

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUIZ ANTÔNIO RIBEIRO DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE  
TEMPERATURA DE CHAMA EM FUNÇÃO DO TEMPO EM QUEIMADORES  
INDUSTRIAIS AR/GÁS: APLICAÇÃO AO PROCESSO DE BRASAGEM DA LIGA DE  
ALUMÍNIO AL-MN E AL-SI**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**BELÉM - PA**

**2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE  
TEMPERATURA DE CHAMA EM FUNÇÃO DO TEMPO EM QUEIMADORES  
INDUSTRIAIS AR/GÁS: APLICAÇÃO AO PROCESSO DE BRASAGEM DA LIGA DE  
ALUMÍNIO AL-MN E AL-SI**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais.

**LUIZ ANTÔNIO RIBEIRO DA SILVA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUIZ AMARANTE MESQUITA**

**BELÉM - PA**

**2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUIZ ANTÔNIO RIBEIRO DA SILVA**

**Título: Desenvolvimento De Um Sistema De Medição Da Variação De  
Temperatura De Chama Em Função Do Tempo Em Queimadores  
Industriais Ar/Gás: Aplicação Ao Processo De Brasagem Da Liga  
De Alumínio Al-Mn E Al-Si**

**DEFESA DE MESTRADO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração em Processos industriais do programa de pós-graduação Strictu Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – ITEC - UFPA**

Belém-Pa, \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/2011

---

Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza - UFPA  
Coordenador do CMPPI

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita  
Orientador - UFPA

---

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macedo  
UFPA

---

Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza  
UFPA

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma direta ou indiretamente contribuíram com a evolução dessa dissertação e que, portanto, merecem meu profundo agradecimento, pois, tenho certeza de que a colaboração dessas pessoas foi fundamental para que essa dissertação fosse concluída.

Meus agradecimentos especiais ao Professor André Mesquita, por sua contribuição em relação banca e pelas correções apoio durante o seu desenvolvimento. Agradeço, principalmente, Deus, pois apesar de uma cirurgia urgente me deu forças para concluir esse trabalho.

Aos professores membros da banca de avaliação, pelas críticas construtivas, durante a qualificação, que foram fundamentais no realinhamento do tema dessa dissertação.

Agradeço a Whirpool Latin América S/A pela bolsa de estudos e o financiamento da pesquisa, sem o qual não seria possível concluir a obra. Por uma questão de sigilo comercial, não relaciono os seus nomes.

Aos professores da UFPA/ITEC que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração desse trabalho de pesquisa.

Aos alunos do Mestrado em Processos Indústrias, pela amizade, trocas de idéias para realização da dissertação.

A UFPA/ITEGAM, ao Departamento de pós-graduação, pelo o apoio administrativo para que o curso pudesse ter sido realizado da melhor forma possível.

*Com carinho,*

*Ao minha filha Layla Rebeca,  
razão de todo meu esforço.*

*À minha esposa Ethiane, por  
acreditar e compreender.*

*Aos meus pais, pela vida e  
dedicação.*

.

“O homem que venceu na vida é aquele que viveu bem, riu muitas vezes e amou muito que conquistou o respeito de homens inteligentes e o amor das crianças; que preencheu um lugar e cumpriu uma missão; que deixou o mundo melhor do que o encontrou, seja com uma flor, um poema perfeito ou o salvamento de uma alma; que procurou o melhor nos outros e deu aos outros o melhor de si.”

**Robert Louis Stevenson**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Bico de Bunsen	22
Figura 2.2	Chama desestabilizada na borda do tubo conhecida como blow off	23
Figura 2.3	Gradientes de velocidades de queima e escoamento de mistura	29
Figura 2.4	Esquema de Mallard e Le Chatelier	30
Figura 2.5	Velocidade de queima para alguns hidrocarbonetos (a)	33
Figura 2.6	Velocidade de queima para alguns hidrocarbonetos (b)	34
Figura 2.7	Velocidade de queima para alguns hidrocarbonetos em função do percentual de mistura	34
Figura 2.8	Efeito da temperatura nos limites de inflamabilidade	36
Figura 2.9	Esquema de um maçarico para brasagem com queimador que utiliza como oxidante o oxigênio	39
Figura 2.10	Esquema de um maçarico para brasagem com queimado de ar induzido	40
Figura 2.11	Máquina automática de brasagem de latão com queimadores tipo jato ar/gás	40
Figura 2.12	Máquina automática de brasagem peças de latão com queimadores tipo jato ar/gás de alta pressão	41
Figura 2.13	Queimador industrial de uma estufa de secagem de peças	41
Figura 2.14	Queimador tipo jato para derretimento aplica no derretimento ouro	42
Figura 2.15	Processo de corte com sistema oxi/gás de alta pressão	42
Figura 3.1	Diagrama de blocos ilustrativo da plataforma experimental para medição da temperatura de chama de queimadores ar atm/gás em função do tempo	45
Figura 3.2	Plataforma experimental de teste da medição de temperatura em função do tempo	46
Figura 3.3	Sistema de controle do fluxo do gás GLP	47

Figura 3.4	Desenho do modelo do compressor radial do catálogo da Abram	48
Figura 3.5	Montagem pratica do compressor radia na estrutura (a) e (b), entrada de ar atmosférico (c), acumulador de ar (d).	48
Figura 3.6	Rotâmetro de controle de vazão de gás GLP	49
Figura 3.7	Câmara de mistura do ar atmosférico e o gás GLP	47
Figura 3.8	Conjunto punho: Gatilho, bico queimador e câmara de mistura de gases e tubo estabilizador.	51
Figura 3.9	Queimador cilíndrico mostrando entrada e saída de fluxo de mistura e zona de recirculação.	52
Figura 3.10	Queimador cilíndrico instalado no punho suporte na posição de teste.	52
Figura 3.11	Queimador tipo U mostrando entrada e saída de fluxo de mistura e zona de recirculação	53
Figura 3.12	Queimador Tipo U montado nos punho suporte na posição de teste.	54
Figura 3.13	Esquema de montagem experimental de teste para medição da temperatura da chama.	55
Figura 3.14	Sistema de aquisição de dados modelo Agilent 34970A.	55
Figura 3.15	Módulo de aquisição de dados de 20 canais.	56
Figura 3.16	Esquema de ligação de dois fios no módulo de aquisição de dados.	58
Figura 3.17	Foto dos fios ligados no módulo de aquisição de dados.	58
Figura 3.18	Tela interativa do programa agilent BenchLink date dogger utilities durante um ensaio.	59
Figura 3.19	Tela interativa de programação do programa agilent bench link date logger utilities	60
Figura 3.20	Medição da temperatura de chama termopar tipo k com queimado com formato de U.	62
Figura 3.21	Tela interativa do programa agilent bench link date dogger utilities durante um ensaio.	64

Figura 4.1	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para o queimador tipo cilíndrico T1.	66
Figura 4.2	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P2 T1.	67
Figura 4.3	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P1. Repetição de T1.	68
Figura 4.4	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P2. Repetição T1.	69
Figura 4.5	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico para o ponto P1 T1.	70
Figura 4.6	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P2 T1.	71
Figura 4.7	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.	72
Figura 4.8	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.	73
Figura 4.9	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico. Repetição de T1 com excesso de ar atmosférico.	74
Figura 4.10	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2. Repetição de T1 com excesso de ar atmosférico.	75
Figura 4.11	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.	76
Figura 4.12	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.	77
Figura 4.13	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador tipo cilíndrico T2.	78

Figura 4.14	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico T2.	79
Figura 4.15	Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador tipo cilíndrico. Repetição de T2.	80
Figura 4.16	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para o queimador cilíndrico no ponto P2. Repetição T2.	81
Figura 4.17	Curva de temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico P1 T2.	82
Figura 4.18	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P2 T2.	83
Figura 4.19	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P1 15% de excesso ar atm T2.	84
Figura 4.20	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico com 15% de excesso ar P2 T2.	85
Figura 4.21	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico com 15% de excesso ar atm ponto P1. Repetição de T2.	86
Figura 4.22	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P2. Repetição de T2.	87
Figura 4.23	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P1 com excesso de ar T2.	88
Figura 4.24	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P2 com excesso de ar atm de 15% T2.	89
Figura 4.25	Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico T3.	91
Figura 4.26	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico com 0,15 l/h de GLP com 15% de excesso de ar atm.	92
Figura 4.27	Curva experimental temperatura de chama versus tempo	93

	no ponto P1 para queimador cilíndrico com 15% de excesso de ar atm T3.	
Figura 4.28	Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico com 15% de excesso de ar atm. Repetição de T3.	94
Figura 4.29	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador tipo cilíndrico T3.	95
Figura 4.30	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico T3.	96
Figura 4.31	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador com excesso de ar atm T3.	97
Figura 4.32	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador com excesso de ar atm T3.	98
Figura 4.33	Figura 4.33 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico com excesso de ar atm. Repetição T3.	99
Figura 4.34	Figura 4.34 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico excesso de ar atm. Repetição T3.	100
Figura 4.35	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico com excesso de ar atm T3.	101
Figura 4.36	Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico com excesso de ar atm T3.	102
Figura 4.37	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico com 0,05 m <sup>3</sup> /h de GLP.	105
Figura 4.38	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U com 0,05 m <sup>3</sup> /h de GLP. Repetição de T1.	106
Figura 4.39	Curva experimental da temperatura média de chama	107

	versus tempo para queimador tipo U com 0,05 m <sup>3</sup> /h de GLP.	
Figura 4.40	Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U teste T1 com excesso de ar atmosférico.	108
Figura 4.41	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo do queimador tipo U para repetição de T1 com excesso de ar atmosférico.	109
Figura 4.42	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U com excesso de ar atmosférico do T1.	110
Figura 4.43	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U para o T2.	111
Figura 4.44	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T2.	112
Figura 4.45	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U T2.	113
Figura 4.46	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U T2 com excesso de ar atmosférico.	114
Figura 4.47	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T2 com excesso de ar atmosférico.	115
Figura 4.48	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U T2 com excesso de ar atmosférico.	116
Figura 4.49	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U T3.	117
Figura 4.50	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T3.	118
Figura 4.51	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U P1 T3.	119
Figura 4.52	Curva experimental da temperatura de chama versus	120

	tempo para queimador tipo U T3 com excesso de ar atmosférico.	
Figura 4.53	Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T3 com excesso de ar atmosférico.	121
Figura 4.54	Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U P1 T3 com excesso de ar atmosférico.	122
Figura 4.55	Material utilizado no teste de aplicação dos queimadores na brasagem manual do alumínio. Trocador de calor em Al-Mn e Al-Si como metal de adição.	124
Figura 4.56	Teste experimental da plataforma experimental na brasagem do trocador de calor	125
Figura 4.57	Curva tempo de brasagem versus ponto do trocador de calor para mistura com composição da curva experimental T3.	125
Figura 4.58	Teste experimental da plataforma experimental na brasagem do trocador de calor	126
Figura 4.59	Curva tempo de brasagem versus ponto do trocador de calor para mistura com composição da curva experimental T3.	127
Figura 4.60	Esquema do projeto do novo queimador industrial para o forno de brasagem automática da Whirlpool com o queimador tipo cilíndrico.	128
Figura 4.61	Teste de aplicação do protótipo de queimador para o forno industrial automático de brasagem (a), (b),(c) e (d) mostra o queimador já instalado no forno automático de brasagem de trocadores de calor para condicionadores de tipo janela da Whirlpool.	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Combustão Estequiométrica dos Gases com Ar Atmosférico	25
Tabela 2.2	Velocidades Máximas de Chama.	27
Tabela 2.3	Faixas para as Velocidades Máximas de Chama.	28
Tabela 2.4	Limites de flamabilidade de combustíveis em ar atmosférico.	36
Tabela 2.5	Temperaturas Mínimas de Auto-Ignição na Pressão Atmosférica.	38
Tabela 3.1	Tabela de teste proporções para experimentação.	60
Tabela 4.1	Resumo dos resultados dos testes experimentais do queimador tipo cilíndrico para o ponto P1.	103
Tabela 4.2	Resumo dos resultados dos testes experimentais do queimador tipo cilíndrico para o ponto P2.	104
Tabela 4.3	Resumo dos resultados dos testes experimentais do queimador tipo U.	123
Tabela 4.4	Custo do sistema desenvolvido e retorno financeiro do projeto.	129

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Al	Alumínio
AC	Corrente elétrica alternada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Atm	Atmosférica (o)
$C_p$	Calor específico a pressão constante
DC	Corrente elétrica contínua
FC	Fator de combustão
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
k	Constante de reação de combustão
LI	Limite inferior de inflamabilidade
LS	Limite superior de inflamabilidade
MME	Ministério de Minas e Energia
Mn	Manganês
$\dot{m}$	Vazão mássica
P	Pressão
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica
ppm	Parte por milhão
Si	Silício
$S_L$	Velocidade de Chama
t	Tempo
T	Temperatura
$\zeta$	Tempo de reação
$\lambda$	Massa específica
$\delta$	Distância
$\epsilon$	Fração molar

## RESUMO

Neste trabalho o objetivo principal é projetar, montar e testar uma plataforma experimental de testes para queimadores industriais ar/gás com aplicação na brasagem manual de tubos de alumínio, capaz de realizar a variação de temperatura de chama dos queimadores e fazer a medição da temperatura da chama em função do tempo, utilizando a mistura de ar atmosférico e GLP (*Gás Liquefeito de Petróleo*). A medição da temperatura da chama em função do tempo direciona a caracterização dos queimadores industriais pelas curvas experimentais temperatura versus tempo para atingimento da temperatura de fusão do metal de adição Al-Si. A aplicação prática dos queimadores industriais caracteriza o tempo de brasagem em processo em função das proporções de mistura e do tipo de queimador de modo a não ultrapassar um tempo de brasagem em 25 segundos condição estabelecida pela Whirlpool Eletrodoméstico S/A. A plataforma é capaz de fazer variar a temperatura da chama nos queimadores, como também armazenar em tempo real em um banco de dados de um computador, as medidas de tempo e temperatura através do módulo de aquisição de dados. Para validar o sistema desenvolvido foram feitos experimentos e testes práticos conforme Tabela 3.1 para várias composições de misturas Ar/GLP, respeitando os limites de inflamabilidade. Os resultados obtidos permitiram o levantamento das curvas experimentais de caracterização Temperatura ( $T$ ) versus Tempo ( $t$ ), as quais apresentaram comportamentos satisfatórios para brasagem industrial que foi comprovado através de teste prático de brasagem num trocador de calor com uma liga base de Al-Mn e liga de material de adição Al-Si. De um ponto de vista prático, o trabalho originou um equipamento de caracterização experimental para o estudo de queimadores, o qual será utilizado em pesquisas desenvolvidas no estudo de processo de brasagem pelo Laboratório Físico-Químico da Whirlpool Eletrodomésticos S/A.

**Palavras-chave:** Brasagem, combustão, queimadores.

## ABSTRACT

In this work the main objective is to project, to set up and to test a platform experimental test for burners industrial air/fuel with application in the manual brasagem of tubes of aluminum, capable to accomplish the variation of temperature of fire of the burners and to do the measurement of the temperature of the fire in function time, using the mixture of atmospheric air and GLP (Liquefied Gas of Petroleum).

The measurement of the temperature of the fire in function of the time addresses the characterization of the industrial burners for the curves experimental temperature versus time for atingimento of the temperature of coalition of the addition metal it ties Al-itself. The practical application of the industrial burners characterizes the time of brasagem in process in function of the mixture proportions and of the type of way burner to not to surpass a time of brasagem in 25 seconds established condition for Whirlpool Eletrodomésticos S/A. the platform is capable to do to vary the temperature of the fire in the burners, as well as to store in real time in a database of a computer, the measures of time and temperature of I modulate of acquisition of data. To validate the developed system they were made a series of experiments and practical tests according to table 3.1 with several compositions of mixtures oxicomburstível, respecting the inflammability limits. The obtained results allowed the rising of the experimental curves of characterization Temperature (T) versus Time (t), which presented satisfactory behaviors for industrial brasagem that was proven through practical test of brasagem in a dressing room of heat with a league base Al-Mn and it calls of addition material Al-itself. Of a practical point of view, the work originated an equipment of experimental characterization for the burning, o study which will be used in researches developed in the study of brasagem process by the Physical-chemical Laboratory of Whirlpool Eletrodomésticos S/A.

**Word-key:** Brazing, combustion, burners.

## SUMÁRIO

Capítulo I .....	16
1.1. Introdução .....	16
1.2. Objetivo geral .....	18
1.2.1. Objetivos específicos .....	18
1.3. Justificativa .....	19
1.4. Delimitação da pesquisa .....	20
Capítulo II .....	21
Revisão Bibliográfica.....	21
2.1. Chamas pré-misturadas .....	21
2.1.1. Introdução.....	21
2.1.2. Estabilização de chamas .....	22
2.1.3. Principais tipos de chama .....	24
2.1.3.1. Chama Fuliginosa.....	24
2.1.3.2. Chama Redutora .....	24
2.1.3.3. Chama Ligeiramente Oxidante .....	25
2.1.3.4. Chama Oxidante .....	25
2.1.3.5. Retrocesso de Chama.....	26
2.2. Velocidade de chama .....	34
2.3. Limites de inflamabilidade .....	34
2.3.1. Limite inferior e superior de inflamabilidade.....	35
2.3.2. Preaquecimento do Ar de Combustão .....	37
2.4. Temperatura Mínima de Auto-Igñição.....	37
2.5. Queimadores Industriais.....	38
2.5.1. Queimadores industriais para o processo de brasagem manual.....	38
2.5.2. Queimadores industriais para o processo de aquecimento e corte ...	41
Capítulo III .....	43
Metodologia da pesquisa.....	43
3.1. Caracterização da pesquisa .....	43
3.2. Métodos e técnicas aplicadas a coleta de dados .....	43
3.3. Diagrama de blocos do sistema de medição da temperatura.....	44
3.4. Desenvolvimento do sistema de medição .....	45

3.5. Testes da plataforma experimental .....	61
3.5.1. Considerações sobre o GLP .....	61
3.5.2. Queimador cilíndrico .....	62
3.5.3. Queimador tipo U .....	62
3.5.4. Tela interativa do programa agilent bench link.....	63
Capítulo IV .....	65
Resultados e discussões .....	65
4.1. Primeiros testes do sistema desenvolvido.....	65
4.1.1 Teste experimental queimador tipo cilíndrico.....	66
4.1.2 Teste experimental queimador tipo U .....	104
4.2. Teste aplicação dos queimadores no processo de brasagem manual do alumínio .....	124
4.2.1. Teste de aplicação do queimador tipo U na brasagem num trocaador de calor .....	124
4.2.2. Teste de aplicação do queimador tipo cilíndrico na brasagem num trocaador de calor .....	126
4.3. Outros testes de aplicação.....	127
4.4. Resultados financeiros do projeto.....	129
Capítulo V .....	130
5.1. Conclusões e Sugestões.....	130
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	131
Referências Bibliográficas.....	132

# CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir da combustão de derivados de petróleo corresponde a mais de 80% da energia utilizada no Brasil, de acordo com o balanço energético nacional publicado pelo MME (*Ministério de Minas e Energia*) (Bessa, 2005; JR, 2008). Desta forma, pesquisas na área de combustão podem gerar importantes resultados, para resolver problemas relacionados com a poluição ambiental, queima de produtos tóxicos, mudanças climáticas e processos industriais mais eficientes. No caso da indústria, especial atenção é necessária quanto às características de queimadores e do combustível a ser usado na queima para geração energia para fins industriais, um ponto em especial é seu valor de mercado e disponibilidade, o que pode ser determinante para que indústria de grande porte migre para o uso de combustíveis cada vez mais baratos e eficientes para seus processos e menos poluentes (Carvalho, 2003, Schwartz, 2008). Isso possibilita ganhos significativos na utilização de queimadores industriais utilizados nos processos de brasagem manuais amplamente empregados na indústria de refrigeração que é o foco desse trabalho.

Robert (2004) relata que o processo de brasagem a chama é de simples execução e o mais apropriado para fazer junções em conjuntos em que todas as partes são razoavelmente acessíveis à chama gerada por queimadores, de modo que operação possa aquecer todas as regiões adjacentes da junta uniformemente até a temperatura desejada para dar início ao processo de brasagem. A técnica de brasagem é de fácil assimilação, e qualquer operador que saiba usar uma chama oxicomustível pode ser instruído a realizar o processo de união de juntas brasadas sem defeitos. Portanto, em muitas aplicações, a brasagem a chama manual pode ser uma boa alternativa para soldagem por fusão, especialmente para espessuras até 3,0 mm do metal base, fazendo o uso de uma chama redutora e moderada branda são as que produzem melhores resultados (Robert, 2004).

Neste trabalho apresenta-se uma pesquisa visando à construção de uma plataforma experimental de teste para queimadores ar/gás para Whirlpool Eletrodomésticos S/A em Manaus – AM, com ar atmosférico/GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), capaz de fornecer energia térmica suficiente, de forma a tornar o queimador com ar atmosférico uma opção para o uso no processo de brasagem manual de alumínio aplicado em condicionadores de ar tipo janela. A estratégia da pesquisa é viabilizar o uso do queimador com ar atmosférico de forma a reduzir de custo de fabricação substituindo o oxigênio puro usado como comburente e manter os mesmos padrões de qualidade e produtividade no processo de brasagem manual do alumínio. O queimador utiliza um sistema de pré-mistura do gás combustível e oxidante para proporcionar uma mistura homogênea de forma a aumentar a eficiência no processo de combustão. O sistema de medição proporciona a coleta de dados da temperatura em função do tempo e análise dos dados coletados de temperatura e tempo permitem a plotagem de curvas experimentais para caracterização das temperaturas em função das proporções de pré-mistura de combustível e oxidante e do queimador. Os resultados das análises direcionam a melhor geometria de queimador como também a melhor proporção de mistura de combustível e oxidante para o alcance das temperaturas do processo de brasagem de alumínio com a liga Al-Mn e Al-Si do circuito de refrigeração dos condicionadores de ar tipo janela de forma eficiente.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Projetar, montar e testar uma plataforma experimental teste de queimadores ar/gás com aplicação na brasagem manual de tubos de alumínio. A plataforma deve ser capaz de realizar a variação de temperatura de chama dos queimadores e fazer a medição da temperatura da chama em função do tempo, utilizando uma mistura inflamável de ar atmosférico e GLP (*Gás Liquefeito de Petróleo*), para aplicação na brasagem de trocadores de calor e tubos de ligação de alumínio usados em condicionadores de ar tipo janela manufaturados pela Whirlpool Eletrodomésticos SA em Manaus-AM.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar as proporções de mistura entre oxidante e combustível de forma a encontrar um faixa temperatura de chama que permita a aplicação na brasagem para tubos de alumínio com a liga Al-Mn e a liga de adição Al-Si.
- b) Projetar, construir, testar e comparar duas geometrias de queimadores, sendo uma do tipo U e outra cilíndrica em relação à temperatura versus tempo de atingimento da temperatura de fusão do material de adição Al-Si.
- c) Definir as características relevantes na plataforma experimental de modo que o tempo de aquecimento do metal até a temperatura de fusão do material de adição não ultrapasse o tempo de 25 segundos exigidos no processo brasagem pela Whirlpool.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O cenário econômico mundial pode ser caracterizado, nos dias de hoje, por quatro fatores marcantes: forte concorrência, velocidade na disseminação de informações, evolução e renovação rápida da tecnologia, e crescente interdependência dos mercados em escala internacional.

É neste ambiente de competição que a área de manufatura das empresas ou a área industrial tem fundamental papel a desempenhar, auxiliando as organizações na conquista de vantagem competitiva.

Para (2007), vantagem competitiva é o conjunto de características construídas por uma empresa que a diferenciam dos concorrentes, permitindo um posicionamento mais vantajoso no mercado para garantir sua sobrevivência.

A vantagem competitiva pode ser conseguida através dos diferentes estágios da cadeia de valor de uma unidade empresarial: matéria-prima, pesquisa e desenvolvimento, manufatura, *marketing*, distribuição e serviços (SEN – MME, 2007).

Na medida em que a manufatura é um destes estágios, tornou-se imperativo para as organizações a importância desse setor estratégico. O mercado globalizado gera uma variação uniforme na aquisição de insumos de fabricação para todos os segmentos de produtos industrializados, isso estabelece uma mesma base comercial para o mercado de insumos, com aço, plásticos, componentes eletrônicos e metais não ferrosos, todos esses largamente empregados nas indústrias de refrigeração, nesse ponto as empresas não conseguem ser competitivas, pois os fornecedores e preços são comuns. Para serem competitivas as empresas cada vez mais, estão sendo desafiadas a usar ferramentas criativas e a habilidade em desenvolver processo de manufaturas com custos cada vez mais baixos e com mais qualidade. É nesse contexto que este trabalho visa desenvolver uma pesquisa para Whirlpool Eletrodomésticos S/A (*conhecida no Brasil pelas marcas Brastemp e Consul*) em queimadores industriais ar/gás de formar a obter técnicas capazes de aplicar o ar atmosférico em queimadores industriais para brasagem manual de alumínio. Ministry(2006), fala que queimadores industriais com ar atmosférico como comburente é opção de custo mais baixo na manufatura em relação ao oxigênio. No

caso do alumínio matéria prima base dos trocadores de calor, o processo de brasagem manual usando ar atmosférico tem grande potencial em relação o oxigênio puro comumente usado, pelo fato da brasagem dos tubos de alumínio e os consumíveis não necessitarem de altas temperaturas para fusão do metal de adição, que para aplicação do estudo está na faixa de 578 °C, podendo proporcionar a eliminação do custo de aquisição do metro cúbico do oxigênio usado na manufatura.

## **1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA**

Esse trabalho não tem como foco principal a abordagem de automação, controles e formulações teóricas avançadas. A principal concentração da pesquisa é o desenvolvimento de uma plataforma experimental capaz de realizar testes em queimadores industriais ar/gás, com aplicação no processo de brasagem de trocadores de calor e tubos de ligação em alumínio para Whirlpool Eletrodomésticos SA.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. CHAMAS PRÉ-MISTURADAS

##### 2.1.1. Introdução

Foram os riscos encontrados na atividade de mineração de carvão, em lugar de problemas de combustão de máquina que motivaram o desenvolvimento bem cedo de teoria de chama. Uma explosão numa mineradora no Norte da Inglaterra em 1815 que deu início ao desenvolvimento de pesquisas na área de combustão que cobriram aspectos como: limite de inflamabilidade, ignição originadas por diferentes fontes quentes, e isso proporcionou o desenvolvimento da lâmpada de segurança para atender as necessidades do trabalho com mineração (Turns, 2000).

Uma chama pode ser descrita como uma zona de reação que se move com relação ao gás (Glassman, 1996). Na prática o termo é normalmente reservado para reações do tipo exotérmicas rápidas, e estas são acompanhadas freqüentemente também por emissão de luz. Chamas podem ser quaisquer chamas estacionárias em um queimador e propagando em um fluxo de gás como, por exemplo, num queimador tubular ou elas podem estar se propagando em chamas que viajam em um gás inicialmente inativo livremente misturado. Chamas estacionárias são de dois tipos gerais: chamas pré-misturadas e chamas por difusão, descritas a seguir:

##### a) Chamas pré-misturas

São aquelas onde os reagentes estão misturados antes de chegar à região da chama (Jr., McQuay, 2007). Estas chamas só podem ser obtidas se o combustível inicial e oxidante estiverem misturados entre certos limites de composição chamados os limites de composição de inflamabilidade.

## b) Chamas por difusão

Chamas difusivas são aquelas na qual o oxidante e o combustível estão inicialmente separados e a combustão ocorre em uma interface entre eles (Warnatz, 2000).

Um bico de Bunsen, cujo esquema é mostrado na Figura 2.1, pode ser usado como exemplo para os dois tipos de chama. O jato de gás carrega o ar pela abertura da base do tubo, pelo efeito Venturi, e os dois se misturam durante o trajeto até a saída. O cone interno do bico de Bunsen é a chama pré-misturada de uma mistura rica, e o produto de combustão ainda contém componentes que podem reagir. O cone externo é o local de uma segunda reação de combustão devido à formação de uma chama de difusão entre os gases parcialmente queimados e ar atmosférico.

As duas chamas coincidem apenas na borda do tubo.

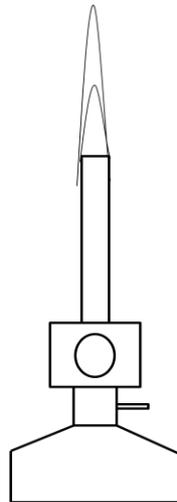


Figura 2.1- Bico de Bunsen

### 2.1.2. Estabilização de chamas

Quando se fala sobre estabilidade de chama é importante ressaltar que a chama é estabilizada apenas entre certos limites de velocidades de escoamento dentro do tubo. Se a velocidade for muito baixa, a chama entra no tubo e percorre a mistura até se apagar, ocorrendo o que chamamos de retrocesso. Por outro lado, se

a velocidade for muito alta, não é possível estabilizar a chama na borda do tubo e ela tende a escapar e apagar, como mostra a Figura 2.2 (Jr., McQuay, 2007).



Figura 2.2 - Chama desestabilizada na borda do tubo conhecida como *blow off*.

Fonte: (Robert,2004).

Em geral, os valores dos limites da velocidade do gás para *flash back* e *blow off*, dependem das dimensões do queimador e da composição do gás. Para misturas ricas e velocidades altas de escoamento, acima do limite de *blow off*, um outro fenômeno pode ocorrer. Devido ao carregamento do ar atmosférico, a mistura tornar-se-á progressivamente pobre acima da borda do queimador e, por causa da velocidade de escoamento uma chama suspensa pode se formar em certa posição acima da borda (Wang, 2010). A chama suspensa também terá dois limites. Quando a velocidade do gás é reduzida, ocorre o que chamamos de *drop back*, isto é, a chama volta a se ancorar na borda do tubo. De outra maneira, quando a velocidade do gás é aumentada ainda mais, chama tende a escapar e apagar, no que chamamos de *blow out* (Haifeng, 2005).

Dessa forma o queimador deve ser capaz de estabilizar a chama produzida, sendo os limites de estabilidade da chama o fator mais importante, que deve ser controlado. Assim o projeto do queimador será simplificado uma vez conhecido o efeito da contribuição dos parâmetros tais como: O tipo de gás combustível, a relação ar-combustível, distribuição de velocidade, velocidade de queima e sua distribuição e a intensidade do *swirl* na estabilidade da chama (Jones, 2003).

Muitos pesquisadores inicialmente tentaram melhorar a estabilidade de chamas turbulentas pré-misturadas, criando uma zona de recirculação da qual afeta a transferência de massa e a energia do sistema. Foi percebido que a velocidade blow off é um critério razoável para estabilidade da chama. Com a aplicação do swirl pode ser criada uma zona de recirculação central e conseqüentemente pode se alcançar intensidades de combustão mais altas e limites operacionais mais abertos (Morgans, 2007). Em escala industrial, em geral, a recirculação interna é feita por uma turbulência rotacional na admissão do ar, ou pela utilização de um obstáculo no fluxo.

### 2.1.3. Principais tipos de chama

#### 2.1.3.1. Chama Fuliginosa

Normalmente utilizada para depositar fuligem em uma superfície, com as finalidades de desmoldagem ou lubrificação.

O gás queima sem ar de pré-mistura, apenas arrastando o ar ambiente ao redor da chama, ou então com uma pré-mistura em proporções mínimas com ar ou com oxigênio.

#### 2.1.3.2. Chama Redutora

É a chama que tem por objetivo a combustão incompleta do gás, com a presença de monóxido de carbono (preferencialmente) e/ou hidrogênio nos produtos da combustão, gerando uma atmosfera protetora contra a oxidação (Baukal, 2001).

Este tipo de combustão é também chamado de combustão sub-estequiométrica, pois a proporção de comburente é inferior aos valores indicados nas Tabelas 2.1.

### 2.1.3.3. Chama Ligeiramente Oxidante

É uma chama praticamente neutra, onde o teor de oxigênio nos produtos da combustão é baixo, da ordem de 1 a 2%, para garantir a queima total do gás (*embora sempre exista a presença de traços de CO, da ordem de ppm*). Para atingir este objetivo, o excesso de ar de combustão deve ser da ordem de 5 a 10% acima das proporções estequiométricas indicadas na Tabela 2.2.

Sob o ponto de vista de economia de combustível, esta é a forma mais eficaz de se queimar um gás com a finalidade de geração de calor.

### 2.1.3.4. Chama Oxidante

Algumas aplicações exigem uma atmosfera oxidante, como no caso de incineração e outras aplicações onde se necessita garantir a queima do material a incinerar ou a não-redução de óxidos metálicos (AGA Aktiebolag, 1985).

As chamas oxidantes exigem o fornecimento de ar ou oxigênio em proporções superiores aos valores indicados na Tabela 2.1. Por exemplo, para se obter uma atmosfera com 7% de oxigênio, gerada por produtos da combustão, é necessário praticar um excesso de ar de combustão da ordem de 50% acima dos valores indicados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Combustão Estequiométrica dos Gases com Ar Atmosférico

Gás	Ar de combustão (Nm <sup>3</sup> ar / Nm <sup>3</sup> gás)	Produtos da Combustão (Nm <sup>3</sup> p.c. / Nm <sup>3</sup> gás)
Monóxido de carbono	2,40	2,90
Metano	9,62	10,62
Acetileno	12,02	12,52
Eteno (etileno)	14,42	15,42
Etano	16,83	18,33
Propeno (propileno)	21,36	23,13
Propano	24,04	26,04
Butano	31,25	33,75

Fonte: <http://www.krona.srv.br>

### 2.1.3.5. Retrocesso de Chama

O retrocesso de chama é um fenômeno indesejável, que pode ocorrer em sistemas de queima em algumas situações críticas.

A definição de retrocesso de chama, como a própria expressão diz, é o retorno da chama para o interior do corpo do queimador ou até, nos casos mais graves, para as tubulações e reservatórios de gás que alimentam os queimadores (J.A.M, 2006).

As principais conseqüências de um retrocesso de chama são o superaquecimento e a elevação de pressão no interior de queimadores, tubulações e seus acessórios, todas estas indesejáveis. Raramente essas conseqüências são levadas em conta quando sistemas de combustão ou de distribuição de combustível são projetados, exceção feita a sistemas de acetileno ou hidrogênio.

#### **Causas mais prováveis**

Existem duas causas principais para que ocorra um retrocesso de chama:

A causa mais comum é quando a velocidade de saída da mistura combustível-comburente, em alguma região da seção transversal do bocal do queimador, é inferior à velocidade da chama para aquela proporção de mistura. Isso pode ocorrer quando um queimador está operando em potência muito baixa ou no momento em que é desligado.

Outra causa é quando ocorre uma condição de ignição em alguma parte interna de queimadores de pré-mistura, de forma que a mistura combustível-comburente se inflame. Isso pode se dar por um superaquecimento, quando a temperatura mínima necessária para auto-ignição é atingida, ou quando outra condição de ignição se faça presente, como fagulhamento pelo tráfego de partículas ou centelha elétrica.

No bocal dos queimadores sempre ocorre uma disputa entre vetores de velocidades: por um lado, os vetores de velocidade de saída da mistura combustível-comburente; pelo outro os vetores da velocidade da chama no sentido contrário ao

da mistura. A estabilidade da chama é o resultado do equilíbrio dessa soma vetorial em todos os pontos da seção transversal do bocal do queimador.

As condições que mais favorecem a ocorrência de um retrocesso de chama são: baixa velocidade de saída da mistura ou velocidades de chama elevadas.

As baixas velocidades de saída da mistura ocorrem quando um queimador está operando abaixo de sua potência mínima ou quando o queimador é desligado.

As elevadas velocidades de chama são características intrínsecas aos combustíveis, aos comburentes e às suas misturas. Os gases combustíveis se dividem em gases de baixa e alta velocidades: o gás natural e o GLP são considerados gases de baixa velocidade, enquanto que o acetileno e o hidrogênio são gases de alta velocidade. Porém, na queima com oxigênio, as velocidades de chama se tornam elevadas para todos os gases combustíveis, embora os gases de alta velocidade continuem a manter a vanguarda nesta característica.

## 2.2. Velocidade de chama

A velocidade de chama também é conhecida por velocidade de ignição, velocidade de queima ou velocidade de propagação da chama (Fudihara).

As determinações das velocidades de chama dos gases combustíveis é um assunto que desperta polêmica. É possível encontrar algumas indicações incoerentes em diferentes referências literárias. Estamos anexando a seguir a Tabela 2.2 e a Tabela 2.3, de distintas origens, as quais apresentam diferentes informações.

Tabela 2.2 - Velocidades Máximas de Chama.

Gás	Comburente = Ar Atmosférico	
	v (m/seg)	FC(*)
Metano	0,45	1,08
Propano	0,46	1,06
n-Butano	0,45	1,03
Butadieno	0,57	1,23
Acetileno	1,55	1,25
Hidrogênio	3,25	1,80

(\*) FC é o fator de combustão (estequiométrica = 1,00). Fonte: Glassman (1996)

A Tabela 2.3 inclui também as velocidades de chama com oxigênio, o que nos mostra como este comburente contribui para a elevação dos valores desta característica. Esta Tabela também indica as faixas de velocidades mais prováveis de serem encontradas.

Tabela 2.3 - Faixas para as Velocidades Máximas de Chama.

Gás	Comburente	
	Ar Atmosférico	Oxigênio Puro
	v (m/seg)	v (m/seg)
Hidrogênio	2,49 - 3,64	8,93 - 11,87
Metano	0,33 - 0,44	3,24 - 4,82
Propano	0,40 - 0,47	3,60 - 4,01
Butano	0,38 - 0,46	3,34 - 3,55
Acetileno	1,10 - 1,81	9,49 - 12,77

Fonte: (Reed, 1997).

As diferenças radicais entre as velocidades de chama da queima de gases combustíveis com ar atmosférico (21% de oxigênio) e com oxigênio puro (praticamente 100% de oxigênio) tornam impossível a troca do comburente em queimadores convencionais. Dentro de certos limites, um queimador projetado para queimar gás combustível com ar pode operar com ar enriquecido com oxigênio, onde tal limite não costuma ultrapassar o teor de 25% de oxigênio na atmosfera comburente (JR,2003) . Alguns queimadores de alta velocidade poderiam trabalhar com teores de, até, um pouco acima dos 30% sem apresentar superaquecimento significativo do bocal e tendência ao retrocesso da chama.

Existem queimadores capazes de queimar gás combustível, tanto com oxigênio puro como com ar atmosférico ou ar enriquecido, sem que nenhuma modificação seja feita durante a operação, bastando apenas realizar manobra de válvulas (BUCKMASTER, 1982). A utilização desses queimadores possibilita uma aplicação versátil em processos de alta temperatura, onde as demandas térmicas e as necessidades de pressurização da câmara de queima são muito variáveis. Por exemplo, na etapa da fusão de um metal a oxi-combustão apresenta as vantagens das altas eficiência e produtividade. Porém, caso seja necessário manter o metal

líquido no mesmo forno, a alternativa mais adequada é, geralmente, a combustão com ar.

Para um queimador laminar, a velocidade do gás é baixa próximo à parede, mas aumenta conforme se aproxima do centro, em um perfil aproximadamente parabólico (2005). Em todos os pontos no interior da borda do tubo, a velocidade de escoamento excede a velocidade de queima. A chama toma o formato cônico de tal maneira que, na frente da chama, a componente de velocidade normal da velocidade de escoamento seja igual à velocidade de chama conforme Figura 2.3.

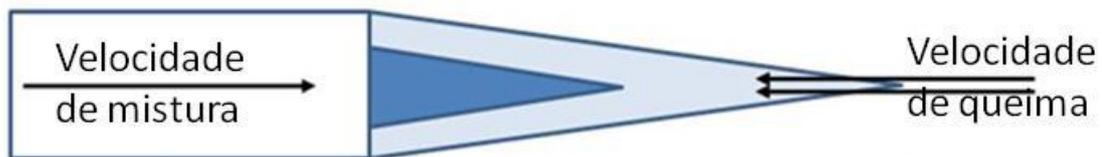


Figura 2.3 - Gradientes de velocidades de queima e escoamento de mistura. Fonte: (Robert, 2004)

Mallard e Le Chatelier dividiram a chama em duas zonas: uma correspondente ao pré-aquecimento da mistura combustível (zona I) e a outra à queima (zona II) (Jr, McQuay, 2007) conforme a Figura 2.4. Conceitualmente, eles afirmam que a quantidade de calor conduzida na zona II é igual à quantidade de calor necessária para que os gases não queimados atinjam a temperatura de ignição. Assim:

$$\dot{m}c_p(T_f - T_0) = \frac{\lambda(T_f - T_0)}{\delta} \quad (1)$$

Na equação (2) o termo do lado direito corresponde o fluxo de calor para esquerda, para aumentar a temperatura de uma valor inicial  $T_0$  até a temperatura de ignição  $T_i$ , e o termo do lado direito corresponde ao fluxo de calor, também para esquerda, devido ao gradiente de temperatura. Na equação (1),  $\dot{m}c_p$  e  $\lambda$  são, a vazão mássica, o calor específico a pressão constante e condutividade térmica da

mistura, respectivamente,  $\delta$  é a espessura da zona de reação e  $T_f$  é a temperatura final após a passagem da onda de combustão.

