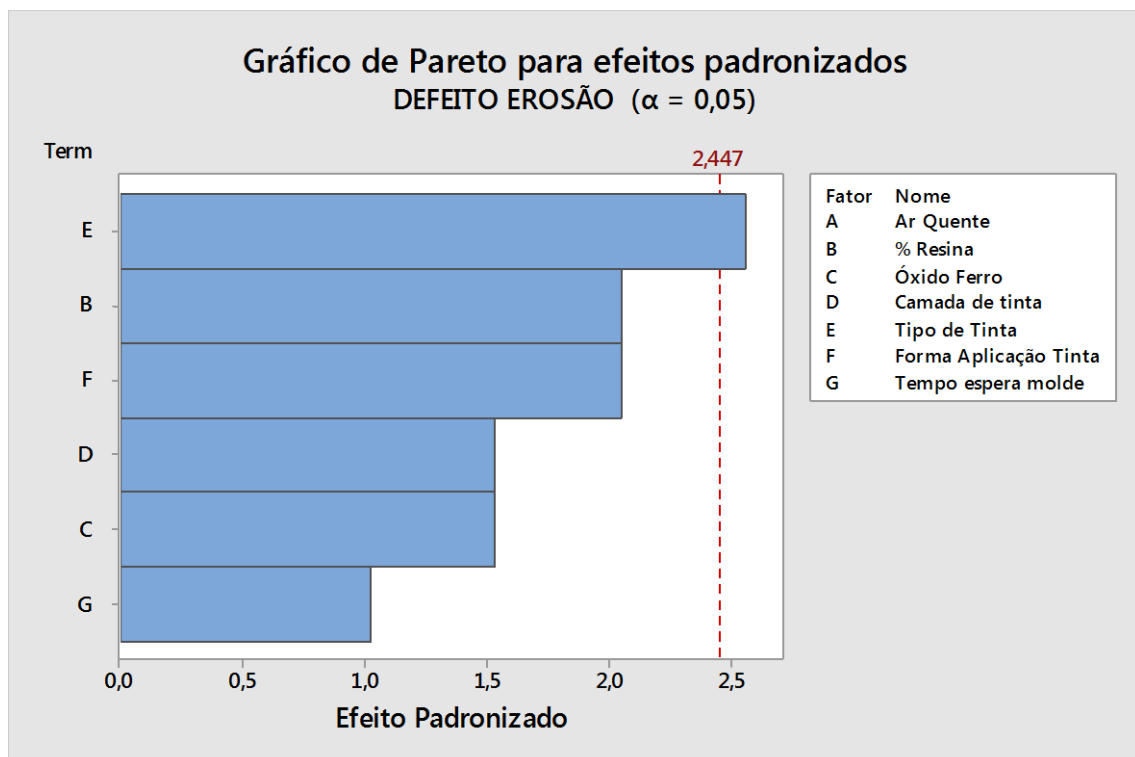
A Figura 60 ilustra a dispersão entre a réplicas da amostras 1,2,3,4,5 e 7 foram de 1 ponto. Já as amostras 6 e 8 tiveram uma variação de dois pontos entre os resultados das réplicas.

Essa variação deve-se a fatores ruídos, ou seja, fatores que não foram considerados no experimento e também devido ao processo em si, pois o processo apresenta interferência do operador (ALVES, 2009).

Com auxílio do planejamento de experimentos pode-se identificar (Figura 61) que os três fatores que mais influenciaram neste tipo de defeito foram em ordem de importância:

- Tipo de tinta;
- Porcentagem de resina na formulação do molde.
- Forma de aplicação da tinta.

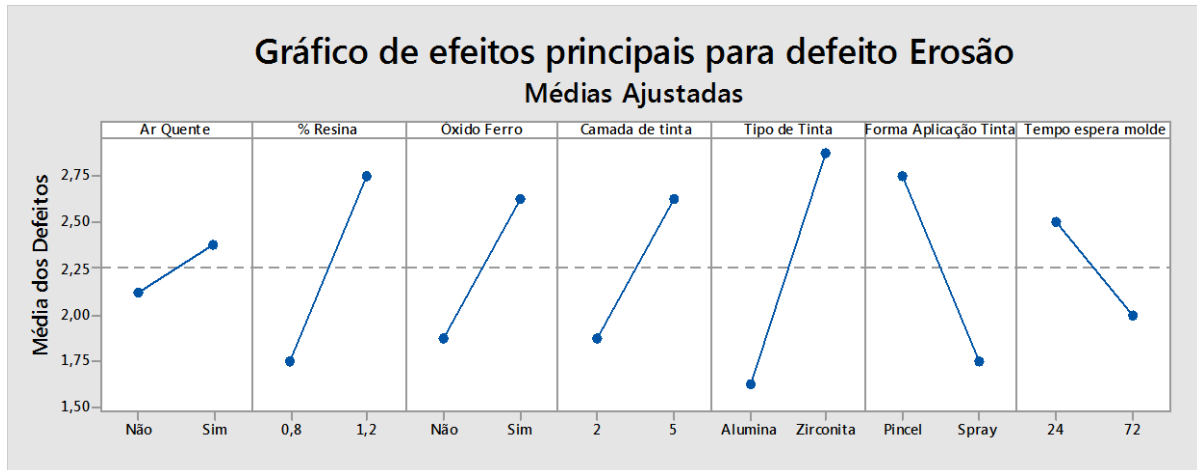
Figura 61: Principais fatores que interferem Defeito de Erosão de areia



Na Figura 61 visualiza-se que apenas o fator E (Tipo de tinta) é estatisticamente significativo na influência do defeito de erosão de areia, sendo que os outros não se pode inferir sobre seu efeitos neste tipo de defeito com um nível de confiança de 95%.

Apesar de não se poder afirmar que os outros fatores influenciam diretamente no defeito de erosão, pode-se ter uma indicação da tendência dos outros fatores como ilustrado na Figura 62.

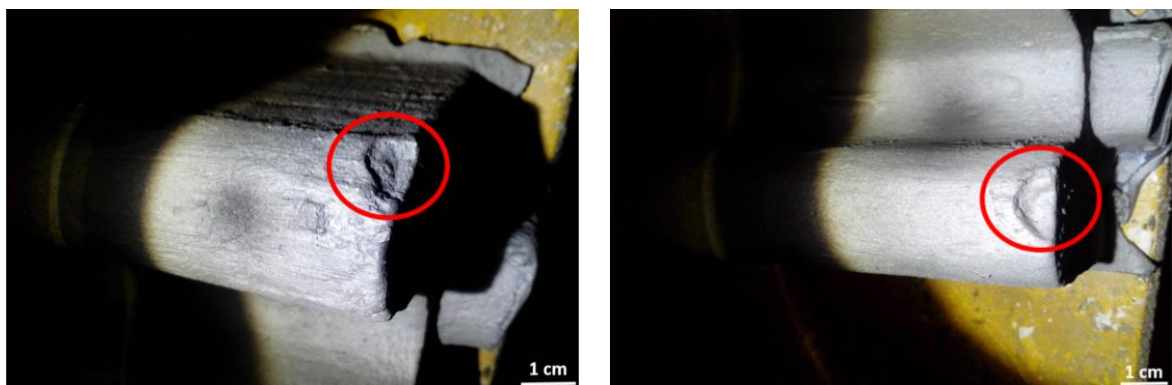
Figura 62: Efeitos principais para defeito de Erosão



O material refratário é o componente mais importante dos revestimentos cerâmicos (SHI, 2012) e é composto por substâncias ou minerais que têm pontos de fusão elevados, assim visualiza-se na Figura 62 que a tinta a base de zirconita foi o maior responsável pela ocorrência de erosão nos moldes de areia.

A amostra I, com as configurações dos fatores expostas nas Tabelas 8 e 9, foi a que mais apresentou o defeito de Erosão, as imagens do defeito são ilustrada na Figura 63.

Figura 63: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de erosão



A região que mais apresentou o defeito é uma região de fluxo turbulento, sendo um dos fatores que aumentam a chance de erosão (ZHANG; THOMAS, 2003). Apesar do esforço para garantir a padronização de todas as amostras, acredita-se que em nos cantos do molde a tinta base de zirconita se acumulou e não secou de maneira coerente, sendo que no momento do

vazamento, a água aprisionada no molde ou mesmo na tinta liberou gases ocasionando o rompimento da camada de tinta e por consequência o defeito de erosão, pois o molde ficou sem proteção.

Segundo Nwagou e Tiedje (2011) um revestimento refratário no molde ou macho não deve ter tendência a formação de bolhas e/ou trincas, porem verificou-se também na Figura 53 que a tinta a base de zirconita ocasionou um número alto de trinca, abrindo um caminho para o contato do metal líquido com o molde, aumentando dessa forma o defeito de erosão.

O mesmo defeito de erosão nos cantos da peça não foram identificados em peças com aplicação de tinta a base de alumina. Outra consideração é que como visualizado nas imagens de MEV (Figura 48) a superfície dos moldes cobertos com tintas a base de zirconita tiveram poros com tamanhos maiores, podendo ocasionar a erosão do molde nesses pontos.

