

## **Estudo da influência da taxa de injeção no processo de combustão**

**Luís Carlos Oliveira Pires**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia de Petróleos**

Orientadores

Prof. Dr. Osvald Vidal Trevisan

Prof. Dr. Maria João Correia Colunas Pereira

**Júri**

Presidente: Prof. Dr. Amílcar de Oliveira Soares

Orientador: Prof. Dr. Maria João Correia Colunas Pereira

Vogal: Prof. Dr. Francisco Manuel da Silva Lemos

**Julho de 2014**



## Agradecimentos

Ao professor Trevisan pela orientação, profissionalismo e oportunidade de pela durante a minha estadia no Brasil.

À Professora Maria João Pereira pela oportunidade e confiança de representar o Instituto Superior Técnico na UNICAMP, e pela esplendida supervisão do trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais e sobrinhos, pelo apoio e cuja presença se fez sentir diariamente, apesar da longa distância.

Um agradecimento especial à Diana e ao Wellington pelo apoio, ensinamentos e paciência infinitos, e que sem eles a realização deste trabalho não teria sido tão gratificante . E a todos os colegas e funcionários do DEP, obrigado pelo companheirismo durante a realização deste projeto.

À Teresa, Claudia, Joana, Ana e Hélder, e a todos os amigos de Portugal.



## Resumo

O processo de combustão in-situ consiste num conjunto de reações que ocorrem pela presença de oxigénio injetado no reservatório. A partir de uma determinada temperatura o oxigénio e o óleo reagem e ocorre um conjunto de reações químicas com a libertação de uma elevada quantidade de energia calorífica, designada por frente de combustão. O calor libertado promove a diminuição da viscosidade do óleo e, conseqüentemente, aumenta a sua mobilidade. Parte do calor promove reações químicas que convertem as frações mais pesadas do óleo em combustível, sendo que este permite a propagação da frente de combustão desde os poços injetores até aos poços produtores.

Com o intuito de compreender o processo de combustão e avaliar o comportamento da combustão do óleo para determinadas condições dentro de um reservatório foram realizados ensaios em tubo de combustão. A partir destes ensaios laboratoriais são determinados parâmetros como a estequiometria das reações, o requerimento de ar, o consumo de combustível, entre outros. No entanto, estes ensaios não fornecem informações sobre o modelo cinético que o descreve.

O estudo apresentado pretende avaliar a influência da variação da taxa de injeção no processo de combustão, assim como o efeito da transferência de calor da parede do tubo de combustão para o meio poroso. Para tal foram realizados quatro ensaios laboratoriais em tubo de combustão no Laboratório de Métodos Térmicos de Recuperação do Departamento de Engenharia de Petróleo da Unicamp, onde foram utilizadas diferentes taxas de injeção utilizando um óleo pesado de um campo brasileiro (15 °API). A análise dos resultados obtidos foi baseada nos parâmetros da combustão, nas velocidades das frentes de combustão e de condensação e no crescimento do patamar de vapor. Foi observado que pelo o aumento da taxa de injeção a velocidade da frente de combustão também aumenta e que há uma produção antecipada dos fluidos. Por outro lado observou-se que o aumento da taxa de injeção o patamar de vapor apresenta um menor comprimento e uma menor taxa de crescimento, resultado da baixa contribuição da transferência de calor do tubo para a mistura porosa. A condutividade térmica do tubo de combustão é maior que a taxa de transferência de calor pela mistura, pelo que quanto maior a velocidade da frente de combustão menor será a influência da transferência de calor do tubo para a mistura. Observou-se ainda o aumento da produção de frações de óleo mais leves ao longo dos ensaios, que conduzem a um aumento da qualidade do óleo. O modelo numérico de simulação mostrou ajustar-se aos fenómenos observados nos ensaios experimentais.