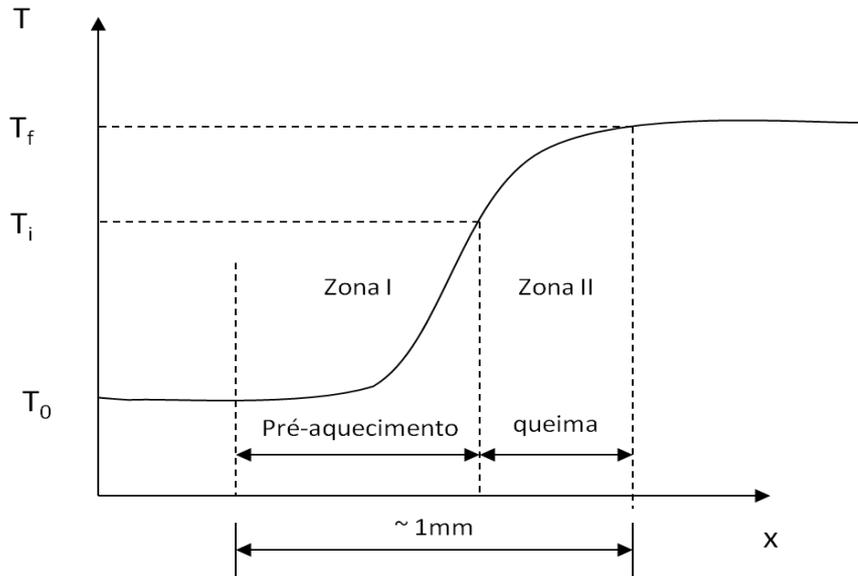


Figura 2.4 - Esquema de Mallard e Le Chatelier (Jr, McQuay, 2007)

O modelo assume  $C_p$  constante, aumento linear de temperatura entre  $T_i$  e  $T_f$  na distância  $\delta$ , e que há uma região onde não há liberação de calor terminando em  $T_i$ .

Considerando o problema unidimensional temos:

$$\dot{m} = \rho A S_L \quad (2)$$

Onde  $A$  é a área da seção (assumida como unitária) e  $S_L$  é a velocidade de chama laminar. Assim:

$$\rho A S_L C_p (T_f - T_0) = \frac{\lambda (T_f - T_0)}{\delta} \quad \text{onde, podemos escrever} \quad (3)$$

$$S_L = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{((T_f - T_i))}{(T_f - T_0)} \frac{1}{\delta} \quad (4)$$

A equação (4) é o resultado de Mallard e Le Charelier. Esta expressão não é suficiente representativa porque  $\delta$  não é conhecido e  $T_i$  define um ponto hipotético

onde começa uma região de reação como incremento linear de temperatura. Contudo, o problema real é que não há informação sobre a razão de reação no modelo. Assim, vamos investigar um modelo simplificado considerando a razão de reação. É possível relacionar  $\delta$  com  $S_L$ , uma vez que  $\delta$  é a espessura da zona de reação. Portanto:

$$\delta = S_L \tau, \quad (5)$$

onde  $\tau$  é um tempo de reação que corresponde a uma razão de reação média  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  tal que:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \tau = 1, \quad (6)$$

onde  $\varepsilon$  é a fração de massa de um reagente que é totalmente consumido na reação. Assim:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{S_L} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7)$$

Substituindo esta equação no resultado de Mallard e Le Chatelier, temos:

$$S_L = \left( \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{T_f - T_i}{T_f - T_0} \frac{d\varepsilon}{dt} \right)^{1/2} \alpha \left( \frac{\lambda}{\rho C_p} RR \right)^{1/2} \quad (8)$$

onde  $RR$  é a razão de reação.

Investigaremos a seguir a dependência com a pressão da velocidade de chama. Sabemos que:

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (9)$$

onde  $k$  é a constante de reação, tal que  $k=Ae^{-E/RT}$ ,  $A$  é fator de frequência,  $C$  a concentração do reagente consumido e  $n$  a ordem de reação. Para o reagente,  $C=\rho\varepsilon$ . Se a pressão e a temperatura variarem pouco com o tempo, temos:

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} - k(\rho\varepsilon)^n \Rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = -k\varepsilon^n \rho^{n-1} \quad (10)$$

Como  $\rho \propto p$ , temos  $\frac{d\varepsilon}{dt} \propto p^{(n-1)}$ . Voltando à pressão para velocidade de chama, obtemos:

A maior parte de chamas de hidrocarbonetos tem ordem de reação igual a 2 e, assim, conclui-se que a velocidade de chama para hidrocarbonetos devem ser independente da pressão. Isso tem sido verificado experimentalmente.

Para o caso da dependência da velocidade de chama com a temperatura é dominada pela exponencial como pode ser vista na equação (11). Assim, pode-se assumir que:

$$S_L \propto (e^{-E/RT})^{1/2} \quad (11)$$

Uma vez que a maior parte da reação ocorre perto da temperatura mais alta, a temperatura a ser usada na expressão é  $T_f$  e

$$S_L \propto (e^{-E/RT_f})^{1/2} \quad (12)$$

Assim, o efeito de variar a temperatura inicial pode ser conhecido se conhecermos como esta variação altera a temperatura de chama. Sabemos que um aumento de 100 °C na temperatura inicial resulta em um aumento de temperatura bem menor na temperatura de chama. A dependência de  $S_L$  com  $T$  dada pela equação acima tem sido observada experimentalmente. A temperatura  $T_f$  é a

apropriada aqui porque estamos considerando uma reação de um único passo. Em reações mais complexas, as reações finais produzindo  $T_f$ , podem ter contribuição mínima em  $S_L$ .

A variação da velocidade de chama com a razão oxidante/combustível segue a variação da temperatura de chama adiabática com a razão de mistura. Assim, a velocidade de chama será a máxima quando a mistura for aproximadamente estequiométrica. A maioria dos hidrocarbonetos tem temperaturas não muito diferentes para mistura estequiométrica com ar. Assim, a maioria dos hidrocarbonetos tem máximas velocidades de chama, aproximadamente iguais para misturas com ar.

A velocidade de propagação de uma chama laminar depende do tipo de combustível e da concentração de combustível na mistura. A Figura 2.5 apresenta a velocidade de chama laminar diversos gases em ar atmosférico. O metano tem uma velocidade máxima de propagação de chama de cerca de 0,40 m/s. velocidades máximas de chama da ordem de 0,4 a 0,5 m/s são típicas para hidrocarbonetos com ar atmosférico. Acetileno, etileno e hidrogênio possuem velocidades de chamas mais elevadas devido à rápida cinética de reação e à alta difusividade molecular. As Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 mostram a velocidade de combustão para vários gases.

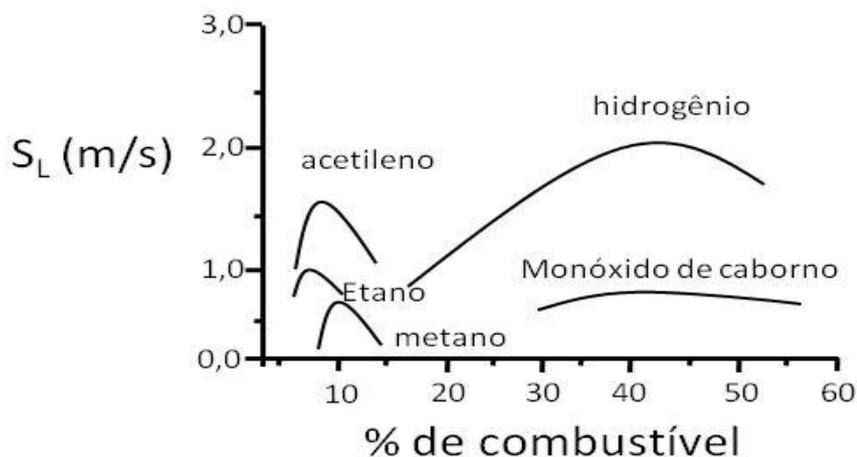


Figura 2.5 - Velocidade de queima para alguns hidrocarbonetos (a). (Jr., McQuay, 2007).

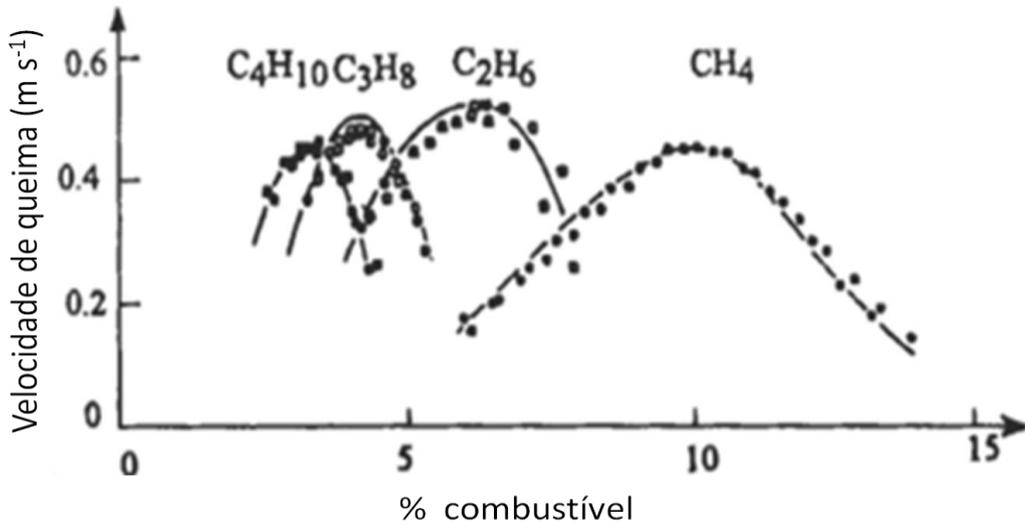


Figura 2.6 - Velocidade de queima para alguns hidrocarbonetos (b). (Kuo, 2004)

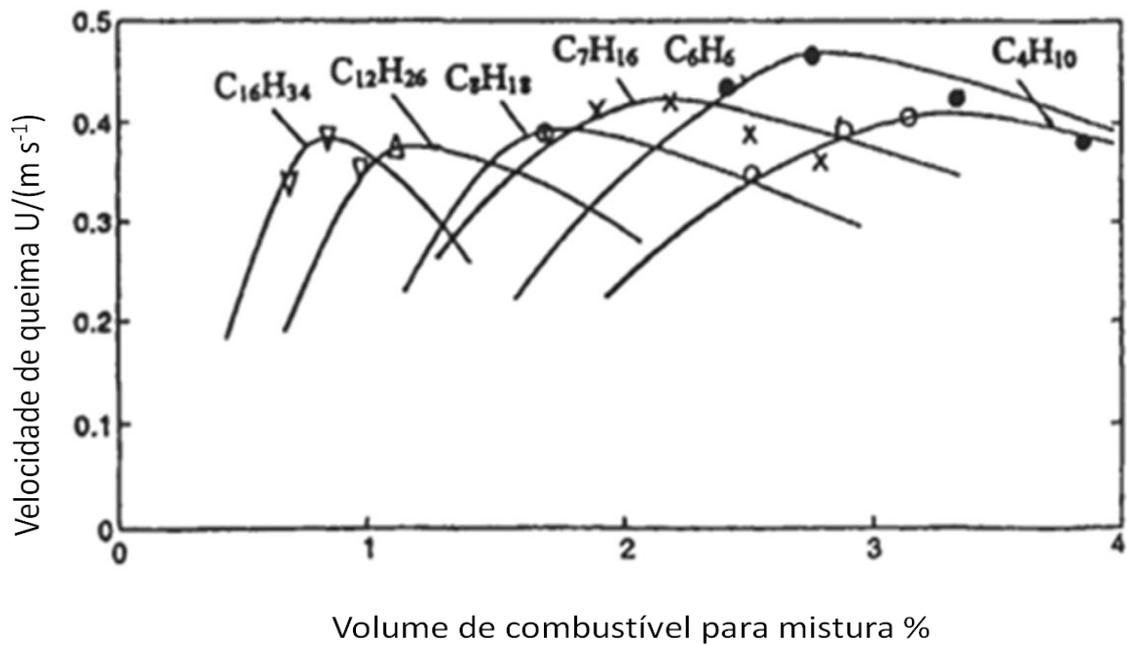


Figura 2.7 - Velocidade de queima para alguns hidrocarbonetos em função do percentual de mistura. Fonte: (Kuo, 2004)

### 2.3. Limites de inflamabilidade

O campo de inflamabilidade define a faixa de proporções onde uma mistura gás-comburente se inflamará quando submetida a uma condição de ignição. O campo de inflamabilidade também é chamado de campo de explosividade. A ocorrência de uma inflamação ou de uma explosão dependerá do grau de confinamento da mistura inflamável e sua capacidade de aliviar a expansão dos gases gerada pela combustão (ABDEL-GAYED, R. G., 1985).

Nem toda mistura de combustível com o ar ou oxigênio irá queimar continuamente em uma combustão auto-sustentável. Existem os limites “pobres” (limite inferior) da mistura e “rico” (limite superior) da mistura, além dos quais a combustão prática é impossível. Um exemplo comum é afogar o motor de um automóvel. (um excesso de combustível produz uma mistura muito rica, para ser queimada. (Acima do limite superior de inflamabilidade). Mesmo dentro dos limites de inflamabilidade, existem alguns limites práticos para o uso da mistura ar-combustível. Um deles é o CO, gás venenoso, gerado por fogo muito rico. outro limite é a temperatura ou atmosfera exigida pelos processos.

A relação entre o combustível e o oxidante em uma mistura determina se a mesma é ou não inflamável. O interesse industrial no assunto ocorre tanto no aspecto de operação como no de segurança. Abaixo do limite inferior de inflamabilidade a mistura é chamada pobre (em combustível) e não se inflama. Acima do limite superior de inflamabilidade a mistura é chamada rica e, também, não se inflama.

#### 2.3.1. Limite inferior e superior de inflamabilidade

Uma mistura somente queimará se a concentração do combustível estiver entre os limites inferior e superior de inflamabilidade, que chamaremos LI e LS, respectivamente. A Tabela 2.4 mostra o LI e LS para alguns combustíveis com ar.

Tabela 2.4 - Limites de flamabilidade de combustíveis em ar atmosférico.

Combustível	Fórmula	LI (%)	LS (%)	PE (%)*
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	4	74,2	29,6
Monóxido de carbono	CO	12,5	74,2	29,6
Metano	CH <sub>4</sub>	5	15	9,5
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3	12,4	5,7
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,1	32	6,5
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,5	80	7,8
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,1	9,5	4,0
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,4	11	4,5
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,6	8,4	3,1
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,6	8,4	3,1
Isopentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1,4	8,3	5,0
Éter dimetílico	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	3,4	27	6,5

Fonte: McQuay, 2007

\*Percentagem estequiométrica do combustível na mistura, calculada considerando o ar atmosférico como 21% O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

Uma regra prática para estimar os limites de inflamabilidade é que limite superior é da ordem de três vezes o valor estequiométrico e o limite inferior é da ordem de 50% do valor estequiométrico.

A Figura 2.8 mostra que o intervalo de inflamabilidade aumenta quando a temperatura inicial da mistura aumenta. Mudanças na pressão inicial da mistura não afetam o LI para os hidrocarbonetos em ar, mas o LS aumenta com a pressão.

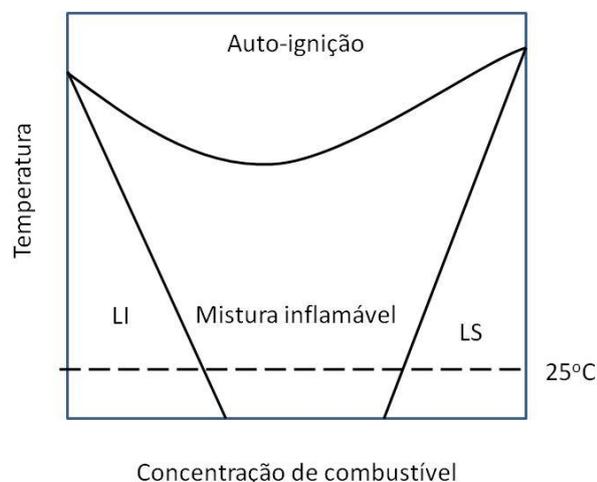


Figura 2.8 - Efeito da temperatura nos limites de inflamabilidade (Jr., McQuay, 2007).

### 2.3.2. Preaquecimento do Ar de Combustão

O preaquecimento do ar de combustão é uma medida que proporciona significativa economia de combustível e também como mostra a Figura 2.8 aumenta o campo inflamabilidade, principalmente em processos térmicos de alta temperatura. Este preaquecimento pode ser feito através de recuperadores ou de regeneradores. Portanto, sob o ponto de vista da emissão de CO<sub>2</sub>, esta medida contribui para sua redução por diminuir a quantidade de combustível queimado.

Porém, por outro lado, aumenta o potencial para formação de NOX devido à elevação da temperatura da chama. Também neste caso, a utilização de gás natural e GLP contribuem significativamente para a redução do NOX, devido ao baixíssimo nível de excesso de ar de combustão exigido.

Outros sistemas de combustão e controle foram desenvolvidos para reduzir a formação de NOX, como a recirculação dos produtos da combustão, a combustão estagiada e a recirculação interna da atmosfera da câmara de combustão no sentido da chama. A filosofia dos métodos para reduzir a formação de NOX baseia-se na redução do excesso de ar de combustão, no rápido resfriamento da chama no interior da câmara de combustão, sem, entretanto contribuir para a formação de produtos da combustão incompleta.

### 2.4. Temperatura Mínima de Auto-Ignição

A temperatura mínima de auto-ignição é uma temperatura limite, a partir da qual uma mistura de um gás combustível e um comburente se inflamam espontaneamente, quer dizer, sem a presença de uma chama piloto ou centelha (J.A .M., 2002, Jr., McQuay, 2007).

A Tabela 2.5 mostra as faixas temperatura mínima de auto ignição para diversos combustíveis.

Tabela 2.5 - Temperaturas Mínimas de Auto-Igنيção na Pressão Atmosférica.

Gás	COMBURENTE	
	Ar (°C)	Oxigênio (°C)
Metano	580	555
Etano	515	-
Propano	480	470
Butano	420	285
Monóxido de carbono	630	-
Hidrogênio	570	560
Acetileno	305	296

Fonte: <http://www.krona.srv.br>

Essa temperatura é muito importante para o estabelecimento das condições de proteção contra a falta de chama no interior de câmaras de combustão. As normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – estabelecem a temperatura de 750°C nas superfícies internas da câmara de trabalho como fronteira entre os processos de baixa e alta temperatura. Nos processos acima de 750°C, estando garantida a auto-ignição da mistura ar-gás com alguma margem de segurança, as exigências aos sistemas de proteção contra falta de chama são menos intensas.

## 2.5. QUEIMADORES INDUSTRIAIS

A função do queimador é o de fazer com que o combustível e o oxidante fiquem em contato o tempo suficiente e à temperatura suficiente para ocorrer e completar a reação de combustão (Brewster, 1999, Fudihara, 1994). Para manter essa característica o queimador é configurado dependendo do tipo de oxidante que vai ser usado para queimar o combustível (J.A M., 2006, Khatchatourian, 1,998).

### 2.5.1. Queimadores industriais para o processo de brasagem manual

A Figura 2.9 mostra a configuração típica de um queimador para processo de brasagem que utiliza como oxidante o oxigênio e a Figura 2.10 apresenta um queimador da configuração típica, sendo ar atmosférico o oxidante do combustível. Esse tipo de queimador utiliza uma válvula com Venturi, que é o principal componente do maçarico. Esta válvula controla o fluxo de gás e oxigênio através da mangueira. Quando se usa gás de bujão sem regulador de pressão, esta válvula tem a função de puxar mais gás para misturar-se ao oxigênio, tornando mínimo o efeito da oscilação de pressão do gás.



Figura 2.9- Esquema de um maçarico para brasagem com queimador que utiliza como oxidante o oxigênio. Fonte: [www.gasflux.com.br](http://www.gasflux.com.br)

O tipo de maçarico da Figura 2.10 utiliza com sistema de mistura e arrasto válvula tipo Venturi, como pressão requerida de gás na entrada de 0,7 até 2 bar (10 e 30 psig). Devido às suas características, não necessita de ventilador de combustão/ar comprimido, sendo de fácil aplicação.



Figura 2.10 - Esquema de um maçarico para brasagem com queimado de ar induzido. Fonte: <http://www.nei.com.br>

A Figura 2.11 mostra um sistema de brasagem automática de latão com queimadores ar/gás. Esse tipo de configuração de queimadores é muito usado em fornos de brasagem automática e manual (ROBERT, 2004).



Figura 2.11 - Máquina automática de brasagem de latão com queimadores tipo jato ar/gás. Fonte: <http://www.nei.com.br>

A Figura 2.12 mostra um sistema de brasagem automática de peças de latão com queimadores industriais de alta pressão ar/gás.



Figura 2.12 - Máquina automática de brasagem peças de latão com queimadores tipo jato ar/gás de alta pressão. Fonte: <http://www.nei.com.br>

#### 2.5.2. Queimadores industriais para o processo aquecimento e corte

A Figura 2.13 mostra um queimador industrial ar/gás aplicados numa estufa secagem de peças pintadas.



Figura 2.13 - Queimador industrial de uma estufa de secagem de peças. Fonte: <http://www.nei.com.br>

A Figura 2.14 mostra queimadores ar/gás do tipo jato aplicados no aquecimento, derretimento e purificação de ouro.

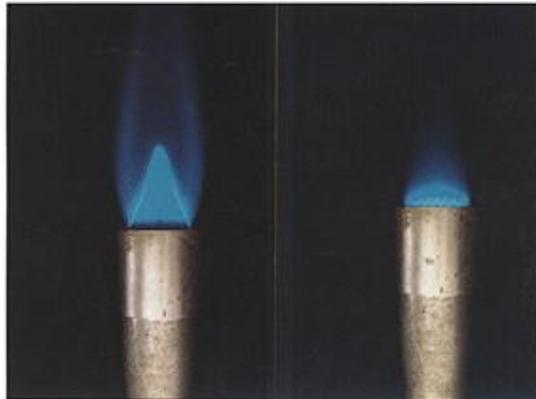


Figura 2.14 - Queimador tipo jato para derretimento aplica no derretimento ouro.

Fonte: <http://www.nei.com.br>

A Figura 2.15 mostra um processo de corte com o sistema oxigás num centro de usinagem



Figura 2.15 - Processo corte com sistema oxigás de alta pressão. Fonte: <http://aplmetaliza.blogspot.com>

## CAPÍTULO III

### **METODOLOGIA DA PESQUISA**

#### **3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA**

Este trabalho visa o desenvolvimento de uma pesquisa em queimadores para ar/gás através do projeto, montagem e testes de uma plataforma experimental de teste, para caracterização de queimadores industriais ar/gás com aplicação no processo de brasagem manual de tubos de alumínio condicionadores de ar de janela. A plataforma é capaz de variar a temperatura de chama nos queimadores e realizar a medição da temperatura em função do tempo com armazenamento dos dados em um banco de dados de um computador. A coleta de dados se faz através de uma placa de aquisição de dados e sensores de temperatura instalados nos queimadores industriais utilizando a mistura de ar atmosférico e GLP para o processo de combustão. A pesquisa foi financiada e desenvolvida no Laboratório Físico-Químico e experimentada no processo de manufatura da empresa Whirlpool Eletrodomésticos S/A em parceria com Instituto de Tecnologia Galileu da Amazônia e a Universidade Federal do Pará - AM.

#### **3.2. MÉTODOS E TÉCNICAS APLICADAS A COLETA DE DADOS**

O estudo sobre os queimadores industriais a gás tomando com base o uso da mistura GLP mais ar atmosférico será realizado em quatro fases:

A primeira fase será feita uma pesquisa bibliográfica visando (i) a familiarização com o processo de combustão e (ii) o levantamento dos tipos de queimadores para processo de brasagem oxigás com ar atmosférico utilizado na indústria (Turns, 2000).

A segunda fase será composta do desenvolvimento do projeto, montagem e testes de uma plataforma experimental para teste de dois queimadores que serão aplicados na brasagem manual de tubos de alumínio. A plataforma deve ser capaz variar a temperatura de chama nos queimadores de realizar a medição da temperatura da chama no queimador em função do tempo durante o processo de queima da mistura, sendo a mistura uma composição de ar atmosférico e GLP.

A terceira fase da pesquisa será composta pela construção e teste dos de dois tipos queimadores para gás GLP mais ar atmosférico.

A quarta e última fase do projeto de pesquisa será a análise dos resultados e conclusões sobre as curvas experimentais dos queimadores cujo resultado deve direcionar qual melhor condição de brasagem com os queimadores propostos para o estudo desse trabalho.

### 3.3. DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

A plataforma experimental ilustrada no diagrama de blocos da Fig. (3.1) é composta de uma fonte de gás combustível (1) uma fonte de ar atmosférico (2), um controlador de vazão volumétrica (3), um misturador de gases (4) para fazer a interação dos gases gerando uma composição inflamável, queimador (5) para a queima e geração da chama, sensor de temperatura (6), um sistema de aquisição de dados (7) registro em tempo real num computador. Os parâmetros envolvidos na medição são a temperatura ( $T$ ) de chama no queimador e o tempo ( $t$ ). Estes parâmetros de tempo ( $t$ ) e temperatura ( $T$ ) armazenados em um PC serão analisados para compor os resultados

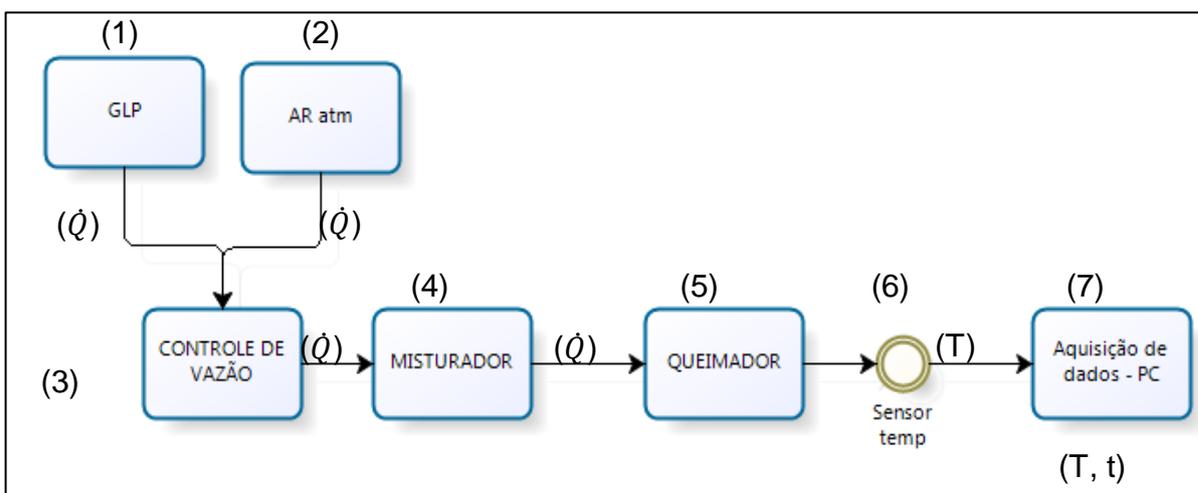


Figura 3.1 - Diagrama de blocos ilustrativo da plataforma experimental para medição da temperatura de chama de queimadores ar atm/gás em função do tempo.

Conforme estabelecido anteriormente, a medição da temperatura em função do tempo direciona a caracterização da composição da mistura e do tipo de queimador utilizado, de forma a ficar conhecida a temperatura versus o tempo que a chama leva para atingir a temperatura de trabalho para brasagem do Alumínio. Com os dados coletados de temperatura e tempo é possível plotar curvas experimentais de temperatura ( $T$ ) versus tempo ( $t$ ), para determinar a temperatura da chama e o tempo correspondente para alcance da temperatura de trabalho de brasagem e relacionar com a proporção experimental de vazão de mistura ar atmosférico/GLP e o tipo de queimador aplicado para brasagem da liga Al-Mn com liga Al-Si. A análise dos dados coletados durante as experimentações determinará qual melhor proporção de mistura e queimador geram uma temperatura de chama que melhor se aplica no processo de brasagem das ligas de alumínio acima mencionadas.

### 3.4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Com base no diagrama de blocos da Fig. 3.1 foi construída a plataforma experimental mostrada na Figura 3.2. Essa plataforma consiste por um tanque de gás GLP (1), um compressor radial da Abram (2), dois rotâmetros (3) da marca

Aplitec, uma câmara de mistura (4), dois queimadores (5), dois termopares tipo K (6) da Minipa, um sistema de aquisição de dados - Modelo Agilent 34970A (7), um computador (8) com programa de visualização dos dados coletados . Os principais componentes dessa plataforma são descritos mais detalhadamente a seguir :

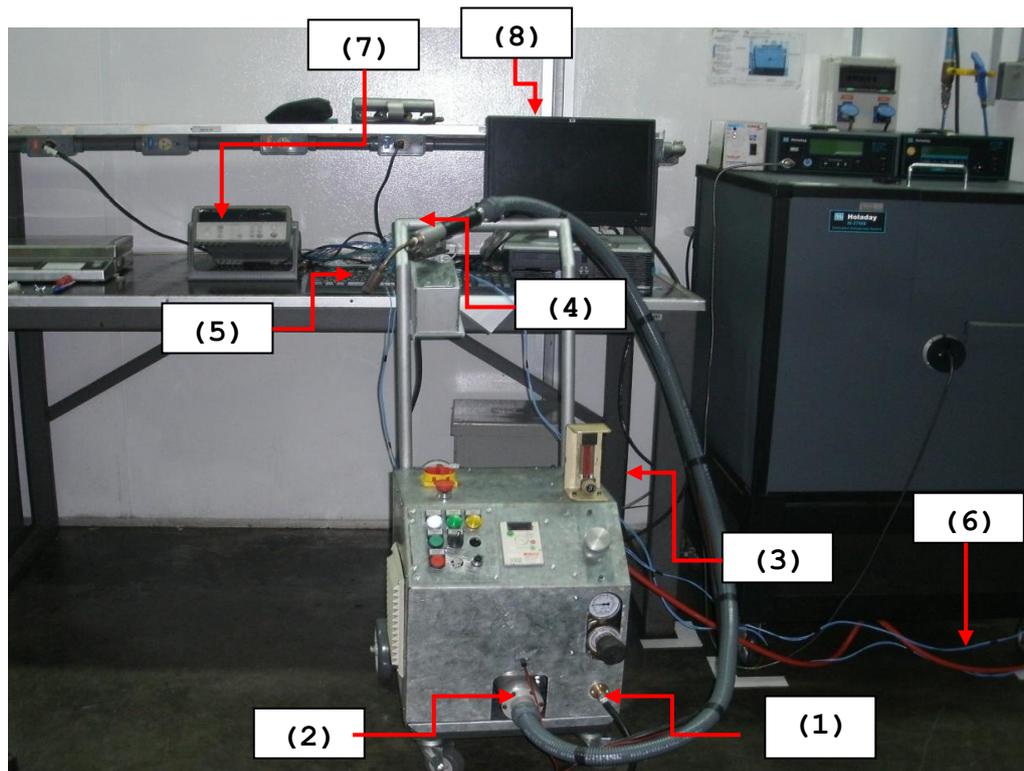


Figura 3.2 - Plataforma experimental de teste da medição de temperatura em função do tempo.

#### 1. Sistema de gás combustível GLP

O gás utilizado no processo de combustão é o GLP (*Gás Liquefeito de Petróleo*), que provém de um tanque externo e é fornecido através de uma rede industrial a uma pressão de trabalho de  $1,2\text{kgf/cm}^2$ . Para o uso do GLP foi desenvolvido um sistema de controle com uma válvula solenóide para abertura e fechamento da passagem de gás de acordo com a solicitação do queimador e um manômetro com regulador de pressão monitoramento e ajuste de pressão de entrada. A Figura 3.3 mostra o sistema de controle de gás GLP da plataforma experimental.

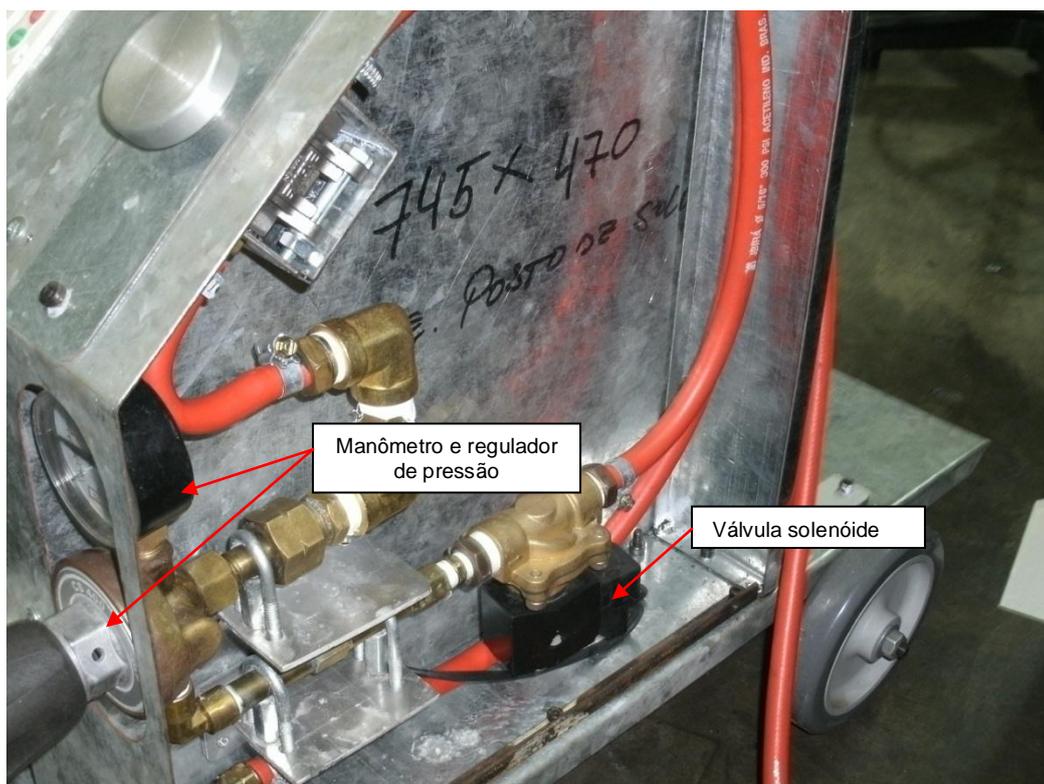


Figura 3.3 - Sistema de controle do fluxo do gás GLP.

## 2. Compressor radial

O compressor do tipo radial do fabricante Abra modelo CR-4 com capacidade de vazão máxima de  $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$  e pressão máxima de  $15690,12$  a  $60 \text{ Hz}$ . O compressor aspira o ar atmosférico do ambiente e envia para um acumulador que distribui para câmara de mistura de gases. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram a imagem do compressor modelo CR-4 da Abram com a montagem prática do compressor no acumulador e entrada de ar atmosférico respectivamente.

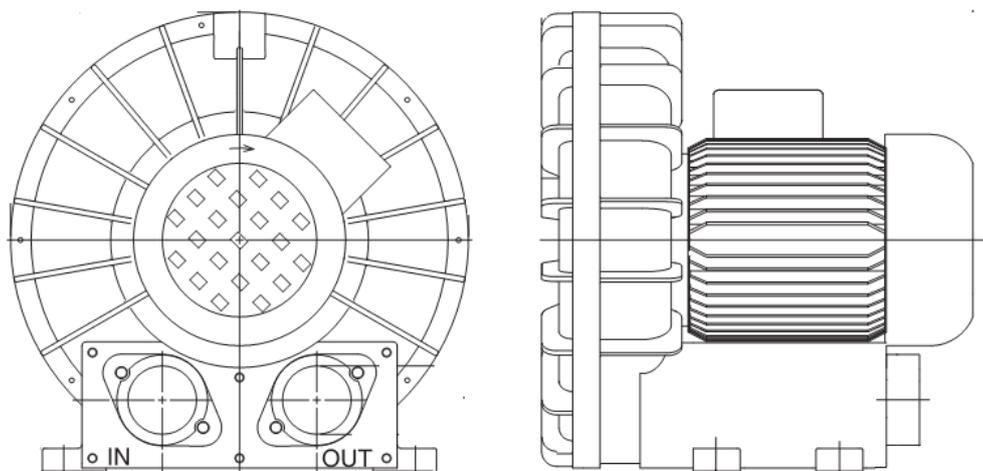


Figura 3.4 - Desenho do modelo do compressor radial do catálogo da Abram.

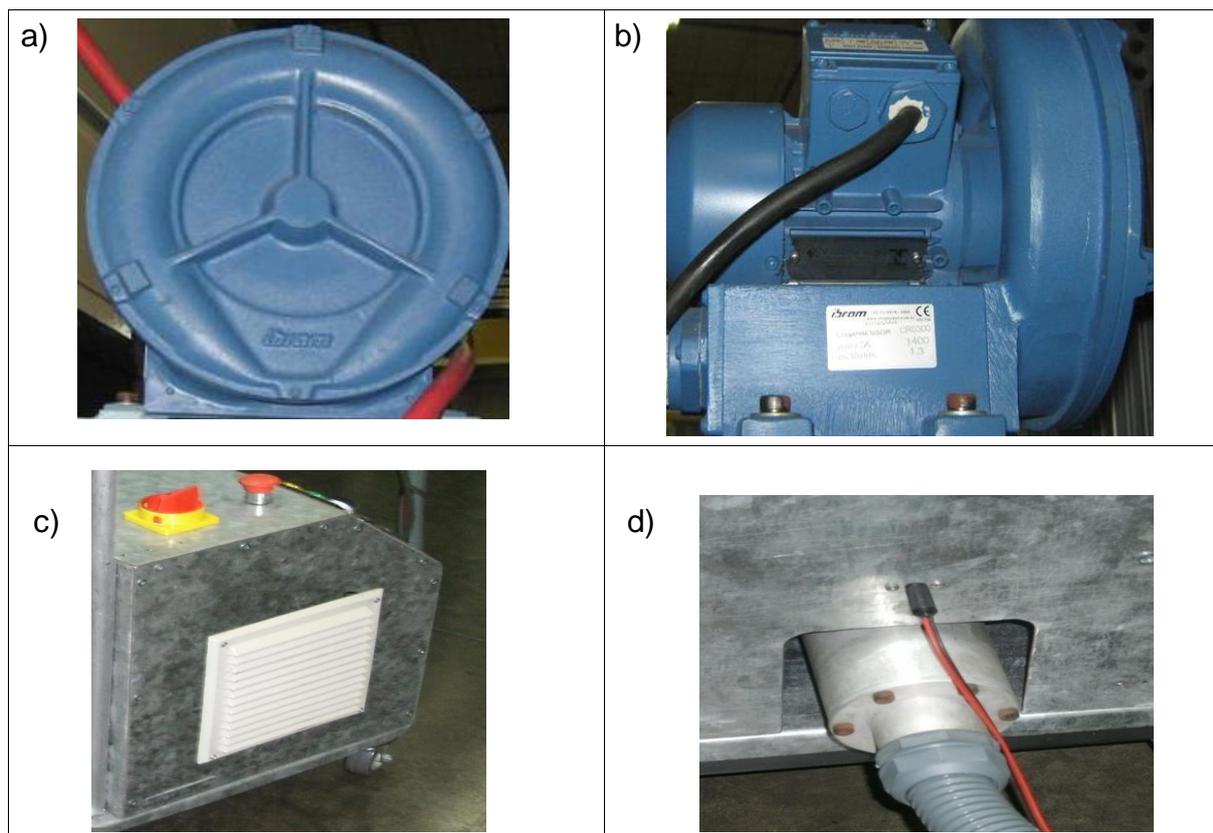


Figura 3.5 - Montagem prática do compressor radia na estrutura (a) e (b), entrada de ar atmosférico (c), acumulador de ar (d).

### 3. Controlador de vazão volumétrica GLP

Para controlar a proporção de gases que compõe a mistura a ser queimada é necessário um controlador de vazão volumétrica, que nesse caso se dá através de um controlador rotâmetro do fabricante Aplitec. É importante destacar que a Aplitec fornece os rotâmetros com certificado de calibração aprovado pelo *INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial)*. A Figura abaixo 3.6 mostra a imagem do rotâmetro do GLP com unidade de vazão l/h.



Figura 3.6 - Rotâmetro de controle de vazão de gás GLP.

### 4. Câmara de mistura

A câmara de mistura é construída em alumínio com um Venturi interno para acelerar o fluxo de ar atmosférico e proporcionar o arrasto e mistura com o GLP. A câmara é montada numa base que adotamos o nome de punho para apoio das mãos e/ou fixação na morça durante os experimentos. O punho serve de suporte para um gatilho de acionamento da válvula solenóide, isso permite o controle de fechamento e a abertura do fluxo de GLP. Ele também possui um tubo

estabilizado de fluxo com uma rosca externa para setup rápido dos bicos queimadores e tem uma entrada de ar atmosférico. A Figura 3.7 mostra o desenho interno da câmara de mistura e a Figura 3.8 o conjunto punho, câmara de mistura, queimador e gatilho de acionamento do fluxo de GLP.

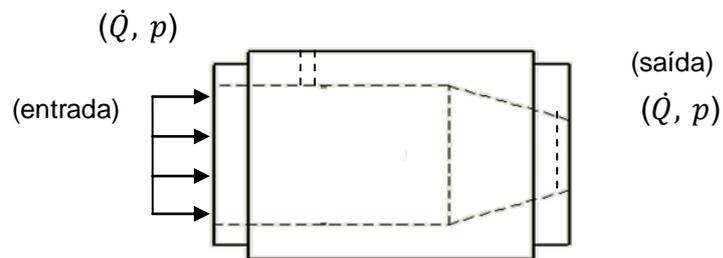


Figura 3.7 - Câmara de mistura do ar atmosférico e o gás GLP.