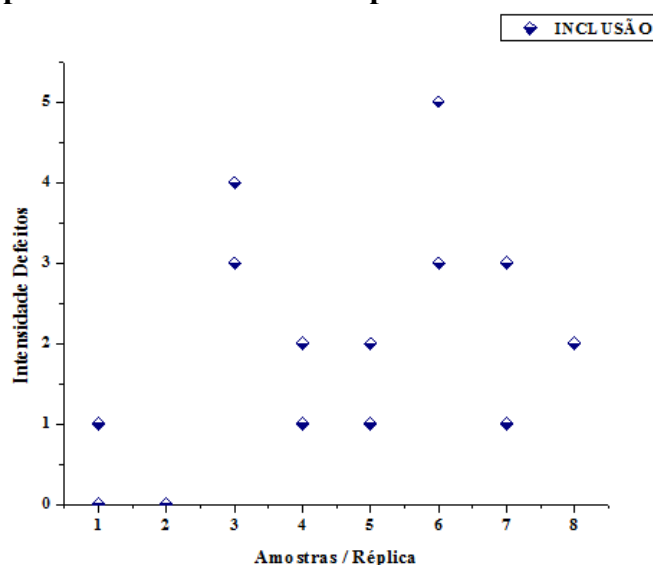
Quando ocorre o defeito de erosão do molde devido ao ataque do metal líquido, a areia desprendida é transportada pelo metal líquido e solidificada junto com o metal formando outro defeito superficial denominado inclusão de areia (BALDAM; VIEIRA, 2013).

4.6.2. Defeito de inclusão de areia

Neste tipo de defeito superficial, os grãos de sílica são transportadas junto com o metal líquido, sendo direcionadas para a superfície devido aos grãos de areia serem mais leves que o ferro (BALDAM; VIEIRA, 2013) .

Assim como para o defeito de erosão, inicialmente foi verificado a dispersão dos valores dos defeitos de cada amostra e cada réplica, conforme ilustrado na Figura 64.

Figura 64: Dispersão dos valores obtidos para o defeito de inclusão de areia

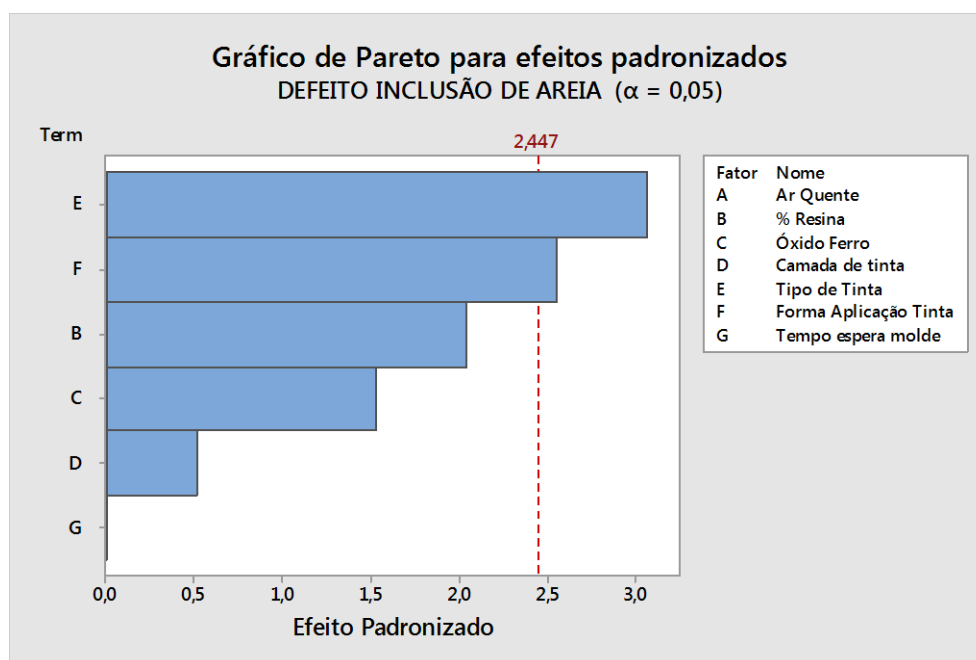


Por intermédio da Figura 64, foi verificado que as amostras 1,3,4,5 tiveram uma variação de 1 ponto entre a suas replicações. As amostras 6 e 7 tiveram variação de 2 pontos e as amostras 2 e 8 não tiveram variação entre as réplicas.

Com auxílio do planejamento de experimentos pode-se identificar (Figura 65) que os três fatores que mais influenciaram neste tipo de defeito foram em ordem de importância:

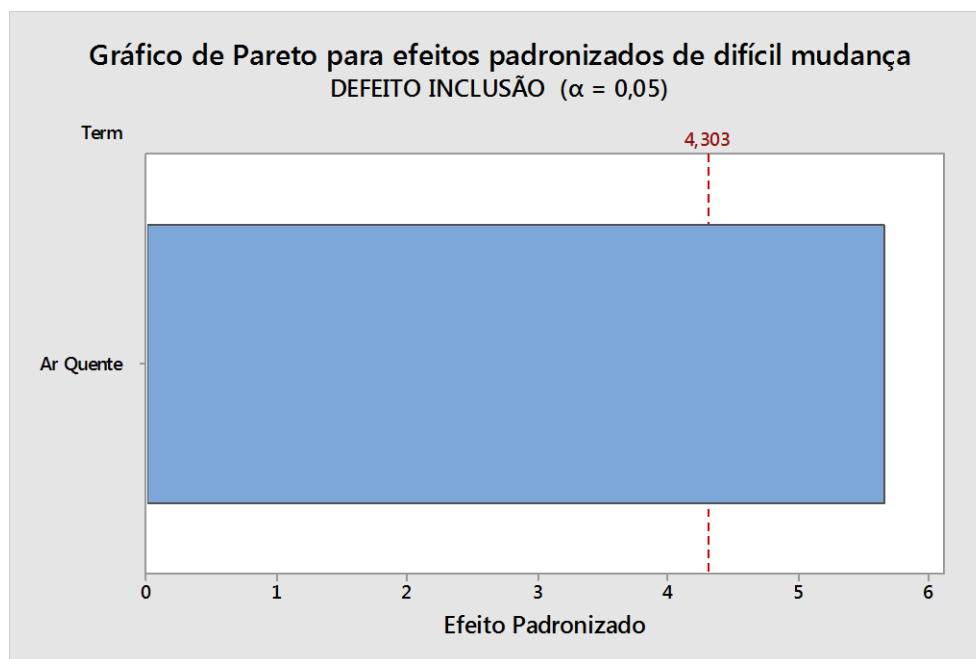
- Tipo de tinta;
- Forma de aplicação da tinta;
- Porcentagem de resina na formulação do molde.

Figura 65: Principais fatores que interferem defeito de inclusão de areia



Outro fator que influenciou no defeito de inclusão de areia foi a presença do ar quente no molde, conforme visualizado na Figura 66.

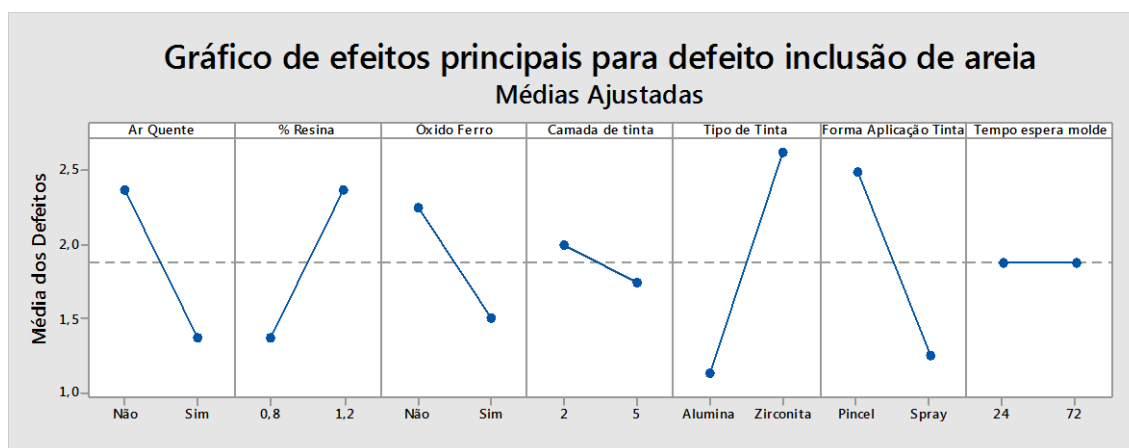
Figura 66: Efeito do ar quente no defeito de inclusão de areia



Foi verificado, nas Figuras 65 e 66, que os fatores E (tipo de tinta), F (forma de aplicação de tinta) e A (Ar quente) foram significativos para o defeito de inclusão de areia. Novamente o fator do tipo de tinta foi bem significativo e condizente com a literatura que demonstra que os defeitos de erosão e inclusão de areia estão diretamente relacionadas (BALDAM; VIEIRA, 2013).

Os níveis de cada fator buscando minimizar os defeitos de inclusão de areia é demonstrado na Figura 67.

