

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TÉRMICA EXPERIMENTAL DE UM FORNO ELÉTRICO TIPO POÇO PARA  
TRATAMENTO TÉRMICO DE PEÇAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO

por

Arthur Blazoudakis Büneker

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 26 de junho de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE TÉRMICA EXPERIMENTAL DE UM FORNO ELÉTRICO TIPO POÇO PARA  
TRATAMENTO TÉRMICO DE PEÇAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO

por

Arthur Blazoudakis Büneker

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 26 de junho de 2018

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, em especial aos meus pais, Rainer e Adriana, por todas as vezes que me motivaram e apoiaram ao longo desta caminhada. Ambos sempre foram e serão um exemplo de vida que tenho a seguir, por que “mesmo que não seja moleza, não dá pra desembarcar no meio do caminho”.

À minha namorada Luisa, pelo amor, ajuda e paciência ao longo deste trabalho. Agradeço por sempre estar ao meu lado me apoiando, me dando força e me motivando quando as coisas saíam ou não como previsto.

Às minhas “dindas”, “Di”, por ter sido minha segunda mãe e ter me acolhido nesta cidade nos primeiros anos da minha graduação, e Luciana, pelos conselhos e apoio sempre que precisei.

Aos meus avós, Harro e Leni, “Marilu” e Charalabos por todo exemplo de vida e ensinamentos que me deram ao longo dos meus 24 anos.

Aos meus amigos Gabriel Trujillo, Eduardo Alves Amado, Elizeu Possamai e Alexandre Simon por todo apoio em toda minha graduação, seja nas incansáveis noites de estudo e trabalho, ou na troca de ideias e conselhos. Também ao meu amigo Lucas Travi por todo companheirismo no período de estudos na Alemanha.

Aos colegas da OTMZA e à empresa em si, que foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os colegas de trabalho do setor, pois foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional, principalmente ao Guilherme e Tiago por todo apoio, conhecimento e confiança ao longo deste estudo. Em especial também aos colegas da fundição Gilmar, Adriano, Alessandro, Diego, Marcos e Anselmo, que sem seu apoio este trabalho não teria acontecido. Também a todos os outros colegas de construção, simulação, fabricação e teste de produtos que fizeram parte deste trabalho.

Ao meu orientador Francis França, por todo conhecimento repassado e aplicado neste trabalho. A todo corpo docente da Engenharia Mecânica da UFRGS, pelos anos de conhecimento compartilhado e por me mostrarem que os problemas, apesar de grandes e complexos, sempre tem solução.

BÜNEKER, A. B. **Análise térmica experimental de um forno elétrico tipo poço para tratamento térmico de peças de alumínio fundido**. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

A solubilização é uma etapa do tratamento térmico do alumínio, que consiste no aquecimento de peças em um forno a uma temperatura e tempo suficientes para que a solubilização ocorra. Durante esse processo, é fundamental que se controle as variações de temperatura das peças contidas na carga do forno. Além de influenciar no consumo de energia elétrica do forno, este controle evita os custos altos do sucateamento de peças que estão fora dos limites de variação de temperatura estabelecidos para a carga. Assim, propõe-se uma análise térmica das temperaturas das peças em um forno elétrico tipo poço, em utilização em uma empresa de fundição de alumínio, a fim de analisar se o forno atende ou não as especificações de variação de temperatura dessa empresa. Realizou-se esta análise de forma experimental, através da medição da temperatura de 15 peças distribuídas uniformemente em um plano transversal dentro do forno. Através de termopares fixados nas peças, o perfil de temperaturas de cada peça ao longo do tempo é traçado. Como foram verificadas variações de temperaturas fora dos padrões estabelecidos pela empresa, modificações no forno foram propostas para que o forno passasse a atendê-los. Após um estudo bibliográfico, concluiu-se que a convecção é o principal fator de influência na uniformidade das temperaturas da carga. Para melhorar o escoamento de ar dentro do forno, alterações estruturais foram primeiramente avaliadas através de uma simulação no programa Flow-3D, como um novo cilindro para guiar e pré-aquecer o ar do forno, um novo rotor de diâmetro maior, um cone para guiar mais eficientemente o escoamento do rotor e espaçadores no fundo do forno. Além disso, implementaram-se melhorias de controle e operação do forno, como um novo posicionamento dos termopares de controle do processo e a divisão do forno em duas zonas separadas de aquecimento. Após a implementação de todas essas melhorias, uma nova análise térmica experimental constatou maior uniformidade das temperaturas da carga, sendo que todas as peças apresentaram temperaturas dentro dos limites estabelecidos pela empresa.

**PALAVRAS-CHAVE:** solubilização do alumínio, forno elétrico tipo poço, análise térmica experimental, uniformidade de temperaturas

BÜNEKER, A. B. **Experimental thermal analysis of an electric pit furnace for heat treatment of aluminum castings**. 2018. 15 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **ABSTRACT**

Solution is a stage in the heat treatment of aluminum that consists of heating parts in a furnace at sufficient temperature and time in order to the solution occurs. During this process, it is essential to control the parts temperature variations in the furnace load. Besides influencing the furnace electricity consumption, the temperature variations control avoids high costs of scrapping parts that are outside the temperature limits determined for the load. Thus, it is proposed a thermal analysis of the parts in an electric pit furnace, used in an aluminum foundry company, to analyze if the furnace meets temperature variation specifications determined by the company. The analysis was performed experimentally, by measuring the temperature of 15 parts evenly distributed in a transverse plane inside the furnace. The temperature profile of each part over time is plotted through thermocouples fixed in these parts. As there were some temperature variations outside the set limits, some modifications were proposed to reduce these variations. After a bibliographic study, it was concluded that the convection is the main influence factor in the load temperatures uniformity. To improve the furnace air flow, structural modifications were first analyzed in a simulation through the software Flow-3D. They consist in a cylinder to guide and preheat the furnace air, a new larger diameter rotor, a cone to more efficiently guide rotor air flow and spacers in the bottom of the furnace. In addition, furnace control and the operation were improved, by new thermocouples positioning and the division of the furnace in two heating zones. After the implementation of all improvements, a new experimental thermal analysis determined a better load temperatures uniformity. In addition, all the parts temperatures were inside the limits determined by the company.

**KEYWORDS:** aluminum solution, electric pit furnace, experimental thermal analysis, temperature uniformity

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	1
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1 Fundição e tratamento térmico .....	2
3.2 Forno elétrico tipo poço .....	2
3.3 Carga do forno .....	3
3.4 Parâmetros do processo de solubilização .....	3
3.5 Trocas térmicas .....	3
4 METODOLOGIA .....	4
4.1 Análise térmica do forno .....	4
4.2 Seleção, fixação e aquisição de dados dos termopares .....	5
4.3 Análise térmica experimental inicial .....	5
4.4 Fatores de influência na uniformidade de temperaturas do forno .....	7
4.4.1 Defeitos no isolamento térmico .....	7
4.4.2 Trocas de calor e fluxo interno de ar .....	7
4.4.3 Rotor de recirculação de ar .....	9
4.4.4 Sistema de controle das resistências elétricas .....	10
4.4.5 Orifícios de entrada de ar na tampa .....	11
5 RESULTADOS .....	11
5.1 Simulação e avaliação das alterações do forno .....	11
5.2 Análise térmica experimental final .....	13
6 CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
Apêndice A .....	16
Apêndice B .....	17

## 1. INTRODUÇÃO

No processo de fabricação de peças de alumínio através da fundição por gravidade, o tratamento térmico do material é fundamental para definir as propriedades mecânicas desejadas do produto. Uma das etapas deste tratamento é a solubilização do alumínio, na qual uma carga de peças brutas fundidas é aquecida em um forno e depois resfriada bruscamente, para que a microestrutura das peças seja mantida. Para este aquecimento, a carga permanece em um forno, que opera a uma temperatura nominal desejada, durante um tempo suficientemente longo para que a solubilização ocorra. Esta temperatura e o tempo de permanência são os principais parâmetros para que esta etapa seja bem-sucedida.

Além disso, é fundamental conhecer e controlar as variações de temperaturas da carga em relação à temperatura nominal do processo. Como a solubilização acontece ligeiramente abaixo do ponto de fusão do alumínio e em uma faixa muito estreita de temperaturas, deve-se evitar o superaquecimento das peças para que não ocorra a fusão do alumínio, e também a insuficiência do aquecimento, pois assim a solubilização não ocorre. Em ambas as situações as peças são condenadas, gerando para a empresa custos altos de sucata. Ainda, se as peças são aquecidas além da temperatura nominal, há um gasto desnecessário de energia no forno, gerando custos que poderiam ser reduzidos.