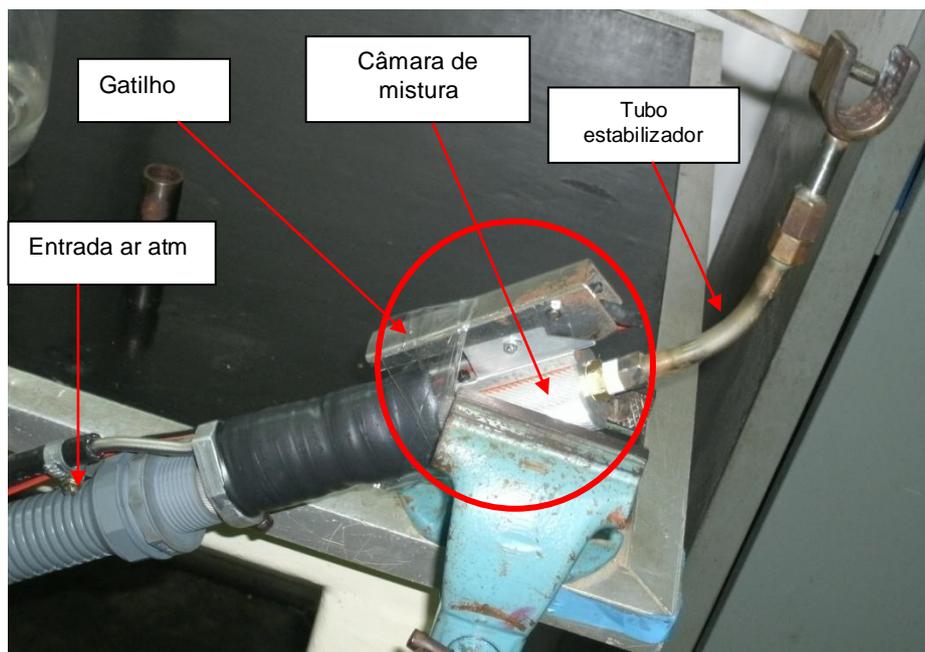


Figura 3.8 - Conjunto punho: Gatilho, bico queimador e câmara de mistura de gases e tubo estabilizador.

## 5. Queimadores

Os queimador tipo cilíndrico e o queimador tipo U foram construídos em latão e aço inox respectivamente. É importante lembrar que a chama tem zonas de diferentes temperaturas e condições de combustão. Segundo Robert (2004) a zona de trabalho mais estável em termo de temperatura e reações de combustão é a região da chama conhecida como penacho para uma queimada laminar e com combustão mais estável. Logo os desenhos dos queimadores foram pensados visando atender esse aspecto. Esse ponto é extremamente relevante, pois, nessa zona de queima temos temperaturas mais estáveis, essa característica será primordial durante a brasagem do alumínio, pois o delta de temperatura entre a fusão do metal base e a temperatura de trabalho do metal de adição é de 80 °C (WARD,2008). O projeto dos queimadores segue a configuração para chamas laminares. Sabendo que a velocidade de propagação de uma chama laminar depende do tipo de combustível, temperatura da mistura e da concentração de combustível e que as velocidades máximas de chama da ordem de 0,4 a 0,5 m/s são típicas para hidrocarbonetos com ar atmosférico, os queimadores foram projetados e construídos para proporcionar um escoamento da mesma ordem de velocidade de combustão e escoamento para uma chama estável. Isso garante que não haverá o efeito de retrocesso de chama para o queimador.

### 5.1. Queimadores cilíndrico

O queimador do tipo cilíndrico na Figura 3.9 possui duas placas defasadas uma em relação à outra mantendo uma distância da entrada fluxo de mistura e uma região de recirculação, com o objetivo de aumentar o índice de mistura do ar com o GLP e proporcionar estabilidade no escoamento para área de saída onde vai acontecer a queima. Essa região também tem o objetivo de pré-aquecimento instantâneo da mistura para eliminar a umidade e aumentar a temperatura da mistura antes da queima gerando uma eficiência de combustão de forma que a chama não perca temperatura na ignição com a mistura mais fria. A Figura 3.10

mostra o queimador instalado no punho suporte e posicionado na morça na posição de teste.

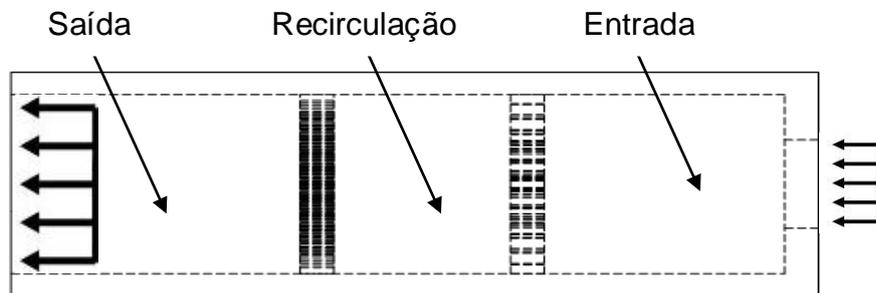


Figura 3.9 - Queimador cilíndrico mostrando entrada e saída de fluxo de mistura e zona de recirculação.



Figura 3.10 - Queimador cilíndrico instalado no punho suporte na posição de teste.

## 5.2. Queimadores tipo U

A Figura 3.11 mostra o queimador com perfil em U. As considerações sobre entra, saída e zona de recirculação do fluxo de mistura são mantidas com o objetivo de não comprometer a estabilidade da queima. O formato em U é intencional tendo em vista atender alguns tipos de formatos de peças nos condicionadores de ar, isso dever reduzir a perda térmica na brasagem dessas peças. A Figura 3.12 mostra o queimador tipo U montado no suporte de apoio na posição de teste.

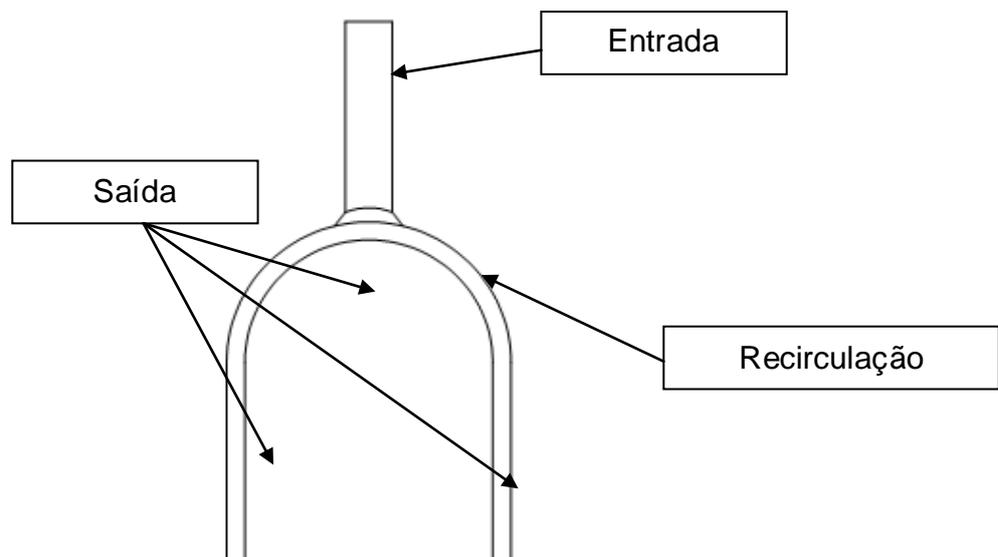


Figura 3.11 - Queimador tipo U mostrando entrada e saída de fluxo de mistura e zona de recirculação.



Figura 3.12 - Queimador Tipo U montado nos punho suporte na posição de teste.

## 6. Termopares

Os termopares usados são do tipo K da do fabricante minipa com capacidade de leitura de até 1300 °C. Eles são responsáveis pela leitura da temperatura de chama no queimador. A Figura 3.13 mostra o esquema de como deve ser montagem dos termopares para os experimentos de teste. A Figura 3.14 mostra a montagem prática para medição da temperatura da chama no queimador do tipo cilíndrico com base no esquema da Figura 3.13.

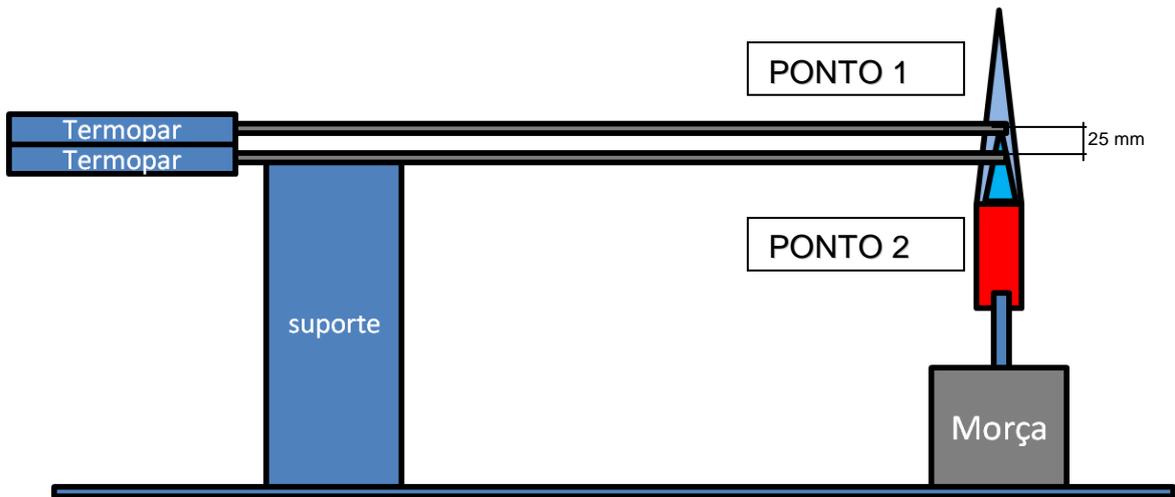


Figura 3.13 - Esquema de montagem experimental de teste para medição da temperatura da chama.

#### 7. Sistema de aquisição de dados - Modelo Agilent 34970A

A Figura 3.15 mostra um sistema de aquisição de dados modelo Agilent 34970A equipado com um módulo multiplexador de 20 canais com precisão de leitura de até 6 ½ dígitos. Esse sistema de aquisição permite fazer a medição da temperatura da chama de forma direta e indireta através do método de dois ou quatro fios. A Figura 3.16 mostra o módulo multiplexador de 20 canais usado pelo sistema de aquisição de dados.



Figura 3.14 - Sistema de aquisição de dados modelo Agilent 34970A.



Figura 3.15 - Módulo de aquisição de dados de 20 canais.

O modelo Agilent 34970A combina uma excelente precisão com uma notável e flexível capacidade de conexões no desenvolvimento de sistemas de testes. É constituído de três aberturas para instalação dos módulos na parte traseira do instrumento. Esses módulos podem ser de atuação ou apenas de aquisição de dados.

As características gerais desse sistema são:

- Realiza medida direta de termopares, RTDs, termistores, voltagem DC, voltagem AC, resistência, corrente DC, corrente AC, frequência e período em tempo real;
- O intervalo de varredura pode ser programável com armazenamento de até 50.000 leituras. Para visualização na tela são disponíveis apenas 1.000 leituras;
- Permite a configuração de cada canal independentemente. Os canais possuem um sistema de segurança de acordo com o tipo e escala de leitura;

- O usuário dispõe de uma interface interativa com seletor para seleção rápida do canal e um menu de navegação, que permite o controle dos dados de entrada no painel de frente do aparelho;
- O sistema de aquisição também pode ser programado via PC com um programa computacional disponibilizado com o aparelho;
- A precisão do multímetro é de 6 ½ dígitos com estabilidade e rejeição de ruído;
- Possui uma taxa de varredura de 250 leituras por segundo em um único canal;
- A interface USB, GPIB (IEEE-488) e a interface RS-232 são padrões;
- SCPI (Comandos de Padrão para Instrumentos Programáveis) compatível.

#### Método dos dois fios e os quatro fios

A principal diferença entre esses dois métodos diz respeito à escala de leitura de tensão elétrica e sua precisão. O método dos dois fios é empregado quando se desejam medir resistência, tensões elétricas em cabos com grandes extensões e resistências superiores a 10  $\Omega$ .

O método dos quatro fios ôhmicos é quase exclusivamente usado para medir baixos valores de resistência em qualquer aplicação, especialmente para avaliar resistências inferiores a 10  $\Omega$  e para exigências de alta precisão como RTD e outros sensores de temperatura. Como a distância entre o ponto de leitura e registro de dados tem mais de 3 metros o método dos dois fios é o mais recomendado.

O sistema de aquisição neste método reduz automaticamente influências de resistências de contato. O método dos quatro fios é usado em sistemas onde a resistência do fio pode ficar bastante variável. Este método tem a desvantagem óbvia de requerer duas vezes quantidade de conexões e duas vezes o número de fios quando comparado com o método de dois fios.

A Figura 3.16 mostra a ligação física dos fios nos contatos elétricos do módulo multiplexador de 20 canais, enquanto a Figura 3.17 mostra a ligação no módulo de aquisição de dados

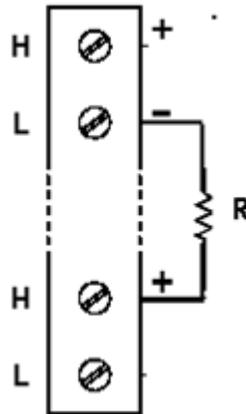


Figura 3.16 - Esquema de ligação de dois fios no módulo de aquisição de dados.



Figura 3.17 - Foto dos fios ligados no módulo de aquisição de dados.

### Offset compensation

As conexões são geralmente de materiais diferentes originando pequenas ddps no sistema devido o contato de metal-para-metal diferente como em termopares ou alguns tipos de baterias. Estas ddps DC também acrescentam erros às medidas de resistência e tensões. O sistema de aquisição de dados possui uma

opção chamada de “Offset Compensation” que foi projetada para permitir medidas de resistência e tensões na presença de pequenas ddps.

#### 8. Computador com programa agilent benchLink date logger utilities

O sistema de aquisição de dados é interligado a um computador através de uma placa de interface USB/GPIB. O programa Agilent BenchLink Date Logger Utilities fornecido com o sistema de aquisição permite visualizar na tela em tempo real os efeitos gerados pela transformação associada ao fenômeno de memória de forma, enquanto as leituras são armazenadas em um banco de dados. O programa também permite programar o sistema de aquisição de dados de forma fácil e rápida.

A Figura 3.18 e 3.19 mostra a tela interativa do programa Agilent BenchLink Date Logger Utilities .

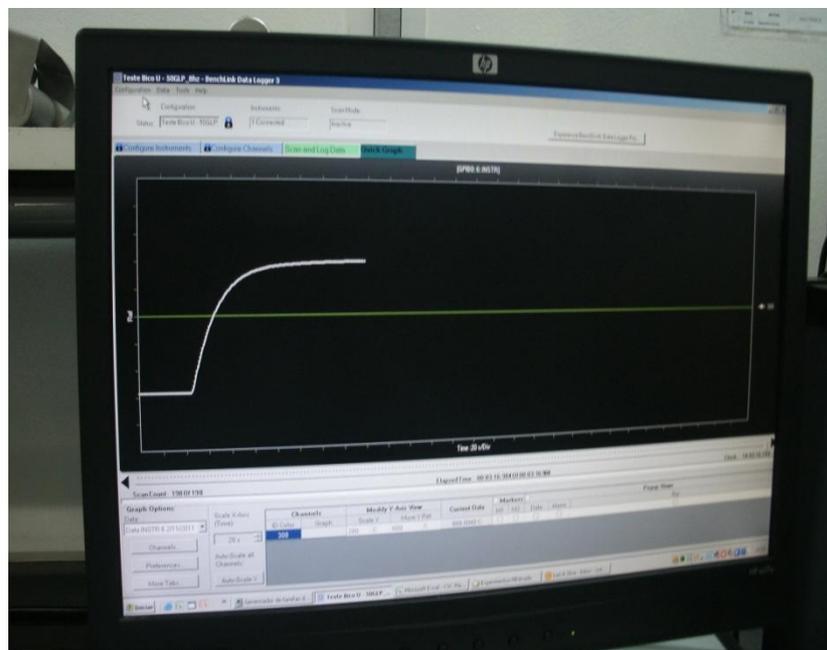


Figura 3.18 - Tela interativa do programa agilent BenchLink date dogger utilities durante um ensaio.

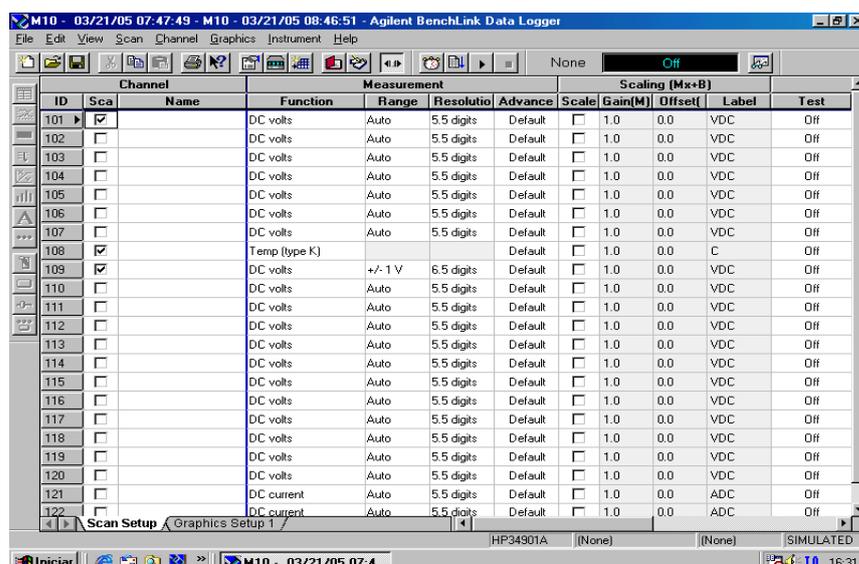


Figura 3.19 - Tela interativa de programação do programa agilent bench link date logger utilities.

### 3.5. TESTES DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL E QUEIMADORES

Para validar o sistema de medição desenvolvido, uma série de testes foi realizada em dois tipos de queimadores, conforme mostra a Tabela 3.1. A proporção de mistura utilizada inicialmente é a razão estequiométrica de 1:23 e em seguida, com a proporção de 15 % de excesso de ar acrescido no valor dor ar estequiométrico se repete o teste.

Tabela 3.1 – Tabela de teste proporções para experimentação.

Queimador tipo Cilíndrico			
Teste	GLP (m <sup>3</sup> /h)	Ar atm - Razão Estequiométrica (m <sup>3</sup> /h)	Excesso de Ar (m <sup>3</sup> /h)
1	0,05	1,191	1,369
2	0,10	2,382	2,739
3	0,15	3,573	4,108
Queimador tipo U			
4	0,05	1,191	1,369
5	0,10	2,382	2,739
6	0,15	3,573	4,108

A coluna número três, mostra a proporção de ar atmosférico para uma composição de mistura estequiométrica e a quarta coluna, estabelece o teste com volume de ar atmosférico com 15% de acréscimo como recomenda xxxx para proporcionar uma queima mais eficiente do combustível. Os 15% tem o objetivo de aumentar a concentração de oxigênio na mistura, afim de se obter um queima total do combustível.

### 3.5.1. Considerações sobre o GLP

O procedimento para uso de misturas inflamáveis como esta é necessário um preenchimento adequado respeitando os limites de inflamabilidade inferior e superior para composição de mistura ar atmosférico/GLP. O GLP em um gás compostos de outros gases principalmente tendo como principais o propano e butano. Para o desenvolvimento de estudo será considerado a seguinte composição do GLP: 90% de propano e 10 % de butano com as seguintes informações técnicas passada pela concessionária da empresa:

- Ponto de Fulgor (Método ou Norma): -104 °C (-156 °F)
- Temperatura de Auto-Ignicão: 450 °C (842 °F) a 1 atm
- Limite de Inflamabilidade no Ar, % em Volume: Inferior: 2,1% e Superior: 9,5%
- Pressão de Vapor a 21,1 °C: 756,56 kPa (109,73 psig)

Para realizar a mistura do GLP com o ar atmosférico deve-se liberar primeiro GLP nas proporções pré-estabelecidas de cada teste e o ar atmosférico conforme Tabela 3.1, dessa forma, as proporções não passam pelo limite de explosividade. O processo de mistura de ar e GLP visa obter uma mistura com poder calorífico capaz de atingir a temperatura de trabalho para brasagem da liga base Al-Mn com a liga de adição Al-Si, que de acordo com o fabricante, possui temperatura de trabalho entre 576 a 578 °C.

### 3.5.2. Queimador cilíndrico

Para o teste do queimador cilíndrico foi instalado dois termopares em dois pontos na chama como mostra a Figura 3.21 nos pontos 1 e 2 da chama. Os termopares são conectados ao sistema de aquisição de dados para registro da temperatura e do tempo.

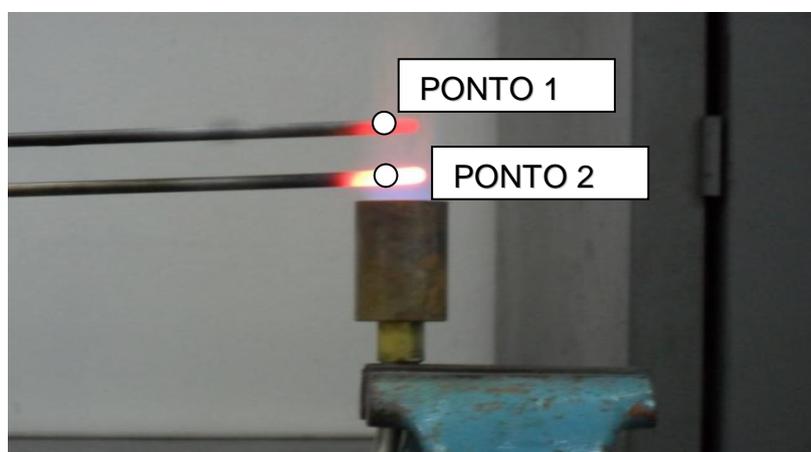


Figura 3.20 - Pontos medição da temperatura de chama no queimador cilíndrico.

### 3.5.3. Queimador tipo U

A Figura 3.21 mostra a medição da temperatura da chama no queimador tipo U em um ponto de aquecimento para as mesmas proporções de mistura da Tabela 3.1.



Figura 3.21- Medição da temperatura de chama termopar tipo k com queimado com formato de U.

#### 3.5.4. Tela interativa do programa agilent bench link

A Figura 3.22 mostra a tela interativa do sistema de aquisição de dados no levantamento em tempo real das curvas experimentais de temperatura versus tempo.

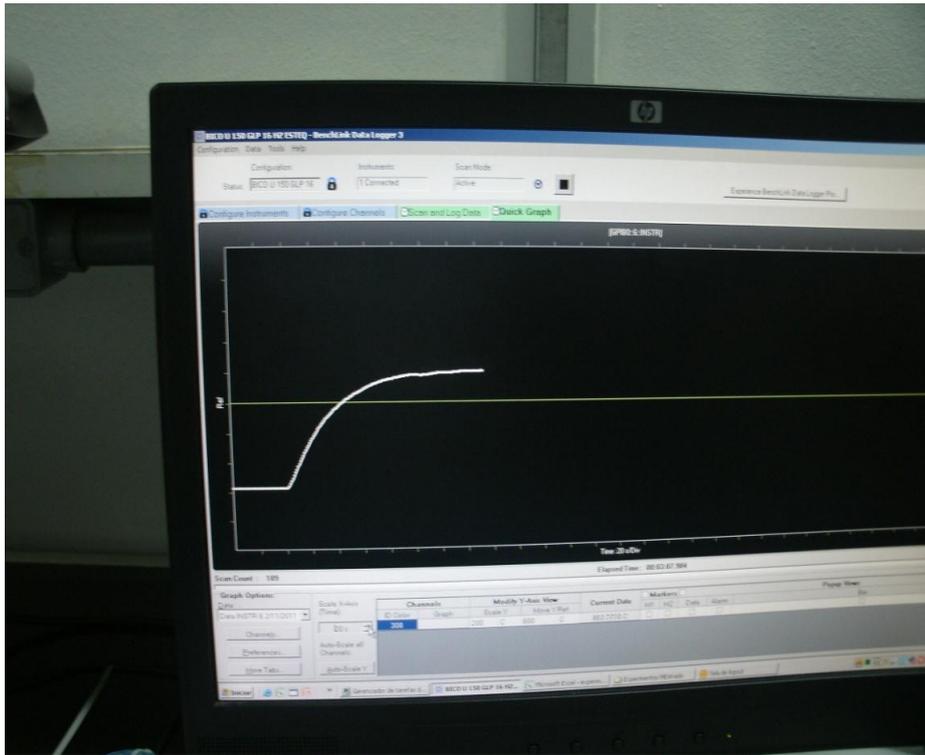


Figura 3.22 - Tela interativa do programa agilent bench link date dogger utilities durante um ensaio.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCURSÕES

#### 4.1. TESTES DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Foi aplicada uma série de três testes com o objetivo de obter a validação do sistema desenvolvido, como também avaliar o desempenho de cada queimador. A tabela 3.1 mostra a montagem de cada teste, ou seja, as composições de ar atmosférico e GLP que devem ser aplicados nos queimadores tipo U e tipo cilíndrico. A observação da variação da resposta se dá, através de um sistema de medição descrito no capítulo III, que faz a coleta de dados de temperatura no tempo para cada queimador.

##### 4.1.1. Teste experimental Queimador tipo cilíndrico

Para realizar o teste experimental do queimador e da plataforma, foi montando um esquema com dois pontos de coleta de dados na chama conforme figura 3.13. A proporção de GLP e ar atmosférico segue as composições para cada série de teste conforme a tabela 3.1. É importante destacar dois pontos importantes antes dos testes: O primeiro é que as vazões de GLP foram estabelecidas com base no consumo já existente na brasagem manual na área de fabricação da Whirlpool. Esse consumo chega à média de  $0,2 \text{ m}^3$  de GLP/h. Logo experimentamos as vazões de 0,05, 0,1 e 0,15 metros cúbicos respectivamente. O segundo ponto importante é o tempo. Foi estabelecido pela empresa um tempo máximo de 25 segundos para curva de aquecimento, tendo em vista ser esse o tempo de montagem do produto na manufatura.

## Teste 1 – 0,05 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura Estequiométrica

Essa vazão de GLP representa ¼ da vazão média que a Whirlpool usa na brasagem manual. Objetivo de partir de uma vazão tão baixa é testar os limites de temperatura do queimador e sua resposta no tempo em relação à temperatura de trabalho do material de adição que é de 578<sup>o</sup>C no tempo. A Figura 4.1 mostra o comportamento obtido no ponto P1 esquema da figura 3.13.

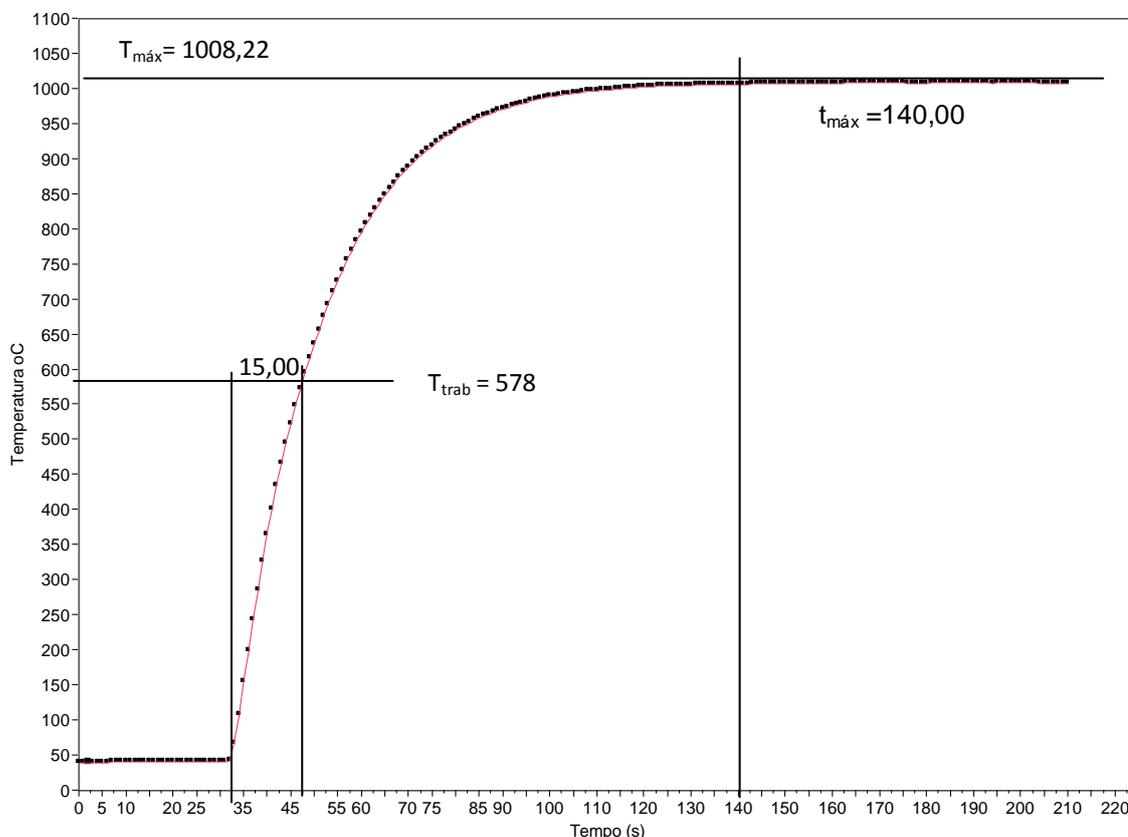


Figura 4.1 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para o queimador tipo cilíndrico T1.

A curva experimental temperatura versus tempo apresenta um comportamento esperado para chama com ar/combustível. A composição de mistura com ar atmosférico tem um poder calorífico inferior à mesma mistura com oxigênio puro da ordem de 1000 graus conforme literatura (Robert, 2004). Isso faz a curva ser mais inclinada, ou seja, ela tem uma taxa de velocidade de queima

menor, o que resulta no aumento do tempo. Contudo a região da chama no ponto P1 atingiu a temperatura máxima de 1008,22 graus em 140 segundos. A temperatura máxima atingida com 0,05 metros cúbicos de GLP/h é muito boa, porém o tempo é muito longo para processo de manufatura, mas fazendo referência ao tempo máximo 25 segundos que a empresa estabeleceu, obteve-se um resultado satisfatório em relação ao atingimento da temperatura de trabalho do material de adição de 15 segundos conforme a figura 4.1. A figura 4.2 mostra o comportamento temperatura da chama no ponto P2, conforme esquema da figura 3.13.

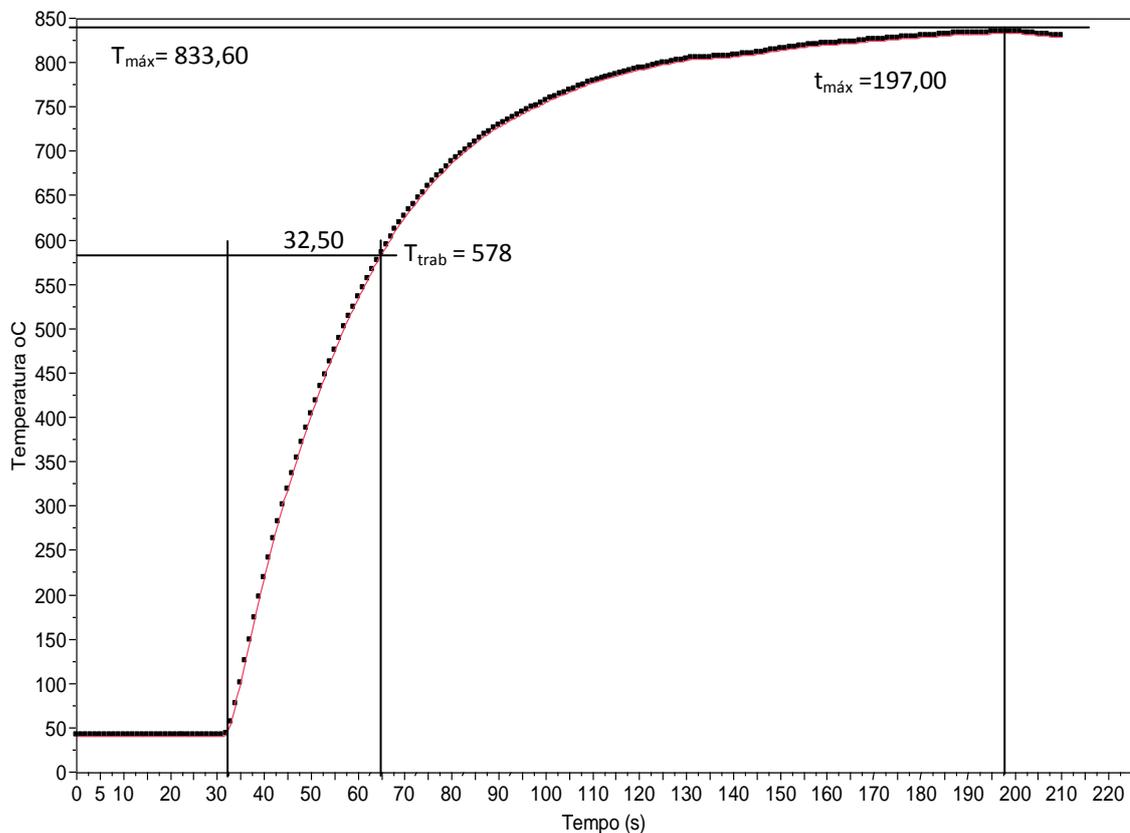


Figura 4.2 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P2 T1.

A curva de temperatura do ponto P2 tem uma inclinação muito maior que a curva do ponto P1 o que indica uma temperatura mais baixa e um tempo maior para atingimento da mesma. A temperatura máxima atingida no ponto P2 é 833,60 °C em 197,5 segundos. O tempo para atingimento da temperatura de trabalho do material

de adição é 32,5 segundos, ou seja, é um tempo superior a 25 segundos, muito superior ao tempo estabelecido. Comparando ponto P1 com o ponto P2 e a distância é de 25 mm e o delta de temperatura é de 174,20 °C. Isso significa que na prática, durante o processo de solda manual, pequenas variações de distância em relação ao aquecimento da peça passam a ser significativas.

### Repetição do Teste 1 – 0,05 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica

A repetição do teste é uma forma de avaliar a consistência do resultado do experimento, ou seja, ver se o resultado se mantém ao longo do tempo. A figura 4.3 apresenta a curva experimental da repetição do teste 1 para o ponto P1.

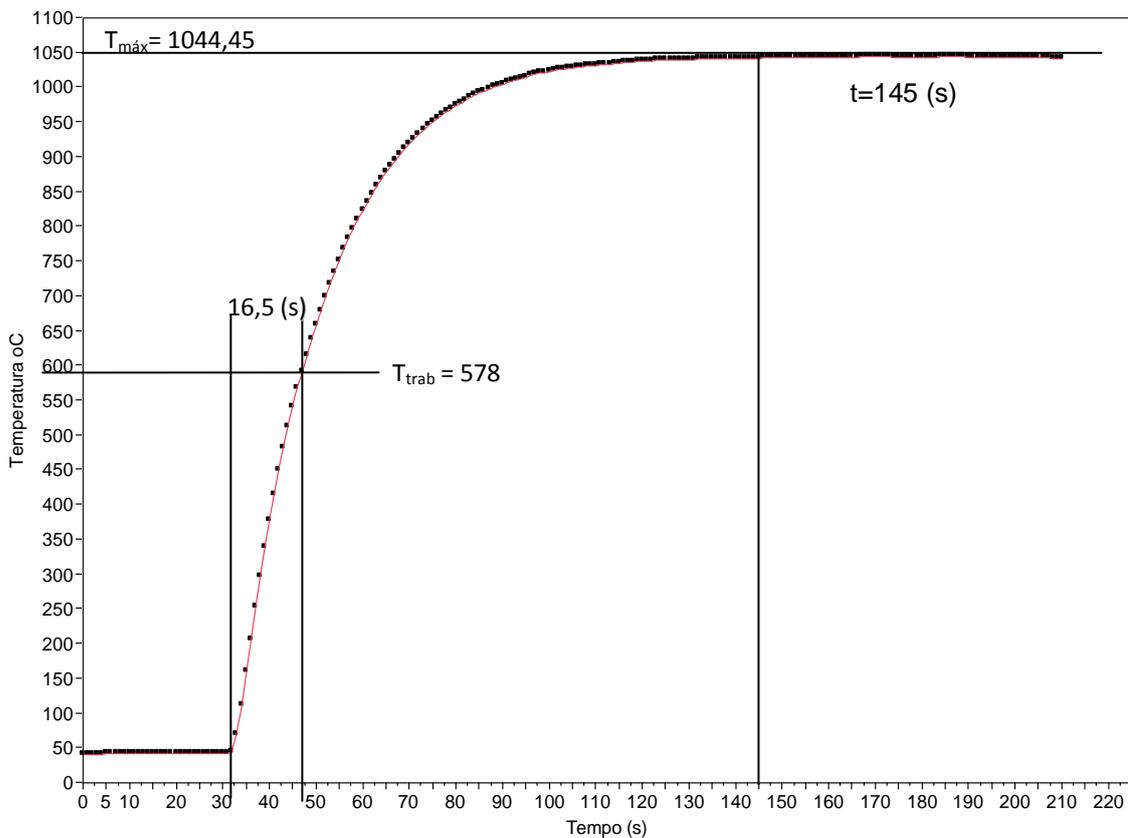


Figura 4.3 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P1. Repetição de T1.

O comportamento da curva no ponto P1 é semelhante ao encontrado na figura 4.1, com pequena diferença na temperatura e no tempo para o mesmo ponto. O Delta de temperatura é de 36,23 °C e tempo 1,5 segundos, isso representa um resultado muito bom para processo com chama. Essa pequena variação de temperatura e tempo mostra que o queimador tem uma boa estabilidade para proporção de vazão de mistura.

A figura 4.4 mostra a curva experimental da repetição do teste 1 para o ponto P2. O comportamento da curva para o ponto P2 é semelhante à curva da figura 4.2 para o mesmo ponto. Nota-se uma diferença de temperatura máxima e tempo em torno de 24,84 °C e 2,5 segundos. Isso indica uma boa estabilidade de chama na região em torno dos pontos P1 e P2, o que é muito positivo para o processo de brasagem da liga de alumínio em estudo, tendo em vista que o ponto de fusão da liga e metal de adição ser bastante estreitos da ordem de 72 °C.

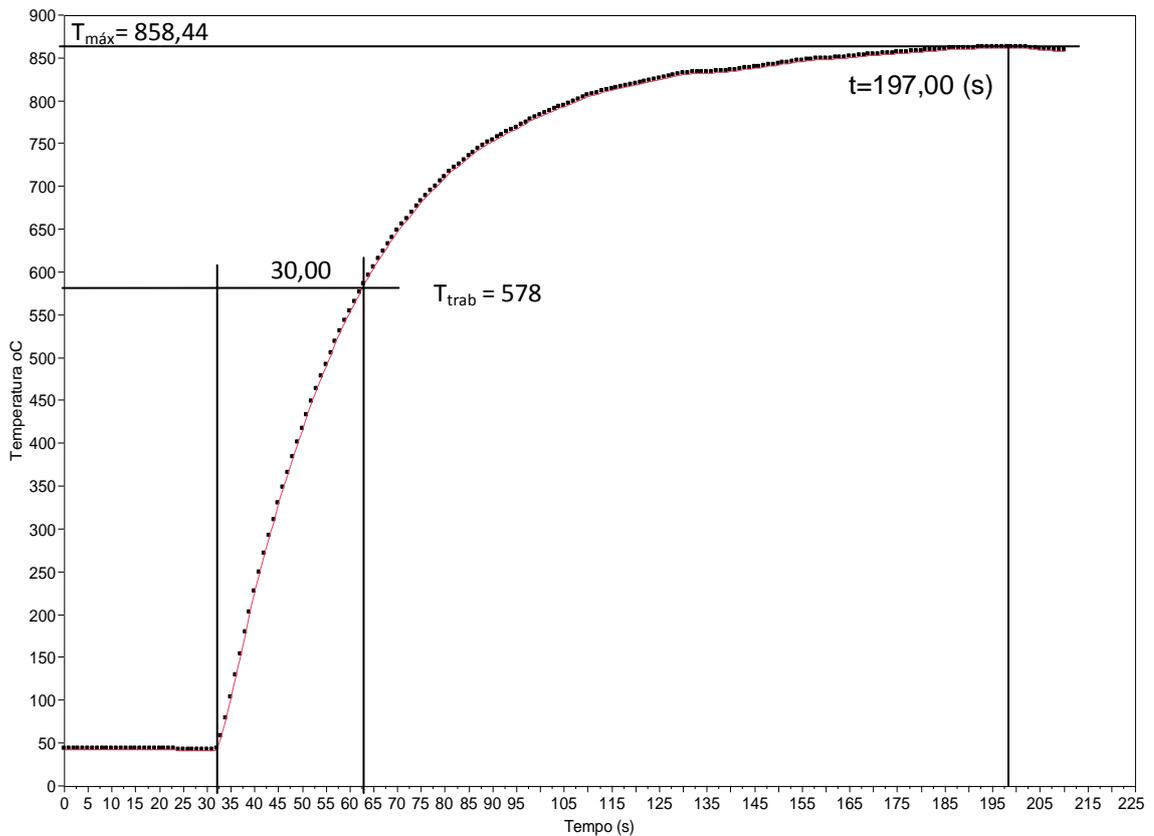


Figura 4.4 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P2. Repetição T1.

## Temperatura média: Teste 1 – 0,05 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica

### Temperatura média versus tempo do ponto P1

A figura 4.5 apresenta a curva experimental da temperatura média do teste T1 e com sua repetição.