*Palavras-chave:* Combustão in-situ; tubo de combustão, simulador térmico, transferência de calor

## Abstract

In-situ combustion consists in oxidation reactions promoted by the injection of oxygen inside the reservoir. If the reservoir temperature exceeds a specific temperature, oil and oxygen react and from this chemical reaction there is the release of a high amount of heat energy, designated by combustion front. The heat generated induces a decrease of the oil viscosity, and consequently its mobility. Also this heat is responsible to convert heavy fractions of oil into fuel, and the production and consumption of fuel along the reservoir allows the propagation of the combustion front from the injector wells to the produced wells.

In order to understand the combustion process and evaluate oil combustion behaviour for a specific reservoir it is commonly performed combustion tube tests. From these experimental tests, parameters such as chemical reaction stoichiometry, air requirement, fuel consumed and combustion front velocity are estimated. However, it does not provide information about the kinetic model that describes it.

This study aimed to evaluate the influence of air injection rate on the combustion process and effect of heat transference through the wall of the combustion tube to the mixture. Four tests were performed in the combustion tube using different air injection rates and it was used a heavy oil from a Brazilian field (15 °API). The analysis of the results was based on the combustion conventional parameters, in the combustion front velocity and on the growth of the steam zone. It was observed that with the increasing of the air injection rate the velocity of the combustion front was higher and there was an early production of fluids. Another result observed was an increasing of the light composition on the produced oil and, consequently, the upgrading of the heavy crude oil. By the increasing of the air injection rates, and hence the combustion front velocity, there was a decrease in the speed and length of the steam plateau, resulted of the lower contribution of the heat transference from the tube wall to the mixture. The thermal conductivity of the tube material is higher than the heat transference rate inside the mixture, so as higher the combustion front speed, lower will be the influence of heat transference from the tube to the mixture.

Numerical models can simulate these experiments in order to predict combustion behaviour in pilot or field scale.

*Key words:* in-situ combustion; combustion tube, thermal simulator, heat transference







# Índice

Índice.....	i
1. Introdução.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
2. Fundamentos teóricos .....	5
2.1. MÉTODOS TÉRMICOS DE RECUPERAÇÃO .....	5
2.2. COMBUSTÃO IN-SITU.....	6
2.2.1. Método .....	7
2.2.2. Tipos de combustão .....	9
2.2.3. Reações químicas.....	10
2.2.3.1. Reações de oxidação de baixa temperatura (OBT) .....	11
2.2.3.2. Reações de média temperatura (RMT).....	11
2.2.3.3. Reações de oxidação de alta temperatura (OAT).....	12
2.2.3.4. Estequiometria das reações .....	12
2.2.4. Controlo do processo de combustão.....	13
2.2.5. Mecanismos de recuperação .....	14
2.2.6. Aplicabilidade do método de combustão in-situ .....	15
2.3. Tubo de combustão in-situ.....	17
2.4. Simulador numérico térmico.....	18
3. Metodologia .....	20
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA.....	20
3.2. APARATO EXPERIMENTAL.....	20
3.2.1. Sistema de injeção de ar .....	22
3.2.2. Tubo de combustão e jaqueta de vácuo .....	22
3.2.3. Sistema de produção de fluidos .....	25
3.2.4. Sistema de análise de gases .....	26
3.2.5. Sistema de aquisição e controlo de dados.....	27
3.2.6. Densímetro .....	29
3.2.7. Dean-Stark .....	29
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	29
3.3.1. Procedimentos preliminares .....	30
3.3.2. Mistura dos componentes .....	31
3.3.3. Preenchimento do tubo de combustão.....	31
3.3.4. Instalação do tubo de combustão .....	32
3.3.5. Pré-aquecimento e pressurização do sistema .....	33
3.3.6. Ignição .....	33