Figura 67: Efeitos principais para defeito de inclusão de areia



Foi verificado, na Figura 67, que os níveis ótimos para minimizar os defeitos de inclusão de areia são:

- Ar quente: SIM
- % Resina: 0,8
- Óxido de Ferro: SIM
- Camada de tinta: 5
- Tipo de Tinta: Alumina
- Forma de aplicação Tinta: Spray
- Tempo de espera do molde: Indiferente

Estatisticamente, os fatores que realmente influenciam no defeito de inclusão de areia foram: Ar quente, Tipo de Tinta e Forma da aplicação tinta. Os outros fatores não podemos afirmar a influência, porém pode nos trazer informações para outros testes.

O conceito de injetar ar quente dentro do molde pronto antes do vazamento é de eliminar a umidade do ar, impedindo que partículas de água se fixem na superfície da tinta, uma vez que essas tintas são hidrocópias (AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ, 2012). Como a umidade do ar na indústria normalmente está acima de 70%, essa umidade dentro dos moldes podem trazer pontos de fragilidade na tinta e conseqüentemente facilitar a ocorrência de inclusão de areia.

Acreditava-se que o ar quente poderia auxiliar na secagem de camadas de tinta inferiores que por ventura ainda estivessem úmidas, porém como demonstrado na Figura 59 a temperatura da parede interna do molde após 3,5 horas de ar quente ligado atingiu no máximo 61°C e a temperatura do ar ficou em 51°C. Essa temperatura pode auxiliar a eliminar a umidade da camada externa da tinta, porém se camadas inferiores de tinta não secaram corretamente, não será possível.

Verificou-se também que a umidade do ar no interior do molde após a utilização do ar quente ficou em menos de 20%. Isso permite que essa umidade não seja aderida a superfície das tintas, favorecendo a qualidade da peça final de aço fundido.

A forma da aplicação de tinta também influenciou no defeito analisado e a melhor forma de aplicação de tinta foi como spray. Pursall (1970), salienta que a aplicação com pincel pode gerar muitos defeitos, pois existe uma grande dependência do operador.

A Figura 68 ilustra a imagem da amostra com o defeito analisado com mais severidade perante as outras analisadas.

Figura 68: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de inclusão de areia



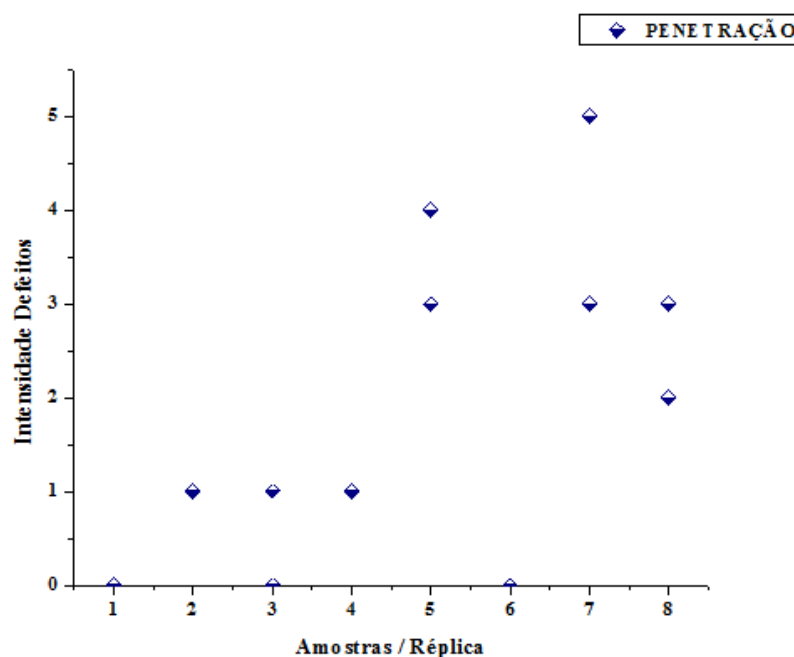
A amostra que mais foi afetada pelos defeitos de erosão e inclusão de areia foram as mesmas (amostra I), o que corrobora com a literatura.

4.6.3. Defeito de penetração do metal no molde

A penetração de metal no molde é uma condição em que o metal líquido entra nos poros dos moldes ou machos, além do ponto médio dos grãos de areia da superfície podendo ter oriundas de causas mecânicas ou reação (LANE et al., 2001).

Inicialmente verificou-se a dispersão dos valores dos defeitos de cada amostra e cada réplica, conforme ilustrado na Figura 69.

Figura 69: Dispersão dos valores obtidos para o defeito de penetração do metal no molde

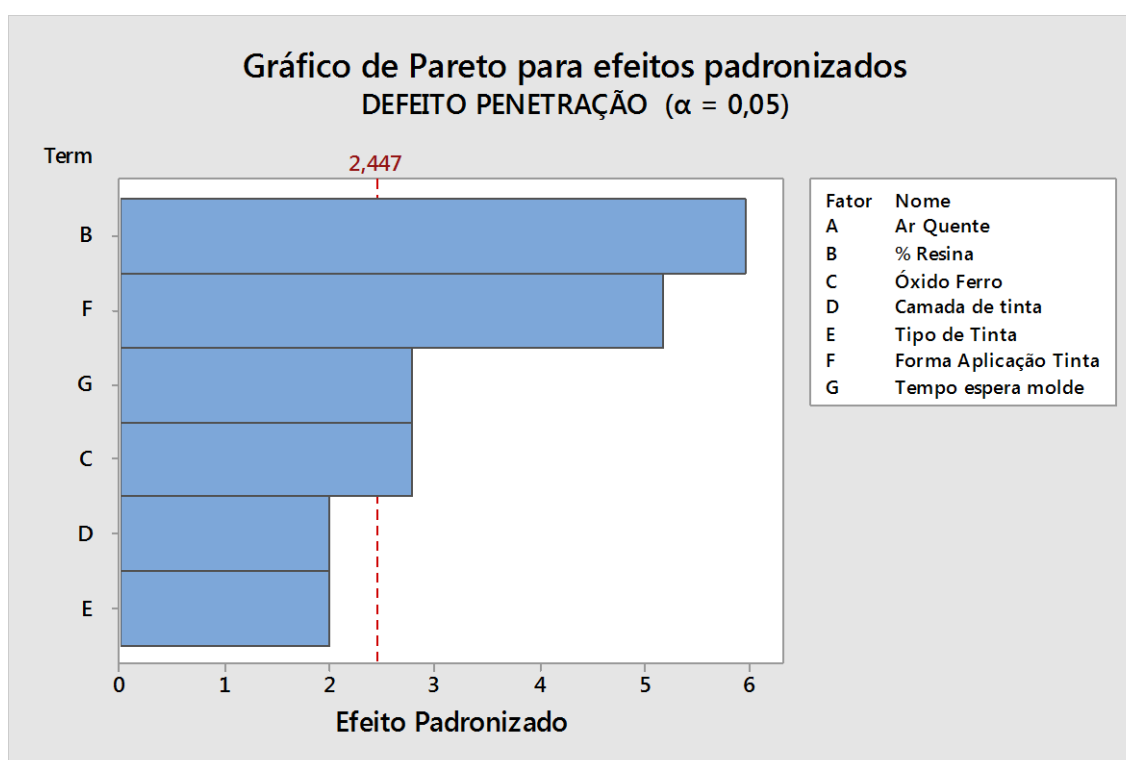


Foi verificado, na Figura 69, que as réplicas das amostras 1, 3 e 6 não apresentaram defeitos de penetração. Verificou-se também que não houve variação entre as réplicas das amostra 1, 2, 4 e 6. Já a variação entre as réplicas das amostras 3,5 e 8 ficou em 1 ponto e a variação entre as réplicas da amostra 7 ficou em 2 pontos.

Com auxílio do planejamento de experimentos, pode-se identificar (Figura 70) que os quatro fatores que mais influenciaram neste tipo de defeito foram em ordem de importância:

- Porcentagem de resina na formulação do molde;
- Forma de aplicação de tinta;
- Tempo de espera do molde pronto antes do vazamento;
- Inserção de óxido de ferro na formulação do molde.

Figura 70: Principais fatores que interferem defeito de penetração de metal no molde

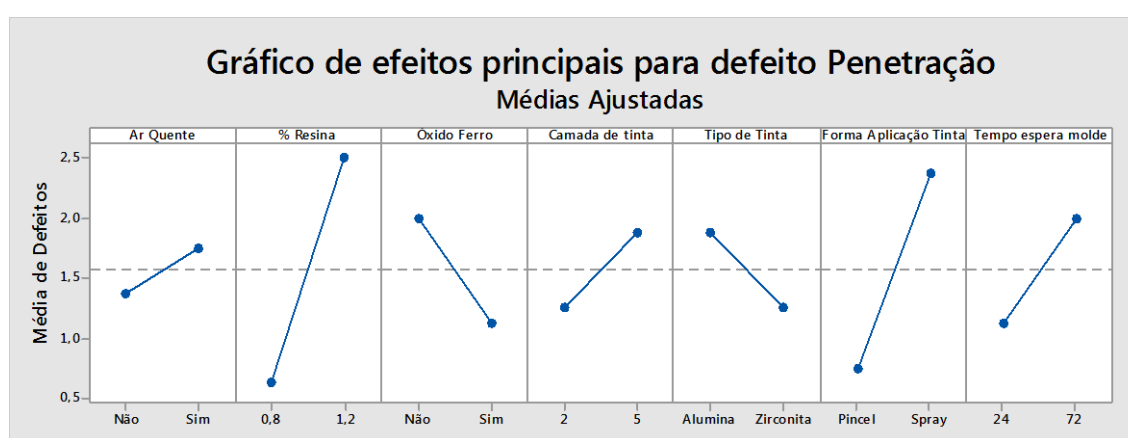


Os resultados do planejamento de experimentos demonstrou que os fatores A e F, respectivamente porcentagem de resina na formulação do molde e forma de aplicação da tinta foram os que mais influenciaram na variável resposta denominada defeito de penetração.