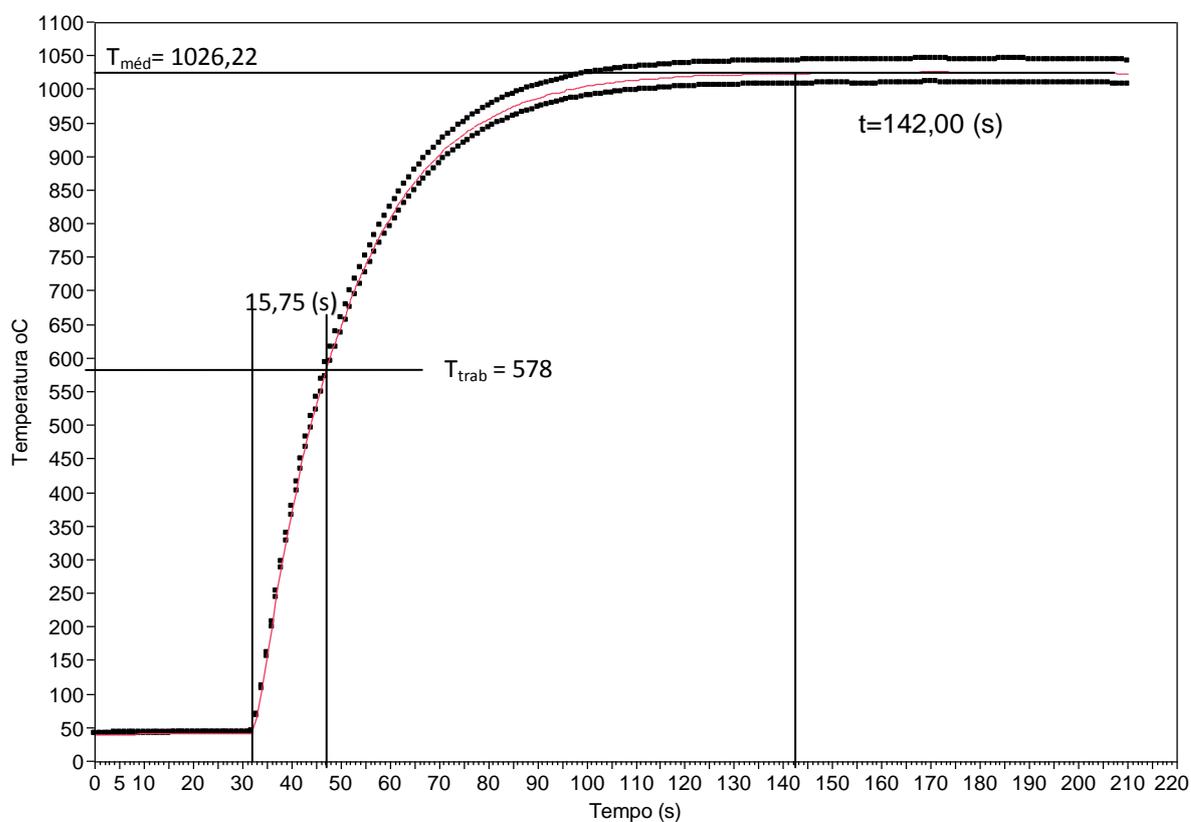


Figura 4.5 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico para o ponto P1 T1.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1026,22 °C com um desvio padrão de 24,68 °C em t<sub>máx</sub>=142,5 segundos. O tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 15,75 segundo, ou seja, 10 segundos menor que o tempo estabelecido de 25 segundos.

## Temperatura média versus tempo do ponto P2

A figura 4.6 apresenta a curva experimental da temperatura média do T1 e com sua repetição para o ponto P2.

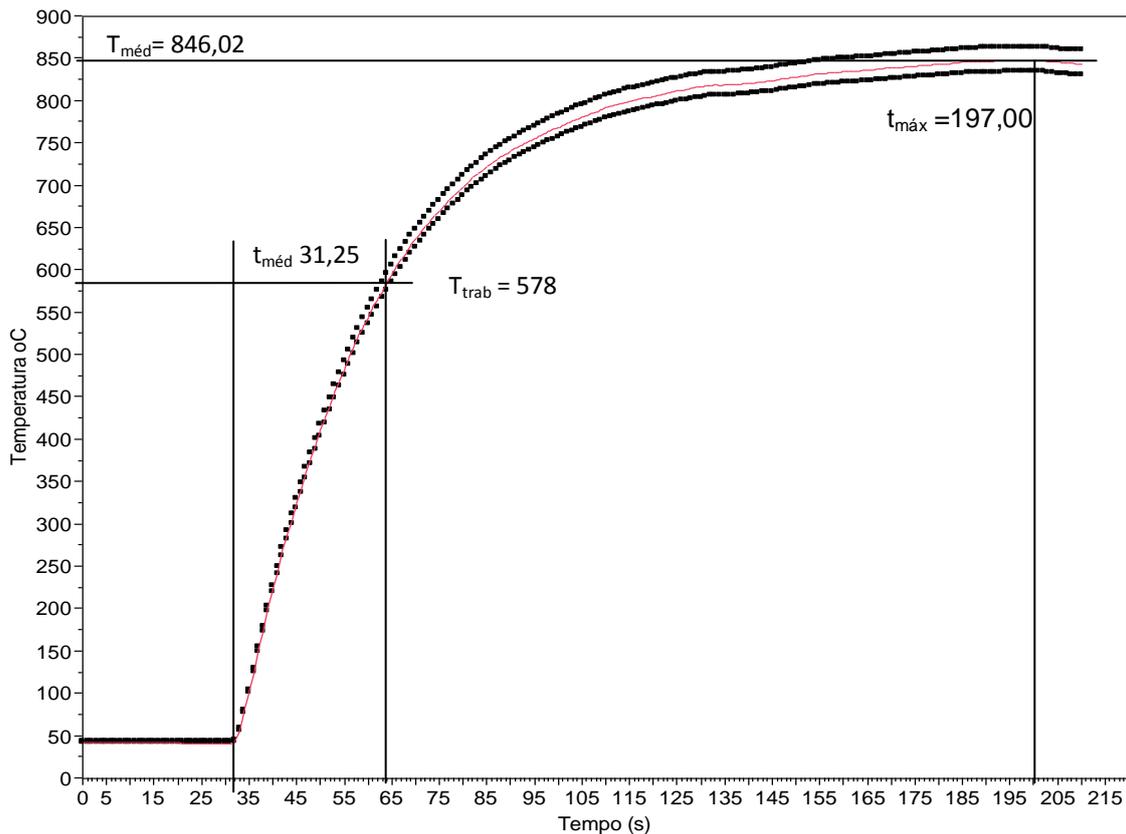


Figura 4.6 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico no ponto P2 T1.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 846,22 °C com um desvio padrão de 20,38 °C em  $t_{máx}=200$  segundos. E o tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 31,25 segundo, ou seja, 8 segundos acima do tempo estabelecido de 25 segundos. Isso reforça que essa região da chama na prática não é boa para o trabalho de brasagem da liga de alumínio em estudo.

## Teste 1 – 0,05 m<sup>3</sup> de GLP/h com excesso de ar atmosférico

Segundo JR e MCQUAY, o excesso de ar é definido como um percentual acima da quantidade estequiométrica de ar atmosférico e é quase sempre necessário para completar as reações do processo real de combustão. Logo a proporção de GLP foi mantida e foi feito um acréscimo na mistura de 15% de ar atmosférico acima do valor estequiométrico, conforme a tabela 3.1. A Figura 4.7 mostra o comportamento obtido no ponto P1.

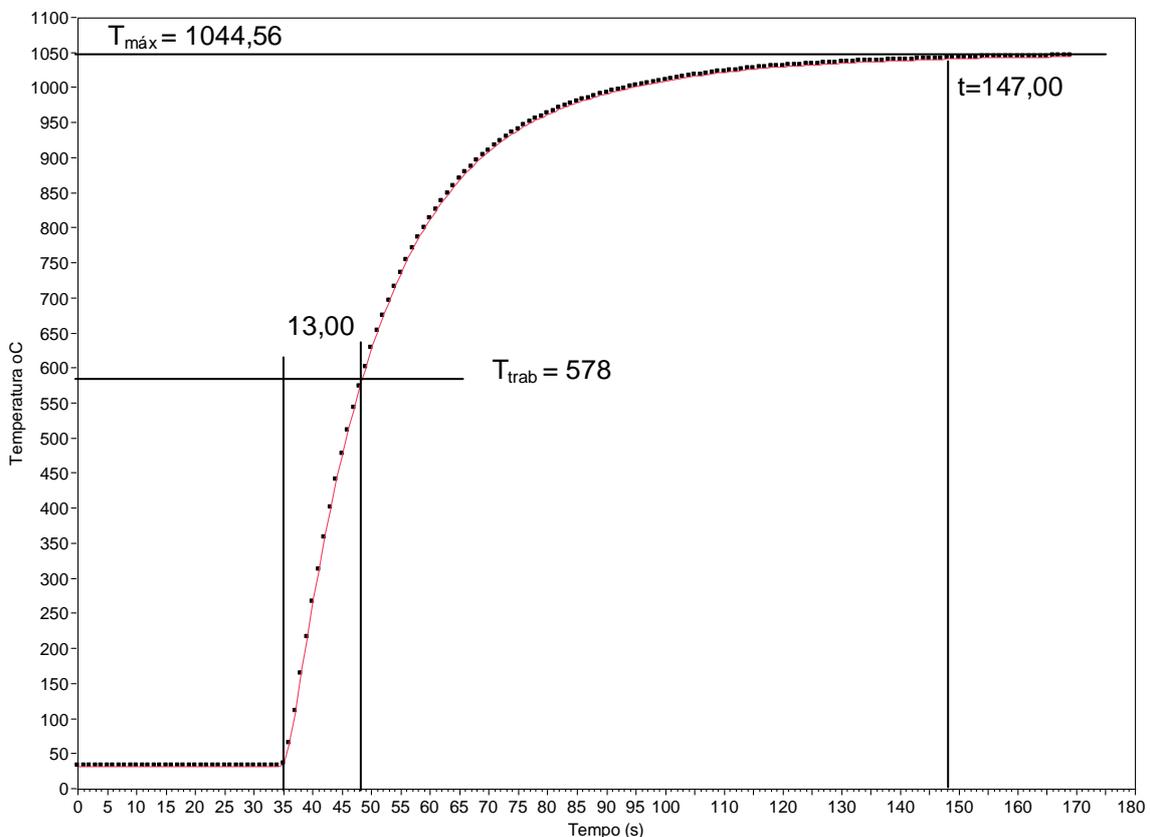


Figura 4.7 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.

O efeito dos 15 % de ar atmosférico não foi significativo na temperatura da chama no ponto P1 em comparação com a mistura estequiométrica. A diferença é apenas de 36,34 °C. Analisando o tempo, o resultado foi bastante positivo, pois a taxa de aquecimento melhorou em 2 segundos se comparado com o resultado da

figura 4.1. Contudo a região da chama no ponto P1 atingiu a temperatura máxima de  $1044,22\text{ }^{\circ}\text{C}$  em  $t_{\text{máx}}=147$  contra  $t_{\text{máx}}=140$  segundos com valores estequiométricos. A temperatura máxima atingida com  $0,05\text{ m}^3$  de GLP/h e 15% de ar atm acima do estequiométrico é muito boa, porém o diferencial é o tempo para atingimento da temperatura de trabalho que fica em 2 segundos melhor que o resultado da figura 4.1. A figura 4.8 mostra o comportamento temperatura da chama no ponto P2 com excesso de ar atm em 15%.

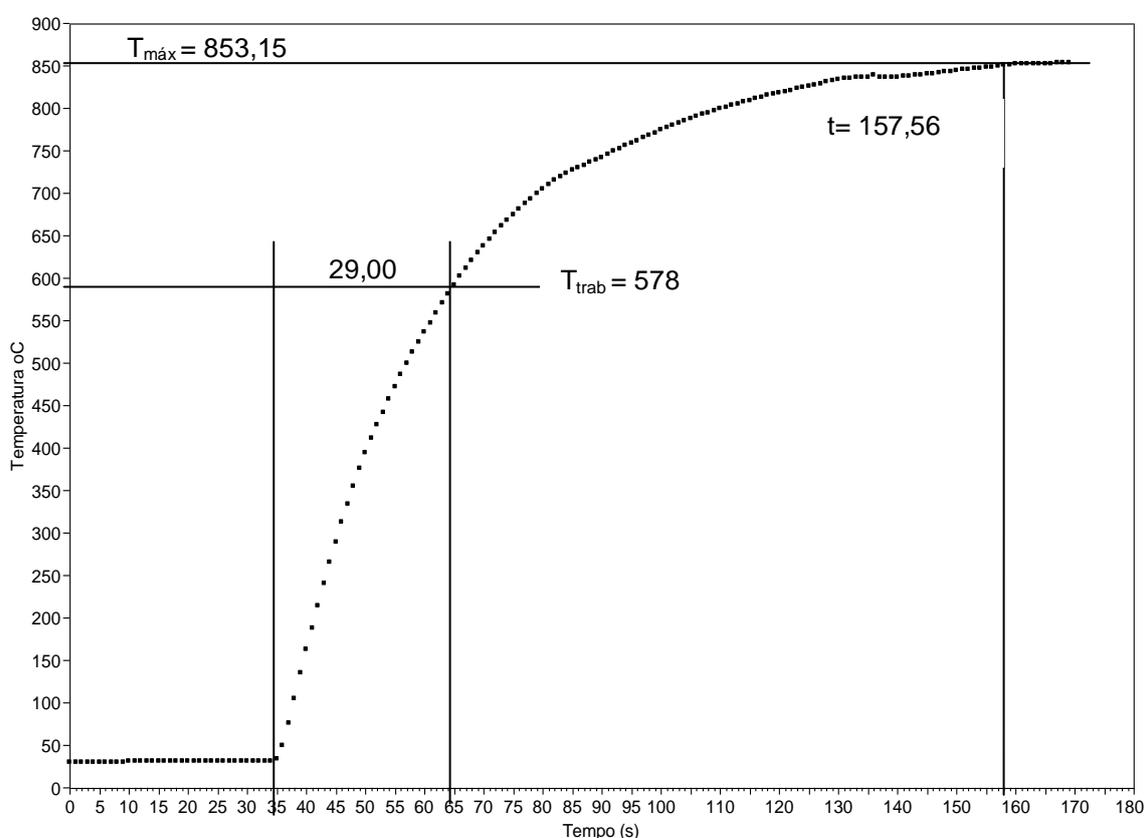


Figura 4.8 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.

A curva de temperatura do ponto P2 tem uma inclinação semelhante à curva da figura 4.2. A temperatura máxima atingida no ponto P2 é  $853,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou seja,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  superiores em relação à  $T_{\text{máx}}$  da figura 4.2 que é de  $833,60\text{ }^{\circ}\text{C}$  com um tempo de  $t_{\text{máx}}=197,5$  segundos contra 158 segundos. O tempo para atingimento da temperatura de trabalho da figura 4.8 ficou melhor com 29 segundos, isso é uma

redução de 3,5 segundos. Isso indica que para essa proporção de mistura, o maior ganho é no tempo para atingimento da temperatura de trabalho.

### Repetição do Teste 1 – 0,05 m<sup>3</sup> de GLP/h com excesso de ar atmosférico

O comportamento da temperatura e o tempo mostrado na figura 4.9 na repetição do teste T1 com 15 % ar atm em excesso é muito semelhante ao encontrado na figura 4.3 para mistura estequiométrica no ponto P1. A curva de repetição do teste com excesso de ar é estável, demonstrando que o queimador mantém uma boa estabilidade da chama. A diferença de temperatura é de 58,66 °C do ponto de vista da repetição e 95 °C em relação ao valor de mistura estequiométrica com 3 segundos mais rápido.

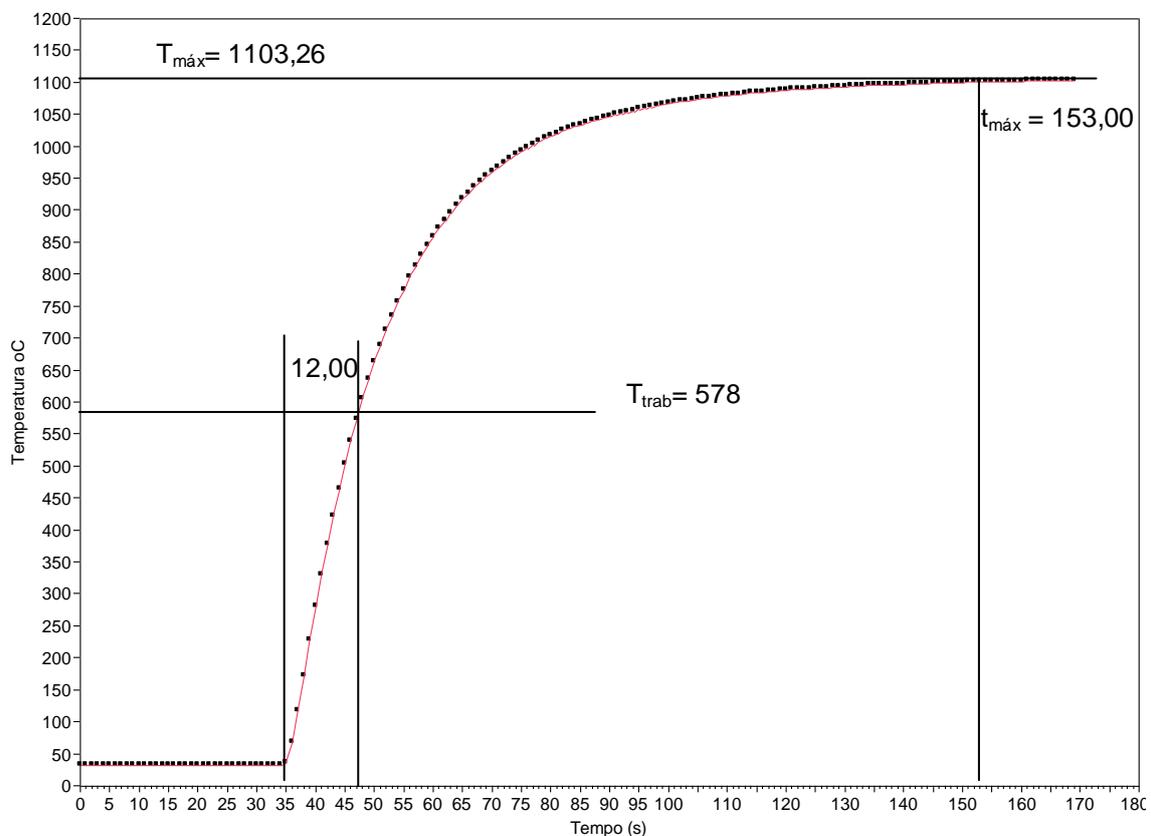


Figura 4.9 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico. Repetição de T1 com excesso de ar atmosférico.

Um aspecto importante é que sempre para repetição são encontrados deltas de temperaturas superiores, isso se deve ao aquecimento da mistura durante o processo de combustão. A geometria do queimador cilindro foi projetada com essa finalidade, ou seja, permitir o aquecimento da mistura para elevar sua temperatura e eliminar umidades, e assim proporcionar uma maior eficiência de queima (TURNS,2000).

A Figura 4.10 mostra o comportamento da temperatura no tempo obtido no ponto P2. Aqui encontramos as mesmas situações anteriores, logo são válidos os mesmo comentários.

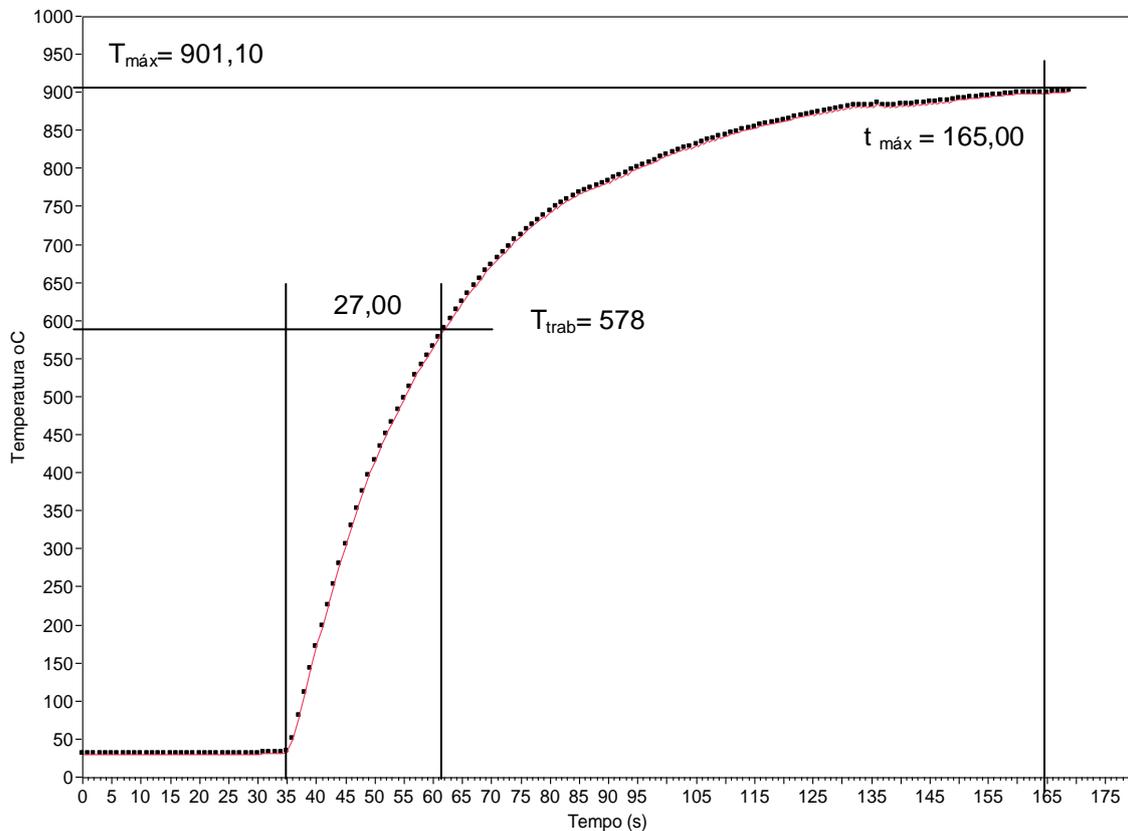


Figura 4.10 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2. Repetição de T1 com excesso de ar atmosférico.

A temperatura máxima da repetição do teste no P2 apresenta uma variação de 47,95 °C e uma redução de 3 segundos. Isso mostra 27 segundos para atingimento da temperatura de trabalho. Esse tipo de comportamento já vem se

repetindo em todos os testes com a composição de GLP de  $0,05 \text{ m}^3$ . Isso indica que os resultados dos experimentos são consistentes e se matem ao longo do tempo.

**Temperatura média: Teste 1 –  $0,05 \text{ m}^3$  de GLP/h com excesso de 15% de ar atm.**

### Temperatura média versus tempo do ponto P1

A figura 4.11 apresenta a curva experimental da temperatura média do teste T1 com sua repetição para o ponto P1 com 15% de ar atm acima do valor estequiométrico.

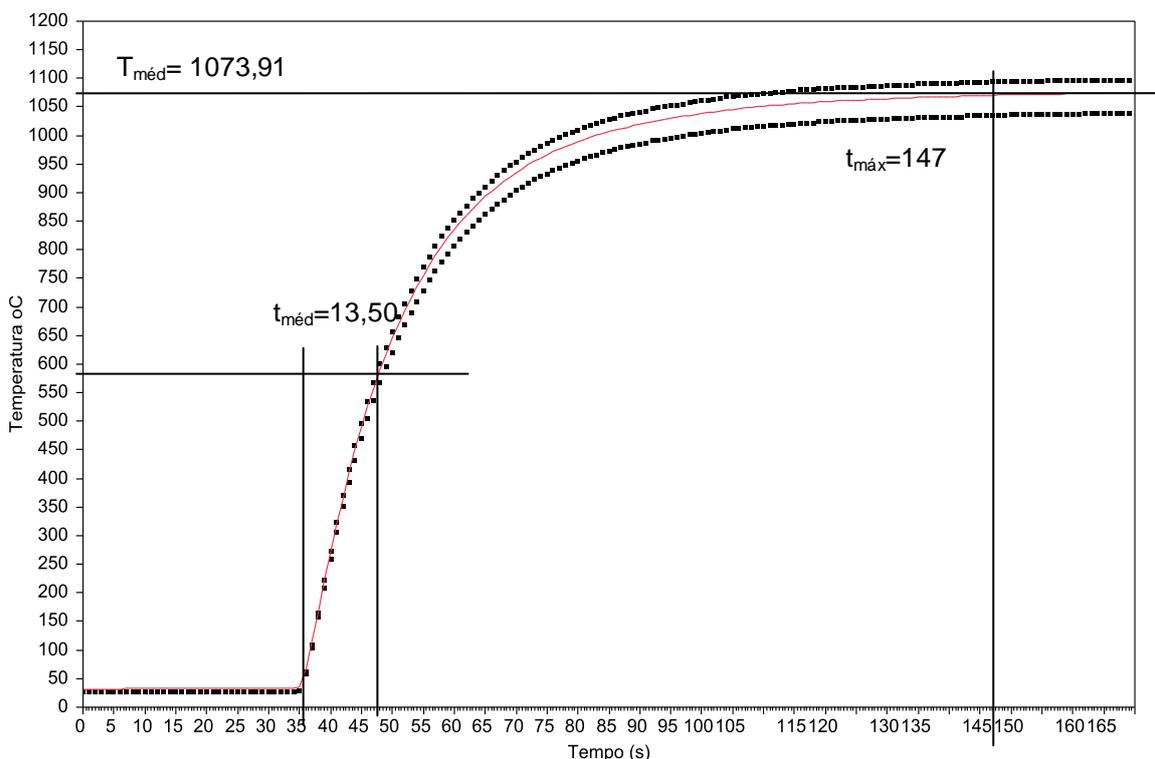


Figura 4.11 - Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1073,91 °C com um desvio padrão de 29,35 °C em  $t_{m\acute{a}x}=147,5$  segundos. O tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 12,5 segundos, ou seja, 12 segundos menor que o tempo estabelecido de 25 segundos. A figura 4.12 apresenta o resultado da temperatura média para o ponto P2. Pode-se observar um aumento na temperatura média, como também uma redução no tempo de atingimento da temperatura de trabalho, porém o resultado mostra que a região nas proximidades do ponto P2, desfavorece o processo de brasagem manual em virtude do tempo para atingimento da temperatura de trabalho ser bem elevado, ultrapassando os 25 segundos estabelecido como meta de trabalho.

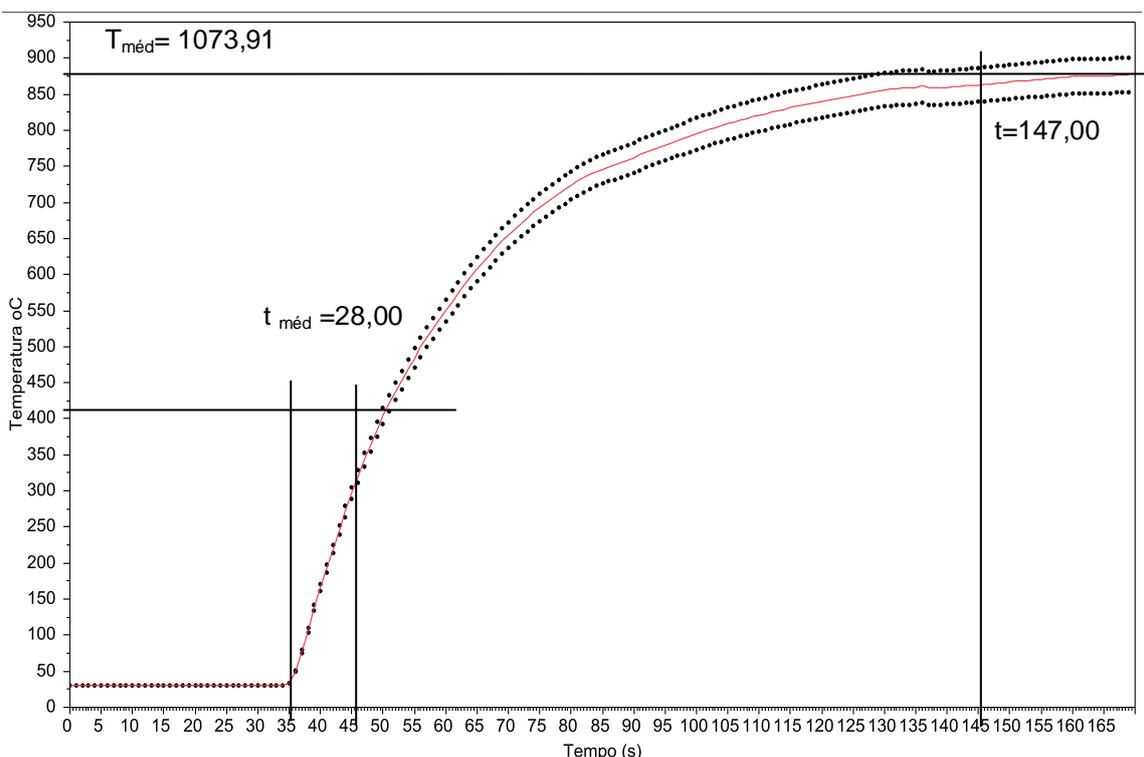


Figura 4.12 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico T1 com excesso de ar atmosférico.

O resultado encontrado no teste 1 para o ponto P1 com mistura estequiométrica e mistura com 15% de excesso de ar atm, atendem a necessidade dos 25 segundos para atingir a temperatura de trabalho de 578 °C, com um consumo de GPL 75% menor ao usado pela Whirlpool atualmente na brasagem

manual. O ponto P2 é uma região da chama que deve ser evitada na brasagem nessa composição. De forma geral o queimador tipo cilindro se comportou com bastante estabilidade de chama e eficiência de queima para a composição de mistura do teste 1.

### Teste 2 – 0,10 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica

Os resultados obtidos no teste 1 com a vazão de 0,05 m<sup>3</sup> de GLP/h, mostraram um bom desempenho do queimador no ponto P1. Agora no teste 2 visa-se avaliar o desempenho do queimador para o dobro da vazão de GLP do teste 1, sempre em busca de um tempo de resposta menor para se atingir a temperatura de trabalho do material de adição de 578<sup>o</sup>C. A Figura 4.13 mostra o comportamento obtido no ponto P1 mantendo o mesmo esquema da figura 3.13 usada no Teste 1.

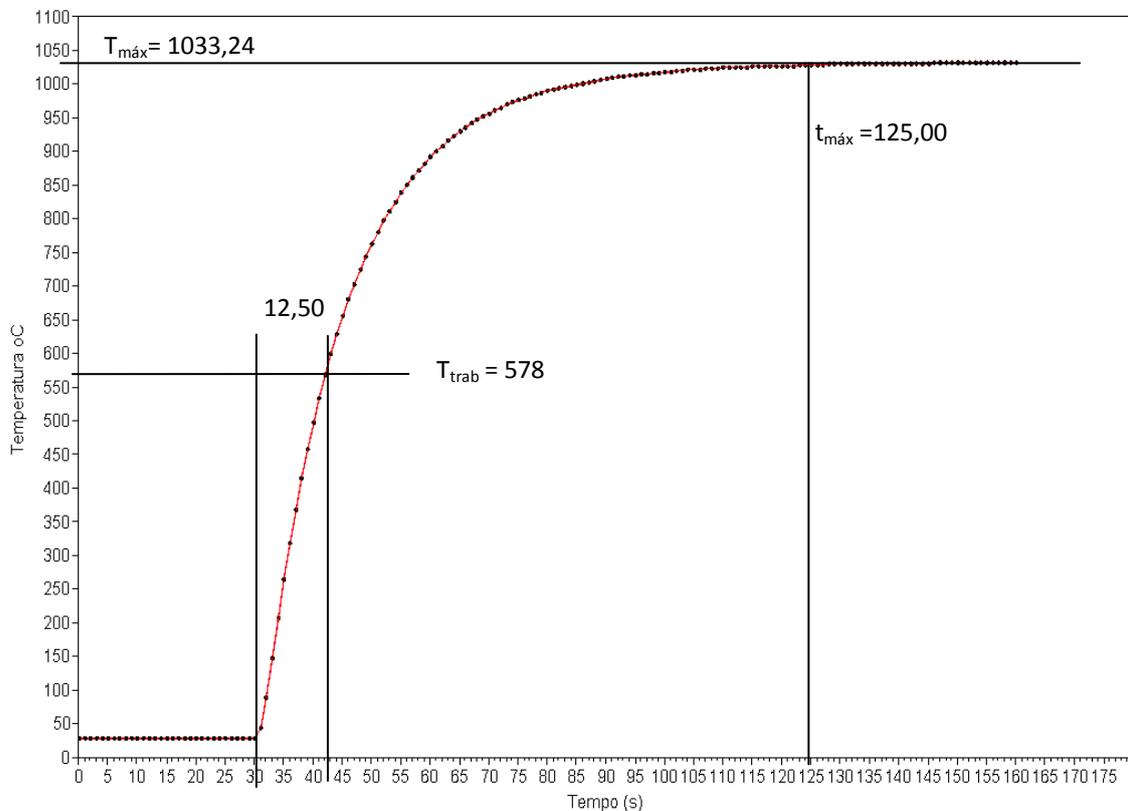


Figura 4.13 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador tipo cilíndrico T2.

A curva experimental da figura 4.13 apresenta um comportamento esperado para chama com ar/combustível como a do T1. Para a composição do T2 esperava-se um aumento significativo da temperatura para o ponto P1, mas não é o que mostra a curva. A temperatura máxima e o tempo de atingimento da temperatura de trabalho do material de adição, são praticamente os mesmos encontrados no T1, com alguns segundos de variação, ou seja, 12,5 segundo para atingimento da temperatura de trabalho e 125 segundos para temperatura máxima. Esse fenômeno pode estar sendo causado por problemas na mistura dos GLP com o ar atmosférico. Problemas no processo de mistura do combustível e o seu oxidante podem gerar queima incompleta do combustível e assim redução na temperatura e baixa eficiência na queima.

A figura 4.14 mostra o comportamento temperatura da chama no ponto P2. Já o ponto P2 mostra um comportamento diferente do P1, pois a temperatura tem aumentado e isso com um tempo mais baixo.

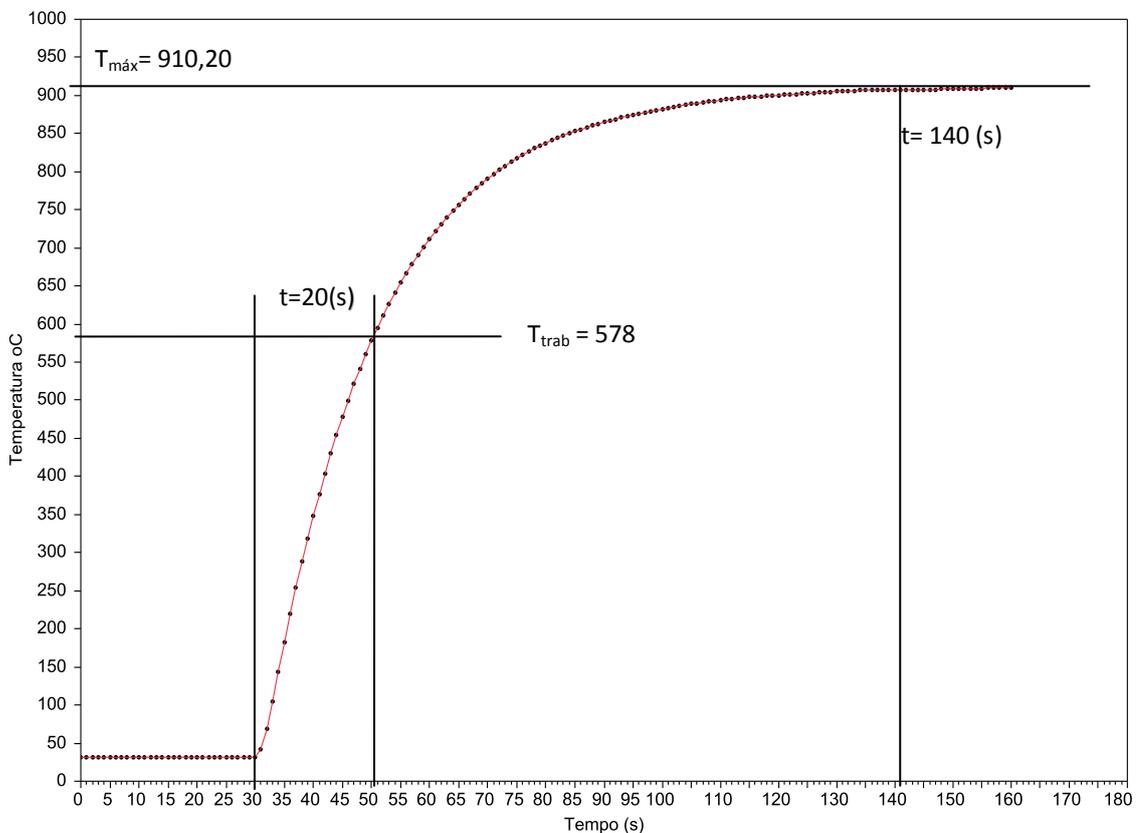


Figura 4.14 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para ponto P2 para o queimador tipo cilíndrico T2.

A curva de temperatura do ponto P2 tem uma inclinação menor em relação do T1. Isso remete um tempo melhor para atingimento da temperatura de trabalho do material de adição. Esse é o primeiro resultado em que o ponto P2 apresenta um tempo menor do que o tempo de 25 segundos estabelecido pela Whirlpool, como também um delta de temperatura mais estreito entre P1 e P2. Os 20 segundos mostrados no gráfico indicam que a região em torno do ponto P2 tem uma eficiência de queima melhor que a do ponto P1.

### Repetição do teste 2 – 0,10 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica

A figura 4.15 apresenta a curva experimental da repetição do T2 para o ponto P1.

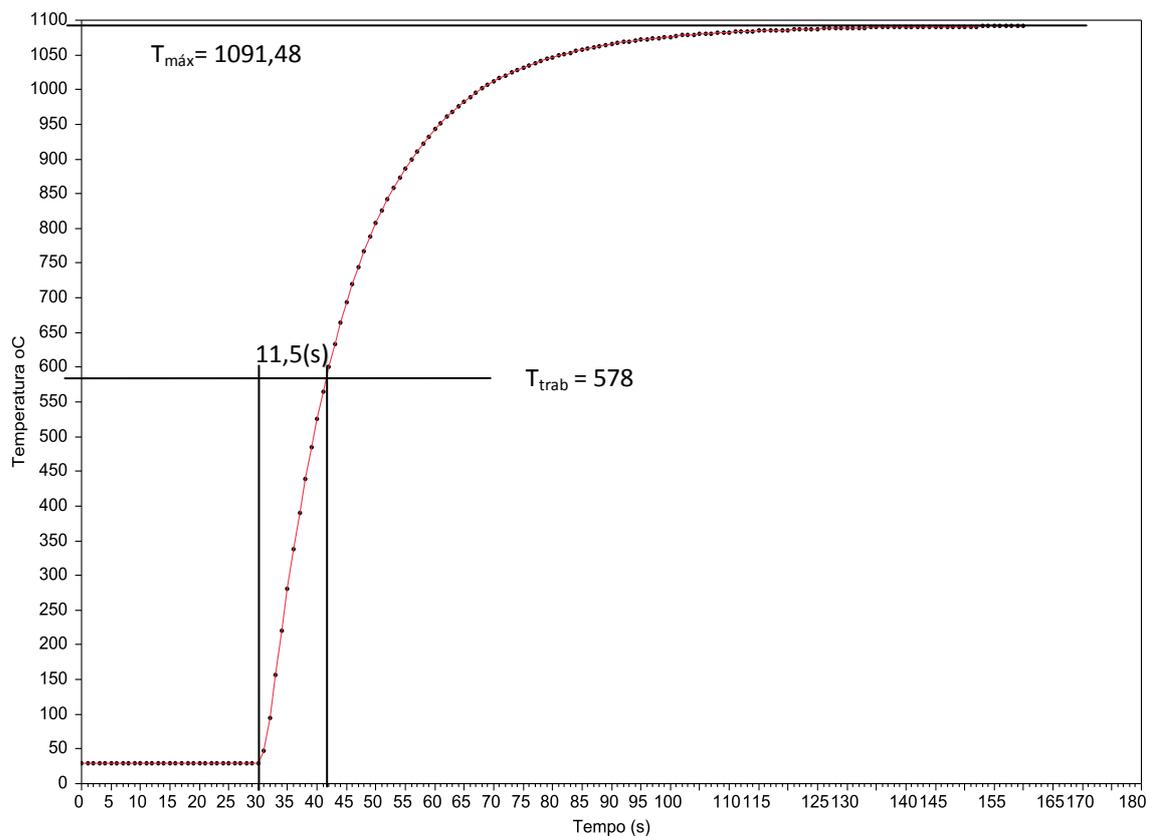


Figura 4.15 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador tipo cilíndrico. Repetição de T2.

O objetivo de realizar a repetição do teste é avaliar a consistência do resultado do experimento com foi feito na sessão do T1, ou seja, ver se os fenômenos encontrados se repetem. Logo podemos comprovar pela análise da curva experimental que a consistência do resultado se mantém, com o mesmo incremento de temperatura encontrado no teste T1.

Apesar de o tempo ser satisfatório para o processo de brasagem com base nos 25 segundos, o resultado não é positivo do ponto de vista do consumo de GLP, pois está sendo usado o dobro da vazão para se obter quase o mesmo resultado do teste T1. Esse comentário vale para a figura 4.16 logo abaixo. A curva mostra que o desempenho da região do ponto P2 se mantém em 20 segundos e realmente é menor valor encontro para esse ponto. O problema que não podemos separar as regiões e a avaliação é global.