Tendo em vista a importância de se ter um controle das variações de temperatura no processo de solubilização, propõe-se a realização de uma análise térmica de um forno elétrico utilizado neste processo em uma empresa de fundição de alumínio. Devido à complexidade do sistema de aquecimento, uma abordagem analítica exigiria a aplicação de várias hipóteses simplificadoras, comprometendo a precisão de seu resultado. Assim, propõe-se a realização de uma análise térmica experimental, através da medição da temperatura das peças dentro desse forno, a fim de contabilizar todos os fatores que influenciam as variações de temperatura da carga e verificar se essas variações atendem ao padrão interno da empresa. Caso essas especificações não sejam atendidas, serão estudadas e implementadas alterações práticas no forno. Novamente, de maneira experimental, os valores de temperatura nas peças serão medidos a fim de verificar se estas aplicações práticas resultaram em um efeito positivo para a homogeneização da temperatura das peças.

Para isso, é imprescindível compreender como agem os mecanismos de transferência de calor presentes neste processo. Neste caso, a determinação das trocas de calor é desafiadora pois, além da carga ser composta por peças de geometria complexa, as trocas de calor por condução, radiação e convecção atuam nela simultaneamente e de maneira não uniforme. Outro fato importante é a necessidade deste forno atender a requisitos específicos do processo de fabricação da empresa. Assim, tanto a complexidade do aquecimento quanto a aplicação específica do forno corroboram para que, neste caso, estudos de análises térmicas não sejam comumente realizados e, conseqüentemente, sejam difíceis de serem encontrados na literatura. Desta forma, encontra-se principalmente bibliografias de caráter generalista sobre funcionamento desses fornos, que servem de referência para esse trabalho e que são citadas ao longo das seções deste estudo.

## 2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo principal a realização da análise térmica experimental de um forno elétrico tipo poço, a fim de verificar se suas variações de temperatura atendem aos padrões internos da empresa. Faz-se esta análise através de medições de temperatura com termopares instalados em peças, que são uniformemente distribuídas na carga tratada. Também como objetivo principal este trabalho contemplará a análise e implementação de melhorias no forno juntamente com a empresa de fundição e a fabricante de fornos, visando tornar o perfil de temperaturas do forno mais homogêneo.

Como objetivos específicos, tem-se a análise dos fenômenos de transferência de calor entre o forno e as peças, e a validação das melhorias através de uma nova análise térmica experimental.

### 3. FUNDAMENÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Fundição e tratamento térmico

Na empresa onde este trabalho foi realizado, a planta de fabricação analisada utiliza o processo de fundição de alumínio por gravidade em coquilha e com macho de areia. Depois de fundidas, as peças são submetidas ao tratamento térmico de solubilização no forno, onde elas permanecem durante um tempo e temperatura pré-estabelecidos. Após isso, as peças sofrem um resfriamento brusco ao serem imersas em um tanque com água agitada mecanicamente.

Por estratégias de produção da empresa, durante a etapa de solubilização também se faz a degradação térmica dos machos que estão nas peças fundidas. Esses machos têm na sua composição uma resina, atuando como ligante da areia, que se degrada e solta a areia das peças quando exposta por tempo suficiente à temperatura do forno. No tanque de resfriamento, devido à agitação da água, a areia é então removida das peças.

#### 3.2. Forno elétrico tipo poço

Para realizar este processo, a planta utiliza um forno elétrico tipo poço, que se caracteriza por ser um forno de batelada de baixa temperatura, pois opera abaixo de 600°C [Lupi, 2017]. Ele possui formato cilíndrico, com as resistências elétricas dispostas circunferencialmente na parede interna feita de tijolos refratários. As resistências do topo do forno até a metade de sua altura compõem a zona superior de aquecimento, e as localizadas da metade até o fundo do forno compõem a zona inferior (ZS e ZI na Figura 3.1.a, respectivamente). O funcionamento de ambas as zonas é regulado por um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), que recebe o sinal de um único termopar instalado na tampa do forno (T na Fig. 3.1.a).

Através desta tampa, localizada na parte superior do equipamento, faz-se o carregamento e descarregamento do forno. Para recircular constantemente a atmosfera interna do forno, na parte inferior da tampa se encontra um rotor de fluxo radial de pás retas, indicado por R na Fig. 3.1.a. Devido a isso, classifica-se esse forno como de convecção forçada [Lupi, 2017]. Abaixo dele está instalada uma chapa circular furada no seu centro, que compõe a carcaça do rotor (C na Fig. 3.1.a), fazendo com que o ar seja sugado pelo centro do rotor, tendo saída radial.

Para não haver contato entre a carga e as resistências elétricas, o forno possui uma parede cilíndrica interna (P na Fig. 3.1.a) de 900 mm de diâmetro e 1394 mm de altura, feita de placas de aço. O isolamento térmico das paredes do forno é composto de camadas de tijolo refratário e isolante térmico. Na tampa, tem-se isolamento de manta térmica de fibra de vidro.

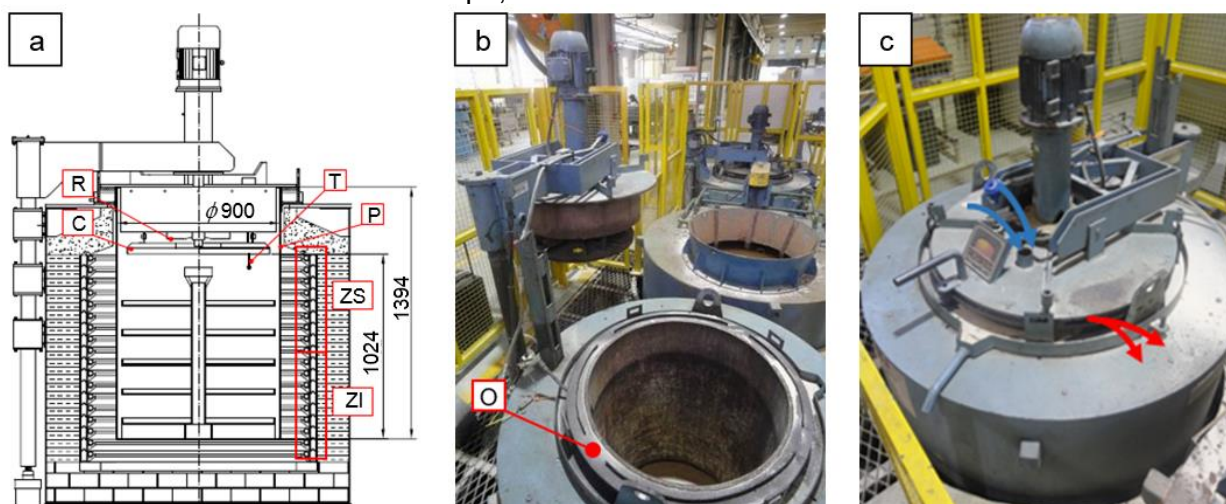


Figura 3.1 - a) Desenho esquemático do forno; b) Forno com tampa aberta; c) Forno com tampa fechada (fonte: autor)



Para que a degradação da resina dos machos aconteça durante a solubilização, adaptam-se um orifício na parte superior da tampa e quatro orifícios na superfície de fechamento da tampa, defasados em 90 graus, sendo um deles indicado pela letra O na Fig. 3.1.b. Através do orifício superior, o ar frio externo é sugado para dentro do forno, indicado pelas setas azuis na Fig. 3.1.c. O ar quente deixa o forno pelos orifícios no fechamento da tampa, representado pelas setas vermelhas na mesma figura, permitindo que o ar externo circule e retire constantemente da atmosfera do forno a resina já degradada dos machos de areia.

### 3.3. Carga do forno

A carga total do forno é composta por cinco bandejas sustentadas verticalmente por uma haste central, por onde a carga é içada e transportada para dentro do forno através de uma ponte rolante (Fig. 3.2). As peças são dispostas em três circunferências (Fig. 4.1.b), sobre bandejas fabricadas principalmente com tela metálica para que o ar possa circular entre elas.



Figura 3.2 - Ciclo de carregamento do forno (fonte: autor)

### 3.4. Parâmetros do processo de solubilização

Através de estudos realizados pela engenharia de processos da empresa, definiu-se 470°C como a temperatura nominal de processo. Quando o termopar (T na Fig. 3.1.a) registra que essa temperatura foi atingida na atmosfera do forno, um temporizador eletrônico automático inicia a contagem das 6 horas do processo de solubilização. Através de testes da empresa, este tempo se mostra suficiente para solubilizar o alumínio e degradar a resina dos machos de areia.

A engenharia de processos da empresa também definiu em  $\pm 10^\circ\text{C}$  a variação máxima de temperaturas da carga em relação à temperatura nominal, pois essa variação garante propriedades mecânicas dentro dos limites especificados para as peças. Isto significa que, em qualquer instante durante as 6 horas, qualquer peça da carga pode atingir no máximo 480°C e no mínimo 460°C. Se as temperaturas medidas na análise experimental estiverem fora desses limites, o forno deverá ser aprimorado.