O fator C (inserção de óxido de ferro na formulação do molde) demonstrou ser significativo neste defeito de penetração e tem papel importante. A adição de óxido de ferro tem como função aumentar resistência a quente molde, pois quando a resina se degrada em altas temperatura, o óxido de ferro se funde, atuando como material para manter os grãos de areia unidos. (ALVES, 2009).

A Figura 71 ilustra os principais efeitos para a variável resposta penetração do metal no molde.

Figura 71: Efeitos principais para defeito de penetração do metal no molde



Percebe-se, na Figura 71, que a porcentagem de resina na sua configuração maior (1,2%) influenciou em um número maior de penetração nas peças e também que os moldes pintados com spray resultaram piores peças considerando o defeito de penetração.

Percebe-se também na mesma figura, que com a inclusão do óxido de ferro (3%) na formulação do molde traduz em uma redução da penetração do molde, pois como observados na literatura, a adição de óxido de ferro na formulação do molde aumenta a resistência a quente do molde (ALVES, 2009). A resina da formulação do molde próximo a superfície é degradada com o aumento da temperatura, porém o óxido de ferro faz o papel do ligante entre os grãos de areia, dessa maneira impede do metal líquido penetrar no molde.

Outro fator significativo no defeito de penetração foi a forma de aplicação de tinta, sendo a aplicação com pincel a mais eficiente. As imagens de MEV (Figuras 44 e 46) ilustram maior penetração da tinta, aumentando a espessura da camada de tinta quando a aplicação for efetuada com pincel. Nwaogu e Tiedje (2011) argumentam que a tinta penetra mais profundamente quando aplicada com pincel, pois existe uma força sendo aplicada pelo operador.

O último fator significativo no estudo desse defeito foi o tempo de espera do molde pronto até o momento do vazamento, sendo o tempo de espera de 24 horas com melhor

resultado. Como a tinta é hidrocópica (AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ; PRSTIĆ; ANDRIĆ, 2012), quanto mais tempo o molde pronto ficar no ambiente exposto a umidades do ar em torno de 70%, maior será a probabilidade de ocorrência de defeitos.

A Figura 72 ilustra a imagem da amostra (identificada com a letra L) com o defeito analisado com mais severidade perante as outras analisadas.

Figura 72: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de penetração do metal no molde

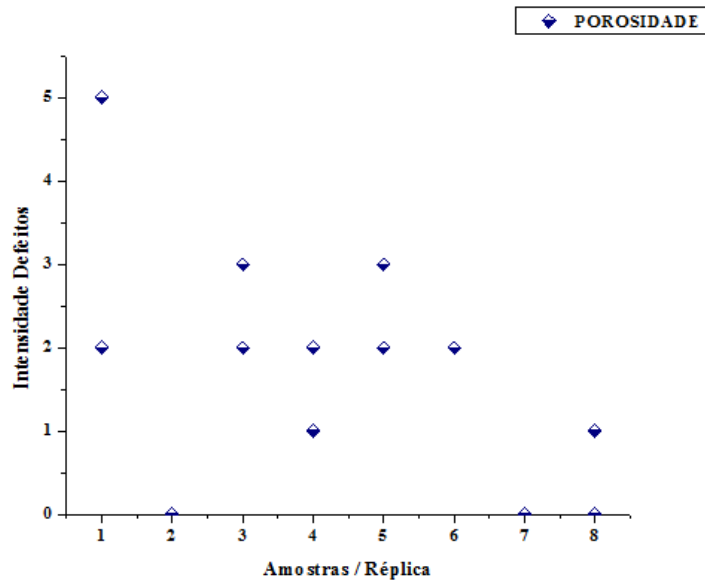


4.6.4. Defeito de porosidade

O defeito de porosidade oriundas de causas exógenas, que são ocasionados por gases produzidos pela reação metal-molde, que podem ter como causa a umidade nos moldes, aglomerantes com elevada tendência de liberar gases, pintura com forte tendência para liberação de gases, baixa permeabilidade dos moldes dentre outros (HABIBULLAH, 2011).

Novamente verificou-se a dispersão dos valores dos defeitos de cada amostra e cada réplica, conforme ilustrado na Figura 73.

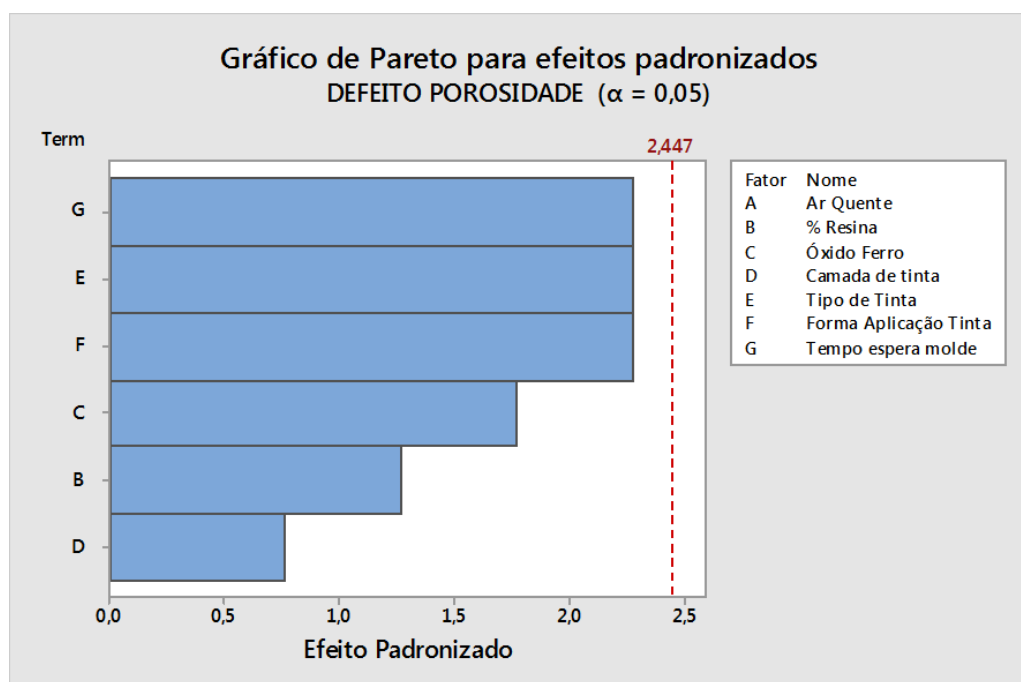
Figura 73: Dispersão dos valores obtidos para o defeito porosidade



Foi verificado, na Figura 73, uma variação maior entre as réplicas da amostra 1. As variação entre as réplicas das amostras 3,4,5 e 8 foi de 1 ponto e não houve variação entre as réplicas das amostras 2, 6 e 7. A análise da variação da resposta da réplicas auxiliar na análise de variância, possibilitando a identificação de fatores significativos para cada tipo de defeito analisado.

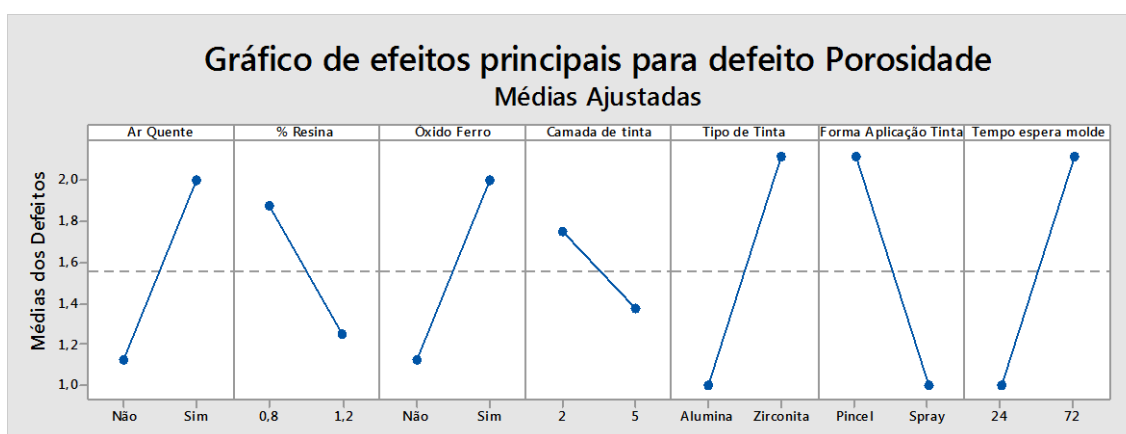
No planejamento de experimentos realizado verificou-se não haver fator significativo para o defeito de porosidade, conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74: Principais fatores que interferem defeito de porosidade



Apesar de não haver nenhum fator significativo para a presença do defeito de porosidade, há um indicativo de que os fatores G (Tempo de espera do molde antes do vazamento), E (Tipo de tinta) e F (Forma da aplicação de tinta) serem os mais relevantes em comparação com outros fatores. A Figura 75 ilustra os níveis ótimos de cada fator para minimizar os defeitos de porosidade.