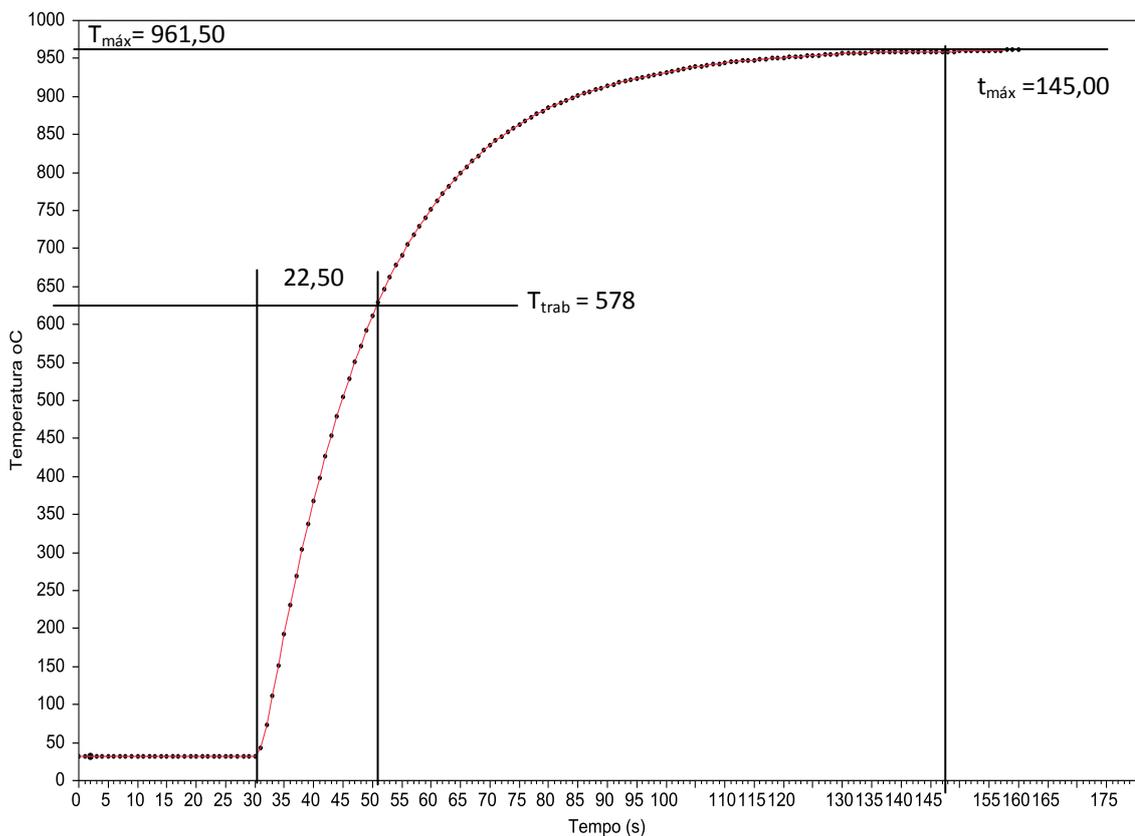


Figura 4.16 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para o queimador cilíndrico no ponto P2. Repetição T2.

## Temperatura média: Teste 2 – 0,10 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica

### Temperatura média versus tempo do ponto P1

A figura 4.17 apresenta a curva experimental da temperatura mede do teste T2 com sua repetição para o ponto P1.

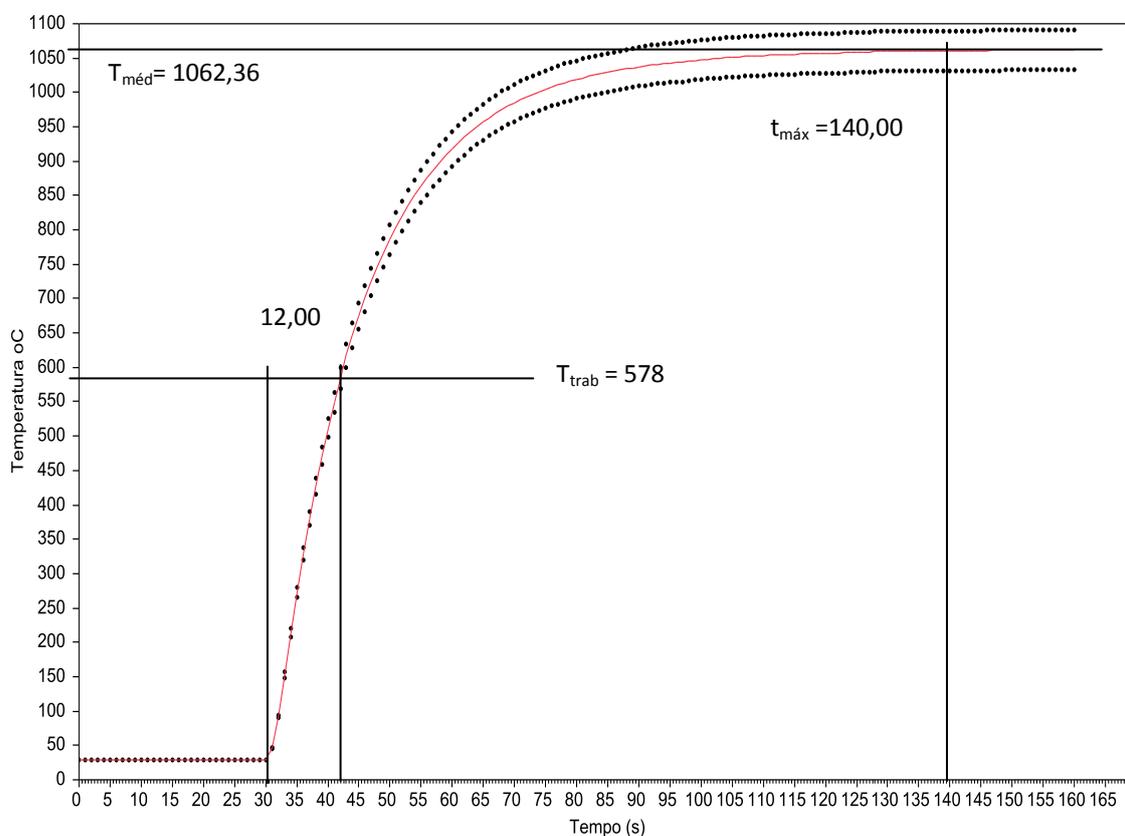


Figura 4.17 - Curva de temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico P1 T2.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1062,36 °C com um desvio padrão de 41,17 °C em  $t_{\text{máx}} = 140$  segundos. E o tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em  $t_{\text{méd}} = 12$  segundos, ou seja, 13 segundos menor que o tempo estabelecido de 25 segundos. Isso reforça que essa

região da chama na prática não é boa para o trabalho de brasagem da liga de alumínio em estudo.

A figura 4.18 demonstra o perfil de temperatura média para o ponto P2. Esse foi o melhor resultado de desempenho para esse ponto. Isso indica que existe possibilidade de equalização das duas regiões. Nesse teste do ponto de vista médio tivemos 19 segundos para atingir a temperatura de trabalho com um desvio padrão de 36,27 °C que representa uma variação excelente para um processo de combustão sem controles sofisticados.

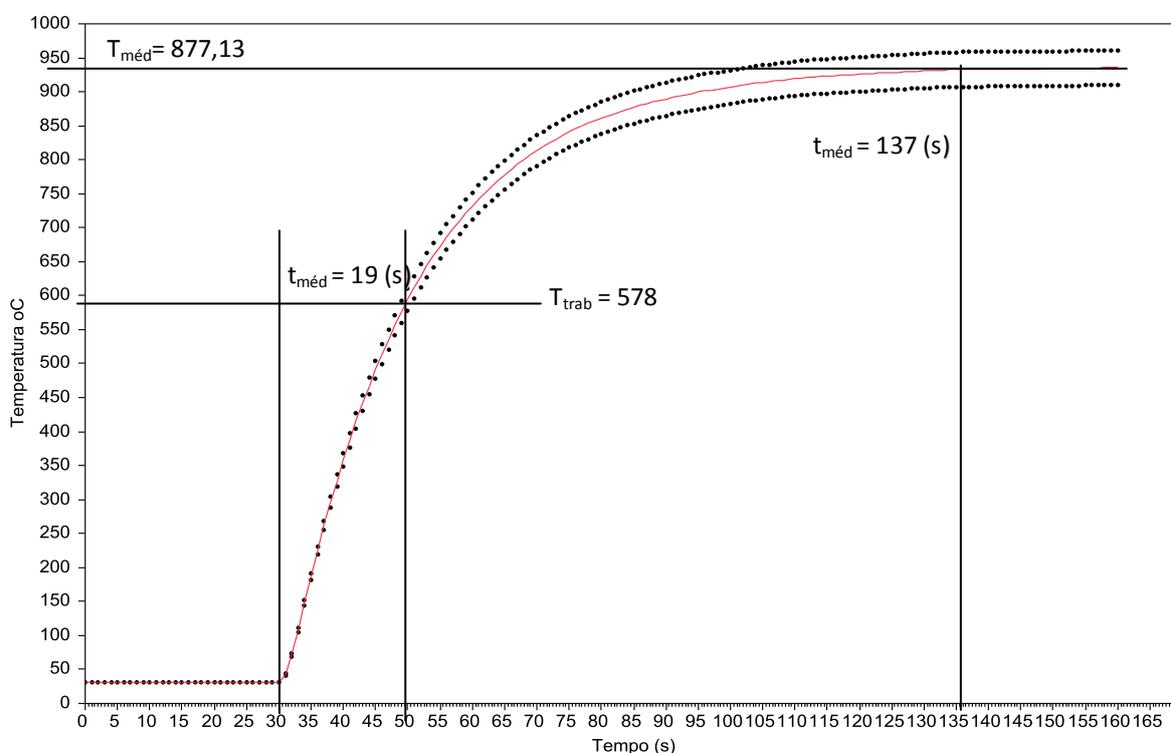


Figura 4.18 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P2 T2.

Analisando separadamente o consumo e o tempo para o teste T2, obtemos resultados diferentes. Em relação ao tempo para atingimento da temperatura de trabalho, o queimador se comportou de forma excelente para P1 e P2, porém para o consumo de GLP demonstra um resultado negativo, pois para o dobro da vazão do teste de T1, os resultados de temperatura apresentam comportamento muito semelhante, o que indica desperdício de combustível. O próximo experimento com o

15% de ar atmosférico acima do valor estequiométrico, deve apresentar resultados melhores nos dois aspectos de tempo e temperatura.

### Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h com excesso de 15% de ar atmosférico

A curva da figura 4.19 apresenta o resultado do teste T2 com 15% de excesso de ar atmosférico acima do valor estequiométrico. Fazendo um comparativo com o teste anterior com valores estequiométricos, esperava-se um resultado melhor em relação à temperatura máxima.

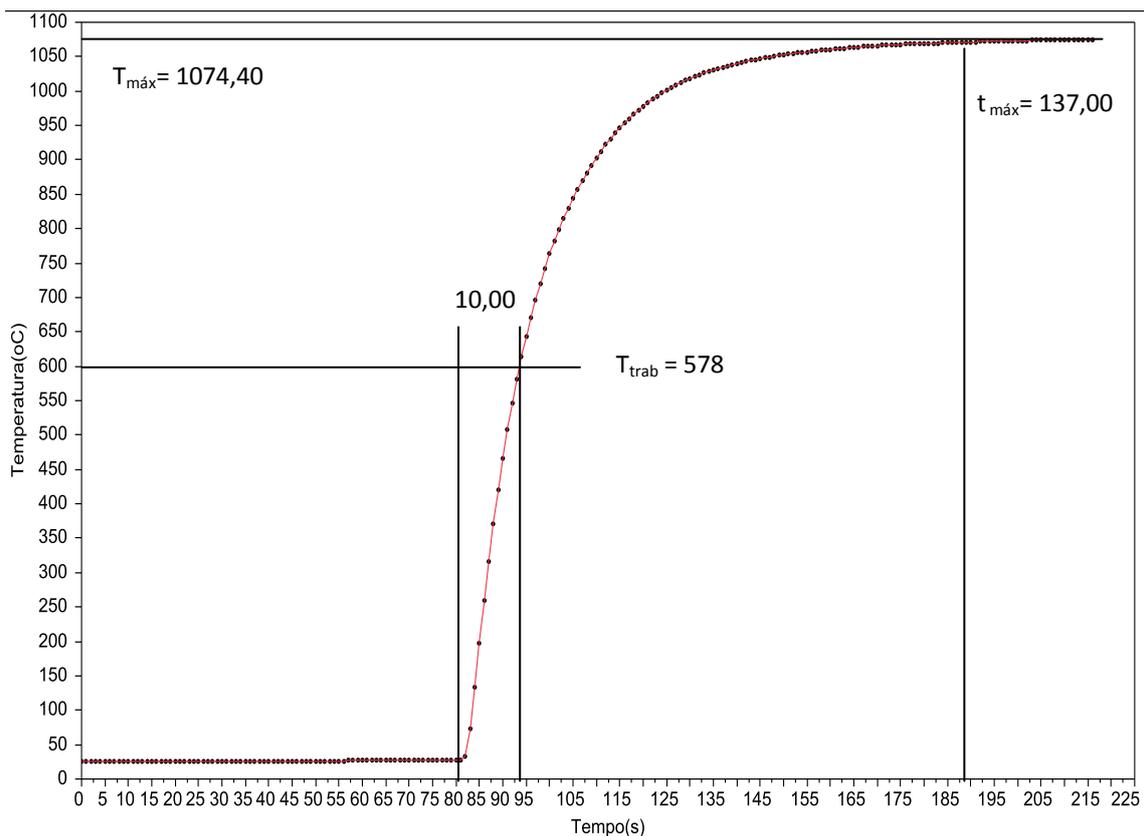


Figura 4.19 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P1 15% de excesso ar atm T2.

Segundo a curva da figura 4.19, temos uma temperatura máxima de 1074,40 °C que representa uma diferença de 41,16 °C em relação à figura 4.13. Analisando o tempo para atingimento da temperatura de trabalho do material de adição, houve uma redução de 2,5 segundos em comparação com o mesmo ponto P1 da figura 4.13, ou seja, obteve-se um tempo de 10 segundos. Isso representa um resultado muito bom para o processo de manufatura.

A Figura 4.7 mostra o comportamento obtido no ponto P2. O efeito dos 15 % de ar atmosférico não foi significativo na temperatura da chama no ponto P2 em comparação com a mistura estequiométrica. A diferença é apenas de 18,90 °C

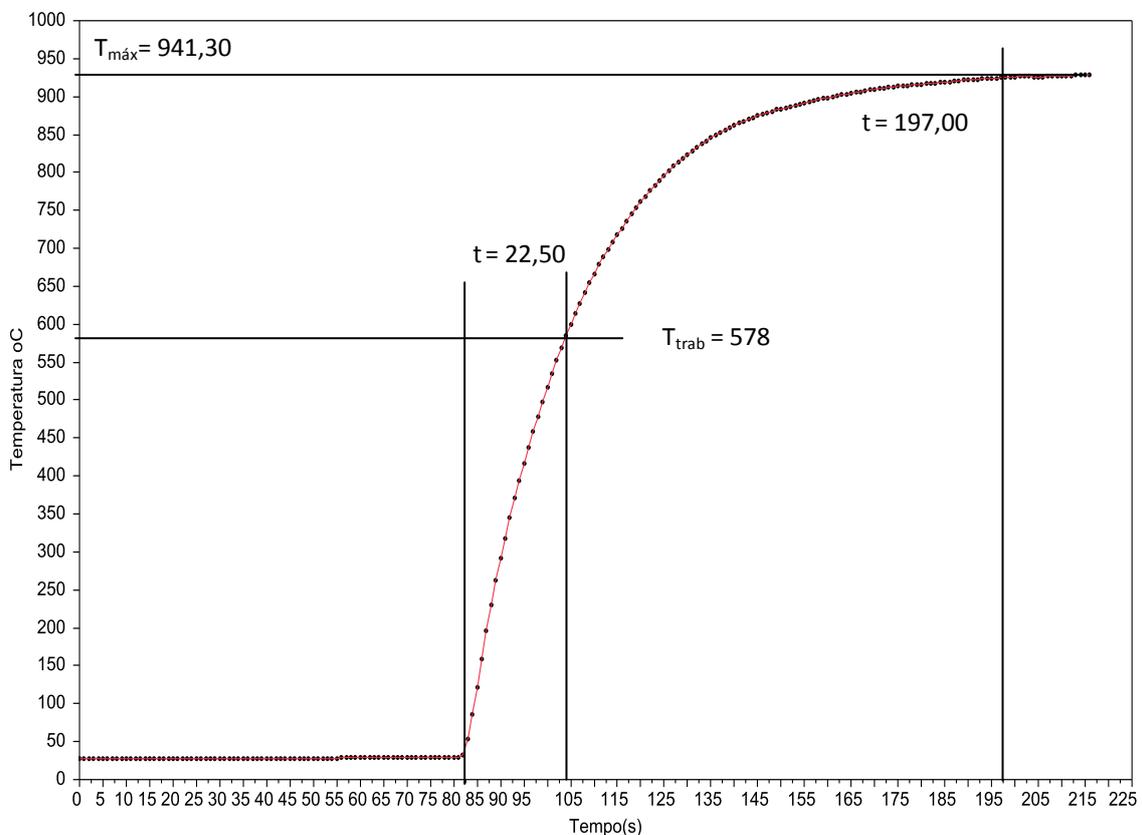


Figura 4.20 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico com 15% de excesso ar P2 T2.

Analisando o tempo também não foi muito bom, 22 segundos, ou seja, aumentou em relação ao mesmo ponto com o valor de vazão estequiométrica. Esse feito pode indicar instabilidade nessa região da chama, isso poderá ser verificada na repetição do teste na próxima sessão.

## Repetição do Teste 2 – 0,10 m<sup>3</sup> de GLP/h com excesso de 15% de ar atmosférico

O comportamento da temperatura e do tempo mostrado na figura 4.21 na repetição do teste T2 com 15 % de excesso de ar atmosférico é muito semelhante ao encontrado na figura 4.19. A diferença de temperatura é muito pequena e o tempo para atingimento da temperatura de trabalho se manteve em 10 segundos. A curva de repetição do teste com excesso de ar é estável e com inclinação menor, demonstrando que o queimador mantém uma boa estabilidade da chama. A diferença de temperatura é de 49 °C se comparado com a figura 4.19.

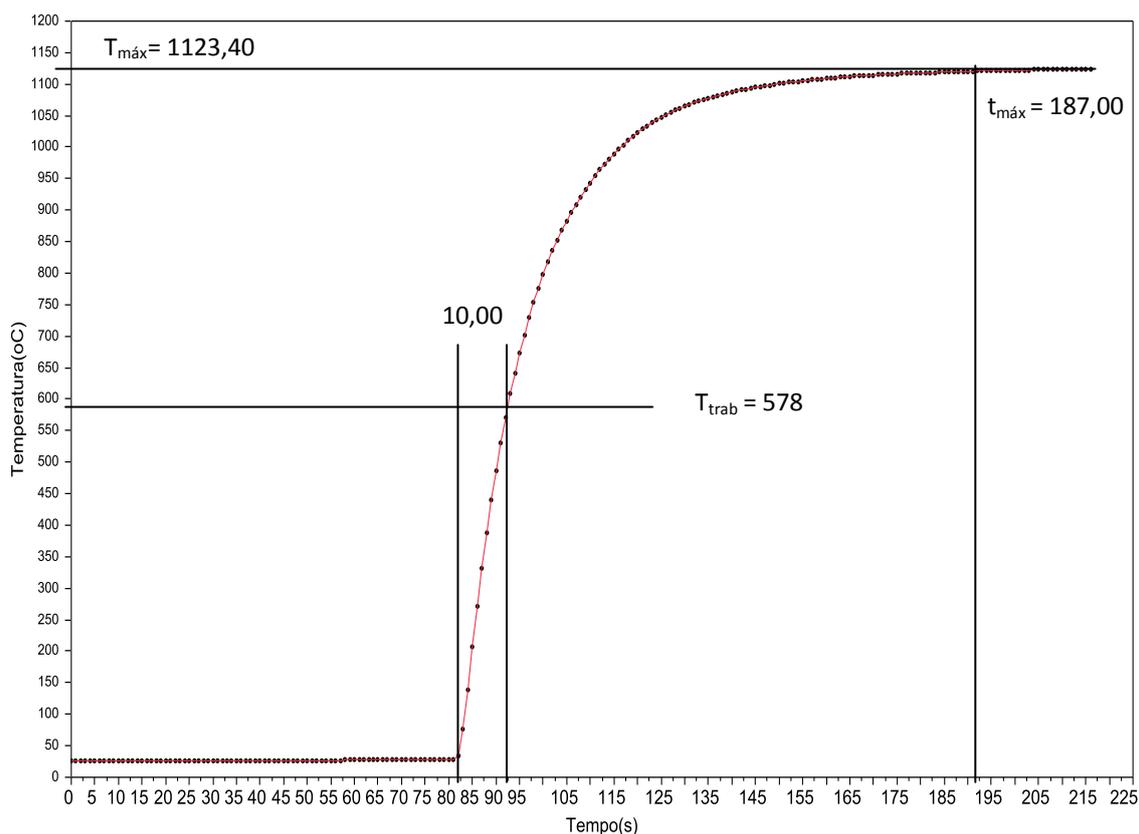


Figura 4.21 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico com 15% de excesso ar atm ponto P1. Repetição de T2.

Um aspecto importante é que sempre as curvas de repetição são encontradas pequenas variações de temperatura, isso é um comportamento muito bom, e mostra que o processo de combustão se mantém estável. A Figura 4.22 mostra o comportamento da curva de repetição do teste 2 da temperatura no tempo obtido no ponto P2. Aqui encontramos as mesmas situações anteriores, logo são válidos os mesmo comentários.

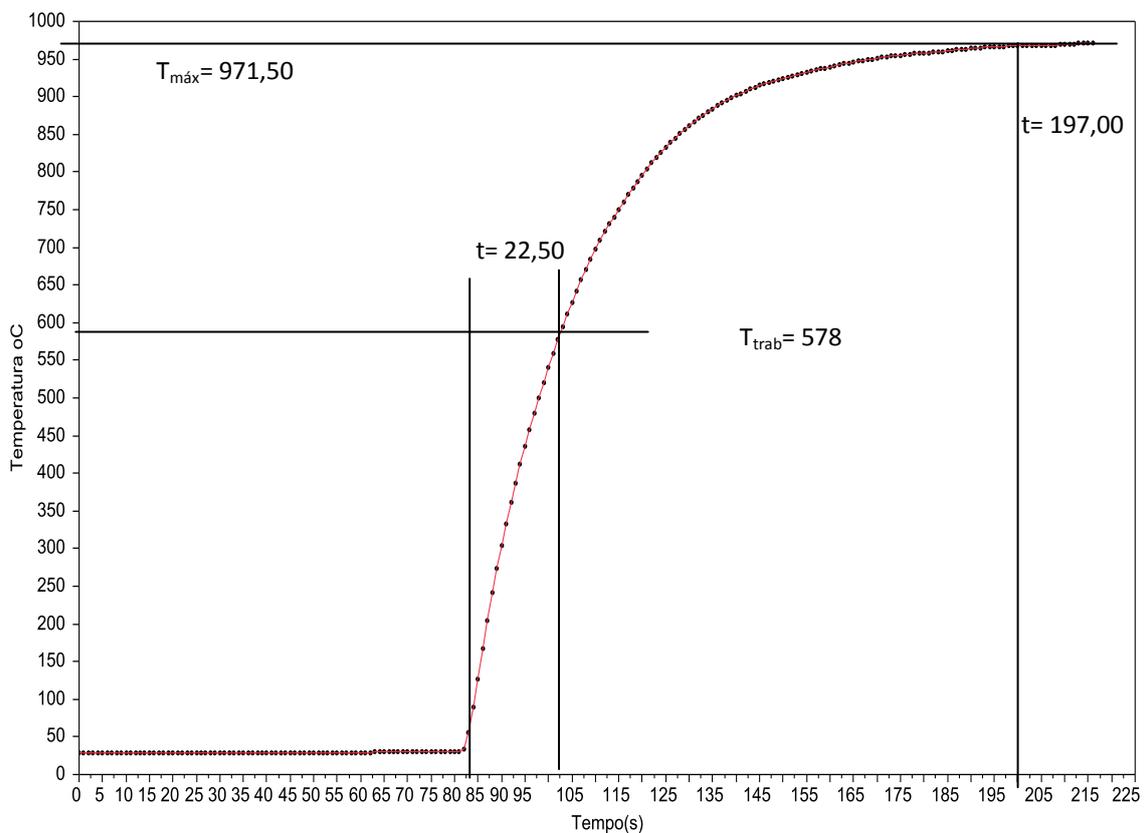


Figura 4.22 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P2. Repetição de T2.

A temperatura máxima da repetição do teste no P2 apresenta uma variação de 30,20 °C e o tempo permanece inalterado. Isso mostra 22,5 segundos para atingimento da temperatura de trabalho. Esse tipo de comportamento já vem se repetindo em todos os testes com a composição de GLP de 0,10 m<sup>3</sup>. Isso indica que os resultados dos experimentos são consistentes e se matem ao longo do tempo.

Temperatura média: Teste 2 – 0,10 m<sup>3</sup> GLP/h com excesso de 15% de ar atm.

### Temperatura média versus tempo do ponto P1

A figura 4.23 apresenta a curva experimental da temperatura média do teste T2 com repetição para o ponto P1 com 15% de ar atm acima do valor estequiométrico.

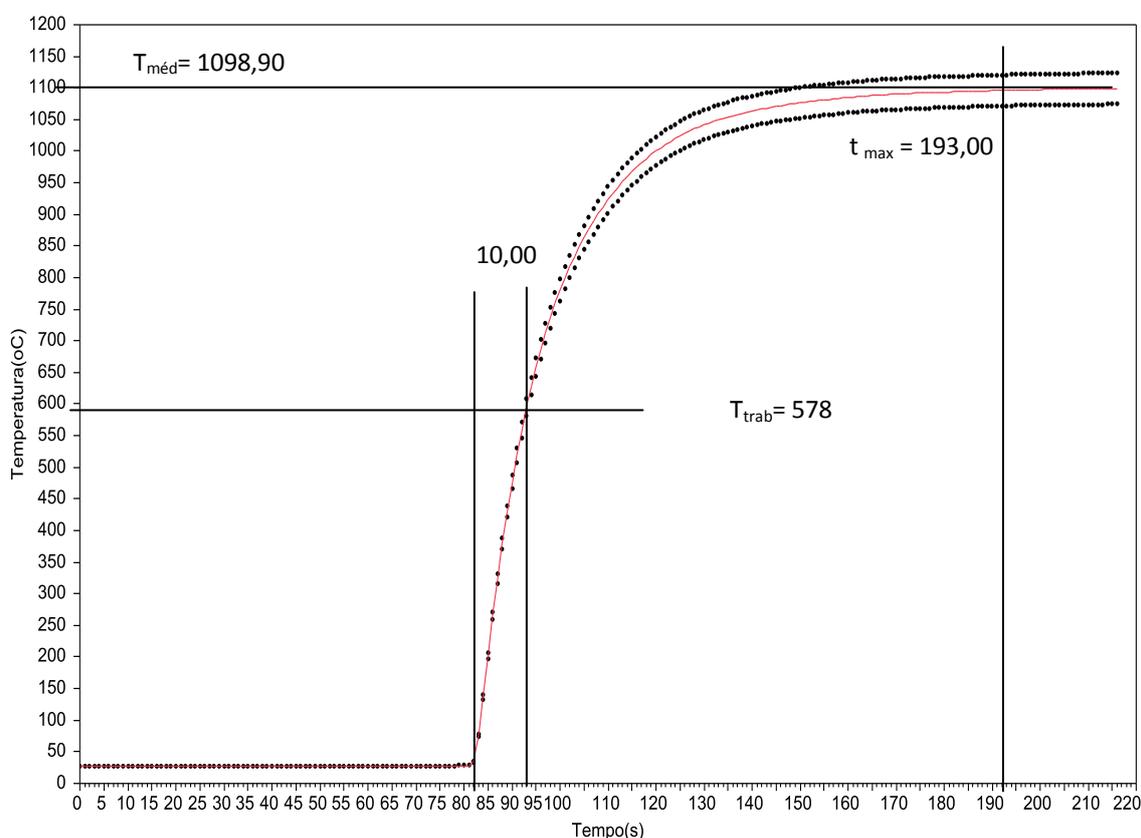


Figura 4.23 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P1 com excesso de ar T2.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1098,90 graus com um desvio padrão de 34,70 graus em T=193 segundos. O tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 10 segundos, ou seja, 3 segundos

menor que o tempo médio do T1 de 13 segundos e 15 segundos menor que tempo padrão de 25 segundos. O desvio padrão é maior que o encontrado para o mesmo ponto P1 do T1, ou seja, o T2 apresenta uma variação em torno da média da temperatura maior que o T1. A figura 4.24 apresenta o resultado da temperatura média para o ponto P2. Pode-se observar um aumento na temperatura média, como também um aumento no tempo de atingimento da temperatura de trabalho em relação à figura 4.18, porém o resultado mostra que a região nas proximidades do ponto P2, favorece o processo de brasagem manual em virtude do tempo para atingimento da temperatura de trabalho ser mais baixo que 25 segundos estabelecido pela empresa.

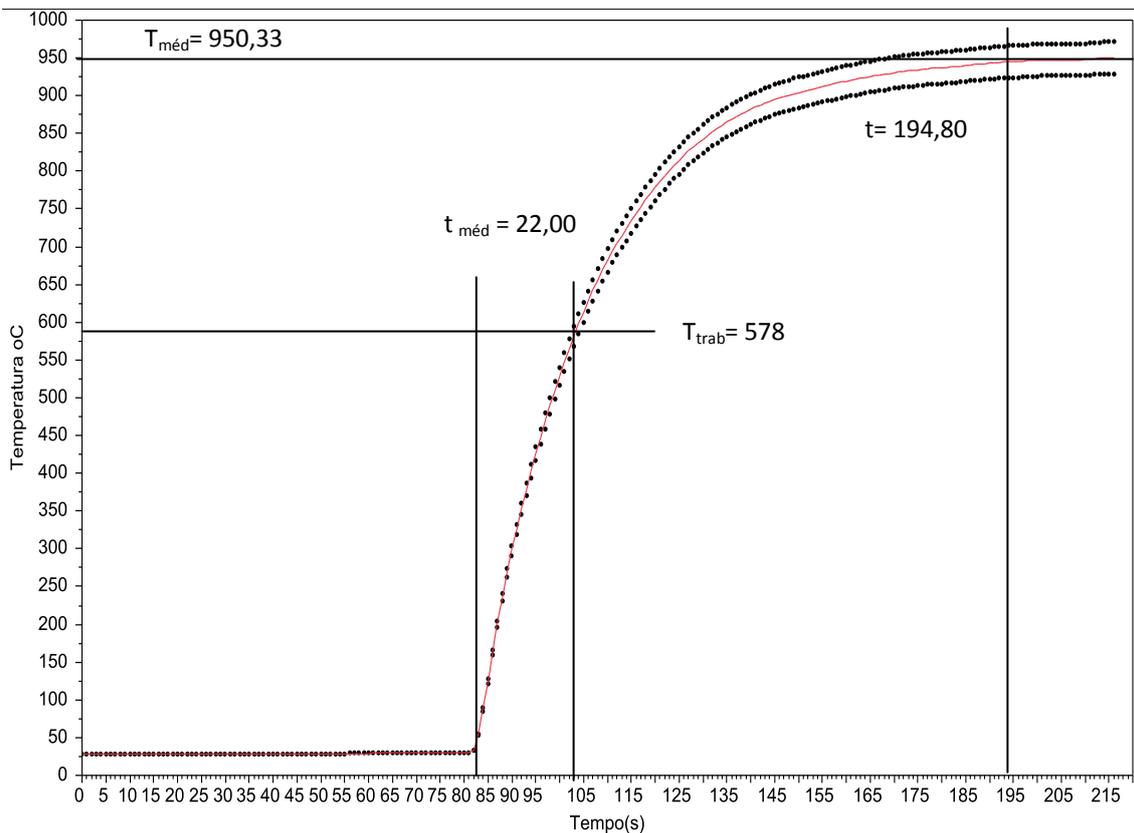


Figura 4.24 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo para queimador cilíndrico no ponto P2 com excesso de ar atm de 15% T2.

O resultado encontrado no T1 para o ponto P1 com mistura estequiométrica e mistura com a de 15% de excesso de ar atm, atendem a necessidade dos 25 segundos para atingir a temperatura de trabalho de 578 °C, com um consumo de

GPL 75% e 50 % respectivamente menor que usado pela Whirlpool atualmente na brasagem manual. O ponto P2 é uma região da chama que deve ser evitada na brasagem para a configuração de T1, pois tempo é superior a 25 segundos. De forma geral o queimador tipo cilindro se comportou com bastante estabilidade de chama e eficiência de queima para a composição de mistura do teste 2.

### **Teste 3 – 0,15 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica**

A curva da figura 4.25 apresenta o resultado do T3 com valor estequiométrico para os elementos de mistura. Fazendo um comparativo com o teste anterior com valores estequiométricos, o resultado também muito satisfatório em relação às temperaturas máximas, porém o consumo de combustível é sempre maior e os resultados são muitos pequenos em se falando de diferenças no  $T_{máx}$ . Esse efeito pode está sendo causado por problemas no processo de mistura do combustível com o oxidante. O tempo para atingimento foi o melhor tempo em relação a  $T_1$  e  $T_2$ , que são superiores a 17,5 segundos do T3, isso se deve ao aumento do limite de inflamabilidade, pela presença de mais combustível na mistura.

O resultado do tempo está bem menor em relação T1 e T2, ou seja, temos uma redução considerável do tempo de  $T_{trab}$ . A estabilidade do queimador é satisfatória para a vazão em teste, o que mostra que mantemos uma chama laminar para as três vazões, o que é muito positivo para minimizar deltas de temperaturas em queimas com chamas turbulentas.

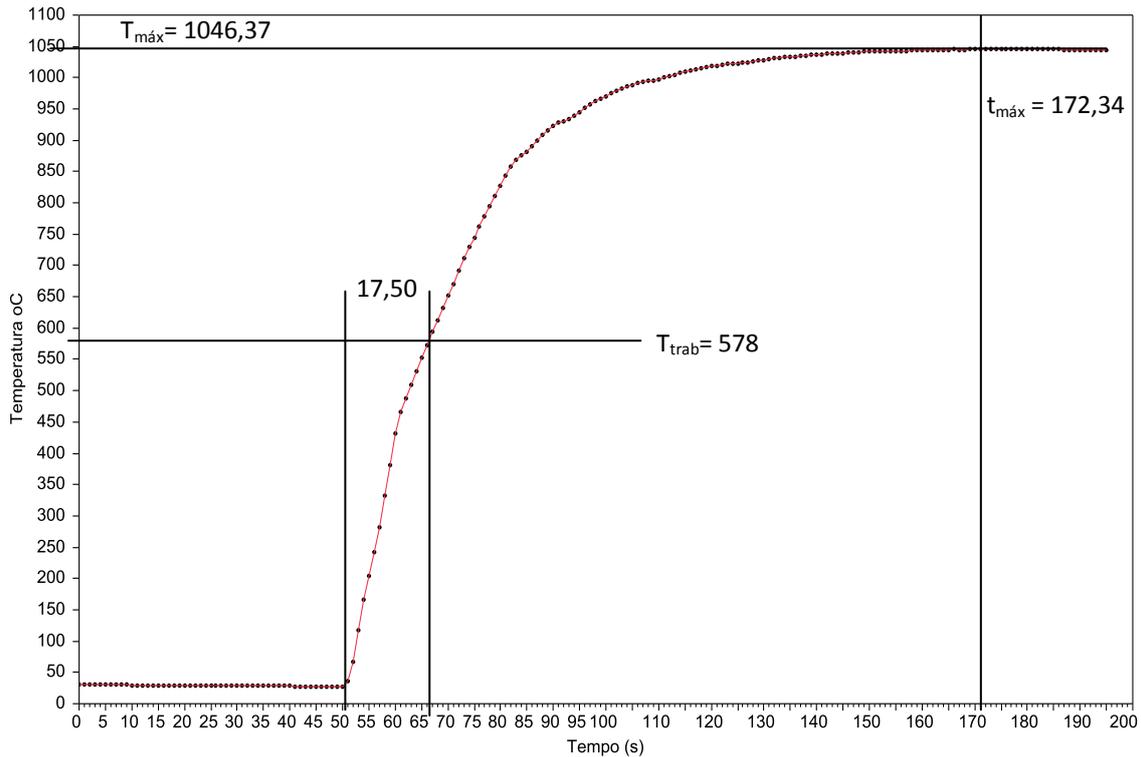


Figura 4.25 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico T3.

Segundo a curva da figura 4.26, temos uma temperatura máxima de 941,95 °C que representa uma diferença de 8,38 °C em relação à figura 4.13. Analisando o tempo para atingimento da temperatura de trabalho do material de adição, houve uma redução de 1,5 segundo em comparação com o mesmo ponto P1 da figura 4.13, ou seja, obteve-se um tempo de 21,25 segundos. Isso quer dizer que o queimador chegou ao seu limite, não adiante aumentarmos o GLP, pois o efeito no resultado não será expressivo. As diferenças entre os testes são muito pequenas, com a tendência de aumento do GLP. O que se espera para a repetição e os testes com excesso de ar atm, que essas temperaturas variem em torno de 5 a 10%.

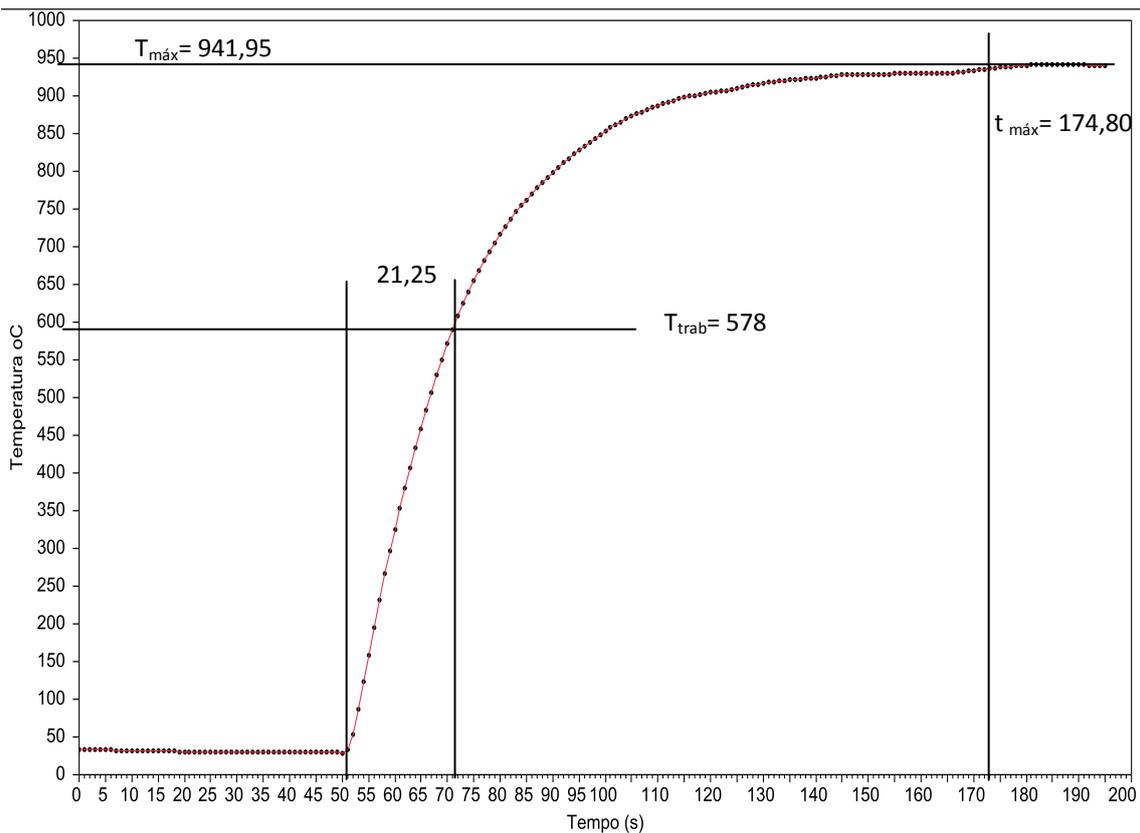


Figura 4.26 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico com 0,15 l/h de GLP com 15% de excesso de ar atm.

### Repetição do Teste 3 – 0,15 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica.

O comportamento da temperatura e do tempo mostrado na figura 4.27 na repetição do teste T3 com ar atmosférico foi previsível com uma variação estimada na sessão anterior. A diferença de temperatura é muito pequena e o tempo para atingimento da temperatura de trabalho se manteve de 16,25 segundos, o que representa um bom resultado em termos de estabilidade da temperatura da chamas no ponto P1. O tempo para atingimento da temperatura máxima ficou em torno de 176,65 segundos o que é muito alto para um alcance de 1060,80 °C em relação a um tempo de trabalho de 25 segundos.

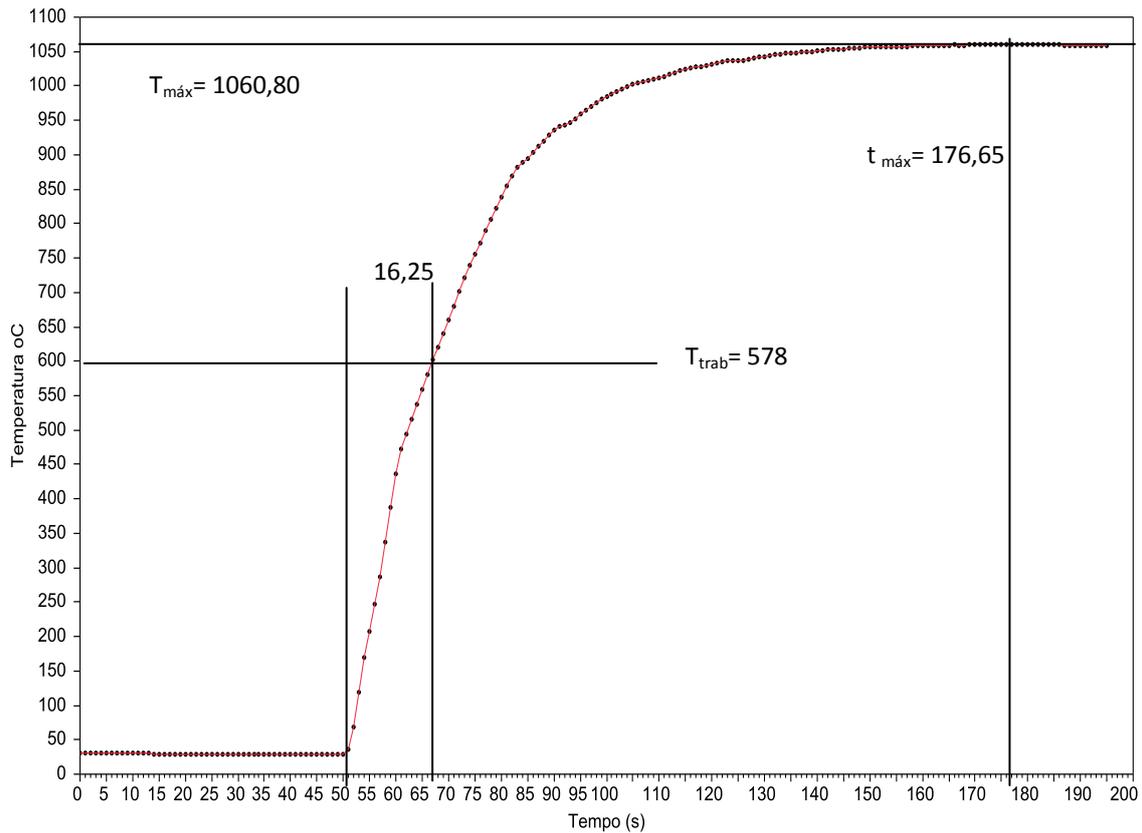


Figura 4.27 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico com 15% de excesso de ar atm T3.