3.3.7.	Injeção de ar.....	33
3.3.8.	Análise cromatográfica de gases produzidos.....	34
3.3.9.	Análise das propriedades do óleo produzido e da mistura remanescente.....	34
3.4.	DESENHO EXPERIMENTAL .....	35
3.5.	MODELO DE SIMULAÇÃO .....	35
3.5.1.	Modelo de fluidos .....	36
3.5.2.	Descrição do modelo de simulação .....	37
4.	Análise e discussão dos resultados.....	41
4.1.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	41
4.1.1.	Resultados do ensaio ETCIS-1 .....	41
4.1.2.	Resultados do ensaio ETCIS-2 .....	48
4.1.3.	Resultados do ensaio ETCIS-3 .....	53
4.1.4.	Resultados do ensaio ETCIS-4 .....	58
4.2.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....	63
4.2.1.	Frente de Combustão.....	63
4.2.2.	Patamar de vapor .....	65
4.2.3.	Frente de Condensação.....	66
4.2.4.	Produção de fluidos.....	67
4.2.5.	Produção de gases .....	70
4.2.6.	Transferência de calor ao longo do tubo.....	74
4.3.	MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	76
4.3.1.	Ajuste das saturações iniciais .....	77
4.3.2.	Ajuste das curvas de permeabilidade relativas .....	78
4.3.3.	Ajuste da energia de ativação .....	79
4.3.4.	Ajuste das perdas de calor .....	79
5.	Conclusões e Recomendações .....	83
5.1.	CONCLUSÕES .....	83
5.2.	RECOMENDAÇÕES FUTURAS .....	84
6.	Bibliografia .....	85

## Lista de Figuras

Figura 1 - Variação da viscosidade com o aumento da temperatura para óleos com diversos graus API (Silva, 2010) .....	5
Figura 2 - Perfil de temperatura e saturação em diferentes zonas do reservatório (Gonçalves, 2010) .....	8
Figura 3 – Representação esquemática dos principais elementos que compõem o aparato experimental dos testes de combustão <i>in-situ</i> (Gonçalves, 2010) .....	21
Figura 4 – Sistema de injeção de ar .....	22
Figura 5 - Tubo de combustão com os tubos guia onde são colocadas as sondas fixa e móvel. ....	22
Figura 6 – Posição da sonda fixa e as várias posições ocupadas pela sonda móvel ao longo do ensaio [em centímetros] ..	23
Figura 7 - Jaqueta de vácuo .....	24
Figura 8 - Bomba de vácuo .....	24
Figura 9 - Resistência colocada na camisa utilizada na ignição do óleo .....	24
Figura 10 - Caixa de aço que reveste o tubo e a jaqueta .....	25
Figura 11 - Sistema de produção de fluidos .....	26
Figura 12 - Sistema de análise de gases .....	27
Figura 13 - Gasómetro .....	27
Figura 14 - Analisador de gases .....	27
Figura 15 - Painel "Diagramas" do software <i>Eclipse SCADA</i> .....	28
Figura 16 - Painel "Controle" do software <i>Eclipse SCADA</i> .....	28
Figura 17 – Densímetro .....	29
Figura 18 - Dean Stark .....	29
Figura 19 - Areia .....	31
Figura 20 - Argila .....	31
Figura 21 - Água destilada .....	31
Figura 22 - Óleo .....	31
Figura 23 - Mistura homogênea .....	31
Figura 24 - Areia grossa com óleo de linhaça (à esquerda) e sem óleo (ao centro e direita) .....	32
Figura 25 - Curva de permeabilidade relativa água-óleo .....	38
Figura 26 - Curva de permeabilidade relativa gás-líquido .....	38
Figura 27 - Cronograma do ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	42
Figura 28 - Amostras da mistura após a combustão - Em cima: a 10 centímetros da base do tubo (à esquerda); a 30 centímetros da base (ao centro); a 50 centímetros da base (à direita). Em baixo: a 70 centímetros da base (à esquerda); a 90 centímetros da base (à direita) - <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	47
Figura 29 - Cronograma do ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min) .....	48
Figura 30 - Amostras da mistura após a combustão do ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min) .....	52
Figura 31 - Cronograma do ensaio <i>ETCIS-3</i> (Taxa de injeção de 3.3 L/min) .....	53
Figura 32 - Amostras da mistura após a combustão - Em cima: a 10 centímetros da base do tubo (à esquerda); a 30 centímetros da base (ao centro); a 50 centímetros da base (à direita). Em baixo: a 70 centímetros da base (à esquerda); a 90 centímetros da base (à direita) - <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min) .....	57
Figura 33 - Cronograma do ensaio <i>ETCIS-4</i> (Taxa de injeção de 3.8 L/min) .....	58