### 3.5. Trocas térmicas

Para que se possa interpretar o perfil de temperaturas da carga durante a solubilização, é necessário compreender as trocas térmicas entre o forno e as peças. Segundo Lupi, 2017, em fornos de batelada de baixa temperatura, a troca de calor entre o forno e a carga acontece mais eficientemente por convecção do que por radiação. Além disso, a radiação tem a característica de se propagar em linha reta, gerando o problema de sombra quando uma carga com várias peças é aquecida [Trinks *et al.*, 2004]. Neste caso as peças que estão no interior da carga, e ocultas à radiação, aquecem mais lentamente do que as que estão em frente às resistências, gerando grandes variações de temperatura na carga. Segundo Paschkis, 1948, quando se trata do alumínio, outro fator agravante é o fato de que no estado bruto recém-

fabricado, com pouca sujeira ou impurezas superficiais, ele possui baixa emissividade e absorvidade, e por isso não aquece tão eficientemente por radiação.

Ainda segundo Paschkis, 1948, para operação em baixas temperaturas, há dois tipos de construção de fornos de batelada de convecção: o de radiação e convecção combinada e o de convecção pura. O primeiro tem uma construção mais simples, com resistências elétricas localizadas nas paredes, que aquecem as peças diretamente por radiação, e ventiladores, que movimentam o ar interno (Fig. 3.3.a). Entretanto, este método de construção faz com que o ar dentro do forno não circule de maneira eficiente e uniforme. Além disso, o aquecimento por radiação de uma carga com várias peças leva ao problema de sombra, já citado anteriormente. Portanto, este tipo de forno é recomendado para aquecer cargas compostas por uma ou mais peças, desde que nenhuma delas fique oculta à radiação propagada a partir das resistências.

Já os fornos de convecção pura se caracterizam por minimizar o aquecimento direto da carga por radiação e favorecer as trocas de calor por convecção. Para isso, posicionam-se as resistências atrás de proteções ou até em câmaras separadas de onde se encontra a carga (Fig. 3.3.b). Assim, o ar do ventilador é forçado a passar primeiramente pelas resistências para pré-aquecer, e posteriormente de maneira uniforme por entre as peças. Indica-se esses fornos quando se deseja uma menor variação de temperaturas entre as peças, pois eles garantem um aquecimento mais eficiente e homogêneo de uma carga com várias peças.

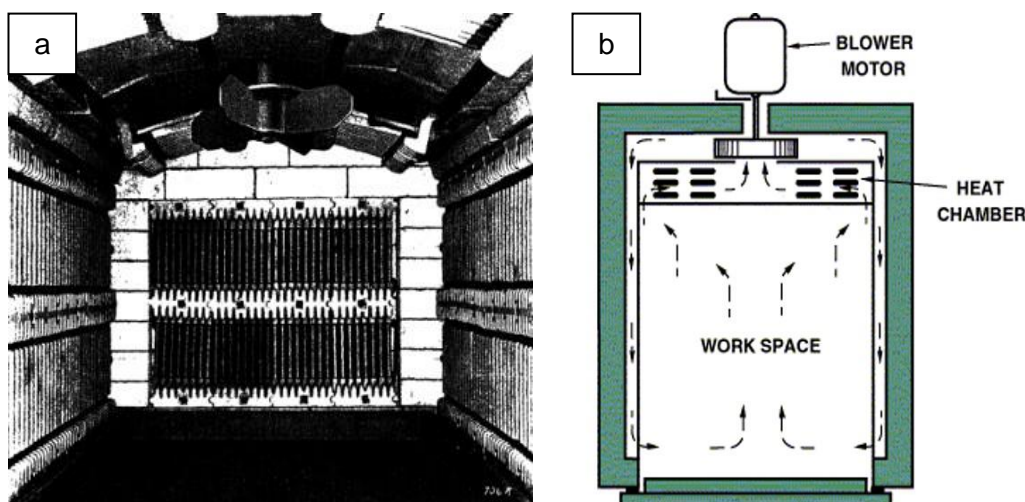


Figura 3.3 – a) Forno de radiação e convecção combinada (fonte: Paschkis, 1948); b) Forno de convecção pura (fonte: GRIEVE, 2018)

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Análise térmica do forno

Visando a obter um mapeamento representativo e uniforme das temperaturas da carga, em cada uma das cinco bandejas são colocadas três peças em um mesmo sentido radial (Fig. 4.1.b), cada uma instrumentada com um termopar (Fig. 4.1.c), resultando num total de 15 pontos de medição. Devido à forma cilíndrica e simétrica, tanto da construção do forno, quanto da disposição da carga dentro dele, realiza-se o mapeamento das temperaturas nas peças contidas em um plano de corte transversal (Fig. 4.1.a). Assim, ao rotacionar este plano imaginário em torno da haste central da carga, é possível inferir a temperatura de outras peças em qualquer local do forno.

As peças instrumentadas são nomeadas considerando o nível da bandeja e em qual posição a peça está. Conforme a Fig. 4.1.a, os níveis variam de N1 a N5, sendo estes o nível inferior e superior, respectivamente. A posição, indicada pela letra P, varia de P1 a P3, sendo elas a posição interna e externa na bandeja, respectivamente. Desta forma é possível criar uma representação gráfica das temperaturas no forno, conforme Fig. 4.3.

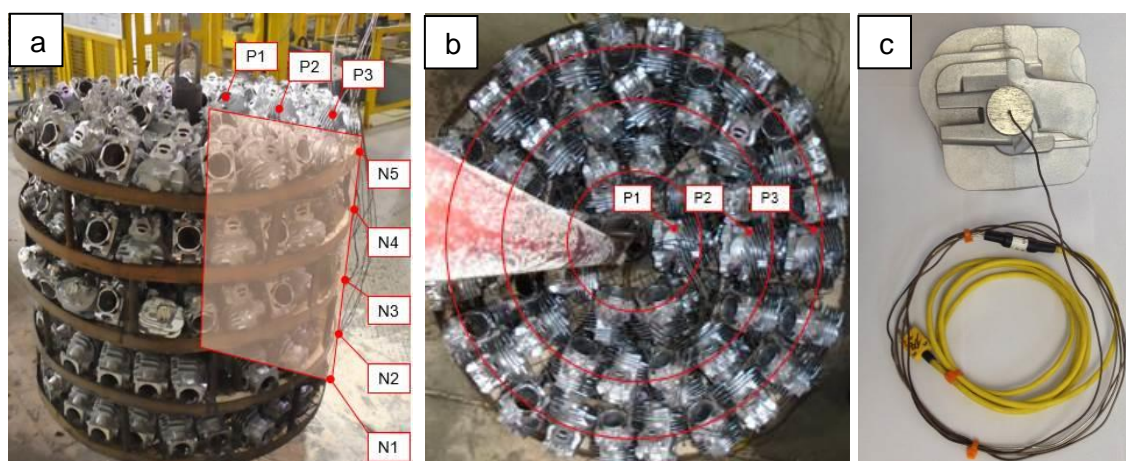


Figura 4.1 - a) Carga montada com o esboço do plano de mapeamento e nomenclatura das peças instrumentadas; b) Vista superior do nível N1; c) Peça instrumentada com termopar

#### 4.2. Seleção, fixação e aquisição dos dados dos termopares

Fez-se a seleção dos termopares segundo recomendações da norma SAE AMS2750-D, que trata sobre análise térmica experimental de fornos da indústria aeroespacial. Inicialmente define-se se serão usados termopares consumíveis, com isolamento externo feito por exemplo de tecido, ou não consumíveis. Segundo recomendações de fabricantes, os não consumíveis com revestimento de inox são mais aconselhados para o uso em processos com choques térmicos, como na solubilização.

Escolheu-se a classe do termopar considerando que ele pode ser submetido no máximo até 650°C e que pode ser usado para medições por no máximo 90 dias antes de uma recalibração ser necessária. Ainda, seu erro de medição deve ser de até  $\pm 0,75\%$  da temperatura medida [Society of Automotive Engineers, 2005]. Fez-se então uma análise financeira das possibilidades, sendo escolhido o termopar mineral, tipo K, classe 2, aterrado, com bainha de inox 316, diâmetro externo de 1,5 mm e rabicho de silicone.

Este termopar foi fixado no local de maior seção da peça (Fig. 4.1.c), que é a região mais crítica para o aquecimento, pois demora mais para atingir a temperatura de processo em comparação com as regiões de menor seção. Se durante as 6 horas de solubilização a região crítica tiver sua temperatura dentro dos limites de variação, o restante da peça também atenderá à especificação de temperaturas do processo. Para fixação dos termopares, o método mais adequado, considerando os pontos de vista técnico e financeiro, é a furação das peças no mesmo diâmetro que os termopares. Ao ser introduzido nessa furação, a junta de medição permanece nela fixamente a 7 mm de profundidade, a qual foi definida para que a ponta do termopar fique no centro da região de maior seção.

Para a aquisição e registro dos dados dos termopares se utilizou o FieldLogger da marca Novus, que foi configurado para registrar as temperaturas a cada dois segundos durante todo o processo. National Instruments, 2015, indica que o erro total dessa medição é igual a soma do erro do equipamento de aquisição e do termopar. Segundo Novus, 2018, o erro do FieldLogger em medições com termopar tipo K é igual a  $\pm 4^\circ\text{C}$ . OMEGA, 2017, indica que o erro de medição dos termopares tipo K é de  $\pm 2,2^\circ\text{C}$  ou  $\pm 0,75\%$  da temperatura medida, sendo considerado o que resultar no maior valor. Assim, na temperatura nominal do processo, 470°C, o termopar possui erro de  $\pm 3,5^\circ\text{C}$ . Portanto, o erro total da medição a 470°C é de  $\pm 7,5^\circ\text{C}$ .