Figura 75: Efeitos principais para defeito de porosidade



Mesmo sem poder inferir que alguns fatores interferem diretamente no defeito de porosidade, pode-se visualizar que o tipo de tinta a base de alumina trouxe melhor resultado. A tinta tem elementos de massa refratária, agentes de suspensão, agentes aglutinantes, aditivos além do veículo que no presente estudo foi considerado a água (NWAOGU; TIEDJE, 2011). Os mesmos autores ratificam ainda que os agentes aglutinantes, de suspensão e aditivos tem tendência a liberação de gases o que pode levar ao aumento de poros na superfície da peça.

Nas imagens de MEV (Figuras 48a e 48b) verificou-se que a tinta a base de alumina tem poros mais bem distribuídos quando comparadas com a tinta a base de zirconita, facilitando a liberação dos gases oriundos do processo. Assim essa tinta teve um resultado superior para o defeito de porosidade.

A forma de aplicação por spray resultou em menores índices de porosidade, isso se justifica, conforme Figuras 44 e 46, a espessura da camada de tinta com aplicação por spray é mais uniforme e com espessura menor quando comparada com a aplicação por pincel. A pintura com espessura muito grande pode ter a dificuldade para a permeabilidade dos gases e assim ocasionar o defeito de porosidade (NWAOGU; TIEDJE, 2011).

A Figura 76 ilustra a foto da amostra com maior quantidade de poros diante das outras analisadas. Pode-se perceber na superfície da peça as marcas do pincel.

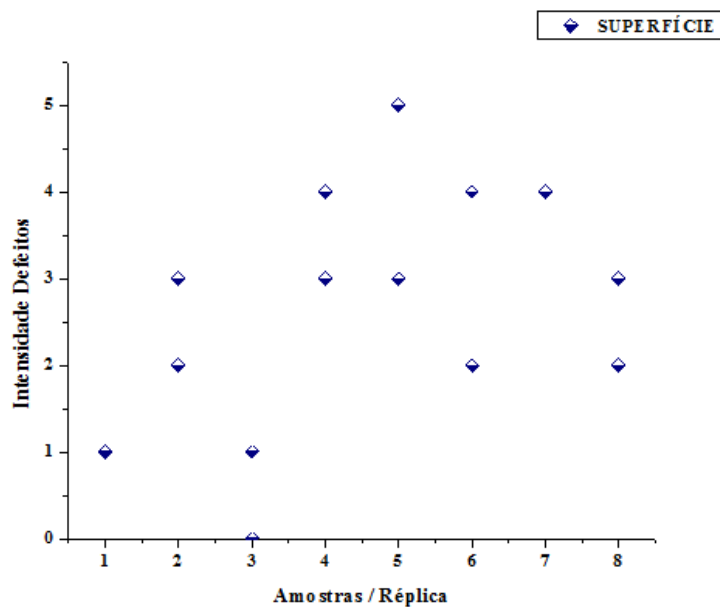
Figura 76: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de porosidade



4.6.5. Defeito de acabamento superficial

O acabamento superficial considerado como variável resposta corresponde a rugosidade da peça. A dispersão dos valores dos defeitos de cada amostra e cada réplica foi analisada e demonstrada na Figura 77.

Figura 77: Dispersão dos valores obtidos para o defeito acabamento superficial

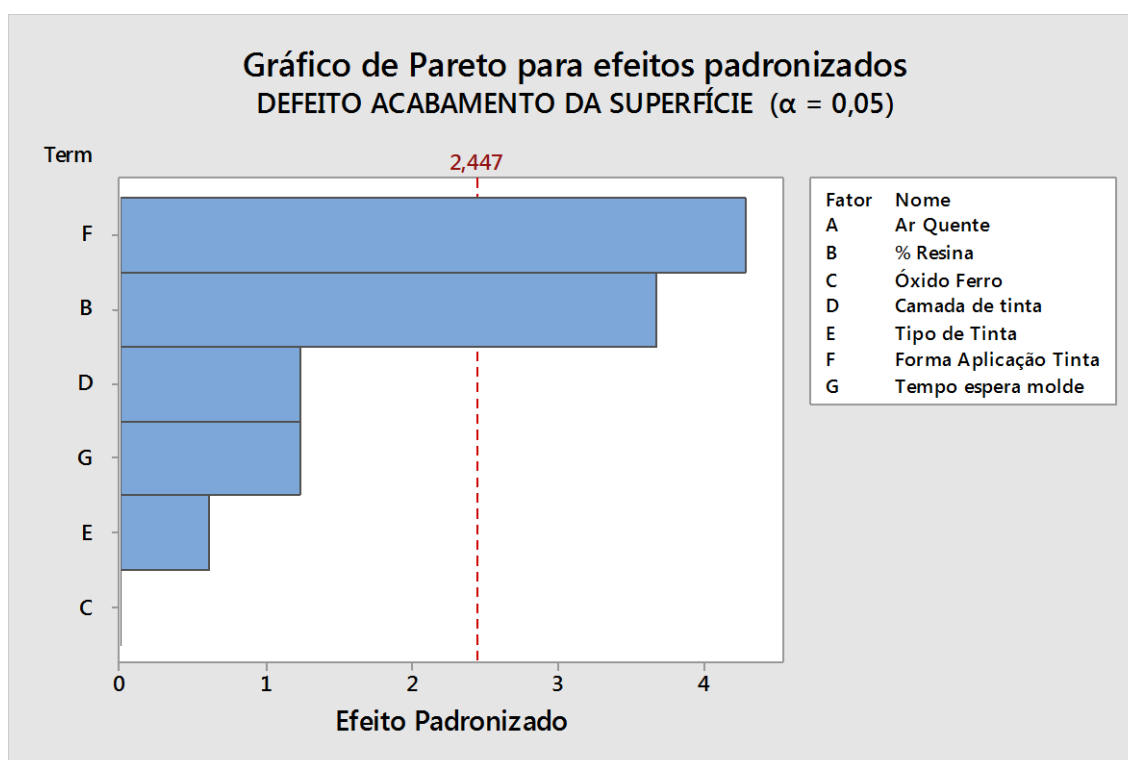


Foi verificado, na Figura 77, que não houve variação entre as réplicas das amostras 1 e 7. As réplicas das amostras 2,3,4 e 8 tiveram uma variação de 1 ponto e as demais amostras demonstraram variação de 2 pontos entre as réplicas.

No planejamento de experimentos realizado verificou-se os dois fatores que mais influenciaram na condição geral do acabamento das peças foram (Figura 78):

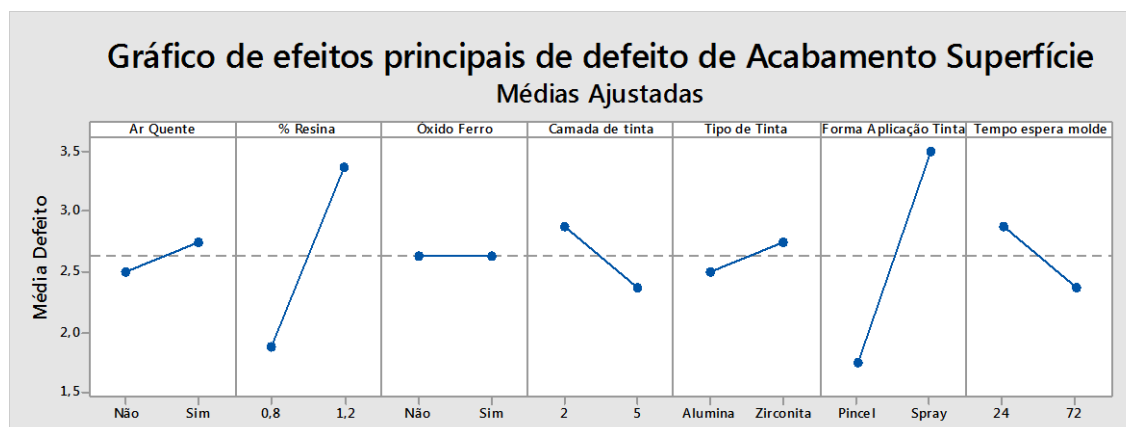
- Forma de aplicação de tinta;
- Porcentagem de resinas utilizado na formulação do molde.

Figura 78: Principais fatores que interferem no defeito de acabamento superficial



Os fatores F e A influenciaram na variável resposta considerando o nível de confiança de 95%. Em comparação com os outros fatores, há uma grande disparidade dos fatores F (Forma de aplicação tinta) e B (porcentagem de resina na formulação do molde), trazendo especial atenção para esses fatores. Na Figura 79 pode-se visualizar os efeitos principais quando a mudança de nível nos experimentos.

Figura 79: Efeitos principais para defeito de acabamento superficial



Foi verificado, na Figura 79, que ocorrem mudanças significativas, do acabamento superficial, quando os níveis dos fatores F e A são alterados do menor nível para o maior, ou seja, a aplicação de tinta com pincel e a formulação do molde com 0,8 % de resina resultou em uma superfície das peças mais uniforme e com menos rugosidade.