Figura 34 - Amostras da mistura após a combustão - Em cima: a 10 centímetros da base do tubo (à esquerda); a 30 centímetros da base (ao centro); a 50 centímetros da base (à direita). Em baixo: a 70 centímetros da base (à esquerda) a 90 centímetros da base (à direita) - <i>ETCIS-4</i> (TI 3.8 L/min) .....	62
Figura 35 - Curva de permeabilidade relativa água-óleo .....	78
Figura 36 - Curva de permeabilidade relativa gás-liquido .....	78

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Temperatura e Posição da Frente de combustão ao longo do ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min).....	42
Gráfico 2 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	43
Gráfico 3 - Perfis de temperatura ao longo do tubo <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	43
Gráfico 4 - Posição da frente de condensação no ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	44
Gráfico 5 - Produção acumulada de fluidos no <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	44
Gráfico 6 - Grau API de algumas provetas do ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min).....	45
Gráfico 7 - Taxa de produção de gases e produção acumulada de gases ao longo do ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	45
Gráfico 8 - Concentrações de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> registadas pelo analisador de gases ao longo do ensaio <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	46
Gráfico 9 - Concentrações de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ao longo do ensaio obtidas a partir do cromatógrafo - <i>ETCIS-1</i> (TI 2.5 L/min) .....	46
Gráfico 10 - Temperatura e posição da frente de combustão ao longo do ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min) .....	48
Gráfico 11 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min) .....	49
Gráfico 12 - Perfis de temperatura ajustadas ao longo do tubo <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min).....	49
Gráfico 13 - Posição da frente de condensação no ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min) .....	50
Gráfico 14 - Produção acumulada de fluidos do ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min) .....	50
Gráfico 15 - Grau API de algumas provetas do ensaio <i>ETCIS-2</i> (TI 3.0 L/min).....	51
Gráfico 16 - Taxa de produção de gases e produção acumulada de gases ao longo do ensaio <i>ETCIS-2</i> .....	51
Gráfico 17 - Concentrações de O <sub>2</sub> , CO e CO <sub>2</sub> registadas pelo analisador de gases ao longo do ensaio <i>ETCIS-2</i> .....	52
Gráfico 18 - Concentrações de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> obtidas a partir do cromatógrafo - <i>ETCIS-2</i> .....	52
Gráfico 19 - Temperatura e posição da frente de combustão do ensaio <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min) .....	53
Gráfico 20 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min) .....	54
Gráfico 21 - Perfis de temperatura ao longo do tubo com as sondas fixa e móvel <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min).....	54
Gráfico 22 - Posição da frente de condensação no ensaio <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min) .....	55
Gráfico 23 - Produção acumulada de fluidos no ensaio <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min) .....	55
Gráfico 24 - Taxa de produção de gases e respetiva produção acumulada no ensaio <i>ETCIS-3</i> (TI 3.3 L/min) .....	56
Gráfico 25 - Concentração de O <sub>2</sub> , CO e CO <sub>2</sub> ao longo do ensaio registadas pelo analisador de gases - <i>ETCIS-3</i> .....	56
Gráfico 26 - Concentrações de N <sub>2</sub> CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ao longo do ensaio obtidas a partir do cromatógrafo - <i>ETCIS-3</i> .....	56
Gráfico 27 - Temperatura e posição da frente de combustão do ensaio <i>ETCIS-4</i> .....	58
Gráfico 28 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio - <i>ETCIS-4</i> .....	59
Gráfico 29 - Perfil da temperatura ao longo do tubo com as sondas fixa e móvel - <i>ETCIS-4</i> .....	59
Gráfico 30 - Posição da frente de condensação no ensaio <i>ETCIS-4</i> .....	60