#### 4.3. Análise térmica experimental inicial

A fim de caracterizar a condição normal de operação do forno, fez-se o mapeamento da carga, com 15 pontos de medição de temperatura. A partir dos dados da Fig. 4.2 e 4.3, o perfil de temperaturas da carga é analisado mais criteriosamente em 3 instantes: Instante 1, início da



contagem das seis horas, à 01:45; Instante 2, onde as temperaturas já estão estabilizadas, às 04:45; Instante 3: momento anterior ao final do processo, às 07:45.

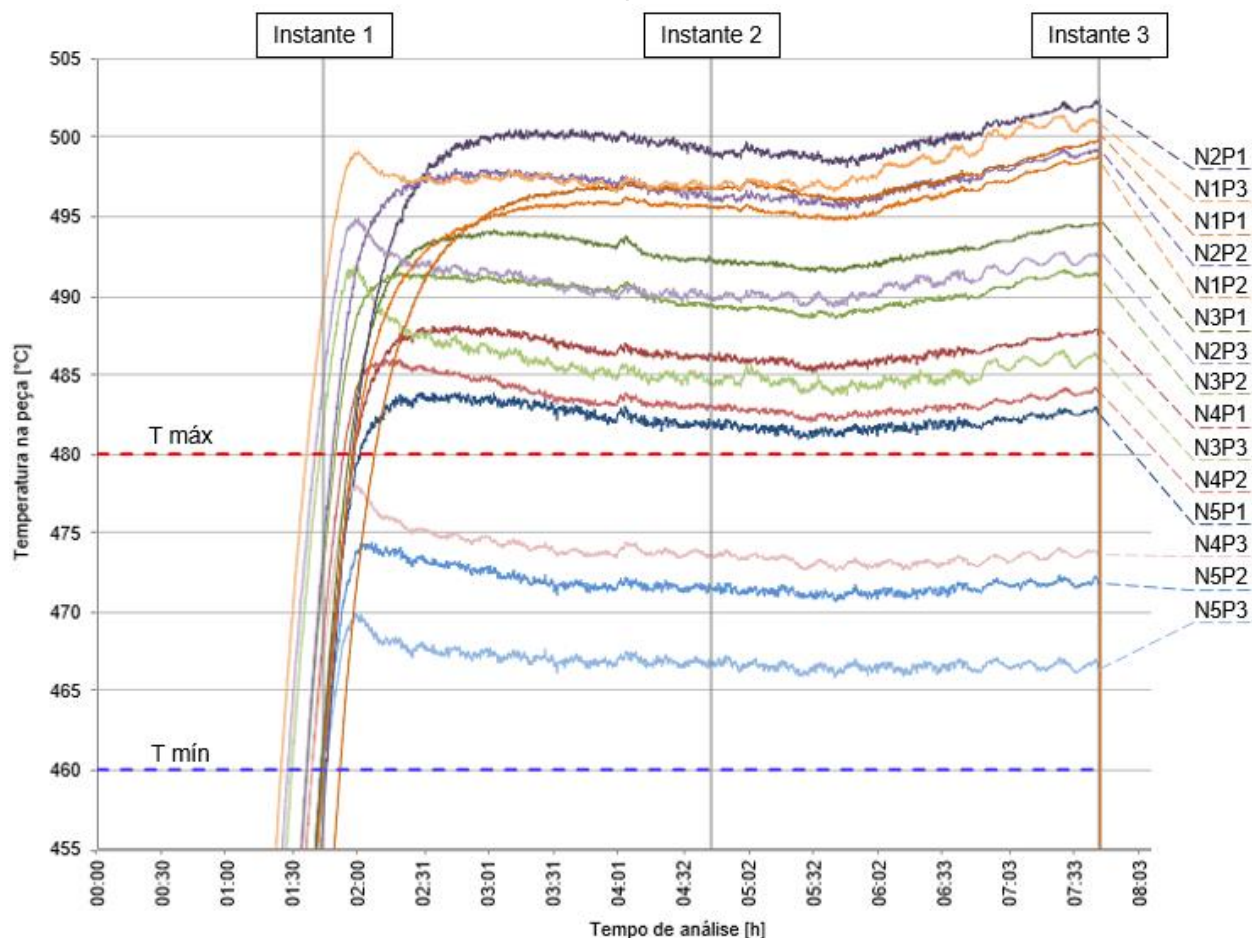


Figura 4.2 – Análise térmica inicial do forno durante o processo de solubilização. Esta mesma imagem pode ser vista ampliada no Apêndice A

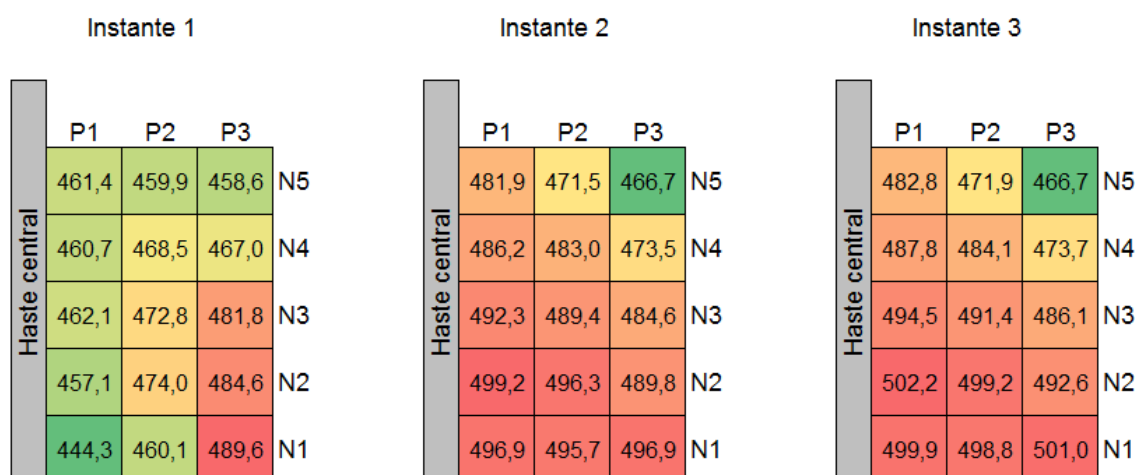


Figura 4.3 – Perfil de temperaturas da carga nos Instantes 1, 2 e 3

Na Figura 4.2 e 4.3 se percebe que no Instante 1 as peças já possuem temperaturas abaixo de 460°C e acima de 480°C, estando fora dos limites estabelecidos pela empresa. No Instante 2, conclui-se que: apenas as peças N5P3, N5P2 e N4P3 estão dentro da faixa de temperaturas estabelecida; com exceção dessas três peças, todas as outras estão acima de

480°C; nenhuma peça está abaixo do limite inferior de 460°C. No Instante 3, percebe-se que: as três peças N5P3, N5P2 e N4P3 continuam dentro da faixa permitida; o restante das peças continua excedendo a temperatura máxima e, em geral, tem um aumento de temperatura em comparação ao Instante 2; a peça N2P1 está a 502,2°C, a maior temperatura durante o processo; nenhuma peça ultrapassa o limite inferior.

Com esta análise, conclui-se que as temperaturas da carga não estavam uniformes e que o forno não atendia a padrão de variações de temperaturas estabelecido pela empresa, sendo necessário um estudo aprofundado de análise térmica deste equipamento. Mesmo considerando nesta análise os extremos do erro de medição, de  $\pm 7,5^\circ\text{C}$ , o forno permanece incapaz de atender aos limites de temperatura estabelecidos.

#### 4.4. Fatores de influência na uniformidade de temperaturas do forno

Analisando o funcionamento do forno, listam-se a seguir fatores estruturais e de controle de processo como possíveis influenciadores da não uniformidade de temperaturas da carga.

##### 4.4.1. Defeitos no isolamento térmico

A deterioração ou defeito do isolamento pode causar perdas de calor localizadas ou gerais no forno. Segundo Trinks *et al.*, 2004, isto ocorre na maioria das vezes quando o forno sofre ciclos bruscos de aquecimento e resfriamento, ou quando ele está exposto a vibrações provenientes de equipamentos como os de forja ou estampagem. Em ambos os casos o isolamento irá se fragmentar ou rachar, prejudicando sua eficiência.

Ainda segundo o autor, estes defeitos podem ser constatados através de uma inspeção visual, onde deve-se procurar por desgastes ou rachaduras que percorram todo o comprimento do isolamento, pois estes defeitos provocam uma ligação da atmosfera interna aquecida com a estrutura externa do forno, gerando fuga de calor.