Um aspecto importante é que sempre as curvas de repetição são encontradas pequenas variações de temperatura, isso é um comportamento muito bom, e mostra que o processo de combustão se mantém estável e que as vazões estão adequadas para o queimador. A Figura 4.28 mostra o comportamento da curva de repetição do teste 3 da temperatura no tempo obtido no ponto P2. Aqui encontramos as mesmas situações anteriores, logo são válidos os mesmo comentários.

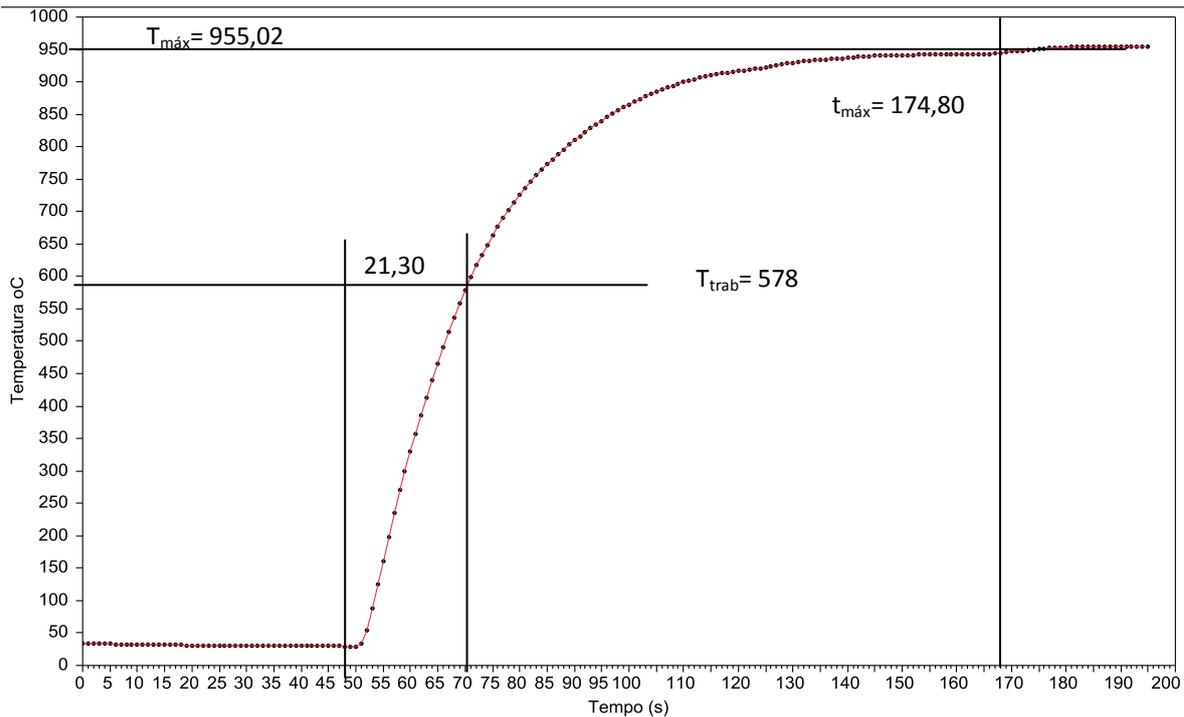


Figura 4.28 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico com 15% de excesso de ar atm. Repetição de T3.

A temperatura máxima para o ponto P2 chegou a 955,02 °C com um tempo máximo de 174,80 segundos, o que representa um resultado muito superior a tempo de trabalho de 25 segundos. É importante destacar que para solução do problema do tempo muito alto para temperaturas acima de 1000 °C pode ser resolvido com pré-aquecimento das peças, como também outros pontos de aquecimento como queimadores mais potentes. Também é importante ressaltar que possivelmente esteja havendo um problema de mistura dos gases, causando problemas na homogeneidade da mistura. Esse aspecto é extremamente relevante para a eficiência e rendimento do queimador. Logo outros estudos serão necessários para desenvolvimento de forma de escoamentos que facilitem a mistura do combustível com o comburente de forma que gerem uma queima com o mínimo de perda de potência, para alcance de tempos melhores.

### Temperatura média Teste 3 – 0,15 m<sup>3</sup> de GLP/h. Mistura estequiométrica

A figura 4.29 apresenta a curva experimental do tempo médio da união dos dados do testes T3 e com sua repetição para o ponto P1 para composição estequiométrica e ar atm e GLP. É visível que a variação neste teste foi a menor em comparação com T1 e T2. Em termos de temperatura média, foi atingido o valor de 1053,63 °C com um desvio padrão de 10,26 °C, que para processo de brasagem a base de chama é uma variação extremamente boa. O tempo médio para atingimento da temperatura de trabalho no ponto P1 ficou em torno de 16,30 segundos e o tempo máximo para temperatura média em torno de 182,45 segundos.

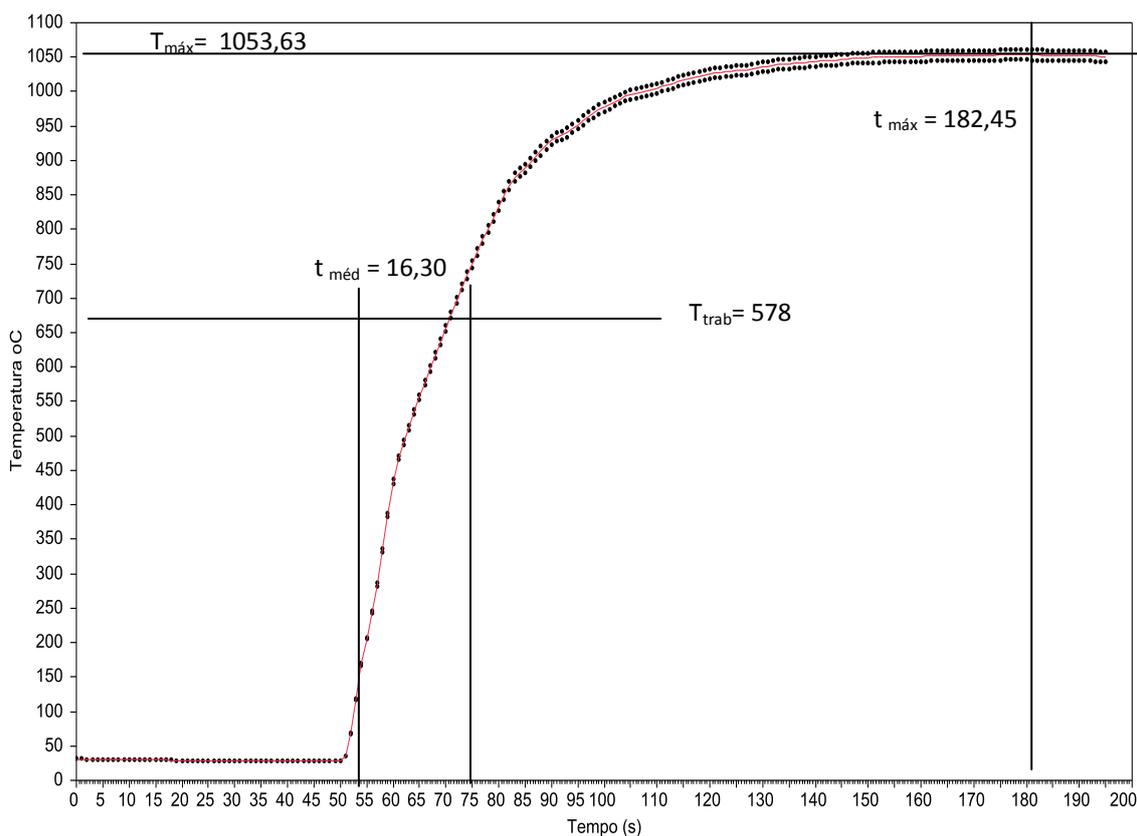


Figura 4.29 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador tipo cilíndrico T3.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1053,63 °C é

um resultado satisfatório. A figura 4.30 apresenta o resultado da temperatura média para o ponto P2. Pode-se observar um aumento na temperatura média, como também um uma redução no tempo de atingimento da temperatura de trabalho em relação à figura 4.18, porém o resultado mostra que a região nas proximidades do ponto P2, favorece o processo de brasagem manual em virtude do tempo para atingimento da temperatura de trabalho ser mais baixo que 25 segundos estabelecido pela empresa, porém muito próximo o que pode gerar um risco ao longo do tempo de processo.

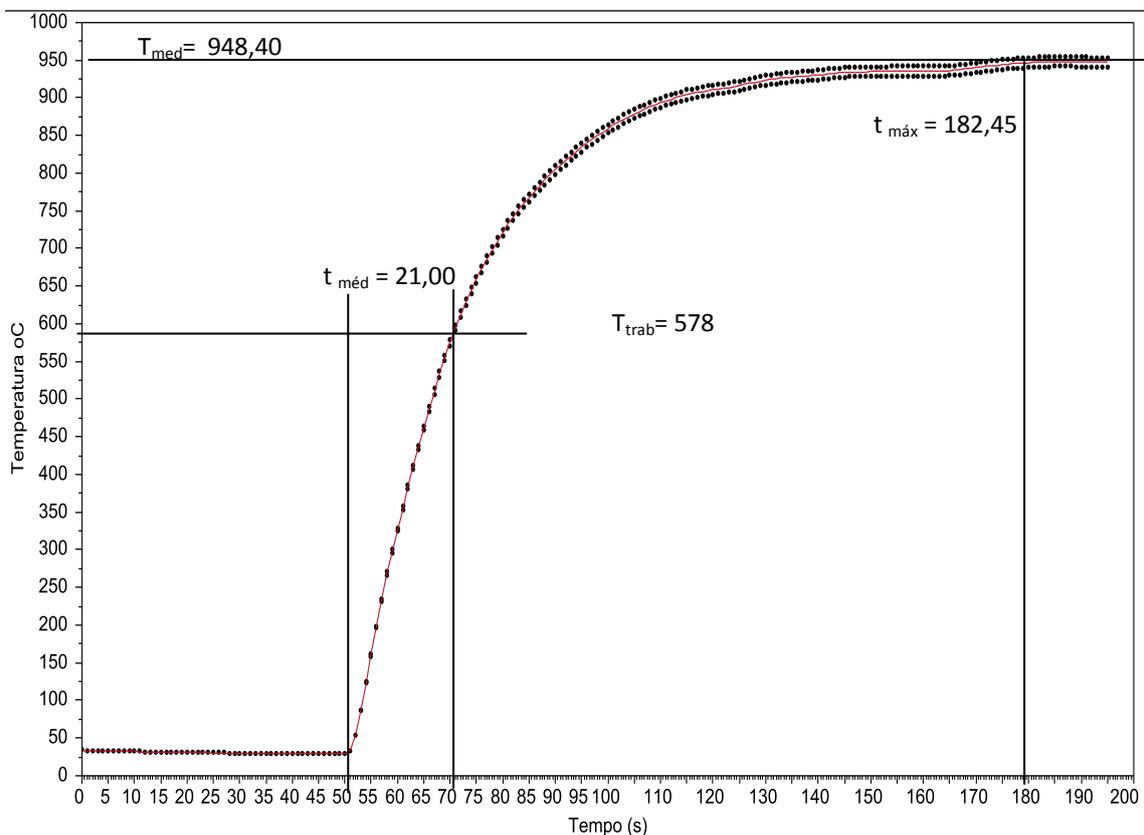


Figura 4.30 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico T3.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média para o ponto P2 se manteve bastante estável na repetição, o que gera uma confiabilidade nos resultados obtidos e no tipo de modelo de queimador.

### Teste 3 – 0,15 m<sup>3</sup> de GLP/h com excesso de ar atmosférico.

A curva da figura 4.31 apresenta o resultado do teste T3 com 15% de excesso de ar atmosférico acima do valor estequiométrico. Fazendo um comparativo com os testes anteriores com valores estequiométricos e os mesmos testes com excesso de ar atm este foi à melhor desempenho do queimados em termos de temperatura de trabalho e tempo de temperatura máxima.

O tempo para atingimento da temperatura de trabalho foi de 5 segundos, ou seja, o menor tempo já alcançado até agora e com 0,05 m<sup>3</sup> a menos do processo normal de 0,2 m<sup>3</sup> já existente.

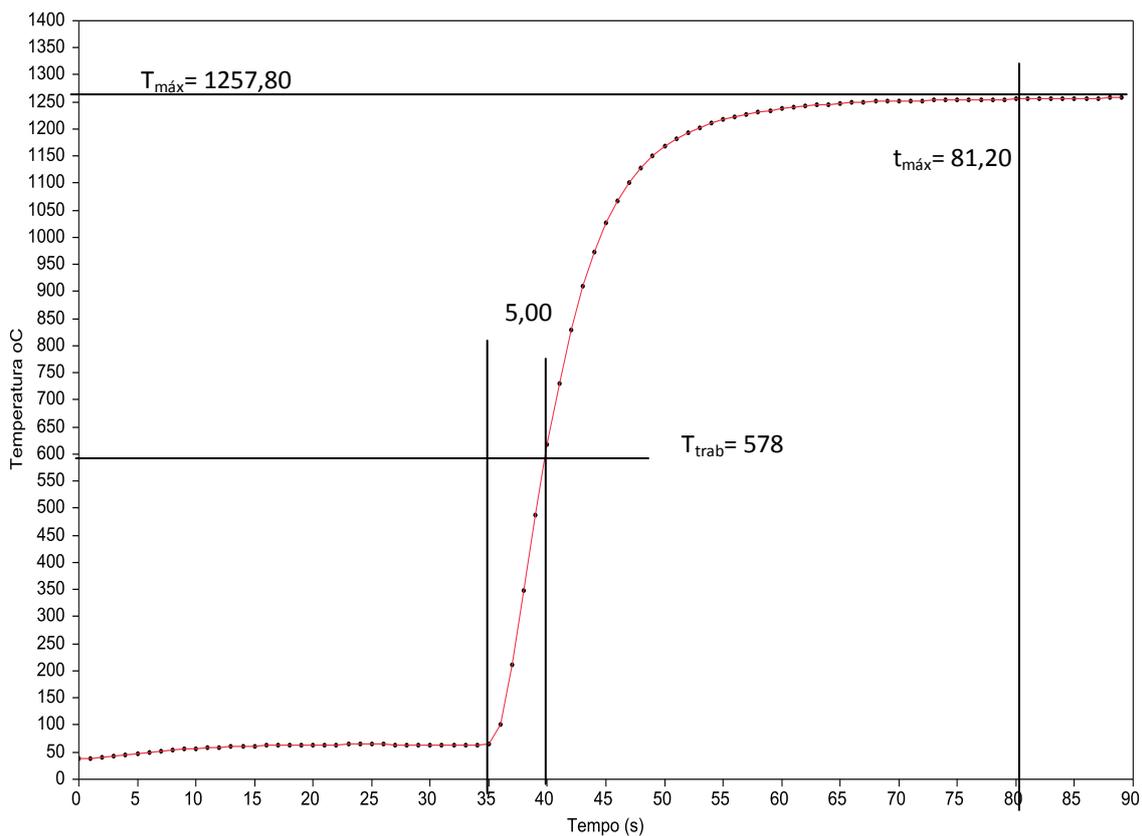


Figura 4.31 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador com excesso de ar atm T3.

Isso mostra que o rendimento com excesso de ar atm para essa faixa de

vazão atingiu a temperatura que se esperava. O efeito do aumento da vazão do ar atm tem influência no escoamento provocando mais turbulência o que ajuda a misturas dos gases para queima. O próximo passo é a repetição do teste para avaliar a robustez desse primeiro resultado.

A Figura 4.32 mostra o comportamento obtido no ponto P2. O efeito dos 15 % de ar atmosférico como no resultado de P1, também é extremamente satisfatório. O ponto P2 sempre vem se mostrando com o delta de temperatura acima de 100 graus Celsius para os testes T1 e T2. A figura 4.32 mostra um tempo de 7 segundos para temperatura de trabalho com um  $T_{\text{máx}}$  de 1096 °C. O resultado mostra que para essa composição da mistura, as duas regiões da chama estão adequadas para uso no processo de brasagem, sem impactos no rendimento e desempenho no processo de brasagem manual, ou seja, pode-se usar qualquer região nas proximidades de P1 e P2 sem impactos significativos na brasagem dos tubos.

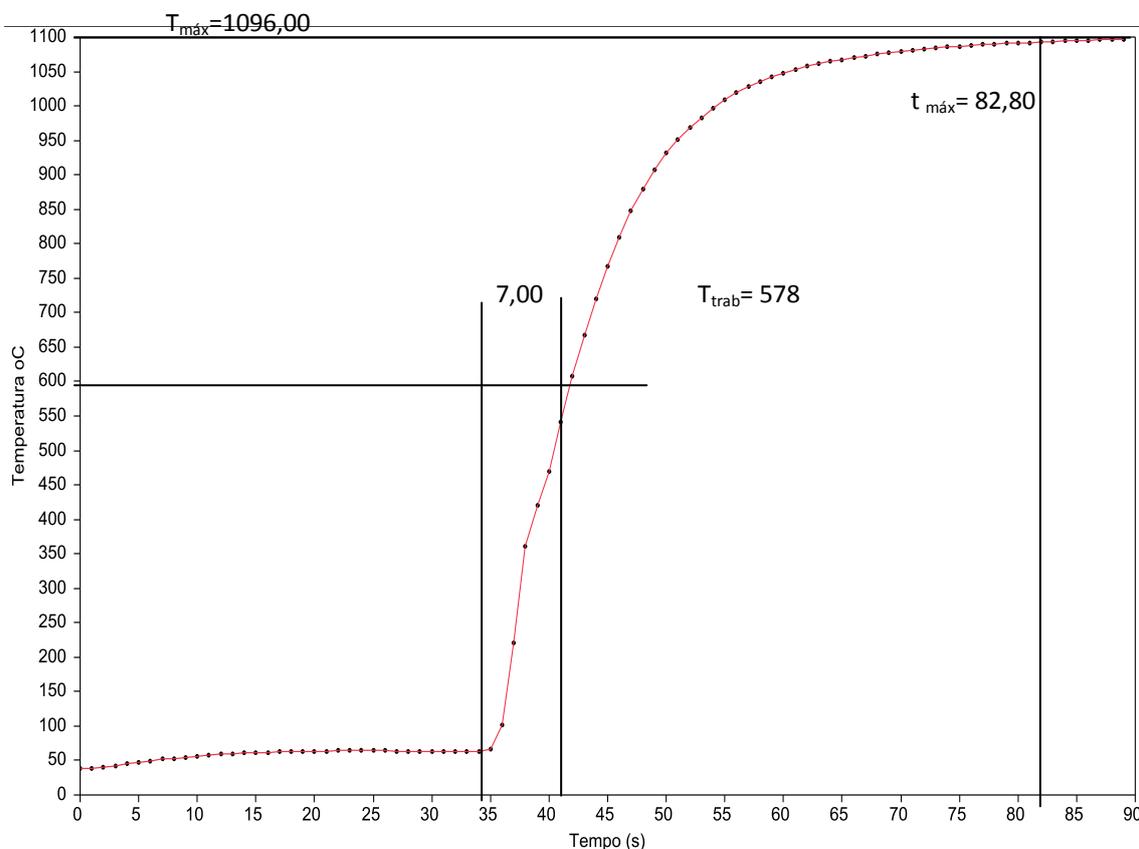


Figura 4.32 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador com excesso de ar atm T3.

De uma forma geral o resultado do ponto P2 para o teste T3, é o melhor comparado com os testes anteriores. A diferença de temperatura entre P1 e P2 é destaque, seguidos dos tempos para atingimento da temperatura de trabalho.

### Repetição do Teste 3 – 0,15 m<sup>3</sup> de GLP/h com excesso de ar atmosférico.

Segundo a curva da figura 4.33, temos uma temperatura máxima de 1314,90 °C que representa uma diferença de 57 °C em relação à figura 4.31. Essa diferença na temperatura para os testes de repetição de uma forma geral para todos os testes tem variado entre 5 a 10 %, sendo que para o T3 essa é menor variação. Isso representa um resultado muito positivo, pois, mostra que encontramos uma composição de mistura e uma vazão satisfatória para brasagem manual com um tempo 72% menor que os 25% estabelecido como meta.

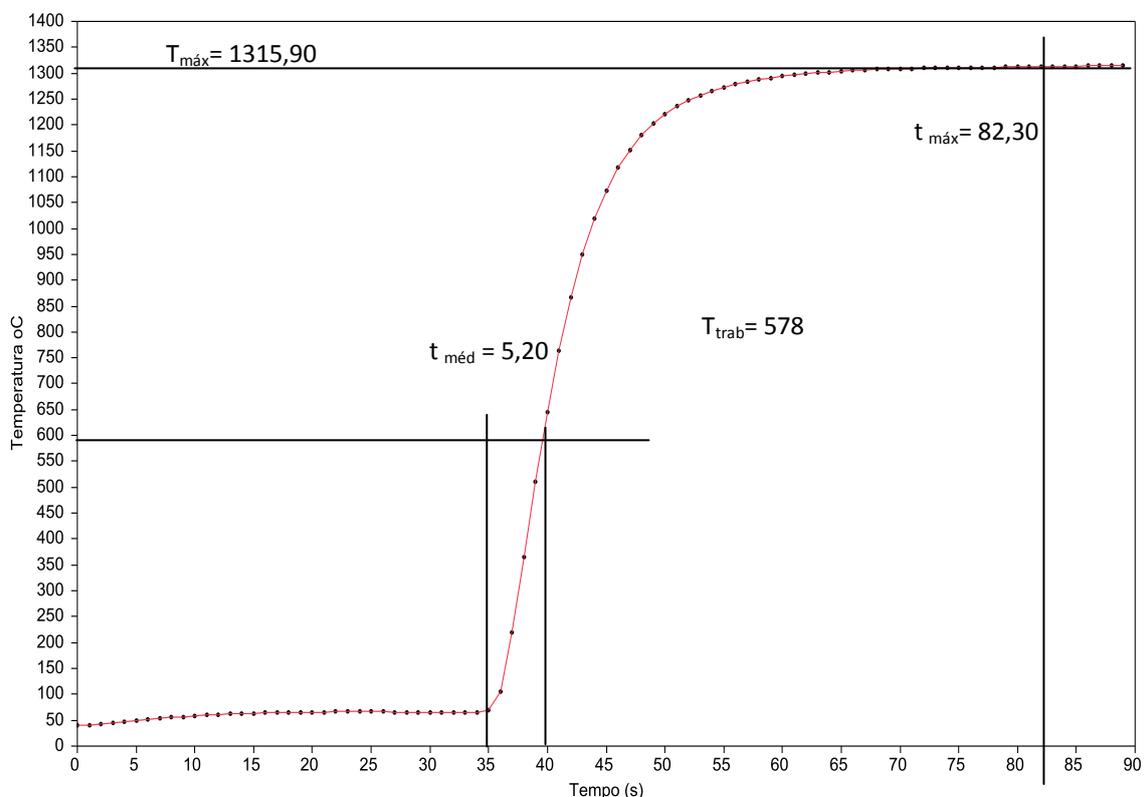


Figura 4.33 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico com excesso de ar atm. Repetição T3.

Outro aspecto para comentário é o tempo para atingimento da temperatura de trabalho, que ficou 1,8 segundos menor do que o mesmo ponto para o valor estequiométrico. É importante comentar que esse resultado com excesso de ar atm, não leva a chama uma formação oxidante o que é muito agressiva para brasagem do alumínio.

A Figura 4.34 mostra o comportamento obtido no ponto P2. O efeito dos 15 % de ar atmosférico na repetição se manteve positivamente na temperatura da chama no ponto P2 em comparação com a mistura estequiométrica. Esse teste mostra que o resultado apresentando é confiável e que o queimador tipo cilíndrico tem um bom desempenho para essa faixa de composição de mistura, maximizando o resultado de temperatura com a diminuição tempo para alcance da temperatura de trabalho. Do ponto de vista de temperatura temos  $1145,70^{\circ}\text{C}$  com 7 segundos de tempo e com um tempo máximo de 84,3 segundos para alcance de  $T_{\text{máx}}$ .

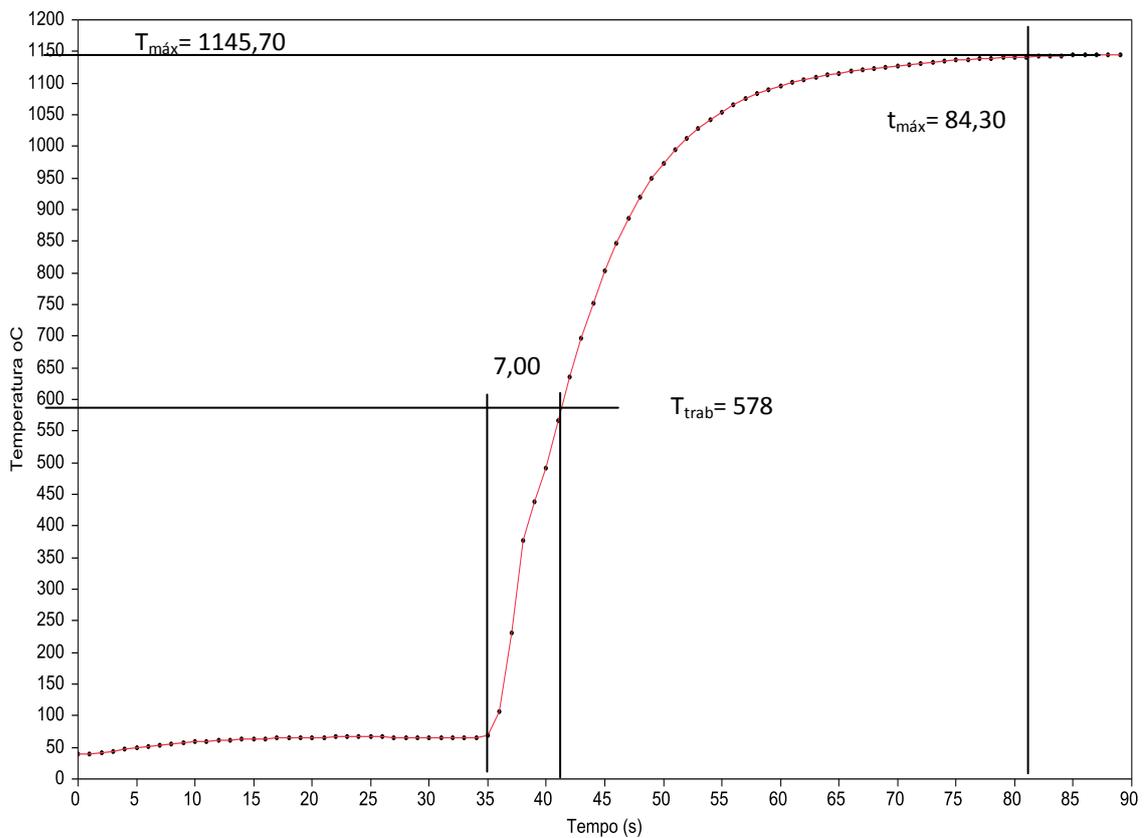


Figura 4.34 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico excesso de ar atm. Repetição T3.

### Temperatura média do Teste 3 – 0,15 m<sup>3</sup> de GLP/h com excesso de ar atmosférico

A figura 4.35 apresenta a curva experimental do tempo médio para os testes T3 e com sua repetição no ponto P1 para com excesso ar atm. É visível que a variação neste teste foi a menor em comparação com T1 e T2. Em termos de temperatura média, foi atingido o valor de 1283,30 °C com um desvio padrão de 28,54 °C, que para processo de brasagem a base de chama é uma variação extremamente boa. O tempo médio para atingimento da temperatura de trabalho no ponto P1 ficou em torno de 5,8 segundos e o tempo máximo para temperatura média em torno de 83,3 segundos.

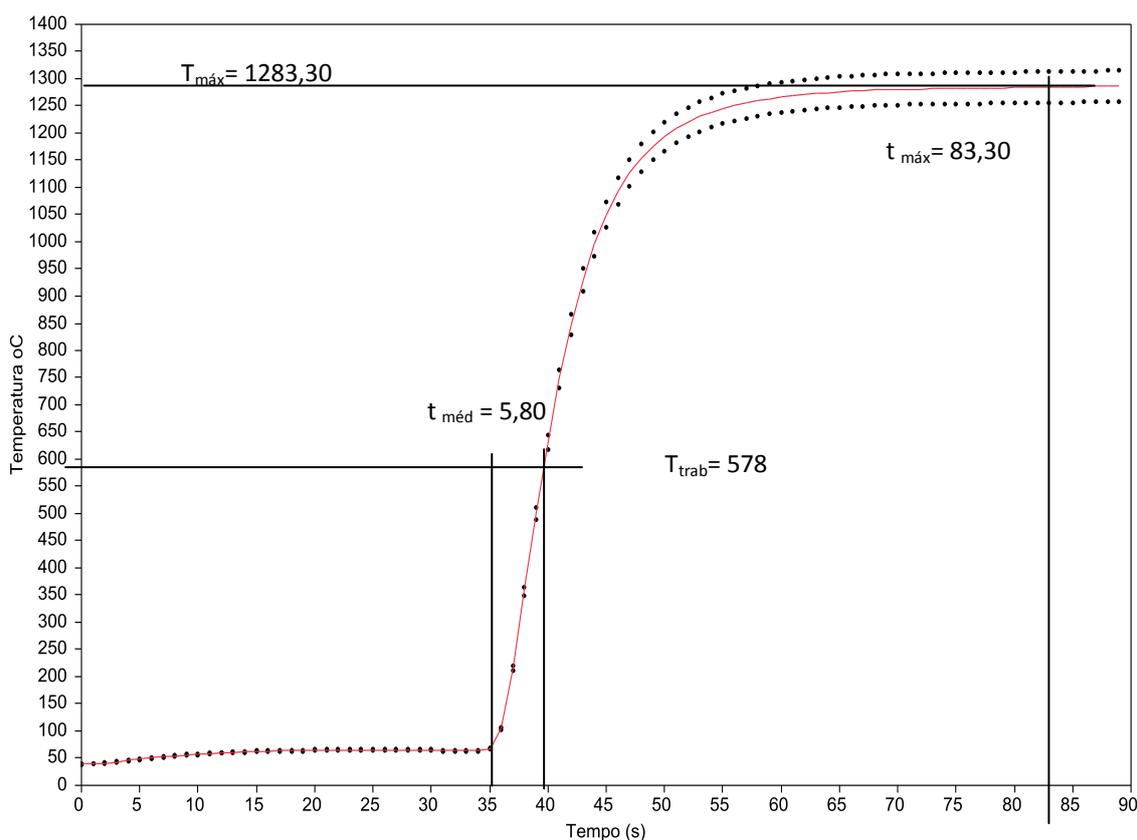


Figura 4.35 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P1 para queimador cilíndrico com excesso de ar atm T3.

É importante destacar que para essa faixa de temperatura material de confecção tem que resistir a temperaturas elevadas, para não sofrer desgaste acelerado com o tempo. De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média é satisfatória.

A figura 4.36 apresenta o resultado da temperatura média para o ponto P2. Pode-se observar um aumento na temperatura média, como também um uma redução no tempo de atingimento da temperatura de trabalho em relação a todos os testes anteriores, onde esse ponto apresentava grandes variações temperatura em relação P1, porém o resultado mostra que a região nas proximidades do ponto P2, favorece o processo de brasagem manual em virtude do tempo para atingimento da temperatura de trabalho ser mais baixo em mais 70% também para esse ponto, ou seja, um  $T_{méd}$  de  $1120,8^{\circ}\text{C}$  em  $7,15$  segundos e uma temperatura máxima de  $79,8^{\circ}\text{C}$  o que representa mais de 50% dos valores nos teste anteriores.

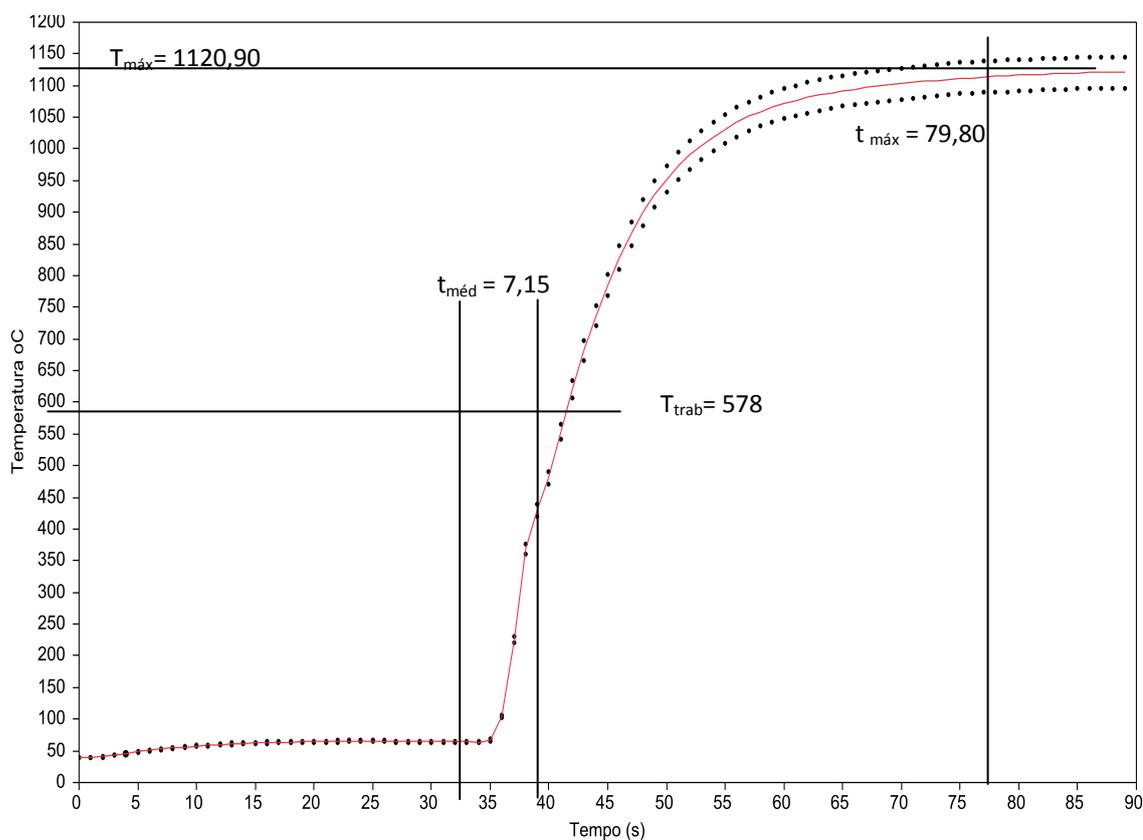


Figura 4.36 - Curva experimental temperatura média de chama versus tempo no ponto P2 para queimador cilíndrico com excesso de ar atm T3.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média para o ponto P2 se manteve bastante estável na repetição, o que gera uma confiabilidade nos resultados obtidos e no tipo de modelo de queimador.

### Tabela resumo de teste – Queimador tipo cilíndrico

A tabela 4.1 e 4.2 apresenta o resumo dos resultados de todos os testes realizados no queimador tipo cilíndrico para as diversas composições de misturas ar atmosférico/GLP.

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados dos testes experimentais do queimador tipo cilíndrico para o ponto P1.

Testes	Temperatura VE sem excesso de ar atm (°C)	Temperatura Repetição VE sem 15% de excesso de ar atm (°C)	Temperatura VE com 15% de excesso de ar atm (°C)	Temperatura Repetição VE com 15% de excesso de ar atm (°C)
	P1		P1	
T1	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	1026,22	15,75	1073,91	12,50
T2	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	1062,36	12,00	1098,90	10,00
T3	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	1053,63	16,30	1283,30	5,80

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos testes experimentais do queimador tipo cilíndrico para o ponto P2.

Testes	Temperatura VE sem excesso de ar atm (°C)	Temperatura Repetição VE sem 15% de excesso de ar atm (°C)	Temperatura VE com 15% de excesso de ar atm (°C)	Temperatura Repetição VE com 15% de excesso de ar atm (°C)
	P2		P2	
T1	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	846,02	31,25	877,12	28
T2	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	877,13	19,00	950,33	22,00
T3	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	948,40	21,00	1120,90	7,15

#### 4.1.2. Teste experimental queimador tipo U

Na seção anterior foi testado a desempenho do queimador tipo cilíndrico com dois pontos de leitura de temperatura na chama. Nesta seção será testado o queimador tipo U com apenas um ponto de leitura de temperatura na chama, em função da chama está concentrada no centro do queimador como mostra a Figura 3.22, usado o procedimento experimental conforme Tabela 3.1.

#### Temperatura do Teste 1 – 0,05 metros cúbico de GLP/h

A curva experimental temperatura versus tempo apresentada na figura 4.37 mostra um comportamento esperado para chama com ar/combustível no ponto P1. A curva tem o comportamento semelhante ao queimador tipo cilíndrico, ou seja, uma curva mais inclinada, o que indica uma taxa de velocidade de queima menor

(Robert, 2004), característica de chamas que usam o ar atmosférico como oxidantes. Contudo a região da chama no ponto P1 atingiu a temperatura máxima de 998,05 graus em 19 segundos. A temperatura máxima atingida com 0,05 metros cúbicos de GLP/h é muito boa e o tempo está abaixo do tempo máximo de 25 segundos.

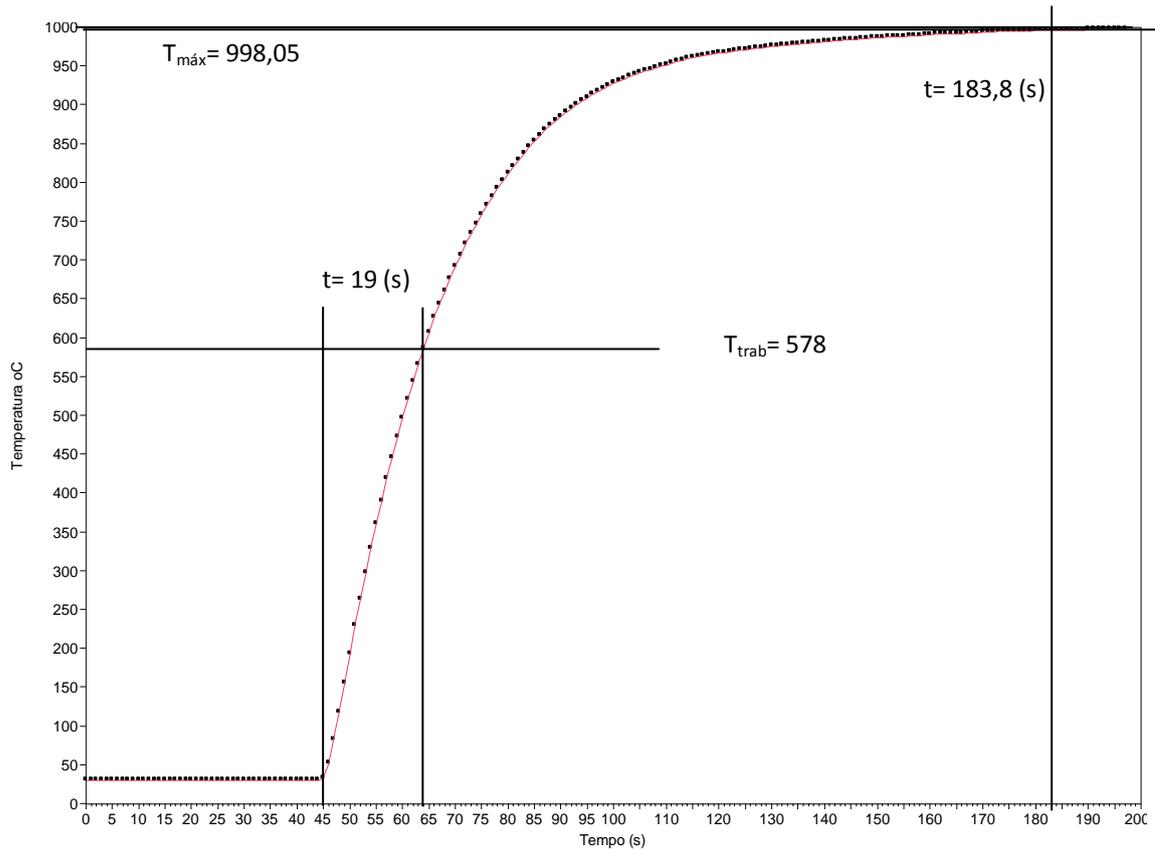


Figura 4.37 - Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo cilíndrico com 0,05 m<sup>3</sup>/h de GLP.

### Repetição do Teste 1 – 0,05 metros cúbico de GLP/h

O comportamento da curva no ponto P1 da figura 4.38 é semelhante ao encontrado na figura 4.37, com a diferença na temperatura e no tempo para o mesmo ponto. O Delta de temperatura é de 84,33 graus e tempo 2 segundos menor, isso representa 8% de variação o que é um resultado muito bom para processo com

chama. Essa pequena variação de temperatura e tempo mostra que o queimador tem uma boa estabilidade para proporção de vazão de mistura.