Apesar do fator porcentagem de resina indicar o menor nível (0,8%) devemos ter atenção especial neste critério, pois com a diminuição da porcentagem da resina na formulação do molde, gera a diminuição da resistência a tração, conforme Figura 56, podendo comprometer o transporte dos moldes no interior da indústria.

A amostra F foi a quem mais apresentou rugosidade na superfície, podendo visualizar o resultado na Figura 80.

Figura 80: Amostra dos experimentos que mais evidenciou o defeito de acabamento superficial

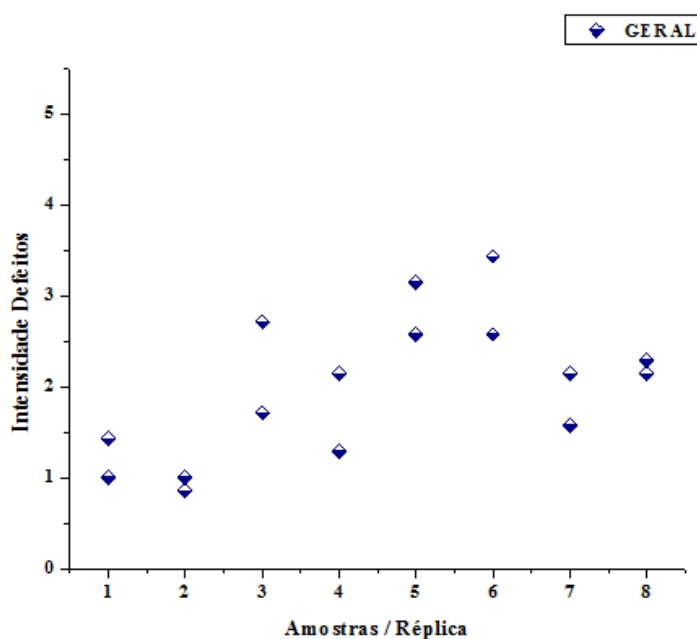


4.6.6. Análise unificada dos defeitos

Buscando reunir todas as variáveis respostas (defeitos), uma análise unificada foi realizada no intuito de se encontrar quais os fatores, relativos aos moldes, que minimizam os defeitos superficiais das peças de aço. Para isso foi realizada uma média ponderada dos valores (Tabela 10). Atribui-se peso 2 para os defeitos de erosão e de inclusão de areia, pois esses defeitos demandam mais tempo para correção, pois exigem a utilização de solda e acabamento. Para os demais defeitos atribui-se peso 1.

Assim como realizado nas outras variáveis respostas (defeitos) uma análise da dispersão dos resultados entre as réplicas de cada amostra foi realizada (Figura 81)

Figura 81: Dispersão dos valores obtidos para o análise unificada dos defeitos

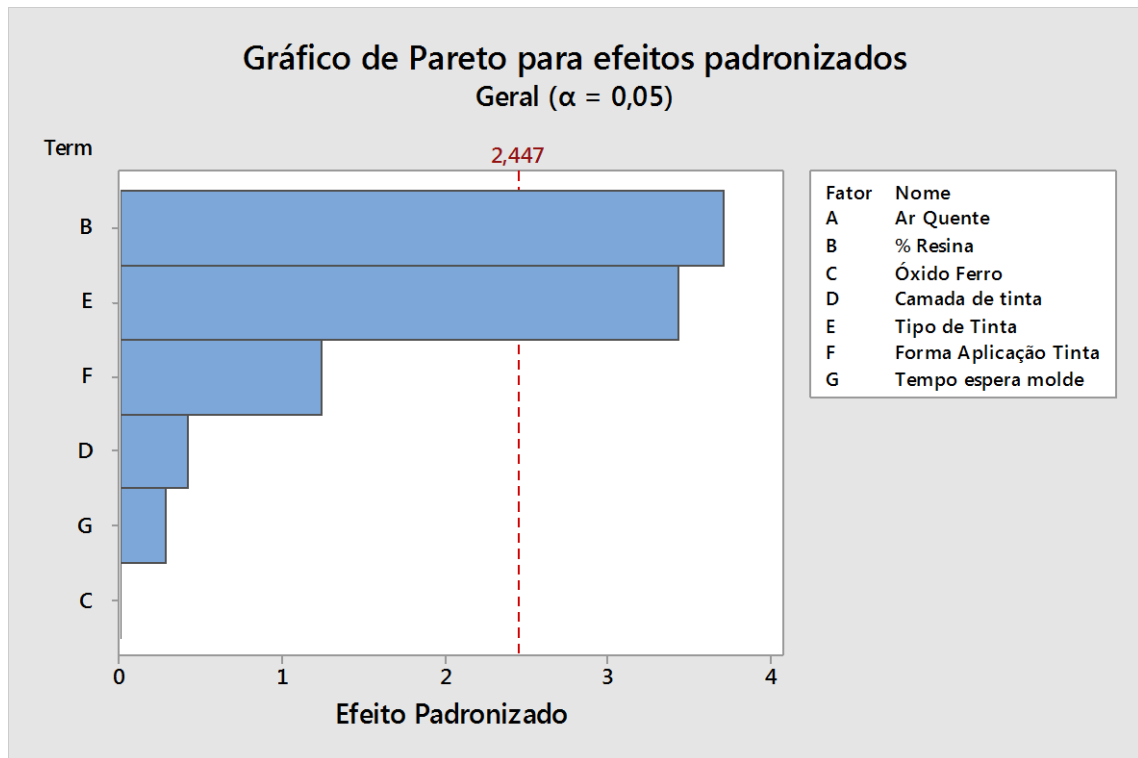


Visualiza-se na Figura 81 que a variação entre as réplicas de cada amostra ficou menor do que 2 pontos, sendo as réplicas da amostras 2 e 8 as que tiveram menor dispersão.

Foi verificado, na Figura 82, que os fatores que mais influenciaram nos defeitos unificados foram:

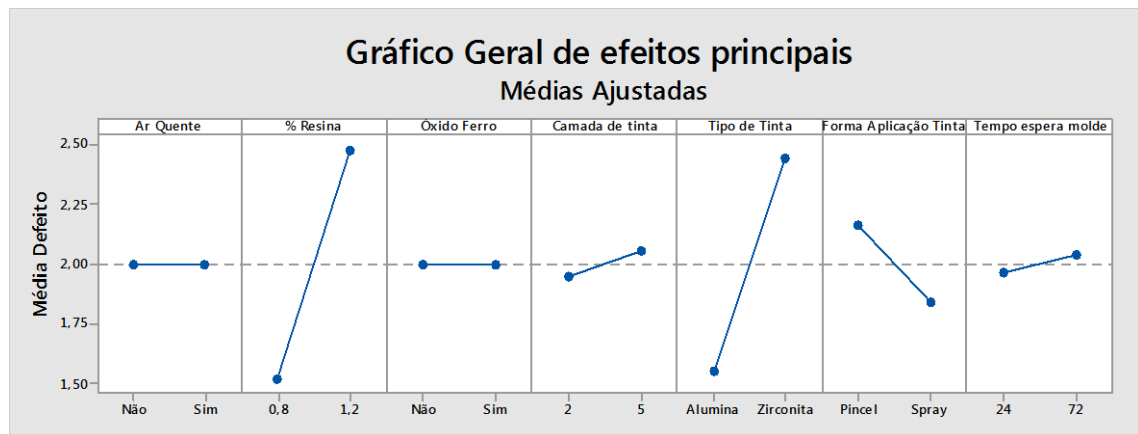
- Porcentagem de resina na formulação do molde;
- Tipo de tinta;
- Tipo de aplicação de tinta.

Figura 82: Principais fatores que interferem nas respostas dos defeitos unificados



Pode-se afirmar com nível de confiança de 95 % que os fatores que são significativos para os defeitos superficiais analisados neste estudo foram a porcentagem de resina na formulação do molde e o tipo de tinta (Figura 82), sendo que a inserção de 0,8% de resina na formulação do molde e tinta a base de alumina foram os níveis dos fatores que possibilitaram melhores resultados nas peças de aço, conforme visualizado na Figura 83.

Figura 83: Efeitos principais para defeitos unificados



Os fatores ar quente, óxido de ferro, camada de tinta e tempo de espera do molde não foram significativas, ou seja, a mudança de nível desses fatores influenciaram em nada ou quase nada nos defeitos superficiais das peças.

A tinta com material refratário de alumina contém propriedades suficientes para lidar com o metal utilizado no presente estudo, teve boa adesão ao substrato, uma boa permeabilidade para que o ar não seja aprisionado, com baixa tendência a ocorrência de trincas e razoável proteção contra penetração do metal, corroborando com aspectos relevantes apontados por Nwaogu e Tiedje (2011)

Após o fim da realização dos experimentos e sua avaliação, Montgomery (2013) destaca que é fundamental fazer o experimento de confirmação, ou seja, um experimento com os níveis ótimos de cada fator deverá ser realizado para confirmar os melhores resultados no acabamento superficial das peças de aço. Assim um experimento de confirmação foi realizado utilizando-se os seguintes níveis de cada fator:

- Ar quente: SIM;
- % Resina na formulação do molde: 0,8%;
- Óxido de Ferro: SIM;
- Camada de tinta: 2;
- Tipo de tinta: Alumina;
- Forma Aplicação de tinta: Pincel e Spray
- Tempo de esperado molde pronto antes do vazamento: 24 h.