Analisando as outras máquinas que operam na fábrica, constatou-se que nenhuma gera vibrações elevadas. No ciclo de operação, o forno também não é submetido a aquecimentos ou resfriamentos bruscos. Realiza-se então a inspeção visual do isolamento do forno e nenhuma rachadura ou desgaste excessivo foi encontrado.

Desta forma, o isolamento térmico foi avaliado e nenhuma irregularidade foi constatada, desprezando-se então sua influência na não uniformidade de temperaturas do forno.

##### 4.4.2. Trocas de calor e fluxo interno de ar

Analisando o forno deste estudo com base nas características citadas pela literatura na Seção 3.5, conclui-se que se trata de um forno de radiação e convecção combinadas. A principal evidência disso se deve ao fato de que o ventilador apenas movimenta a atmosfera do forno, sem forçar o ar a percorrer um caminho que primeiro o pré-aqueça, para depois passar uniformemente por entre a carga e aquecê-la. Entretanto, como indicado pela literatura, a aplicação deste forno está incorreta pois ele não é ideal para o aquecimento de uma carga com várias peças.

Segundo Trinks *et al.*, 2004, e Paschkis, 1948, em fornos de convecção, se o escoamento de ar no forno é uniforme e tem velocidades constantes quando se movimenta dentro da carga, conseqüentemente o perfil de temperaturas da carga será homogêneo. Como neste forno se deseja diminuir as variações de temperatura da carga, propõe-se uma avaliação da convecção dentro do equipamento.

Tendo em vista os recursos técnicos, temporais e financeiros existentes, decidiu-se avaliar qualitativamente a convecção através de uma simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*), a qual foi feita pelo setor de simulações computacionais da empresa de fundição através do programa computacional FLOW-3D. Devido aos recursos temporais e técnicos envolvidos, a geometria das peças da carga foi simplificada (Fig. 4.4), sendo considerado

apenas seu contorno externo. No modelo 3D do forno, simulou-se apenas sua atmosfera interna, que é delimitada pelo fechamento da tampa com a parede interna do forno.

Segundo Zalamera, 2017, para reduzir o tempo de cálculo da simulação, utilizou-se um ventilador padrão do programa, cujos dados e coeficientes (Tabela 4.1), foram ajustados seguindo recomendações do fabricante do programa computacional, para que o ventilador opere de forma similar ao encontrado no forno real. A malha usada no forno é composta de cubos com arestas de 10 mm.

Dados do rotor		Coeficientes de operação	
Número de pás	6	Coeficiente de acomodação para velocidade rotacional	$5 \text{ s}^{-1}$
Diâmetro externo	400 mm	Coeficiente de velocidade axial	$-0,9 \text{ m}^{-1}$
Rotação nominal	89,5 rad/s		

Tabela 4.1 – Parâmetros da simulação de convecção

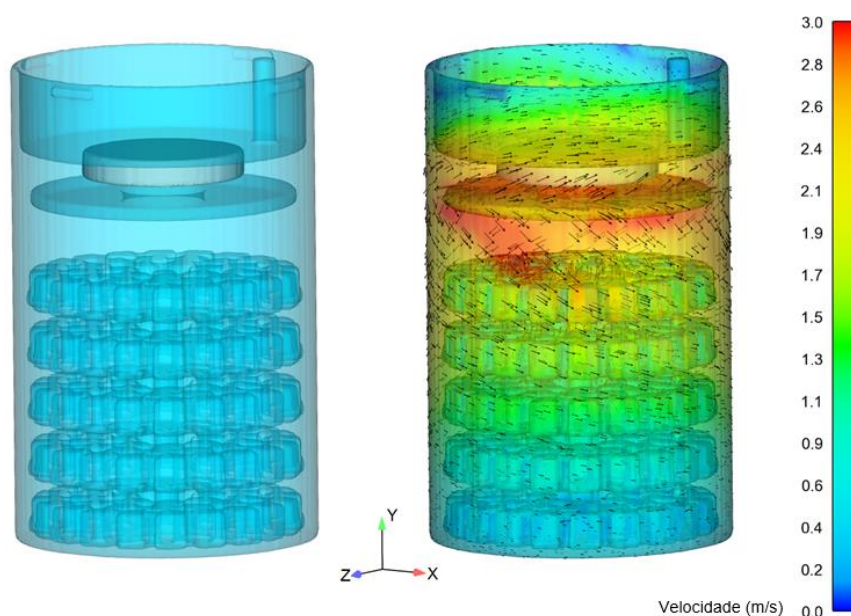


Figura 4.4 – À esquerda a carga modelada dentro do forno; à direita o resultado da simulação qualitativa [Zalamera, 2017]

Analisando o resultado qualitativo da simulação na Figura 4.4, percebe-se que nos níveis inferiores da carga o escoamento apresenta velocidades próximas de zero, enquanto nos superiores ele possui velocidades mais altas. Desta forma, fica claro que a convecção entre os níveis não é homogênea, o que pode ser um fator de grande influência para a não uniformidade de temperaturas da carga.

Percebe-se, também, que o escoamento não é direcionado para a carga de maneira eficiente. O ar que deixa o rotor radialmente é bruscamente forçado a mudar sua direção para descender verticalmente para a carga. Assim, uma parte do escoamento acaba sendo direcionada sem necessidade para a região entre a tampa e a parede do forno.

Para fornos de convecção pura, Paschkis, 1948, elenca duas possibilidades para se obter um escoamento mais uniforme e, conseqüentemente um perfil de temperaturas mais homogêneo na carga. A primeira delas é a recirculação e o pré-aquecimento do ar através de uma câmara externa ao forno, para que em seguida ele seja injetado uniformemente por entre as peças. Entretanto, esta possibilidade foi descartada porque a empresa de fundição não dispõe de espaço em volta do forno para essa câmara operar com segurança.

A segunda possibilidade descrita pelo autor, e que será analisada para esta aplicação, é a construção de paredes ou dutos internos no forno, que servem para guiar o ar para ser

primeiramente pré-aquecido, distribuí-lo uniformemente para escoar por entre todas as peças e evitar que as peças aqueçam diretamente por radiação.

Para que isto seja possível, propõe-se a instalação de outro cilindro vertical dentro do forno (CI na Fig. 4.5), posicionado junto ao cesto da carga e afastado da parede interna do forno, por onde se cria um duto. Dentro dele, o ar que deixa o rotor na parte superior do forno é forçado a entrar em contato com toda a parede para ser pré-aquecido. Ao chegar no final do duto na parte inferior, o ar quente entra uniformemente na carga através de orifícios (O na Fig. 4.5). Além disso, este cilindro também atua como uma barreira radiante entre as resistências e a carga, reduzindo o aquecimento direto das peças por radiação.

Para garantir que o escoamento seja direcionado mais eficientemente para o duto, propõe-se a instalação de um cone em volta do rotor (CO na Fig. 4.5). Além disso, altera-se a geometria da placa abaixo do rotor para que ela tampe a parte superior do novo cilindro. Assim, guia-se o ar para dentro do duto de pré-aquecimento, sem deixá-lo ir diretamente para a carga. Porém, uma folga entre a placa e o cilindro é necessária para compensar as dilatações da estrutura quando aquecida, permitindo que um pouco do fluxo vá diretamente para as peças.

Propõe-se também o uso de espaçadores (E na Fig.4.5) no fundo do cesto, para evitar que as peças do primeiro nível fiquem em contato direto com a superfície do fundo do forno. Estes espaçadores também permitem que o ar vindo dos orifícios do duto entre por baixo de toda a carga de maneira uniforme.

De maneira geral, com essas alterações para melhorar o fluxo de ar é possível transformar o aquecimento do forno de radiação e convecção combinadas para convecção pura, proporcionando assim um aquecimento mais uniforme da carga. As análises da convecção, assim como as propostas de melhorias do fluxo de ar no forno, foram apresentadas para a empresa de fundição e para a fabricante de fornos. Estando ambos de acordo com as alterações, dimensionaram-se e fabricaram-se os componentes na fabricante de fornos, fazendo-se uso de sua experiência e conhecimento da aplicação específica deste forno. O modelo 3D desta proposta, sua simulação de fluxo e análise térmica experimental das alterações são apresentados no Capítulo 5.

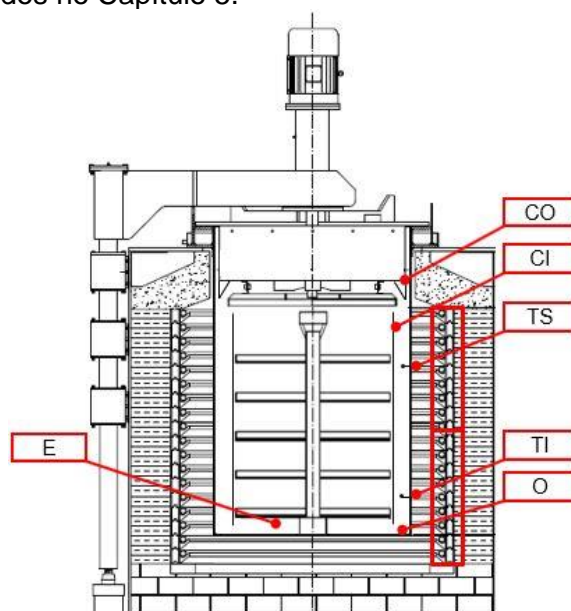


Figura 4.5 - Esboço das modificações do forno

#### 4.4.3. Rotor de recirculação de ar

Segundo Paschkis, 1948, os rotores de fluxo radial de pás retas são os mais utilizados em fornos de convecção pura, pois conseguem gerar pressões estáticas suficientes para trabalhar com a perda de carga do sistema, causada principalmente pelo fluxo de ar forçado

por entre as peças. Assim, ainda segundo o autor, com este rotor é possível se obter um escoamento com velocidades homogêneas entre as peças. De acordo com os fabricantes de fornos, também se prefere este tipo de rotor devido à sua robustez e fácil fabricação.