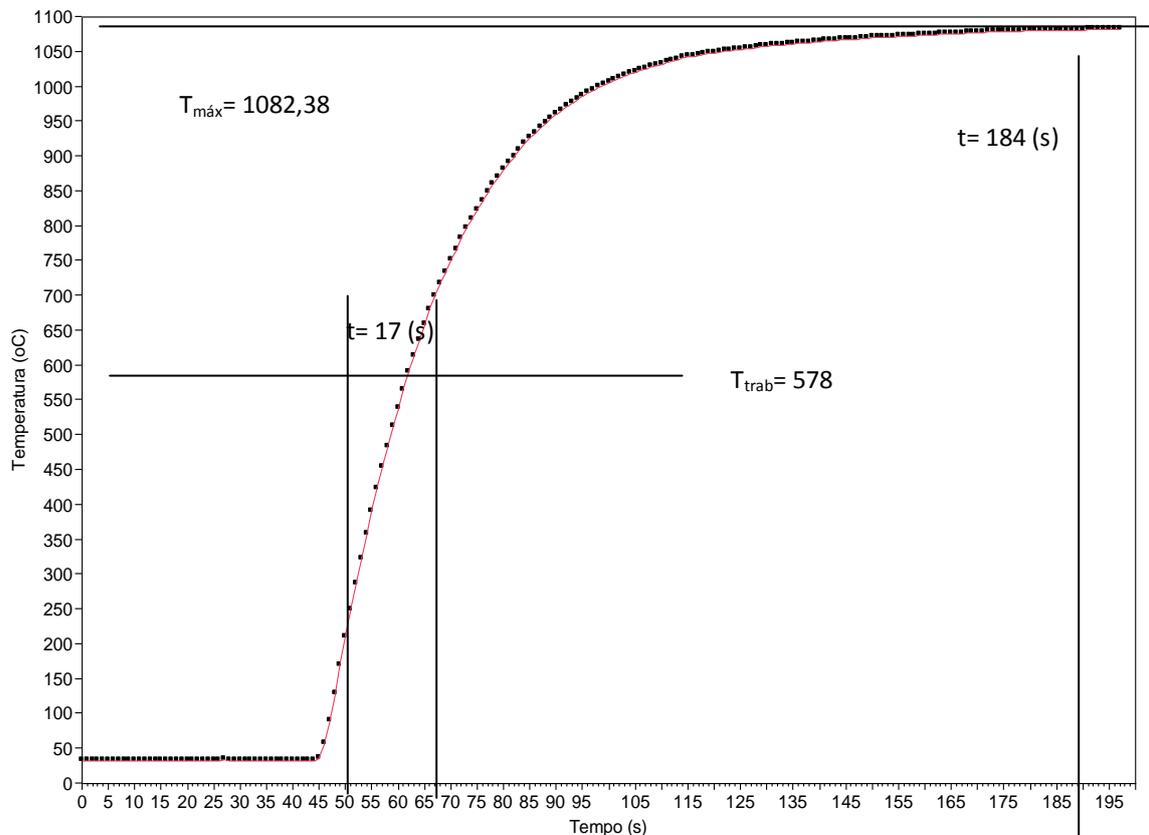


Figura 4.38 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U com 0,05 m<sup>3</sup>/h de GLP. Repetição de T1.

Em resumo a temperatura máxima obtida na repetição do teste 1 foi de 1082,38 graus Celsius com um tempo de 17 até a temperatura de trabalho e tempo máximo de 184 segundos.

### Temperatura média Teste 1 – 0,05 metros cúbico de GLP/h

A figura 4.39 apresenta a curva experimental da temperatura média do teste T1 para o ponto P1. De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1040,20 graus Celsius com um desvio padrão de 59,63 graus em t=184 segundos. E o tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 18 segundo, ou seja,

7 segundos menor que tempo estabelecido de 25 segundos. Isso reforça que essa região da chama na prática é boa para o trabalho de brasagem da liga de alumínio em estudo.

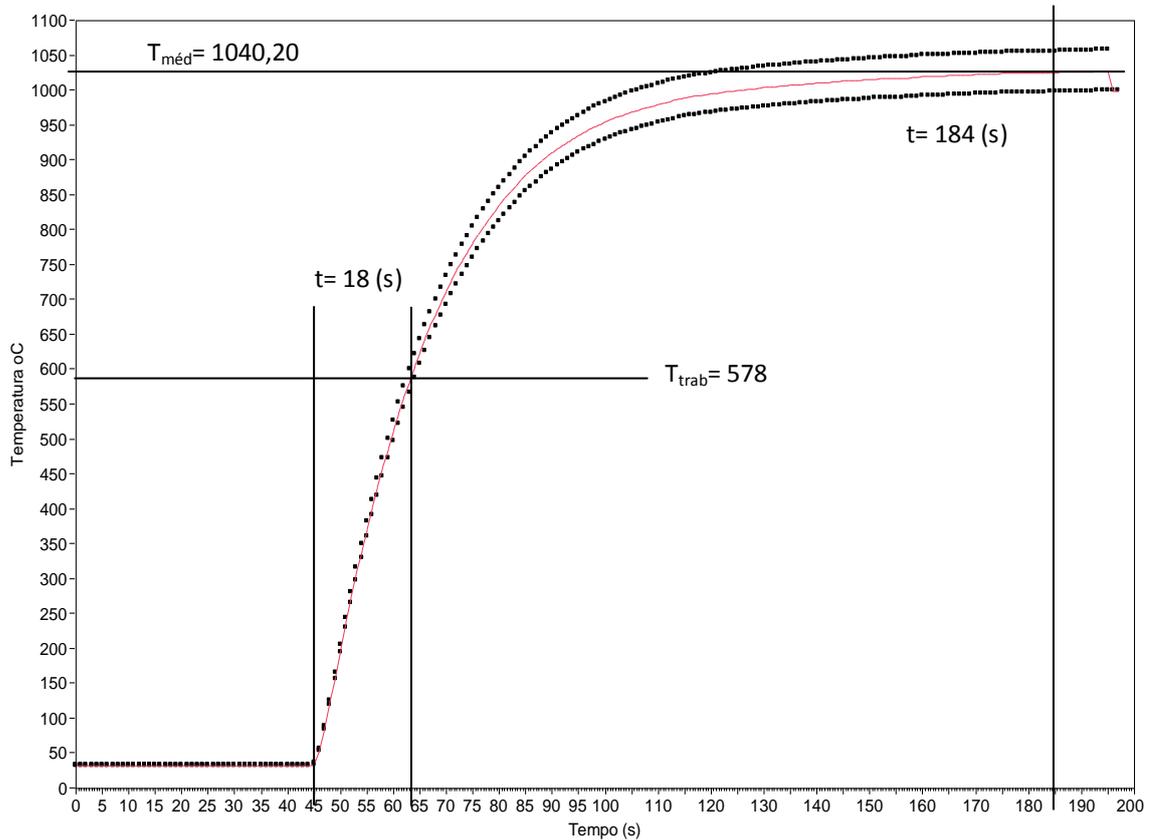


Figura 4.39 - Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U com  $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$  de GLP.

### Teste 1 – $0,05$ metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

Como na seção de testes para o queimador cilíndrico, o excesso de ar é definido como um percentual acima da quantidade estequiométrica de ar atmosférico e é quase sempre necessário para completar as reações do processo real de combustão. Logo a proporção de GLP foi mantida e foi feito um acréscimo na mistura de 15% de ar atmosférico acima do valor estequiométrico, conforme a

tabela 3.1. A Figura 4.40 mostra o comportamento obtido no ponto P1.

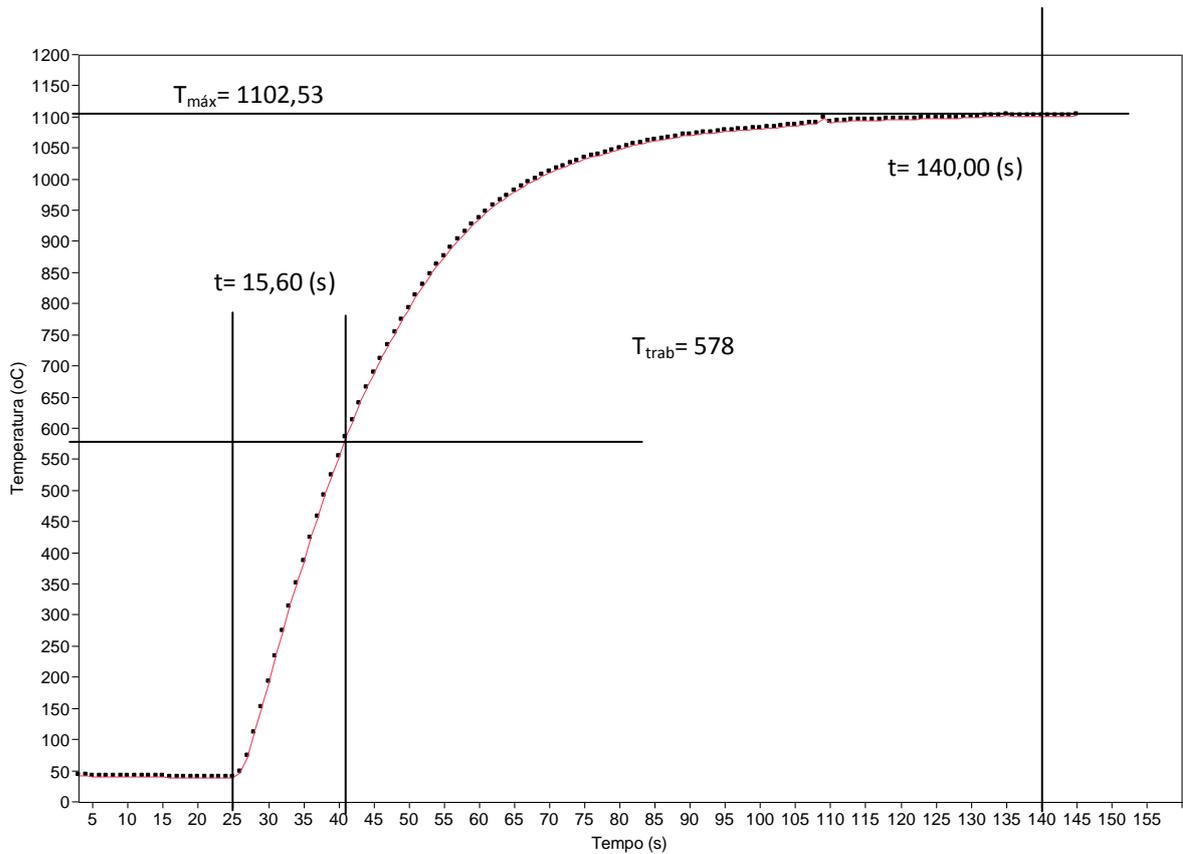


Figura 4.40: Curva experimental temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U teste T1 com excesso de ar atmosférico.

O efeito dos 15 % de ar atmosférico foi significativo na temperatura da chama no ponto P1 em comparação com a mistura estequiométrica. A diferença é de 104,23 graus, o que corresponde a 18% da temperatura de trabalho. Analisando o tempo, o resultado foi bastante positivo, pois a taxa de aquecimento melhorou em 2,4 segundo se comparado com o resultado da figura 4.39. A região da chama no ponto P1 atingiu a temperatura máxima de 1102,53 graus em 140 segundos. A temperatura máxima atingida com 0,05 metros cúbicos de GLP/h e 15% de ar atm acima do estequiométrico é muito boa, porém o diferencial é o tempo para atingimento da temperatura de trabalho que fica em 2,4 segundos melhor que o resultado da figura 4.39.

## Repetição do Teste 1 – 0,05 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

O comportamento da temperatura e o tempo mostrado na figura 4.41 na repetição do teste T1 com 15 % ar atm em excesso é muito semelhante ao encontrado na figura 4.40. A curva de repetição demonstrando que o queimador mantém uma boa estabilidade da chama com uma variação de 4% na temperatura.

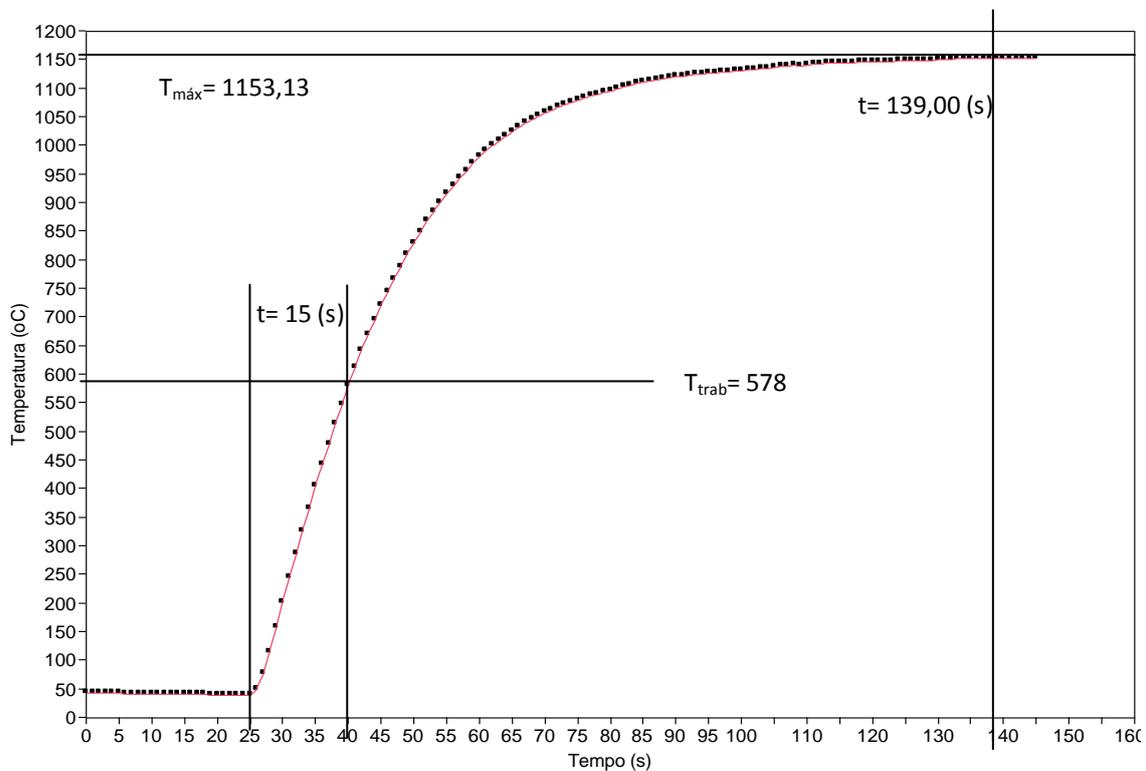


Figura 4.41 - Curva experimental da temperatura de chama versus tempo do queimador tipo U para repetição de T1 com excesso de ar atmosférico.

A diferença de temperatura é de 50,61 °C do ponto de vista da repetição 0,4 segundos mais rápido o que não é significativo.

## Temperatura média do Teste 1 – 0,05 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

A figura 4.42 apresenta a curva experimental da temperatura média a partir dos dados do testes T1 para o ponto P1 com 15% de ar atm acima do valor estequiométrico.

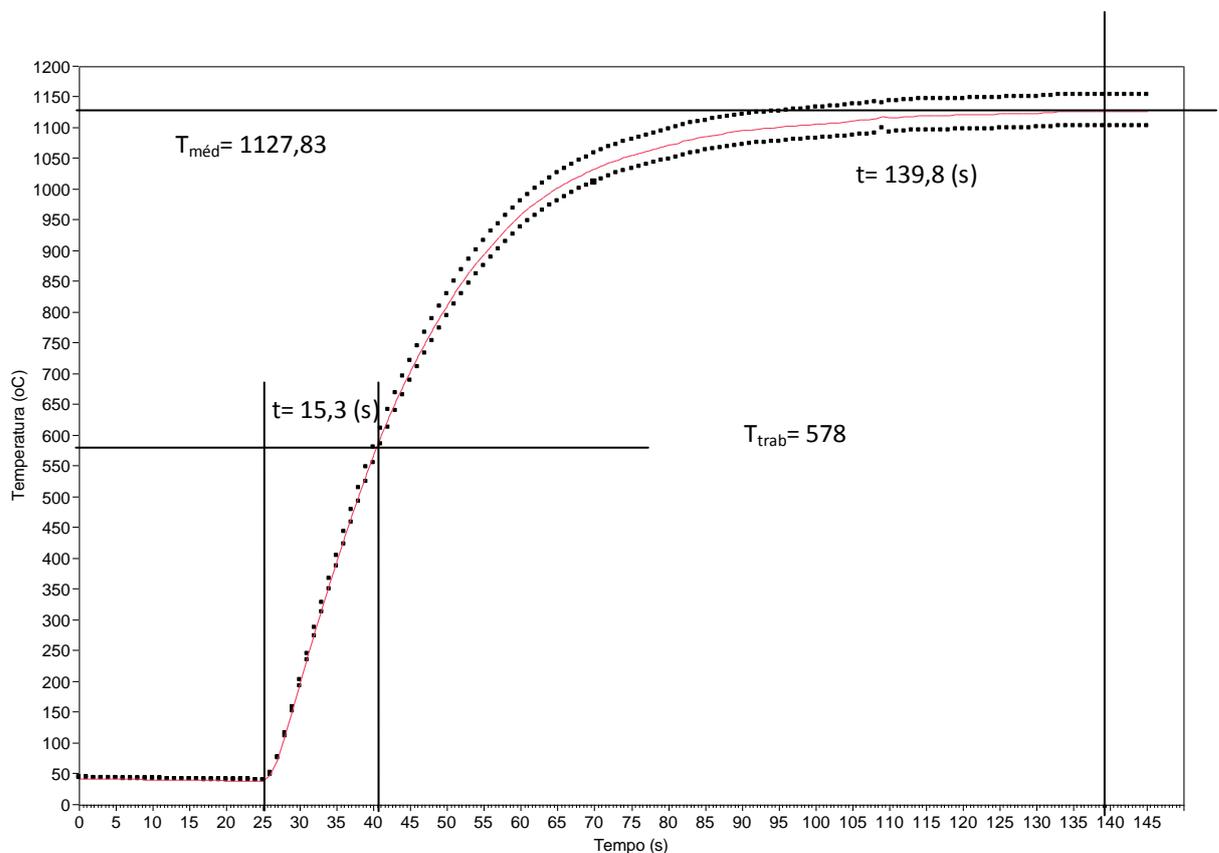


Figura 4.42 – Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U com excesso de ar atmosférico do T1.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1127,83 graus Celsius com um desvio padrão de 35,78 graus em  $t=139,8$  segundos. O tempo para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 15,30 segundos, ou seja, 9,7 segundos menor que o tempo estabelecido de 25 segundos. É importante ressaltar que foi atingida a temperatura de trabalho com um tempo muito satisfatório usando

apenas  $\frac{1}{4}$  do consumo usual de GLP.

### Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h

Os resultados obtidos no teste 1 com a vazão de  $0,05 \text{ m}^3$  de GLP/h, mostraram um bom desempenho do queimador no ponto P1. Agora no teste 2, visa-se avaliar o desempenho do queimador para o dobro da vazão de GLP do teste 1, sempre em busca de um tempo de resposta menor para se atingir a temperatura de trabalho do material de adição de  $578^\circ\text{C}$ . A Figura 4.43 mostra o comportamento obtido no ponto P1 mantendo o mesmo esquema da figura 3.13 usada no Teste 1.

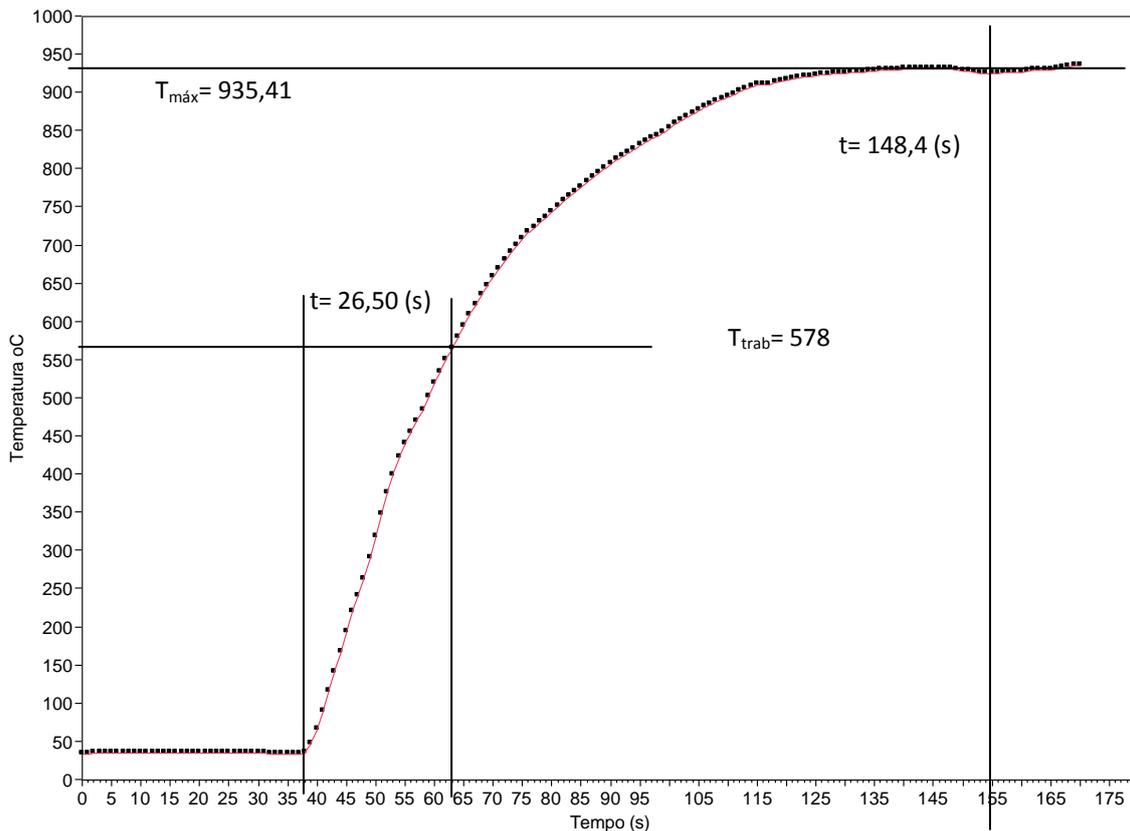


Figura 4.43 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U para o T2.

A curva experimental da figura 4.43 apresenta um comportamento esperado para chama com ar/combustível como a do teste 1. Para a composição

do teste 2 esperava-se um aumento significativo da temperatura para o ponto P1, mas não é o que mostra a curva. A temperatura máxima para atingimento da temperatura de trabalho do material de adição, é praticamente a mesma encontrada no teste 1, porém o tempo é muito superior ao do T1 e fica acima de 25 segundos. Esse fenômeno pode estar sendo causado por problemas na mistura do GLP com o ar atmosférico, causando queima incompleta do combustível e assim redução na temperatura e baixa eficiência na queima. Para o dobro da vazão esperava-se uma temperatura mais elevada com um tempo menor.

### Repetição do Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h

A figura 4.44 apresenta a curva experimental da repetição do teste 2 para o ponto P1.

O objetivo de realizar a repetição do teste é avaliar a consistência do resultado do experimento com o que foi feito na sessão T2, ou seja, ver se os fenômenos encontrados se repetem.

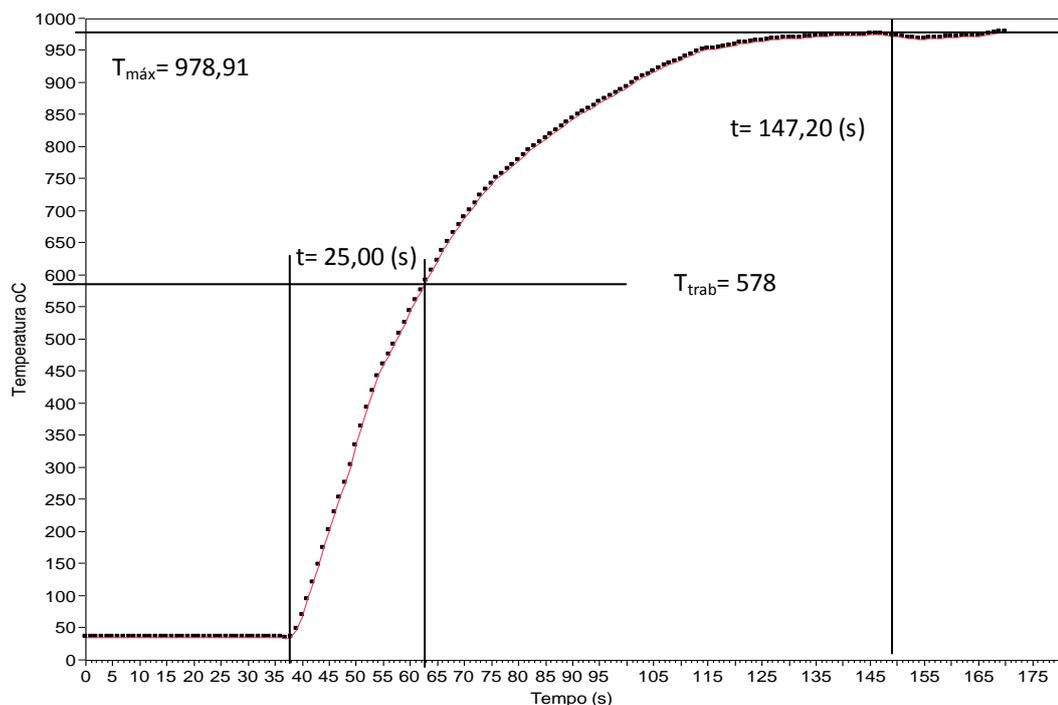


Figura 4.44 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T2.

A análise da curva experimental que a consistência do resultado se mantém, ou seja, o queimador apresenta baixo rendimento.

O tempo atingiu os 25 segundos e a temperatura subiu um pouco não passando dos 4% em relação ao teste anterior. O resultado não é positivo do ponto de vista do consumo de GLP, pois está sendo usado o dobro da vazão para se obter quase o mesmo resultado do teste T1.

### Temperatura média Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h

A figura 4.44 apresenta a curva experimental da temperatura do teste T2 para o ponto P1.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 957,16 graus com um desvio padrão de 30,76 graus em  $t=147,9$  segundos. E o tempo médio para atingimento da temperatura de trabalho ficou em  $t=25,75$  segundos, ou seja, maior que o tempo estabelecido de 25 segundos. Isso reforça que o queimador está com o rendimento baixo.

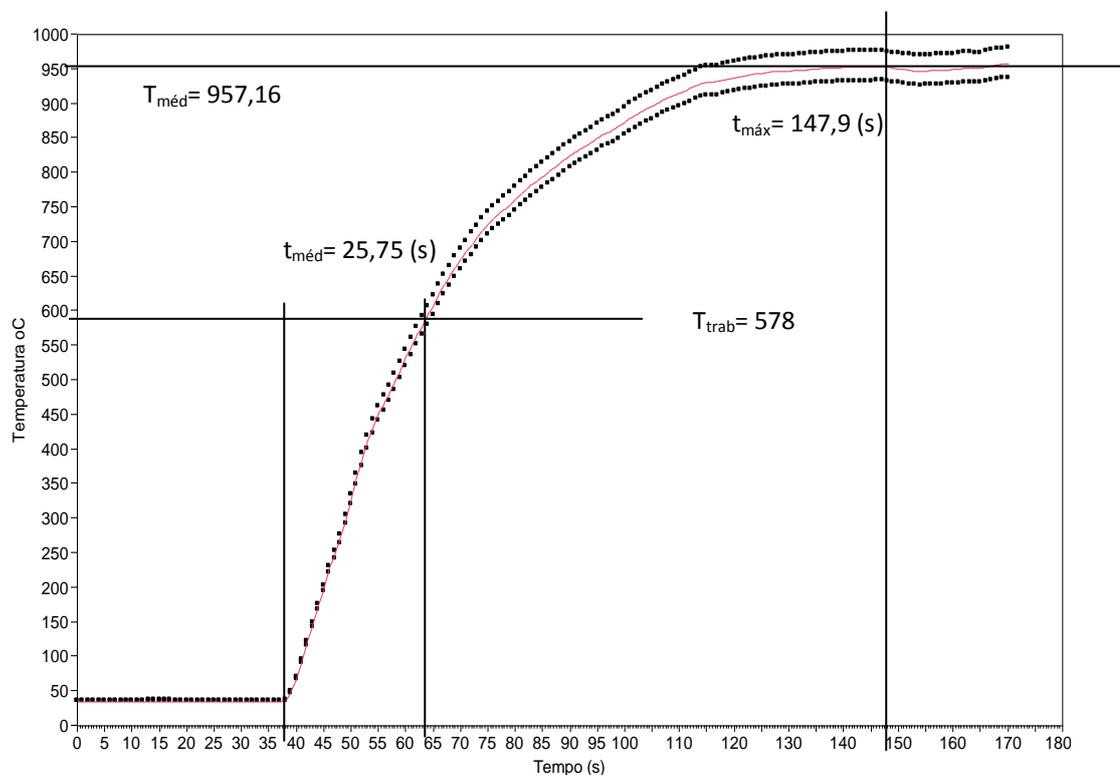


Figura 4.45 – Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U T2.

## Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

A curva da figura 4.46 apresenta o resultado do teste T2 com 15% de excesso de ar atmosférico acima do valor estequiométrico. Fazendo um comparativo com o teste anterior com valores estequiométricos, esperava-se um resultado melhor em relação à temperatura máxima.

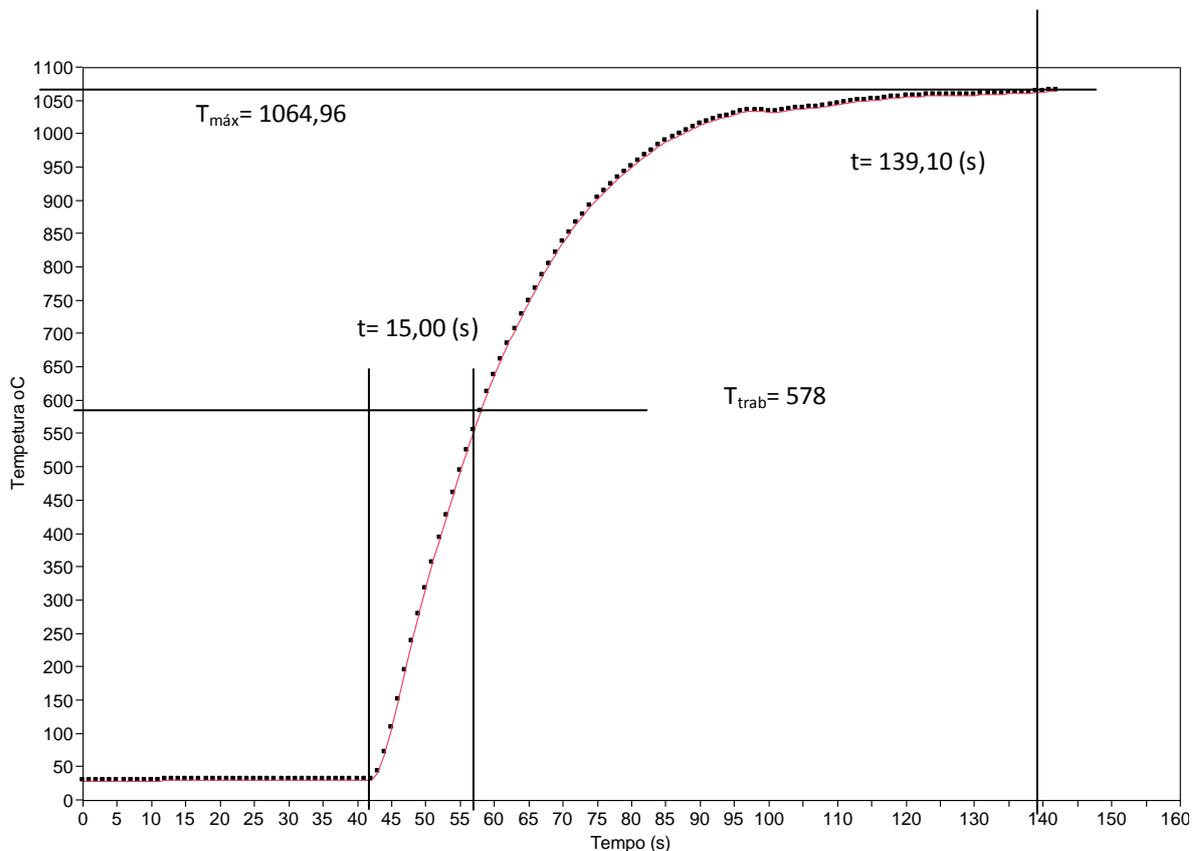


Figura 4.46 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U T2 com excesso de ar atmosférico.

Segundo a curva da figura 4.46, temos uma temperatura máxima de 1064,96 graus que representa uma diferença de 63,96 graus em relação à figura 4.44. Analisando o tempo para atingimento da temperatura de trabalho do material de adição, houve uma redução de 10,65 segundos em comparação com o mesmo ponto P1 da figura 4.43, ou seja, obteve-se um tempo de 10,65 segundos. Isso

representa um resultado muito bom para o processo de manufatura. Porém a desempenho ainda estará baixa.

### Repetição do Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

O comportamento da temperatura e do tempo mostrado na figura 4.47 na repetição do teste T2 com 15 % de excesso de ar atmosférico é muito semelhante ao encontrado na figura 4.44 e 4.45. A diferença de temperatura é muito pequena em torno de 66,60 °C e o tempo para atingimento da temperatura de trabalho se manteve em 14,2 segundos, quase igual ao tempo anterior. A curva de repetição do teste com excesso de ar é estável e com inclinação menor, demonstrando que o queimador mantém uma boa estabilidade da chama. O que o mostra que para o queimador tipo U precisa melhorar a eficiência de queima.

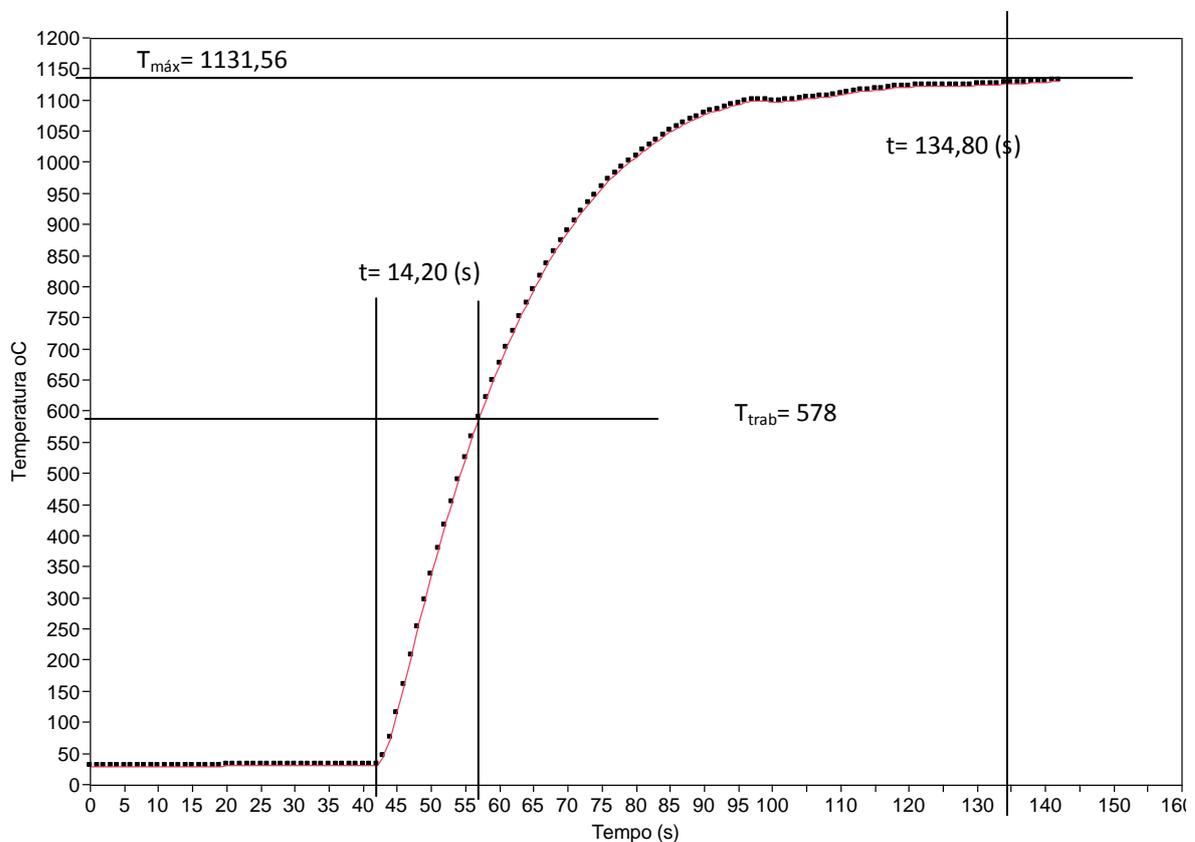


Figura 4.47 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T2 com excesso de ar atmosférico.

## Temperatura média Teste 2 – 0,10 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

A figura 4.48 apresenta a curva experimental da temperatura média do T2 e com sua repetição para o ponto P1 com 15% de ar atm acima do valor estequiométrico.

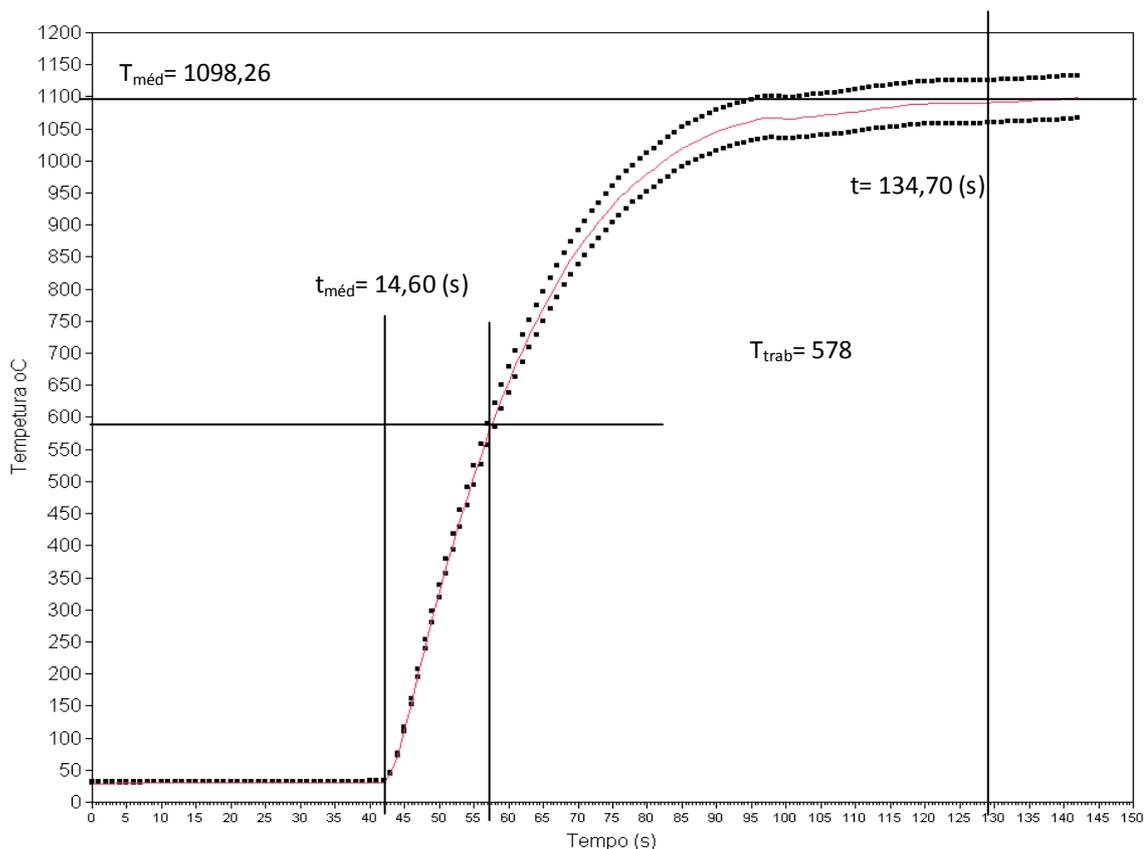


Figura 4.48 – Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U T2 com excesso de ar atmosférico.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média de 1098,26 graus com um desvio padrão de 47,10 graus em  $t_{\text{máx}}=193$  segundos. O tempo médio para atingimento da temperatura de trabalho ficou em 14,6 segundos, ou seja, 10,7 segundos menor que o tempo médio do teste 2 estequiométrico e menor que tempo padrão de 25 segundos. O desvio padrão é de 66,60 °C que representa uma variação aceitável para o processo de brasagem.

### Teste 3 – 0,15 metros cúbico de GLP/h

A curva da figura 4.49 apresenta o resultado do teste T3 com valor estequiométrico para os elementos de mistura. Fazendo um comparativo com o teste anterior com valores estequiométricos, o resultado não é satisfatório em relação às temperaturas máximas, o consumo de combustível é sempre maior e o rendimento da queima do GLP tem baixa eficiência. A temperatura máxima é 805,16 °C, sendo inferior ao T2. Esse efeito pode está sendo causado por problemas no processo de mistura do combustível com o oxidante. Isso indica que o desenho do queimador tem que ser melhorado para aumentar a eficiência de queima.