O fator ar quente foi acionado neste experimento de confirmação, pois ele foi significativo no defeito de inclusão de areia (Figura 66), assim buscou-se com isso minimizar os defeitos de inclusão de areia.

Utilizou-se 0,8% no fator resina na formulação do molde, pois ele foi o melhor nível na análise dos defeitos unificados (Figura 82), penetração do metal no molde (Figura 70) e acabamento da superfície (Figura 78).

O fator óxido de ferro foi acionado também pois esse fator foi significativo no defeito de penetração do metal no molde (Figura 70).

O fator considerando o número de camada de tinta foi colocado em duas camadas por motivo de custos, uma vez que não foi significativo em nenhum dos defeitos analisados.

Utilizou-se para a confirmação a tinta a base de alumina, pois foi a tinta com melhor nível na análise dos defeitos unificados (Figura 82), Erosão (Figura 61) e Inclusão de areia (Figura 65).

O fator de tempo esperado do molde pronto antes do vazamento foi acionado em 24 horas pois este foi o melhor nível na variável resposta de penetração do metal no molde (Figura 70)

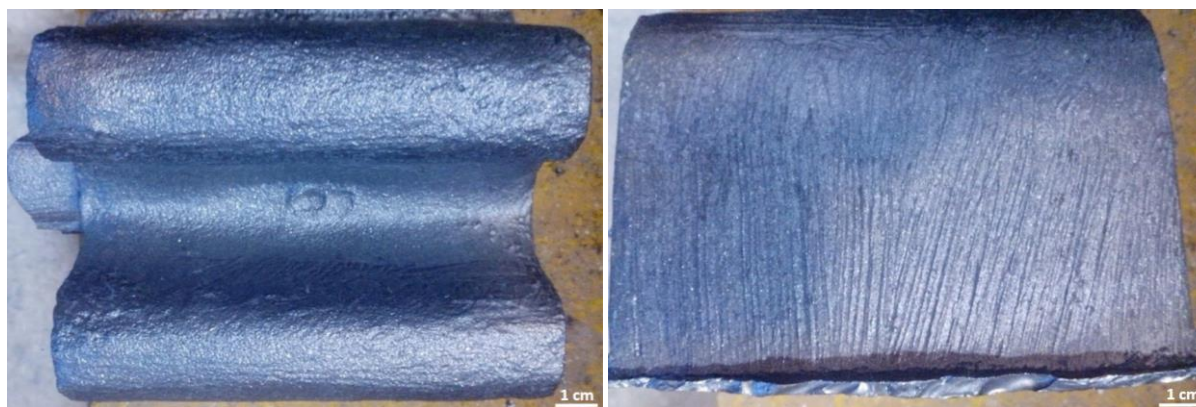
O experimento de confirmação ocorreu dia 13/10/2015, com a temperatura de vazamento 1563°C. A composição química é apresentado abaixo (Tabela 13).

Tabela 13: Composição química do aço dos experimentos de confirmação

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,52	0,55	1,39	0,034	0,020	0,10	0,09	0,02	0,18	0,040

Os experimentos de confirmação foram conclusivos, em que os mesmos não apresentaram defeitos de erosão, inclusão de areia, penetração, porosidade e o acabamento superficial ficou com excelentes resultados. Assim os experimentos de confirmação comprovaram os melhores níveis para os fatores analisados, trazendo o resultado esperado (Figura 84).

Figura 84: Amostra dos experimentos de confirmação



A Figura 84 ilustra uma das peças do experimento de confirmação, a qual não apresentou nenhum dos defeitos superficiais analisados no presente estudo. No experimento de confirmação buscou-se identificar a melhor forma de pintura (pincel ou spray), porém não foi conclusiva, pois as duas formas utilizadas para pintar os moldes resultaram na ausência de defeitos nas peças de aço fundido.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como principal objetivo a otimização dos níveis das variáveis do processo de moldagem visando a minimização da ocorrência de defeitos superficiais nas peças de aço em moldes de areia de sílica ligados quimicamente por processo de cura a frio e vazamento por gravidade.

Os fatores mais importantes diretamente relacionados com os moldes de areia identificados no presente estudo foram: Porcentagem de resina utilizado na formulação do molde; inserção de óxido de ferro na formulação do molde; tipo de tinta; forma de aplicação da tinta; quantidade de camadas de tinta; tempo de espera do molde pronto até o momento do vazamento e utilização de ar quente no molde antes do vazamento.

O estudo abordou os melhores níveis de cada fator estudado em diversos defeitos (variáveis resposta), sendo os defeitos considerados: Erosão; Inclusão de areia; Penetração de metal no molde; Porosidade e Acabamento superficial. Cada variável resposta trouxe uma configuração diferente dos fatores que minimizam os defeitos analisados. Assim para buscar a otimização geral do processo utilizou-se uma análise unificada dos defeitos. Assim os níveis dos fatores relacionados com os moldes que otimizam o processo de fundição com a minimização dos defeitos superficiais foram encontrados.

Experimentos de confirmação com os níveis ótimos de cada fator analisado foi realizado para ratificar a inexistência de defeitos superficiais. A minimização dos defeitos superficiais em peças de aço reflete em redução de custos de retrabalhos.

Evidenciou-se neste estudo que duas camadas de tinta são suficientes para minimizar os defeitos superficiais, sendo sugerido a empresa do estudo a utilização de duas camadas ao invés de três ou até cinco camadas utilizadas anteriormente no processo.

O estudo demonstrou que a utilização de 0,8% de resina na formulação do molde com adição de 3% de óxido de ferro não compromete a resistência a tração dos moldes e diminui a quantidade de gases liberados pela evaporação da resina. Com isso a quantidade de defeitos superficiais é minimizada.

O estudo demonstrou também que a tinta a base de alumina foi superior para minimizar os defeitos superficiais. Isso se justificou devido a tamanho de poros menores e mais bem distribuídos ao longo da camada.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Devido a limitação de custos ocasionado pela presente crise vivenciada no setor, os experimentos foram realizados nos corpos de prova das peças de aço, porém como trabalhos futuros recomenda-se a utilização dos fatores analisados neste estudo para a produção dos moldes para a produção de peças de aço da linha de produção normal da indústria.

Recomenda-se também analisar os efeitos do tempo de cura da resina antes do início da aplicação da camada de tinta, pois pode interferir no processo uma vez que a água presente nas tintas pode reagir com o catalisador isocianato, podendo ocasionar defeitos superficiais.

REFERÊNCIAS

ABIFA-CEMP. **Ensaio de determinação da distribuição granulométrica - CEMP - 081/1982**. São Paulo: [s.n.].

ABRAHAM, B.; CHIPMAN, H.; VIJAYAN, K. Some risks in the construction and analysis of supersaturated designs. *Technometrics*, v. 41, n. 2, p. 135–141, 1999.

ÁCIMOVIĆ-PAVLOVIĆ, Z.; PRSTIĆ, A.; ANDRIĆ, L. Ceramic Coating for Cast House Application. In: **Ceramic Coatings - Applications in Engineering**. [s.l.] Intech, 2012. p. 296.

AFS. **Mold & Core Coatings Manual**. 2. ed. [s.l.] American Foundrymen's Society Publishing, 2000.

AFS. **Nobake Casting**. Disponível em: <<http://www.afsinc.org/about/content.cfm?ItemNumber=6913>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

ALVES, L. H. D. **Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processo de fundição de aço ABNT 1030**. [s.l.] Unesp, 2009.

ANTONY, J.; KATE, M.; FRANGOU, A. A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. *The TQM magazine*, v. 10, n. 3, p. 169–176, 1998.

ARASU, M. Development of quality cost system in cast iron foundries. **Metal Casting Technologies - Foundry**, 2010.

ASK CHEMICALS. **BOLETIM TÉCNICO – ASK CHEMICALS**. Disponível em: <<http://www.ask-produtos.com.br/Modulos/Produto/PDF/PDF720.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2015a.

ASK CHEMICALS. **How to avoid Pinholes?** Disponível em: <<http://www.ask-chemicals.com/pt/fundicao/casting-defect-prevention/pinholes.html>>. Acesso em: 27 fev. 2015b.

BAKER, S. G. Evaluating Refractory Coatings: a Practical Approach. **Modern Casting**, v. 92, p. 21–23, 2002.

BAKER, S. G.; WERLING, J. M. Expansion Control Method for Sand Cores. **Transactions of American Foundry Society**, v. 111, n. 03-, p. 2–7, 2003.

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição: Processos e tecnologias correlatas**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2013.

BAMR. **Elcometer Wet Film Combs**. Disponível em: <<http://www.bamr.co.za/elcometer-154-wet-film-combs.php>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

BARKER, T. B. **Quality by experimental design**. New York: ASQC Quality Press, 1985.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. . **Como fazer experimentos**. 3. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007.

BEÑO, J. et al. Alternative Evaluation of the Properties of the Silica Sands. **Archives of**

Metallurgy and Materials, v. 59, n. 2, p. 735–738, 1 jan. 2014.

BOX, G. What can you find out from 8 Experimental Runs. **Quality Engineering**, v. 4, n. 4, p. 619–627, 1992.

BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. **Engineering Materials: Properties and Selection**. 9. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas: Unicamp, 2001.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAREY, P.; SWARTZLANDER, M. Sand Binder Systems Part II - Resin/Sand Interactions. **Foundry Management & Technology**, p. 8–12, 1995.