Como se deseja uma melhor uniformidade das temperaturas da carga e o rotor correto já é utilizado no forno, uma possível medida para tornar isso possível, segundo Trinks *et al.*, 2004, é o aumento da velocidade do escoamento no forno através do aumento do diâmetro do rotor. Ainda segundo o autor, no caso de uma carga com peças de menor emissividade, como o alumínio bruto, é indicado que se tenha um fluxo de ar com maior velocidade para que o aquecimento das peças por convecção seja favorecido.

Tal medida foi analisada juntamente à empresa de fundição e à fabricante de fornos. Como o rotor original do forno é antigo e possuía problemas de desbalanceamento por causa de desgaste, concordou-se em fazer a aquisição de um rotor novo, com 450 mm de diâmetro, ao invés de 400 mm, indicado pelo fornecedor com base na potência e rotação do motor elétrico original instalado para o sistema. Os impactos dessa e das outras alterações foram novamente simulados e são apresentados no Capítulo 5.

#### 4.4.4. Sistema de controle das resistências elétricas

Através da análise do projeto e do funcionamento do forno, nota-se que ele possui duas zonas separadas de resistências elétricas: zona superior e zona inferior. Entretanto, elas são controladas simultaneamente apenas por um termopar, instalado logo abaixo da tampa, onde também se tem a zona mais fria do forno, conforme apresentado na Figura 4.3. Desta maneira, este sensor mede uma temperatura mais baixa nesta região e o controlador, que recebe este sinal, aquece igualmente as duas zonas. Além disso, no fundo do forno há uma perda de calor menor do que na tampa e, quando as temperaturas do processo estão estabilizadas, todos estes fatores corroboram para que se tenham peças mais quentes no fundo do forno.

Conforme Lupi, 2017, quando se deseja uma boa uniformidade de temperaturas em um forno, deve-se dividi-lo em várias zonas de aquecimento separadas, cada uma com um controlador e termopar independentes. Apesar de o forno ter dois bancos de resistências, eles não operam separadamente, pois ambos são controlados por um mesmo termopar e, por isso, propõe-se sua divisão. Devido às duas zonas de resistências já estarem em circuitos elétricos separados, sugere-se que seja instalado mais um termopar e um controlador exclusivos para a zona inferior. A divisão do forno em mais de duas zonas também foi avaliada, mas foi desconsiderada por implicar em um custo maior devido ao cabeamento de alta tensão.

Após estas análises, avaliou-se com a empresa de fundição e a fabricante de fornos a viabilidade desta proposta, sendo aceita a aquisição e instalação destes novos equipamentos.

Além disso, é de grande importância analisar o posicionamento dos termopares no forno. Trinks *et al.*, 2004, recomenda que os termopares devem ser instalados o mais próximo possível da carga, para medirem a temperatura real das peças. Entretanto, é fundamental que os termopares não sejam danificados durante o carregamento ou descarregamento do forno. Neste caso, a junta quente do termopar poderia ficar muito próxima das peças se instalada na parede interna do novo cilindro. Porém, nesta posição, os termopares podem ser avariados, pois o cesto da carga se choca com esta parede quando está sendo movimentado no forno.

Propõe-se, então, a instalação dos termopares (TS e TI na Fig. 4.5) radialmente no centro da seção do duto e, verticalmente no centro de cada zona de aquecimento, obtendo-se uma temperatura média de cada uma delas. Assim, é possível medir a temperatura do fluxo de ar aquecido que posteriormente entrará em contato com a carga. Trinks *et al.*, 2004, alerta que neste caso são gerados atrasos e oscilações na temperatura das peças no decorrer do tempo de processo. Porém, o real efeito desta alteração só pode ser verificado através de um mapeamento térmico do forno com os termopares na sua nova posição. Após este mapeamento, a posição dos termopares será validada de forma experimental e utilizada no processo caso as temperaturas fiquem dentro dos limites inferior e superior de variação. Os resultados desta melhoria são avaliados na Seção 5.2.



#### 4.4.5. Orifícios de entrada de ar na tampa

Apesar de serem fundamentais para que ocorra a degradação da resina dos machos de areia, os orifícios permitem que o ar externo entre no forno sem ser devidamente pré-aquecido. Conforme Trinks *et al.*, 2004, uma entrada pontual de ar frio na atmosfera do forno resfria as peças numa região ao seu entorno, causando variações no perfil de temperaturas da carga. Isso faz também com que se gaste mais energia elétrica do que o necessário para manter o forno em sua temperatura nominal.

Através da análise da Fig. 4.3 nos Instantes 2 e 3, nota-se que o forno possui uma área mais fria em torno da peça N5P3. Isso se justifica pela análise de fluxo da Seção 4.4.2, na qual esta peça é a primeira a receber o escoamento do rotor, que está mais frio por ter incorporado ar externo vindo do orifício superior da tampa. Além disso, o escoamento frio recém-saído do rotor não é forçado a pré-aquecer até a temperatura nominal antes de entrar em contato com as peças.

Assim, há a necessidade de uma solução que pré-aqueça o ar do rotor até a temperatura nominal, antes que ele entre em contato com a carga. Analisando a instalação do outro cilindro interno proposto na Seção 4.4.2, percebe-se que ele atende a esse requisito de pré-aquecimento do ar. Isso ocorre porque todo ar frio vindo dos orifícios é incorporado ao escoamento do rotor, que é então forçado a pré-aquecer no duto para depois entrar na carga. Por isso, nenhuma ação é tomada para resolver o problema dos orifícios, pois a proposta da Seção 4.4.2 já engloba indiretamente a resolução deste problema.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Simulação e avaliação das alterações do forno

Para avaliar as alterações propostas, o setor de simulações computacionais da empresa de fundição simulou novamente a convecção do forno. Foram utilizados os mesmos parâmetros citados na Tabela 4.1, alterando-se apenas o diâmetro do novo rotor e as novas geometrias internas, destacadas na Fig. 5.1.

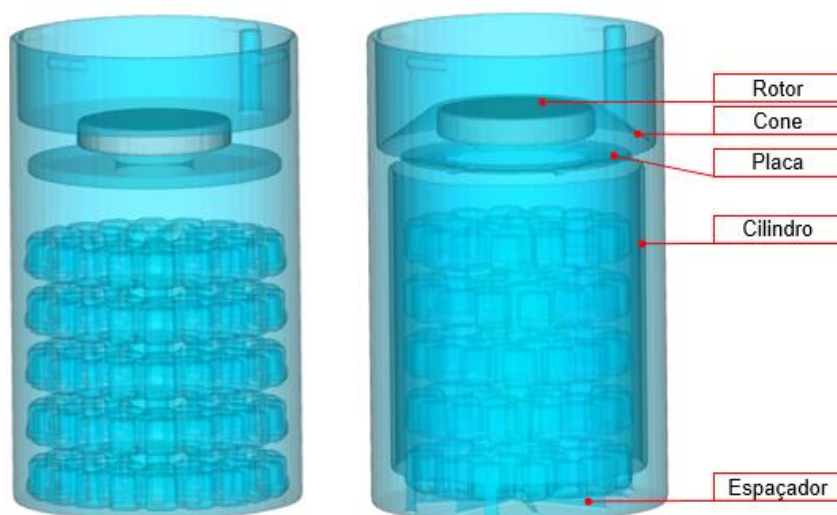


Figura 5.1 – Modelagem 3D: à esquerda a condição inicial do forno; à direita a condição com as propostas de alterações

Analisando o resultado da nova simulação qualitativa (Fig. 5.2), é possível ver que a velocidade do fluxo entre as peças, desde o nível 1 até o nível 5, é muito mais homogênea quando comparada a condição original do forno. Naturalmente, o escoamento nas peças no centro do nível superior tem velocidades mais elevadas, pois logo acima se encontra a admissão do rotor, onde todo fluxo é concentrado.

Na tampa, com o uso do cone, percebe-se que o ar é melhor direcionado para o duto, por onde o escoamento mantém uma velocidade relativamente constante até chegar nos orifícios inferiores. Também com o uso do cone, muito menos fluxo é direcionado para a região entre a tampa e a parede interna do forno, pois agora nesta região o ar tem velocidades baixas. Os espaçadores no fundo do cesto também colaboram para que o escoamento possa entrar de maneira mais homogênea por baixo da carga, desfazendo a área de velocidade nula que existia inicialmente neste local.