O resultado do tempo está bem menor em relação T1 e T2, ou seja, temos um aumento considerável do tempo de  $T_{trab}$  o que excede o padrão de 25 segundos 9 segundos

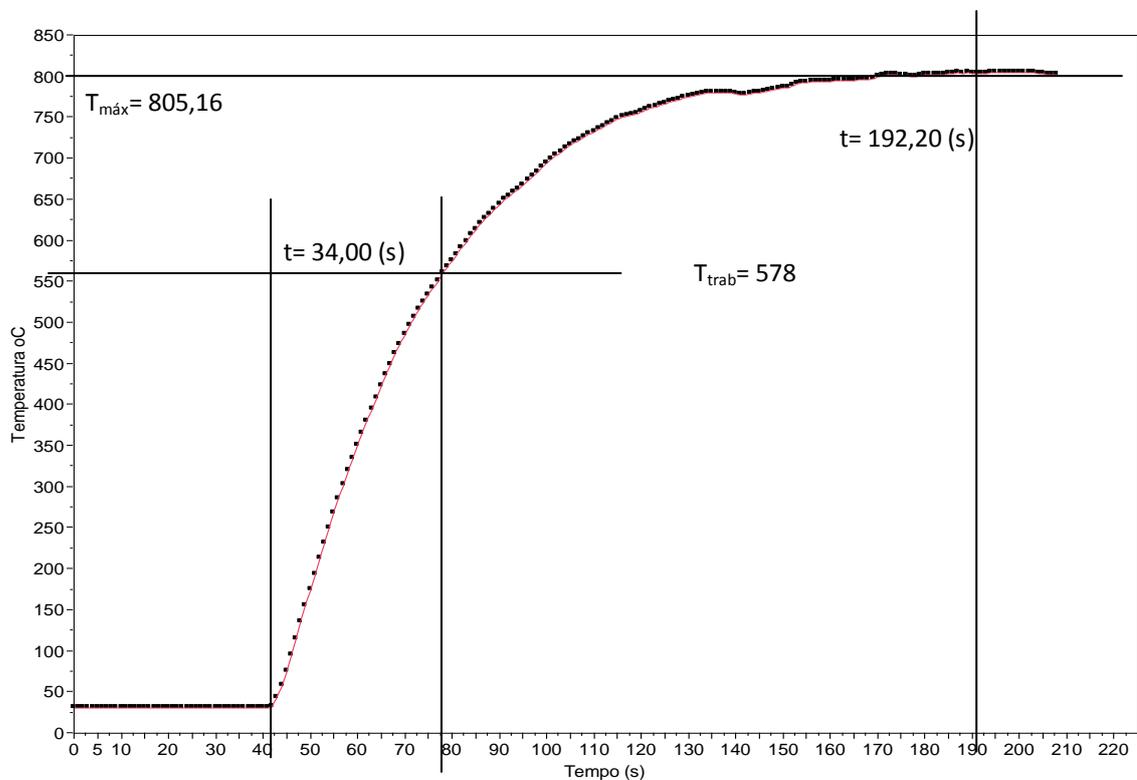


Figura 4.49 – Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U T3.

### Repetição do Teste 3 – 0,15 metros cúbico de GLP/h

O comportamento da temperatura e do tempo mostrado na figura 4.50 na repetição do teste T3 com ar atmosférico foi previsível com uma variação estimada na sessão anterior. A diferença de temperatura é muito pequena 28,74 °C e o tempo para atingimento da temperatura de trabalho se manteve de 35 segundos, o que representa um bom resultado em termos de estabilidade, mas insatisfatório do ponto de vista da temperatura da chama no ponto P1 e do tempo.

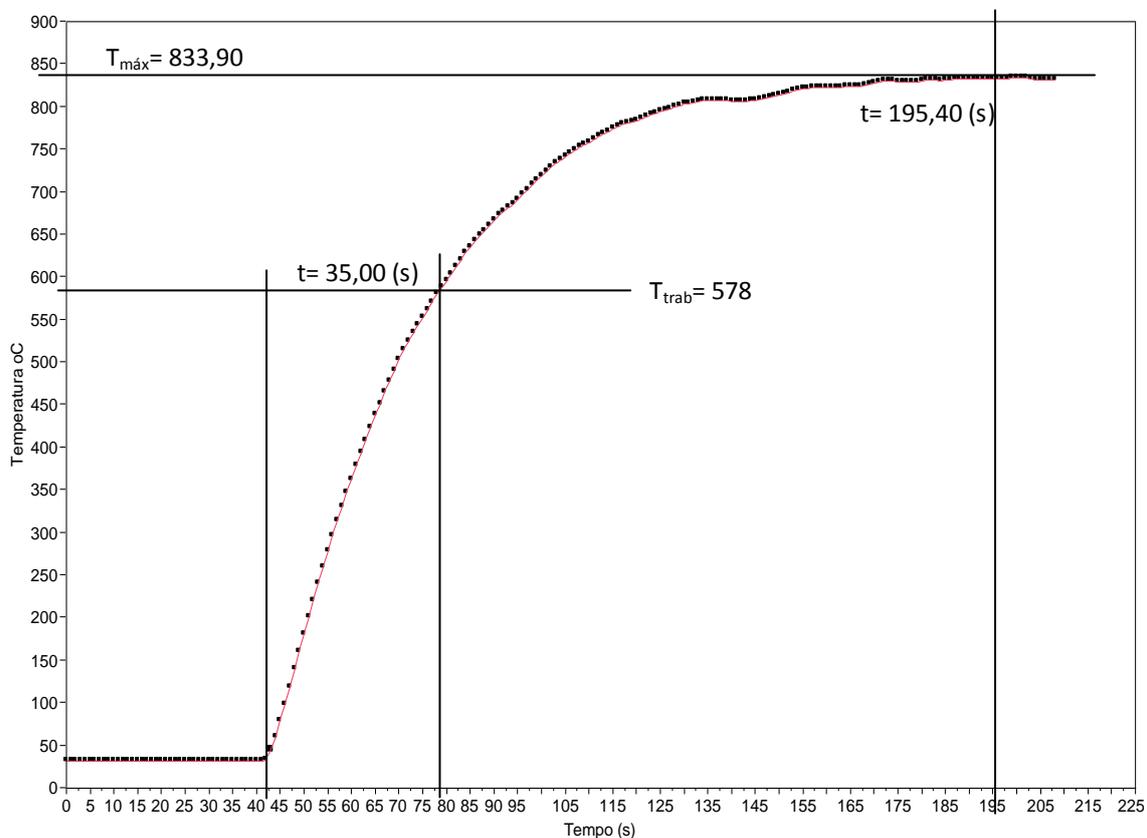


Figura 4.50 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T3.

Um aspecto importante é que sempre as curvas de repetição são encontradas pequenas variações de temperatura, isso é um comportamento muito bom, para essa a varia é em torno de 3% e mostra que o processo de combustão

se mantém estável, porém o queimador é ineficiente sobre o aspecto da queima para essa vazão.

### Temperatura média do Teste 3 – 0,15 metros cúbico de GLP/h

A figura 4.51 apresenta a curva experimental do tempo médio da repetição de T3 para o ponto P1 para composição com excesso de ar atm. É visível que a diferença na temperatura neste teste foi a menor em comparação com T1 e T2. Em termos de temperatura média, foi atingido o valor de 819,53 °C com um desvio padrão de 20,32 graus Celsius, que para processo de brasagem a base de chama é uma variação extremamente boa. O tempo médio para atingimento da temperatura de trabalho no ponto P1 ficou em torno de 34,5 segundos e o tempo máximo para temperatura média em torno de 177,80 segundos.

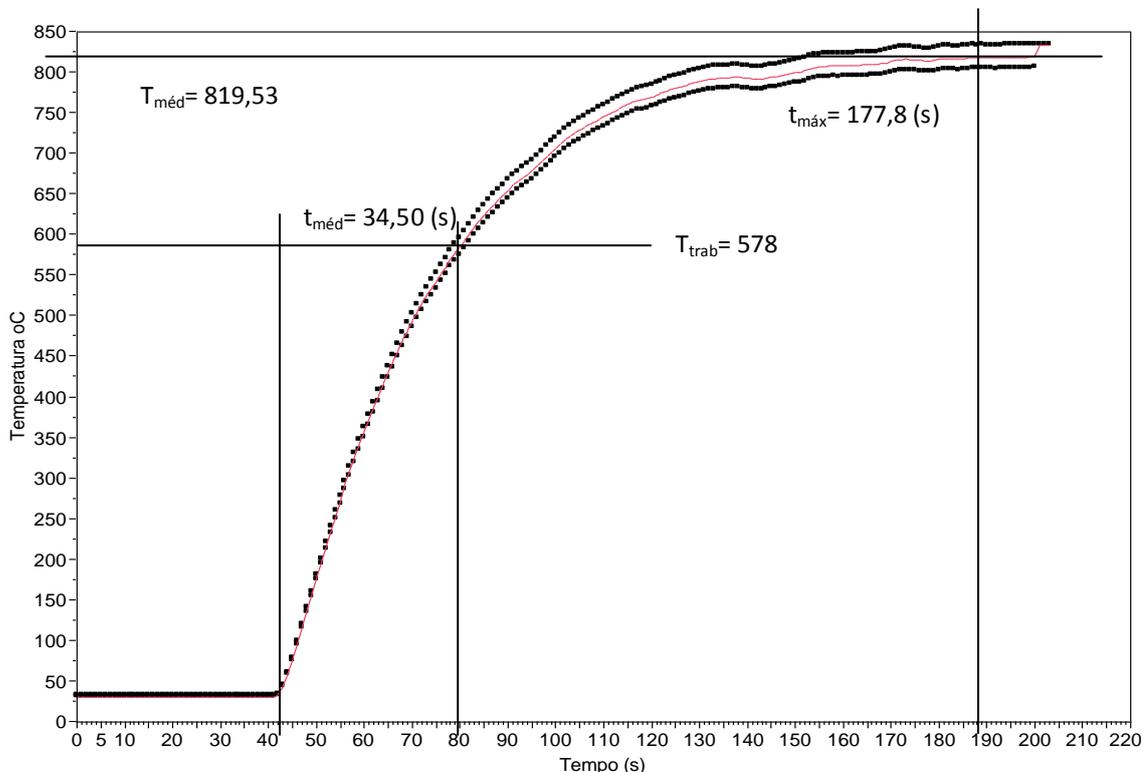


Figura 4.51 – Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U P1 T3.

De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média para o ponto P1 no teste T3 insatisfatório em termos de temperatura de trabalho e tempo, como também no consumo de GLP, pois esse teste tem a maior vazão de GLP com a menor eficiência de queima em relação a T1 e T2.

### Teste 3 – 0,15 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

A curva da figura 4.52 apresenta o resultado do teste T3 com 15% de excesso de ar atmosférico acima do valor estequiométrico. Fazendo um comparativo com os testes anteriores com valores estequiométricos e os mesmos testes com excesso de ar atm este foi à melhor desempenho do queimado em termos de temperatura de trabalho e tempo de temperatura máxima. O excesso de ar atm no escoamento além do adicional de oxigênio, também melhorou a mistura dos gases através do aumento da turbulência.

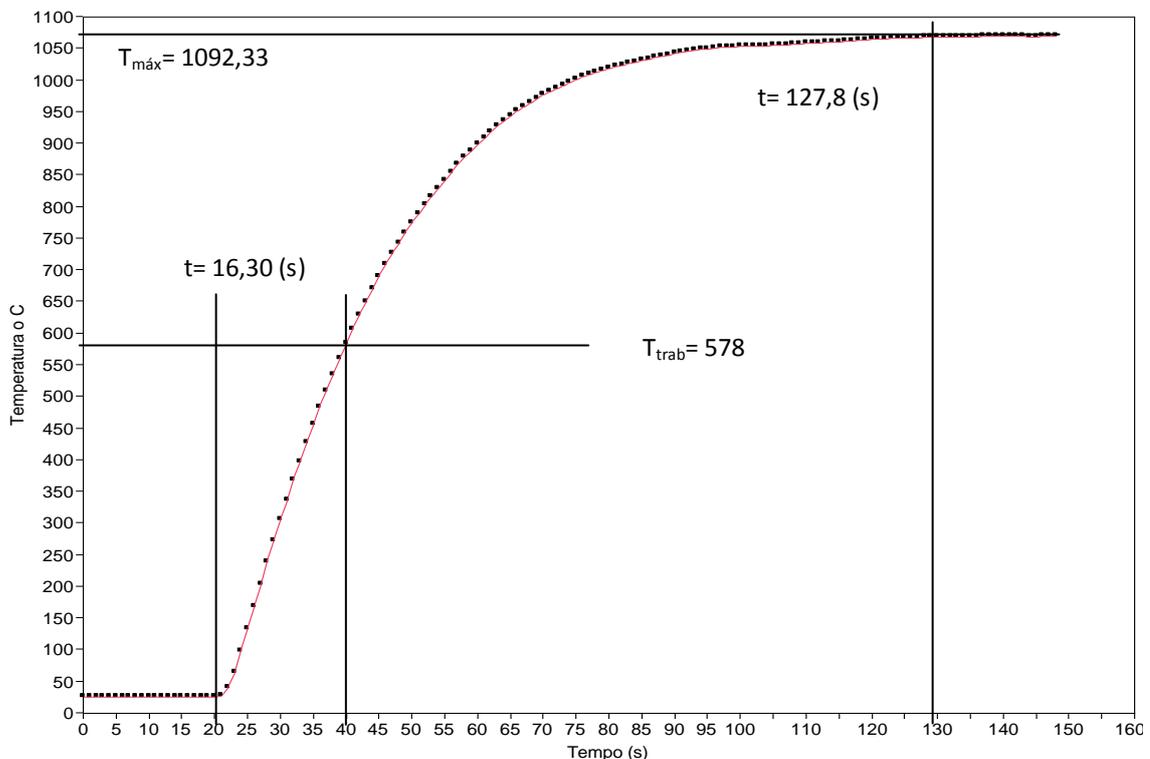


Figura 4.52 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U T3 com excesso de ar atmosférico.

O tempo para atingimento da temperatura de trabalho foi de 16,30, ou seja, 18,20 segundos melhor que o teste com valor estequiométrico atingindo  $T_{\max}$  de 1092,33 °C.

### Repetição do Teste 3 – 0,15 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

Segundo a curva da figura 4.53, temos uma temperatura máxima de 1115,09 graus que representa uma diferença de 45,52 graus em relação à figura 4.52. Essa diferença na temperatura para os testes de repetição de uma forma geral para todos os testes tem variado entre 3 a 4,5 %. Isso representa um resultado muito positivo, pois, mostra que a influência do excesso de ar no escoamento contribuiu positivamente para o atingimento da temperatura de trabalho num tempo abaixo dos 25 segundos.

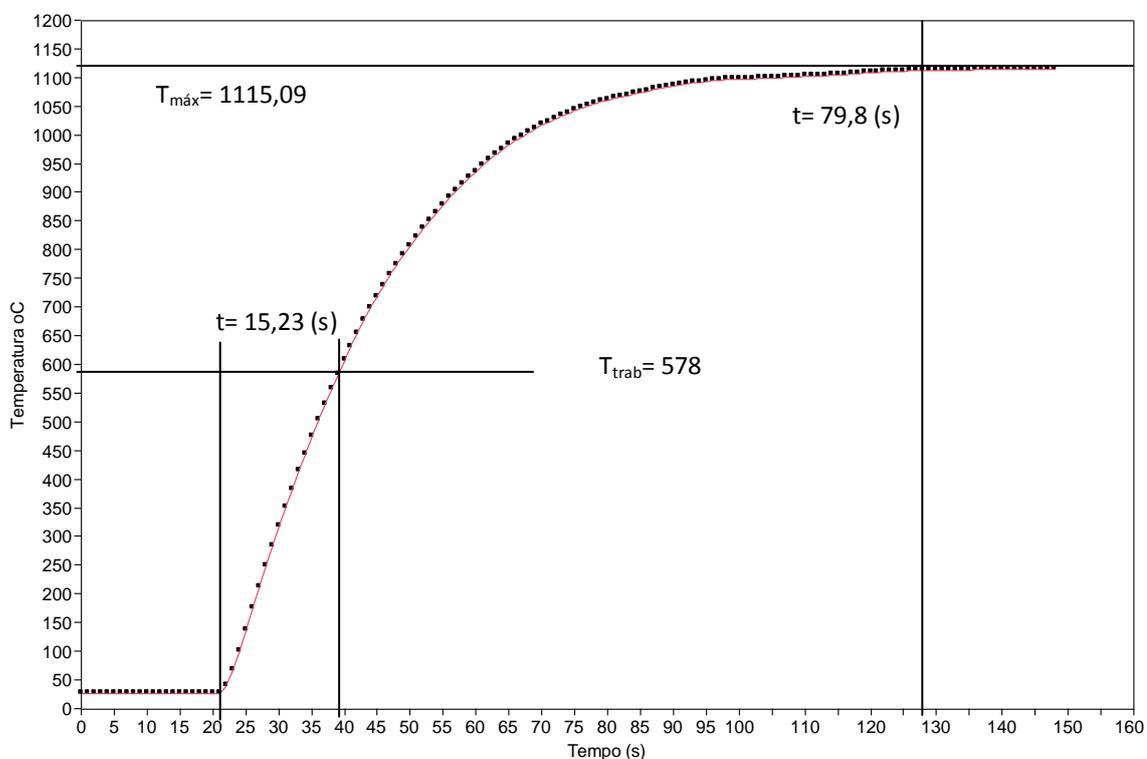


Figura 4.53 – Curva experimental da temperatura de chama versus tempo para queimador tipo U. Repetição do T3 com excesso de ar atmosférico.

De uma forma geral, o queimador mostra uma estabilidade satisfatória para brasagem manual com um tempo 40% menor que os 25 estabelecido como meta.

### Temperatura média do Teste 3 – 0,15 metros cúbico de GLP/h com excesso de ar atmosférico

A figura 4.54 apresenta a curva experimental do tempo médio para o teste T3 com repetição no ponto P1 com excesso ar atm. É visível que a variação neste teste foi pequena com desvio padrão de 45,52 °C. Em termos de temperatura média, foi atingido o valor de 1092,33 °C e o tempo médio para atingimento da temperatura de trabalho no ponto P1 ficou em torno de 15,76 segundos e o tempo máximo para temperatura média em torno de 135,40 segundos.

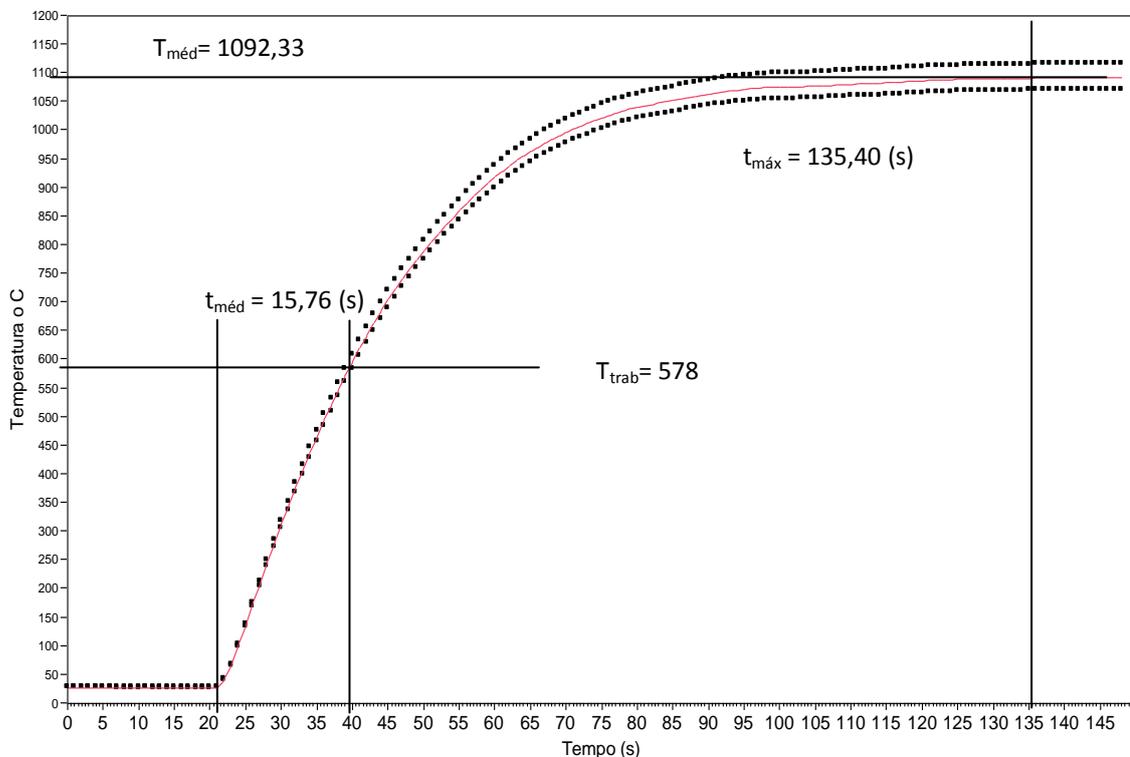


Figura 4.54 – Curva experimental da temperatura média de chama versus tempo para queimador tipo U P1 T3 com excesso de ar atmosférico.

É importante destacar que para essa faixa de temperatura material de confecção tem que resistir a temperaturas elevadas, para não sofrer desgaste acelerado com o tempo. De uma forma geral o resultado foi uma temperatura média é satisfatória com um tempo médio 9,25 segundos menor em relação a meta de 25 segundos colocada pela Whirpool.

### Tabela resumo de teste – Queimador tipo U

A tabela 4.3 apresenta o resumo dos resultados de todos os testes realizados no queimador tipo U para as diversas composições de misturas ar atmosférico/GLP.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados dos testes experimentais do queimador tipo U.

Testes	Temperatura VE sem excesso de ar atm (°C)	Temperatura Repetição VE sem 15% de excesso de ar atm (°C)	Temperatura VE com 15% de excesso de ar atm (°C)	Temperatura Repetição VE com 15% de excesso de ar atm (°C)
	P1		P1	
T1	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	1040,20	18	1127,83	15,30
T2	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	957,16	25,75	1098,26	14,60
T3	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)	$T_{méd}$	$t_{méd}$ (s)
	819,53	34,50	1092,33	15,76

## 4.2. APLICAÇÃO DOS QUEIMADORES NO PROCESSO DE BRASAGEM MANUAL DO ALUMÍNIO

O teste de aplicação para os queimadores foram realizados com base nos resultados dos testes experimentais. A Figura 4.55 mostra o material utilizado no teste de aplicação de brasagem de alumínio com a liga Al-Mn como metal base e Al-Si como metal de adição

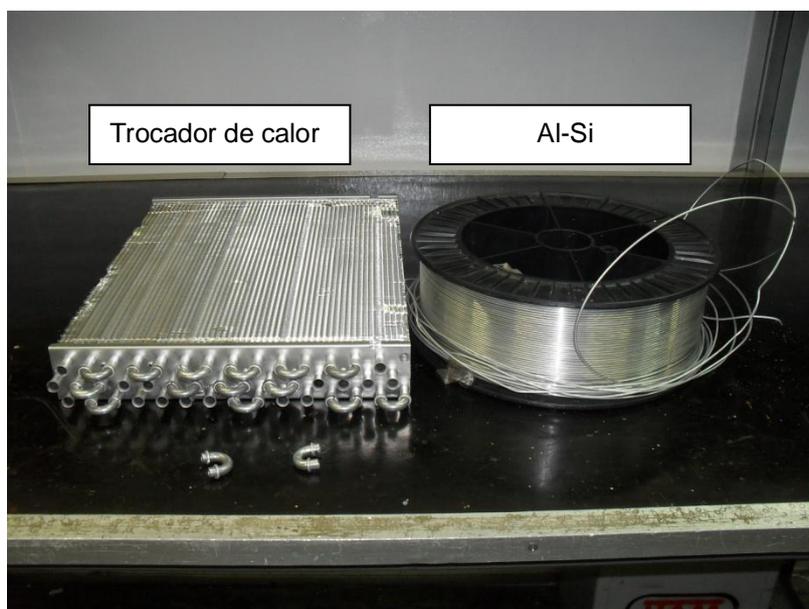


Figura 4.55 - Material utilizado no teste de aplicação dos queimadores na brasagem manual do alumínio. Trocador de calor em Al-Mn e Al-Si como metal de adição.

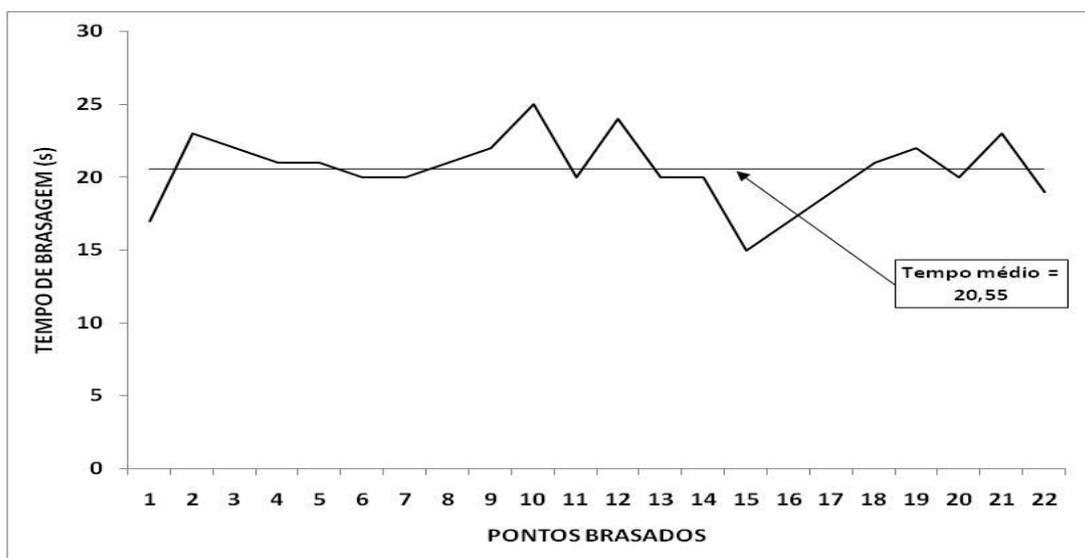
### 4.2.1 Teste de aplicação do queimador tipo U na brasagem num trocador de calor

A Figura 4.56 mostra o teste de aplicação do queimador tipo U na brasagem de curvas de Al-Mn com anel de Al-Si. Durante o teste foram brasadas 22 curvas de ligação em um trocador de calor para avaliação do tempo de brasagem que não deve ultrapassar 25 segundos. Para esse teste de aplicação foi

utilizado às condições de teste da curva experimental da Figura 4.11. A Figura 4.57 mostra o resultado da perspectiva de tempo de brasagem versus quantidades de pontos.



Figura 4.56 - Teste experimental da plataforma experimental na brasagem do trocador de calor



4.57 - Curva tempo de brasagem versus ponto do trocador de calor para mistura com composição da curva experimental T3.

#### 4.2.2 Teste de aplicação do queimador tipo Cilíndrico na brasagem num trocador de calor

A Figura 4.58 mostra o teste de aplicação do queimador tipo cilíndrico na brasagem de curvas de Al-Mn com anel de Al-Si. Durante o teste foram brasadas 22 curvas de ligação em um trocador de calor para avaliação do tempo de brasagem que não deve ultrapassar 25 segundos. Para esse teste de aplicação foi utilizado às condições de teste da curva experimental da Figura 4.5. A Figura 4.59 mostra o resultado da perspectiva de tempo de brasagem versus quantidades de pontos.

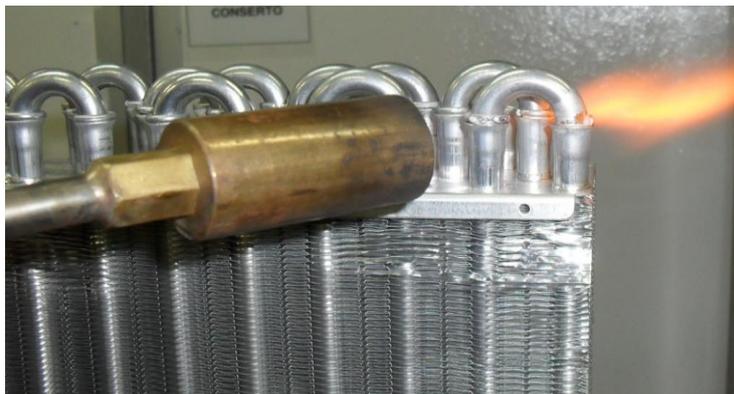
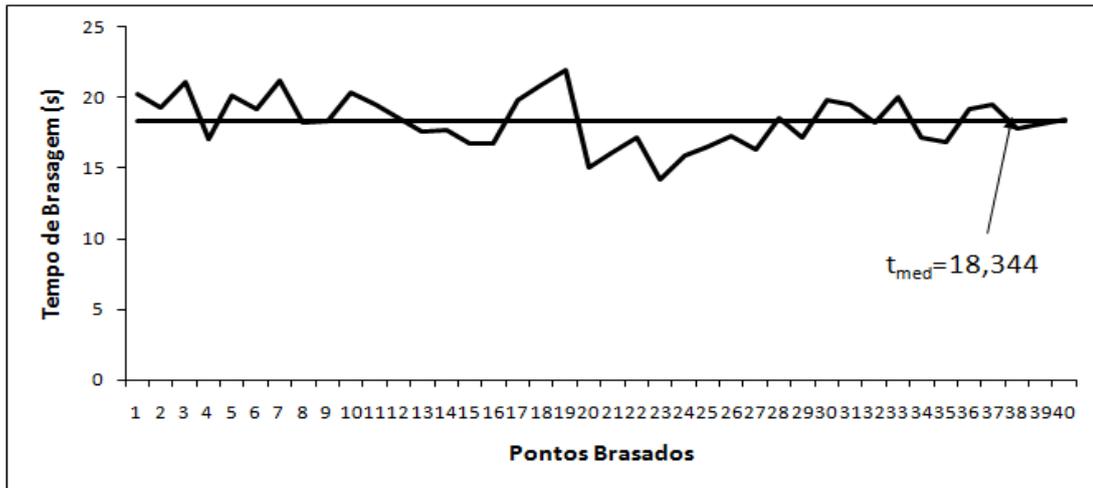


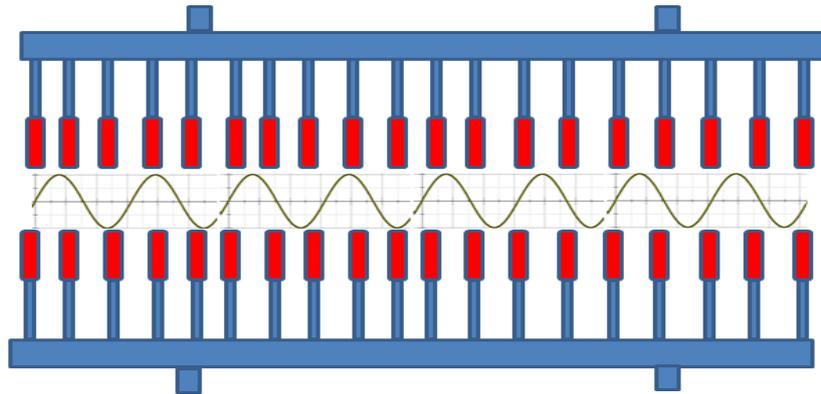
Figura 4.58 - Teste experimental da plataforma experimental na brasagem do trocador de calor



4.59 - Curva tempo de brasagem versus ponto do trocador de calor para mistura com composição da curva experimental T3.

### 4.3. OUTROS TESTES DE APLICAÇÃO

Foi estendido o teste de aplicação do queimador tipo cilíndrico para brasagem de trocadores de calor em um forno de brasagem automático. A Figura 4.60 mostra o esquema para a construção do queimador industrial do forno com base no modelo de queimador cilíndrico. A Figura 4.61 (a), (b) e (c) mostram o teste de aplicação do protótipo de queimador do forno. A Figura 4.61 (d) mostra o queimador já instalado no forno automático de brasagem de trocadores de calor para condicionadores de tipo janela da whirlpool.



4.60 - Esquema do projeto do novo queimador industrial para o forno de brasagem automática da Whirlpool com o queimador tipo cilíndrico.

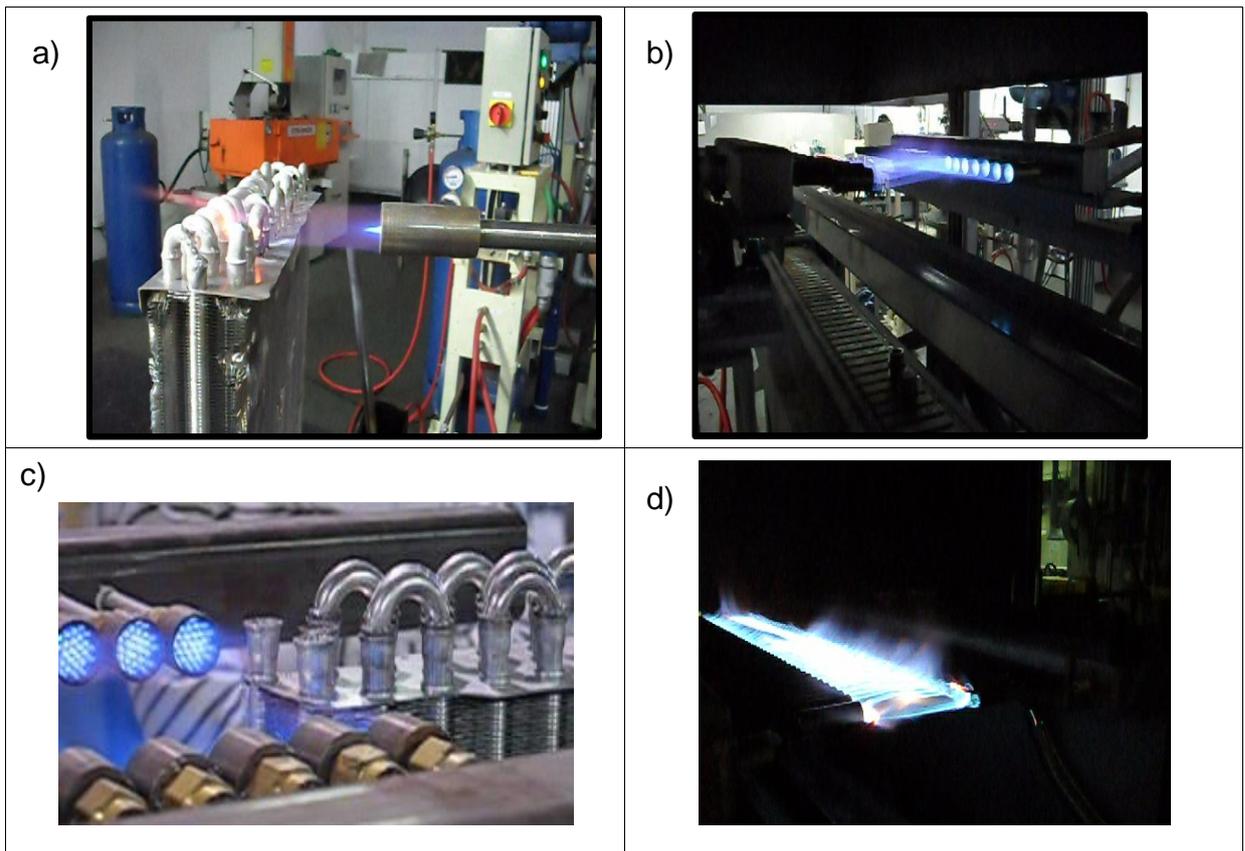


Figura 4.61 - Teste de aplicação do protótipo de queimador para o forno industrial automático de brasagem (a), (b),(c) e (d) mostra o queimador já instalado no forno automático de brasagem de trocadores de calor para condicionadores de tipo janela da Whirlpool.

#### 4.4. RESULTADOS FINACEIROS DO PROJETO

Além do objetivo geral do trabalho um segundo de maneira intrínseca era desenvolver um sistema que tivesse um custo acessível e que permitisse caracterização da temperatura no tempo com uma boa faixa de temperatura de trabalho menor que 25 segundos. A tabela 4.4 mostra o custo de todos os equipamentos que compõem o sistema de medição desenvolvido. O projeto atualmente está implantado na Whirlpool no processo de brasagem manual do alumínio com rendimento econômico de R\$ 200.000,00 por ano. Esse resultado se dá através da economia da GLP e redução de refugo de peças por temperatura de chama inadequada.

Tabela 4.4 – Custo do sistema desenvolvido e retorno financeiro do projeto.

CUSTOS DO PROJETO DE PESQUISA	
Equipamentos	Custo R\$
Bancada experimental com queimadores	R\$ 24.000,00
Sistema de aquisição de dados	R\$ 6.500,00
Módulo de aquisição de dados	R\$ 2.500,00
Termopares tipo K	R\$ 1.300,00
Cabo USB/GPIB	R\$ 1.200,00
Materiais	R\$ 2.000,00
Total	R\$ 37.500,00
Resultado financeiro por ano	R\$ 200.000,00

## CAPÍTULO V

### 5.1 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Os resultados obtidos e mostrados neste trabalho permitem concluir que:

- O projeto, teste e montagem do sistema de medição da temperatura da chama em função do tempo para a plataforma experimental com as proporções de GLP estabelecidas na Tabela 3.1 foi um sucesso;
- O projeto, construção e teste dos queimadores com geometria cilíndrica e tipo U foi um sucesso. Ambos os queimadores apresentaram comportamentos similares com relação ao tempo para atingimento da temperatura de trabalho da liga Al-Si, destacando o do tipo cilíndrico com valores tempo menores;
- As proporções de mistura para teste da Tabela 3.1, apresentaram comportamento semelhante em termos de resultado no tempo de aquecimento. O que possibilita uma economia de GLP usando proporções menores de GLP na mistura com excesso de ar atmosférico;
- O teste experimental prático foi realizado com sucesso. O tempo para fusão da liga Al-Si para brasagem com a liga base Al-Mn teve um tempo médio de 18,344(s) e 20,55(s) para os queimadores cilíndrico e tipo U respectivamente. O tempo exigido pela Whirlpool é de 25 segundos;

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar variação de chama como o enriquecimento da mistura com oxigênio puro para aplicação em processos que exijam temperaturas mais elevadas.
- Desenvolver um modelo matemático para simulação numérica dos queimadores;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDEL-GAYED, R. G., BRADLEY, Derek. Criteria for turbulent propagation limit of premixed flames. *Combustion and Flame*, New York, v. 62, n.1, p. 61-68, out. 2005.
2. AGA Aktiebolag. AGA Gas Handbook. Kersti Ahlberg. Lidingö, Sweden. 1985. 582 p.
3. TURNS, S.R., An introduction to combustion Concepts and applications. Mc Graw Science, 2<sup>a</sup> ed. January, 2007.
4. BUCKMASTER, John David. Theory of Laminar Flames. Cambridge: Cambridge University, 1982. 262 p.
5. Baukal, C.E., Ed., The John Zink Combustion Handbook, CRC Press, Boca Raton, FL, 2001.
6. Brewster, B. S., Cannon, S. M., Farmer, J. R. and Meng, F., Modeling of Lean Premixed Combustion in Stationary Gas Turbines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 353-385 (1999).
7. Bessa, Mauro Sérgio do Carmo Marques Ribeiro. Metodologia para a Avaliação do Nível de Automação em Sistemas de Produção Enxuta, 2004. 179 pg.
8. CARVALHO, J. A.; LACAVALHA, P.T. Emissões em processos de combustão. São Paulo: Editora da UNESP, 2003.
9. FUDIHARA, T. J., Goldstein, L. and Mori, M., The Three-Dimensional Numerical Li, H. and Tomita, Y., Characteristics of Swirling Flow in a Circular Pipe, *Journal of Fluids Engineering*, 116(2), 370-373 (1994).
10. GLASSMAN, I. Combustion. San Diego, Califônia Academic Press, 1996.
11. HAIFENG W., Yiliang, C. , Fluid Dynamics Research Steady flamelet modelling of a turbulent non-premixed flame considering scalar dissipation rate fluctuations Volume 37, September 2005, Pages 133-153.
12. J.A.M. de Swart, G.R.A. Groot, J. A. van Oijen, J.H.M. ten Thijsse, L.P.H. de Goeij, *Combust. Flame* 145 (2006) pp 245–258.
13. JR. C. E. B. Industrial Burners handbook. Academic press, 2002.
14. JR, J.A. C., MCQUAY, M.Q. Princípios de Combustão aplicada. Editora da UFSC, Florianópolis, 2007.

15. JONES, H. R. N. The application of combustion principles to domestic gas burner desing. British Gas Teaching Fellow, University of Combridge, 2005.
16. JR, C. E. B. Air-Oxy/Fuel Burnes, CRC Press LLC, 2003.
17. KUO, Keneth Kuan-yun. Principles of Combustion. New York: John Wiley & Sons, 1986. 810 p.
18. KHATCHATOURIAN, O. Combustion de Querosen em Aire, en Condiciones de Estabilización Aerodinâmica de la Flama, Información Tecnológica, vol. 9, N°4, (1998), pp. 247-254.
19. MORGANS, A.S., STOW, S.R., Model-based control oscombustion instabilities, Combustion and Flame 150 (2007) 380 – 399.
20. MINISTRY of Power. The Efficient Use of Fuel. London. Her Majesty's Stationery Office. 2006. 888 p.
21. NORTH AMERICAN Mfg. Co. Combustion Handbook. Vol. 1. Third Edition. Cleveland. 1986. 332 p.
22. KUO, K. Principles combustion 2 ed. Wiley-Interscience January 2005)
23. ROBERT, P., Industrial Brazing Practice. Editora CRC Press. New York Washington, D.C., 2004.
24. Reed, R. J., North American Combustion Handbook, Third Edition, Volume II, 1997.
25. SCHWARTZ, M. Brazing for the engeneering tech nologust (Manufacturing Process and Materials 2008.
26. SEN - MME. Balanço Energético Nacional - Publicado em 2007, referente ao ano base de 2006.
27. WANG,J.F.,ZAHNG,H.,JARDSINSKI,J.,GORCZAKOWSKI, A., PORFILIPSKI, J., Laminar burning velocities and markstein lengths of premixed methane/Air flame near the lean flamambility limit in microgravity, Combustion and Flame 157 (2010) 667-675.
28. WARNATZ, J.; MASS, U.; DIBBLE, R.W., Combustion Physical and Chemical Fundamental modeling and simulation experiments, 4 ed. 378 pg. Springer 2007.
29. WARD, P.T.; DURAY, Rebecca. Manufacturing strategy in context: environment, strategy competitive and manufacturing strategy. Journal of 2008.