CHASTAIN, S. **Metal Casting: A sand casting manual for the small Foundry**. Jacksonville: Paperback, 2004.

CHEAH, S. F.; RAMRATTAN, S. N. Comparing Refractory Coatings on Shell Sand Utilizing Elevated Temperature and Collapsibility Testing. **Transactions of American Foundry Society**, v. 112, n. 04, p. 1–7, 2004.

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v. 35, n. 2, p. 1–12, 1993.

CORREIA, E. A. S.; CARDOZA, J. A. S. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas (GEPROS)**, v. 6, n. 1, p. 55–66, 2011.

DRAPER, A. L.; GAINDHAR, J. L. The role of mold atmospheres in the penetration of steel in sand molds. **AFS Transactions**, v. 83, p. 593–616, 1975.

FISHER, R. A. **Statistical Methods for Research Workers**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação de técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2002.

GIETECH, B. V.; HENDERIECKX, G. **Coating for Chemical Bounded Sand**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.gietech.be/LinkClick.aspx?fileticket=16MCLofoMI=&tabid=111&mid=539>>.

HABIBULLAH, P. **Morphology of Exogenous Blowholes in steel castings**. [s.l.] Interdisciplinary Research in Metallurgy & Materials for Advanced Applications, 2011.

HAYES, K. D. et al. **Steel penetration in sand molds**. Alabama: [s.n.].

HLAVAC, J. Melting temperatures of refractory oxides. **Pure and Applied Chemistry**, v. 54, n. 3, p. 681–688, 1982.

HOLTZER, M.; DAŃKO, R.; ŻYMANKOWSKA-KUMON, S. The state of art and foresight of World's production. **Metalurgija**, v. 53, n. 4, p. 697–700, 2014.

HORAK, J. J. **Core and Mould Wash**. Estados Unidos, 1990. Disponível em:

<<http://www.freepatentsonline.com/1990075>>

JAIN, P. L. **Principles of Foundry Technology**. 4. ed. [s.l.] Tata McGraw - Hill Education, 2003.

JAMROZOWICZ, Ł.; ZYCH, J.; KOLCZYK, J. The drying kinetics of protective coatings. **Metalurgija**, v. 54, n. 1, p. 23–26, 2015.

JONES, B.; NACHTSHEIM, C. J. Split-plot designs: What, why, and how. **Journal of Quality Technology**, v. 41, n. 4, p. 340–361, 2009.

JU, H. L.; LUCAS, J. M. Lk Factorial Experiments with Hard-To-Change and Easy-To-Change Factors. **Journal of Quality Technology**, v. 34, p. 411–421, 2002.

KALANDYK, B.; ZAPAŁA, R.; RAKOWSKA, A. Characteristics of defects present in industrial steel castings due to metal-mould reactions. **Archives of metallurgy and materials of metallurgy and materials**, v. 54, n. 290-297, 2009.

KASSIE, A. A; ASSFAW, S. B. Minimization of Casting Defects. v. 3, n. 5, p. 31–38, 2013.

KLEIN, C.; HURLBUT JR., C. S. **Manual of mineralogy**. 21. ed. New York: John Wiley, 1993.

LANE, A M. et al. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds , Part II : Chemical Reactions at the Mold / Metal Interface During Casting of Steel. **Transactions of American Foundry Society**, v. 109, n. 1, p. 1–19, 2001.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEVINE, D. M. et al. **Estatística: Teoria e aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

LEXICON-FOUNDRY. **Sand Inclusion**. Disponível em: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged%5Bsource%5D=default&tx_contagged%5Buid%5D=4008&cHash=3a6ade5203c92b175b29618af712839>. Acesso em: 13 fev. 2015a.

LEXICON-FOUNDRY. **Pinholes**. Disponível em: <[http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged\[source\]=default&tx_contagged\[uid\]=4593&tx_contagged\[backPid\]=3&cHash=12299af83e7b4ab5e4717cf64477ce5c](http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged[source]=default&tx_contagged[uid]=4593&tx_contagged[backPid]=3&cHash=12299af83e7b4ab5e4717cf64477ce5c)>. Acesso em: 12 mar. 2015b.

LUZ, A. ; LINS, F. A. . Rochas & Minerais industriais: uso e especificações. **CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**, n. 2, 2008.

MARIOTTO, C. L. **Curso de areias de moldagem**. 15. ed. São Paulo: ABM, 1986.

MARIOTTO, C. L. **Areias ligadas quimicamente**. Disponível em: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/27930521/2120968561/name/APO>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

MARIOTTO, C. L.; GOULART, A. C. A. Possibilidades de controle de areias de moldagem através de suas curvas tensão-deformação. **Fundição e Matérias Primas**, v. 1, n. 1, 1978.

MONROE, R. Porosity in castings. **AFS Trans**, v. 5, n. 04, p. 10, 2005.

MONROE, R. W.; BLAIR, M. Steel Foundry Research. **World Foundry Organization**, p. 1–10, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. New York: J. Wiley, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NARO, R. L. Porosity Defect in Iron Castings From Mold-Metal Interface Reactions. **Transactions of the American Foundrymen's Society**, v. 107, p. pp. 839–851, 1999.

NARO, R. L. Formation and Control of Lustrous Carbon Surface Defects in Iron and Steel Castings. **Transactions of American Foundry Society**, v. 110, p. 1–20, 2002.

NWAOGU, U. C. et al. New sol-gel refractory coatings on chemically-bonded sand cores for foundry applications to improve casting surface quality. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, n. 16, p. 4035–4044, 2011.

NWAOGU, U. C.; TIEDJE, N. S. Foundry Coating Technology: A Review. **Materials Sciences and Applications**, v. 02, n. August, p. 1143–1160, 2011.

PEIXOTO, F. **Regeneração térmica de areia ligada quimicamente**. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003.

PILATO, L. **Phenolic Resins: A century of progress**. [s.l.] Springer, 2010.

PINTO, S. H. B.; CARVALHO, M. M. DE; HO, L. L. Implementação de programas de qualidade: um survey em empresas de grande porte no Brasil. **Gestão & Produção**, v. 13, p. 191–203, 2006.

PIRKLE, F. L.; PODMEYER, D. A. Zircon: Origin and uses. **Society for Mining, Metallurgy and Exploration**, v. 292, [s.d.].

PIWONKA, T. Aggregate Molding Materials. **ASM Handbook - Casting**, v. 15, 1998.

PURSALL, F. W. Coatings for Moulds and Cores. In: **Applied Science in the Casting of Metals**. Oxford: Pergamon Press, 1970.

REINERS, P. W. Zircon (U-Th)/He Thermochronometry. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 58, n. 1, p. 151–179, 2005.

RIBEIRO, L. G. M.; ALVES, L. H. D.; SILVA, M. B. Melhoria Da Qualidade Na Produção De Peças De Grande Porte Em Aço Fundido Utilizando Planejamento De Experimentos. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 4, p. 36–41, 2007.

ROBLES JÚNIOR, A. **Custos da qualidade: Aspectos econômicos da gestão da qualidade e da gestão ambiental**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

RODRIGUES, M.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. [s.l.] Cárita Editora, 2005.

SAIKAEW, C.; WIENGWISSET, S. Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings. **Applied Clay Science**, v. 67-68, p. 26–31, 2012.

SAMPAIO, J. A. et al. Minerais pesados Millennium. In: **Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

SANDERS, A. C. **Foundry sand practice**. Illinois: American Colloid Company, 1973.

SENAI. **Areia de Fundição Aglomeradas com Argila**. Belo Horizonte: Senai, 1987.

SHACKELFORD, J. . **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2008.

SHAMLAX META-CHEM. **Colour Changing Zircon Foundry Coatings**. Disponível em: <<http://www.tradeindia.com/fp442828/Color-Changing-Zircon-Foundry-Coatings.html>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

SHI, F. **Ceramic coatings – Applications in Engineering**. [s.l.] InTech, 2012.

SHIROYA NIKUNJ, R.; SHAH, J. B. Review Paper on Improve Quality in Sand Casting Industry using Total Quality Management (TQM) Tool. **International Journal for Scientific Research & Development**, v. 2, n. 10, p. 180–182, 2014.

SILVA, J. J. S. **Processos de Fabricação III – Fundição**. 1. ed. Rio de Janeiro: FAT/UERJ, 1971.

SOARES, G. . **Mercado, Processos e Metalurgia**. 1. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.

THAKARE, A. G.; TIDKE, D. J. Data Mining for Casting Defects Analysis. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 2, n. 12, p. 2153–2157, 2013.

THIEL, J. Thermal Expansion of Chemically Bonded Silica Sands Copyright 2011 American Foundry Society. p. 1–10, 2011.

UPADHYE, R. A.; KESWANI, I. Optimization of Sand Casting Process Parameter Using Taguchi Method in Foundry Nagpur 440013 India castings manufactured in iron foundry by maximizing the signal to noise ratios and the effects of signal to noise ratio of the experiments depending upon th. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 1, n. 7, p. 1–11, 2012.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

ZHANG, L.; THOMAS, B. . Inclusions in continuous casting of steel. **XXIV National Steelmaking Symposium, ...**, p. 26–28, 2003.