Estas análises corroboram que a convecção no forno se tornou mais homogênea após as alterações. Os resultados foram apresentados para a empresa de fundição e para a fabricante de fornos. Como foram satisfatórios, decidiu-se fabricar e instalar as alterações (Fig. 5.3), a fim de validá-las através de uma nova análise térmica experimental.

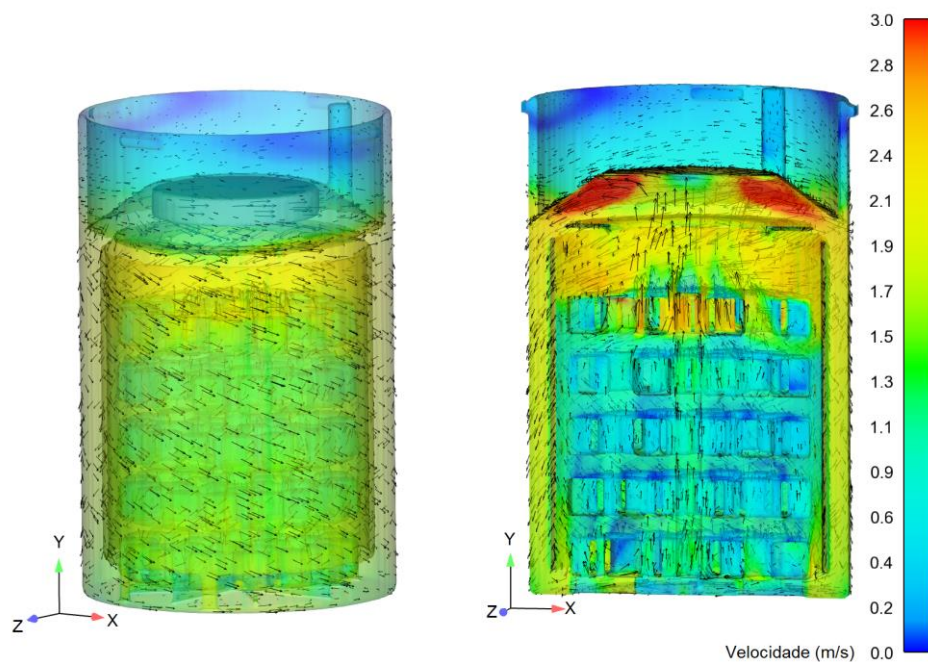


Figura 5.2 – À esquerda o resultado da simulação em vista completa; à direita o resultado na seção transversal [Zalamena, 2017]

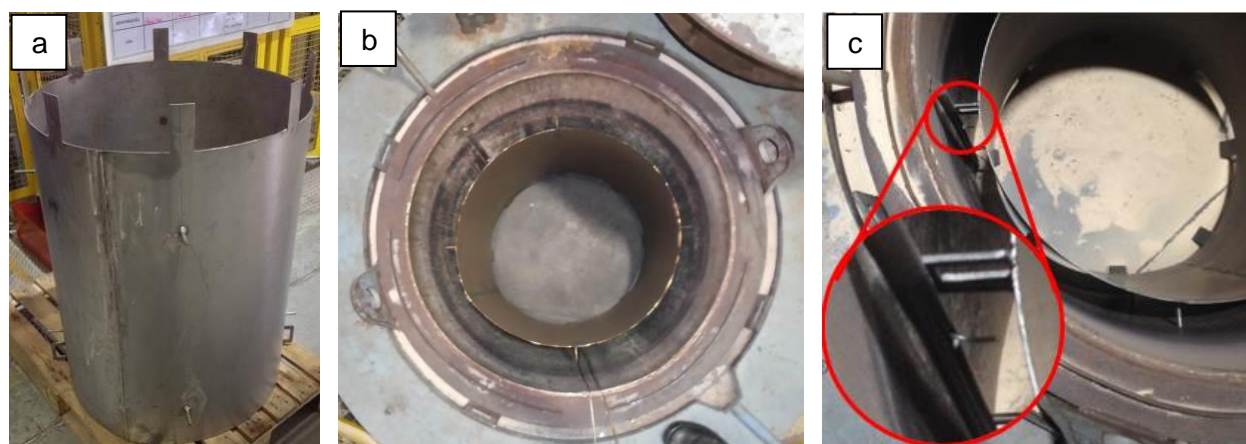


Figura 5.3 – a) Novo cilindro; b) Instalação do novo cilindro no forno; c) Posicionamento dos termopares no centro do duto

## 5.2. Análise térmica experimental final

Todo conjunto de alterações do forno foi submetido a uma nova análise térmica, para que as variações de temperatura do forno alterado pudessem ser comparadas com as iniciais, apresentada na Seção 4.3. Porém, uma redução do diâmetro das bandejas da carga foi necessária para possibilitar a instalação do novo cilindro interno. Assim, na condição nova, pôde-se montar apenas duas circunferências de peças, ao invés de três e, por isso, somente duas peças instrumentadas foram montadas em cada um dos cinco níveis, seguindo as especificações das Seções 4.1 e 4.2. Os resultados são apresentados na Fig. 5.4 e 5.5

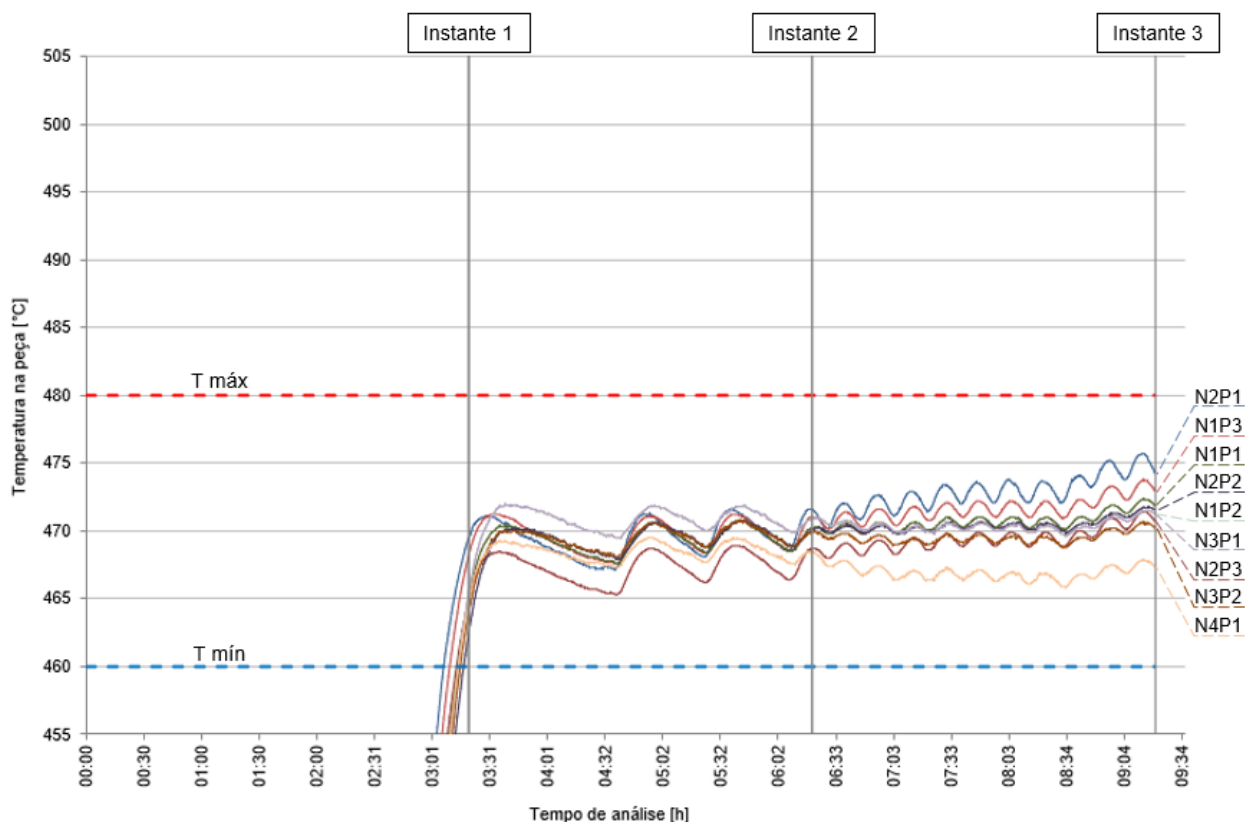


Figura 5.4 - Análise térmica do forno durante o processo de solubilização com as alterações propostas. Esta mesma imagem pode ser vista ampliada no Apêndice B

	Instante 1			Instante 2			Instante 3		
	P1	P2		P1	P2		P1	P2	
Haste central	469,5	-	N5	471,6	-	N5	474,2	-	N5
	465	468,2	N4	468,7	471	N4	470,7	472,9	N4
	465,1	468,2	N3	470,2	471,2	N3	471,9	472,1	N3
	462,5	465,5	N2	470	470,9	N2	471,5	471,2	N2
	464	464,8	N1	469,9	468,5	N1	470,1	467,4	N1

Figura 5.5 - Perfil de temperaturas da carga nos Instantes 1, 2 e 3

Através dos resultados da nova análise térmica na Fig. 5.4 e 5.5, percebe-se que todas as peças apresentam temperaturas dentro dos limites estabelecidos pela empresa de fundição. Assim, conclui-se que foram resolvidos todos os problemas encontrados na primeira análise térmica. O termopar da peça N5P2 falhou durante a aquisição de dados e por isso não pôde fazer uma medição durante todo o processo, sendo excluído da representação. Nesta análise, ao considerar os extremos do erro de  $\pm 7,5^{\circ}\text{C}$  associado à medição de temperatura, N4P2 e N5P1 apresentariam uma temperatura maior que  $480^{\circ}\text{C}$  e estariam fora do limite superior estabelecido. Já as peças que estão em verde na Fig. 5.5, com temperatura menor que  $467,5^{\circ}\text{C}$ , apresentariam temperaturas abaixo do limite inferior de  $460^{\circ}\text{C}$ .

Para comprovar a eficácia das alterações completas foi realizado mais um teste sem o novo cilindro, sendo mantidas todas as outras alterações. Nessa condição fez-se uma nova análise térmica experimental, que mostrou variações temperaturas da carga ainda maiores que as da situação inicial do forno. Desta forma comprova-se que é necessário ser implementado todo conjunto de alterações, sendo que principalmente o novo cilindro desempenha um papel importante para guiar o fluxo de ar até o fundo do forno poço.

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho realizado se mostrou capaz de mapear as condições iniciais de temperaturas do forno, analisá-las e propor melhorias para o equipamento. A análise térmica final corroborou experimentalmente que as alterações surtiram o efeito desejado no funcionamento do forno, fazendo com que o processo de solubilização passasse a atender à especificação de temperatura da empresa. Desta forma, o objetivo principal do trabalho foi cumprido.

As alterações foram eficazes devido ao entendimento de todos os fenômenos de troca de calor presentes dentro do forno, bem como da contribuição de cada um deles para a variação de temperaturas da carga durante o processo. Assim, conclui-se que o forno de convecção pura é mais apropriado para esta aplicação, na qual se deseja obter uma variação de temperaturas pequena em uma carga com várias peças. Também, para fornos elétricos de convecção, que operam em regime de batelada em baixas temperaturas, ao se aprimorar a convecção entre as peças, obtêm-se menores variações de temperaturas dentro da carga.

Devido a essas alterações terem reduzido o diâmetro das bandejas onde a carga é montada, uma perda de capacidade de produção do forno foi gerada. Como a empresa proprietária do equipamento preza principalmente pela qualidade do seu produto final, influenciada pelas variações de temperatura do forno, isso torna a redução na capacidade de produção do forno alterado um fator não tão relevante.

Entretanto, para se obter melhor aproveitamento do forno originalmente dimensionando para aquecer uma quantidade maior de peças, propõe-se como continuidade deste trabalho um estudo que vise a otimizar o aproveitamento do espaço interno do forno, de modo que a capacidade produtiva deste equipamento possa ser aumentada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GRIEVE, “**Universal Ovens**”, <http://www.grievcorp.com/catalog/Batch-Ovens/Universal-Ovens/Universal-Batch-Oven.html>. 2018. Acessado em 10/06/2018

Incropera, F. P.; Dewitt D. P.; Bergman T. L.; Lavine A. S.; “**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**”, LTC, 6ª edição, 2008.

Lupi, S.; “**Fundamentals of Electroheat – Electrical Technologies for Process Heating**”, Springer International Publishing, 1<sup>st</sup> edition, 2017.

National Instruments, “**Calculating Thermocouple Measurement Error in DMM/Switch Temperature Measurement Systems**”, <http://www.ni.com/tutorial/3075/en/>. 2015. Acessado em 10/06/2018.

Novus, “**Manual de Operação FieldLogger V1.6x F**”, [https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/manual\\_fieldlogger\\_v16x\\_f\\_portugu%C3%AAs.pdf](https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/manual_fieldlogger_v16x_f_portugu%C3%AAs.pdf). 2018. Acessado em 10/06/2018.

OMEGA, “**Revised Thermocouple Reference Tables**”, <https://br.omega.com/temperature/Z/pdf/z204-206.pdf>. 2017. Acessado em 10/06/2018.

Paschkis, V.; “**Industrial Electric Furnaces and Appliances**”, Vol. 2, Interscience Publishers, Inc, 1948.

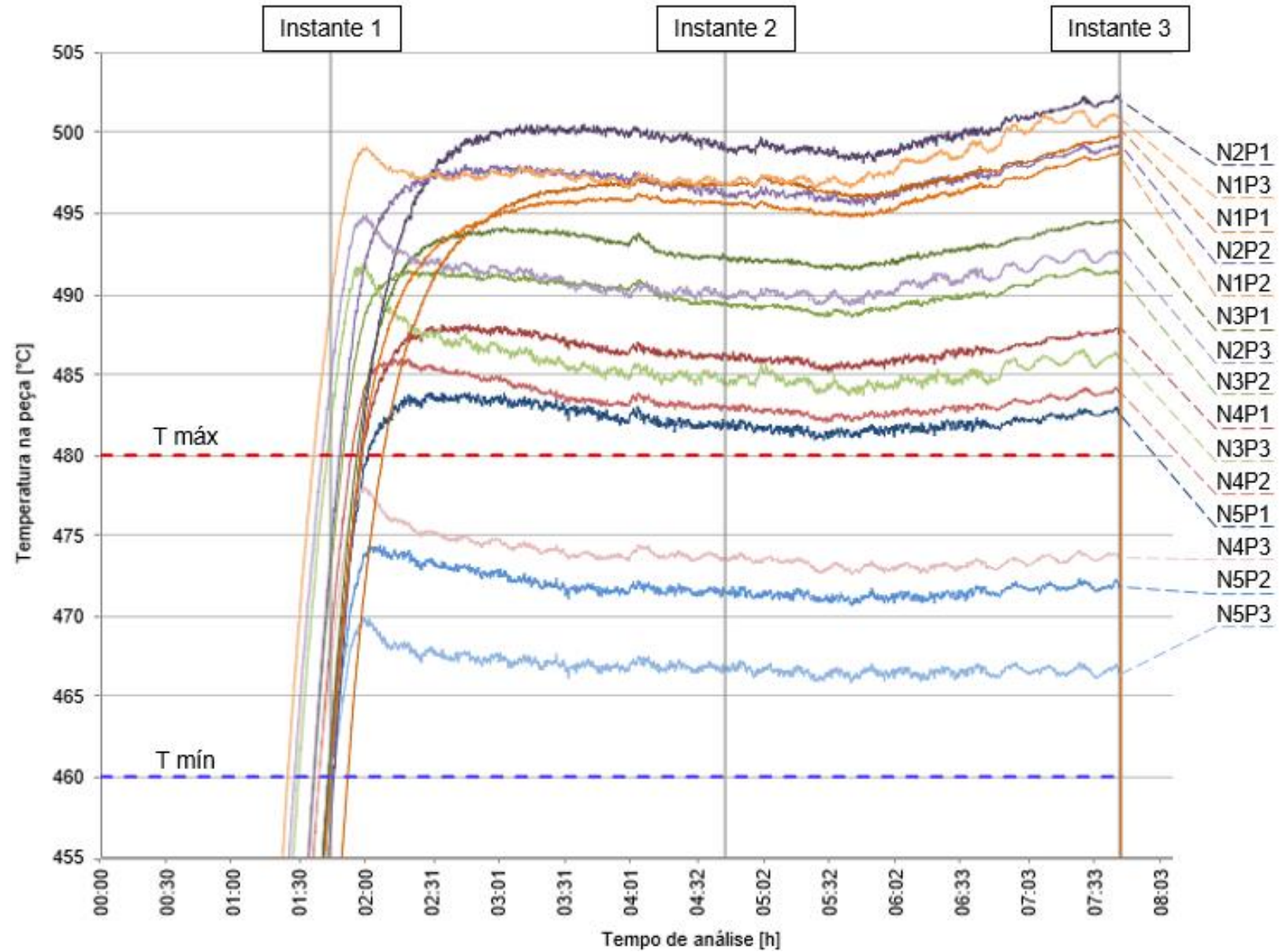
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, “**AMS 2750D: Pyrometry**”, 2005.

Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; Shannon, R. A.; Reed, R. J.; Garvey J. R.; “**Industrial Furnaces**”, John Wiley & Sons, Inc, 6<sup>th</sup> edition, 2004.

Zalamena, V. V., 2017; Comunicação pessoal com Arthur Blazoudakis Büneker



## APÊNDICE A - Análise térmica inicial do forno durante o processo de solubilização



APÊNDICE B - Análise térmica do forno durante o processo de solubilização com as alterações propostas