Gráfico 31 - Produção acumulada de fluidos no ensaio <i>ETCIS-4</i> .....	60
Gráfico 32 – Taxa de produção de gases e respectiva produção acumulada no ensaio <i>ETCIS-4</i> .....	61
Gráfico 33 - Concentração de N <sub>2</sub> ,O <sub>2</sub> , CO e CO <sub>2</sub> ao longo do ensaio registadas pelo analisador de gases .....	61
Gráfico 34 - Concentrações de N <sub>2</sub> CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ao longo do ensaio obtidas a partir do cromatógrafo .....	61
Gráfico 35 - Temperatura da frente de combustão nos diversos ensaios.....	64
Gráfico 36 - Posição da frente de combustão nos diversos ensaios .....	64
Gráfico 37 - Velocidade da frente de condensação nos diversos ensaios.....	66
Gráfico 38 - Produção acumulada de fluidos nos diversos ensaios.....	67
Gráfico 39 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 2.5 L/min .....	68
Gráfico 40 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 3.0 L/min .....	68
Gráfico 41 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 3.3 L/min .....	68
Gráfico 42 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 3.8 L/min .....	68
Gráfico 43 - Volume de óleo e água produzidos nos diversos ensaios .....	69
Gráfico 44 - Concentração de gases registada pelo analisador de gases (à esquerda) e pelo cromatógrafo (à direita) .....	71
Gráfico 45 - Temperatura da mistura e da camisa quando a frente de combustão se encontra na posição 0,55 m do tubo de combustão.....	74
Gráfico 46 - Histórico de temperaturas do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo base definido no capítulo 3.....	76
Gráfico 47 - - Histórico de produção acumulada de fluidos do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo base definido no capítulo 3 .....	77
Gráfico 48 - Histórico da composição do gás produzido do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo base definido no capítulo 3 .....	77
Gráfico 49 - Histórico de temperaturas do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo numérico ajustado.....	80
Gráfico 50 - Concentração de combustível (kg/m <sup>3</sup> ) no modelo numérico ajustado .....	80
Gráfico 51 - Histórico de produção de fluidos do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo numérico ajustado.....	81
Gráfico 52 - Histórico da composição do gás produzido do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo numérico ajustado.....	81

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Variação do Ar requerido em função da temperatura (Green & Willhite, 2003).....	14
Quadro 2 - <i>Screening</i> dos critérios das propriedades do óleo para aplicação da combustão in-situ (Green & Willhite, 2003) 16	16
Quadro 3 - <i>Screening</i> dos critérios das propriedades do reservatório para aplicação da combustão in-situ(Green & Willhite, 2003).....	16
Quadro 4 – Quantidades teóricas de cada componente requeridas para a elaboração do meio poroso saturado .....	20
Quadro 5 - Lista de equipamentos utilizados nos ensaios experimentais .....	21
Quadro 6 - Condições operacionais dos ensaios realizados .....	35
Quadro 7 - Propriedades da mistura porosa e da parede do tubo de combustão .....	37

Quadro 8 - Estequiometria das equações utilizadas no modelo do tubo de combustão .....	38
Quadro 9 - Propriedades das reações químicas (Mercado & Trevisan, Numerical Simulation of a Dry Combustion Tube Test for a Brazilian Heavy Oil, 2013).....	39
Quadro 10 - Concentrações médias de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia (TI 2.5 L/min).....	46
Quadro 11 - Concentrações médias de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia (TI 3.0 L/min).....	52
Quadro 12 - Concentrações médias de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia .....	56
Quadro 13 - Concentrações médias de N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia .....	61
Quadro 14 - Propriedades da mistura porosa em cada ensaio.....	63
Quadro 15 - Velocidade da frente de combustão nos diversos ensaios .....	64
Quadro 16 - Registo de descida da sonda móvel nos diversos ensaios.....	65
Quadro 17 – Temperatura para determinar a velocidade da frente de condensação.....	65
Quadro 18 – Velocidades das frentes de combustão e condensação e crescimento do patamar de vapor nos diversos ensaios .....	66
Quadro 19 - Fluidos produzidos nos diversos ensaios .....	69
Quadro 20 - Grau API de algumas amostras de óleo colectadas ao longo dos ensaios .....	70
Quadro 21 – Concentração de gases produzidos e parâmetros da combustão determinados no período estável dos diversos ensaios .....	72
Quadro 22 - Propriedades do meio poroso e volume inicial de fluidos in-place obtida pelo ajuste da saturação inicial de fluidos e gás no modelo numérico.....	78

# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

A constante procura de hidrocarbonetos tem resultado na exploração de campos onde a qualidade do óleo é maior ou onde a sua extração é mais fácil. Durante muitos anos a indústria petrolífera encarou a exploração de reservatórios com óleos mais pesados como sendo a “era” posterior à exploração de campos petrolíferos de óleos médios e leves. Contudo, com o aparecimento de grandes reservas de *shale gas* e do pré-sal, onde a qualidade do óleo é superior, as empresas petrolíferas avançaram para estes projetos, deixando novamente para segundo plano a exploração dos campos com presença de óleos mais pesados.

Apesar dos campos petrolíferos de óleos pesados serem considerados como solução de *backup*, é importante salientar que as reservas de óleo convencional constituem aproximadamente de 30% das reservas mundiais, sendo o restante dividido entre óleos pesados (15 %), óleos extrapesados (25 %) e betume (30 %), pelo que a exploração destes campos fará parte do portefólio de reservas das empresas (Shlumberger, 2014). Além disso, países como o Canadá, Venezuela ou Romênia, cuja maioria dos seus recursos são campos com óleos pesado necessitam de métodos adequados à sua produção.

A produção de um poço petrolífero inicia-se pela recuperação de óleo apenas pela sua depleção, ou seja, pela ação das fontes de energia existentes naturalmente no reservatório e que promovem a produção de fluidos. Este processo está relacionado com a expansão do óleo e do gás dissolvido, com a expansão do gás livre no reservatório e que pressiona o óleo (*gas cap expansion*), ou com a expansão de um aquífero adjacente ao reservatório.

A recuperação de fluidos sem adição de energia ao sistema é designada por recuperação primária, no entanto muitas vezes está associada a fatores de recuperação pouco satisfatórios, havendo a necessidade de aumentá-los recorrendo a outros métodos. É neste sentido que surgiram os métodos de recuperação avançada. Estes métodos podem ser classificados entre métodos de recuperação secundária ou terciária, e caracterizam-se por requererem a introdução de uma fonte externa e suplementar de energia aos reservatórios (Castiñeira, 2008). Os fatores de recuperação associados à recuperação primária situam-se ente 5 a 15 % (Bressam, 2008).

Os métodos de recuperação secundária são muitas vezes aplicados desde o início da exploração dos poços quando se regista uma produção de óleo muito baixa. Simplificadamente existem apenas dois métodos de recuperação secundária: injeção de água e/ou injeção de gás. Pela injeção de água ou gás é possível manter a pressão do reservatório, geralmente acima do *bubble point*, o que conduz ao aumento da energia do reservatório, contribuindo positivamente para o aumento da produção. Todavia a aplicação destes métodos requer que seja efetuada a análise económica, pois é necessário avaliar se o aumento da produção cobre os custos associados aos novos poços injetores, e instalações de superfície necessárias. Os fatores de

recuperação associados à recuperação secundária dependem muito das propriedades do óleo e do reservatório, mas em geral a recuperação situa-se entre 15 % a 45 % (Castiñeira, 2008).

No caso de campos maduros ou campos com a presença de óleos de elevada viscosidade os métodos de recuperação secundária podem ser pouco eficazes, sendo necessário proceder ao aumento da energia do reservatório através da alteração das suas propriedades e/ou das propriedades dos fluidos existentes. Os principais métodos terciários incidem sobre o aumento da eficiência do deslocamento dos fluidos dentro dos reservatórios. Quando a viscosidade do fluido injetado é menor que a do óleo presente no reservatório, o fluido deslocante pode encontrar caminhos porosos preferenciais até aos poços produtores sem promover o deslocamento do óleo remanescente de forma satisfatória e eficiente. Para ultrapassar este problema pode proceder-se ao aumento da viscosidade da água ou à diminuição da viscosidade do óleo.

Os métodos terciários encontram-se agrupados em três grupos distintos: métodos miscíveis; métodos químicos/biológicos; e métodos térmicos.

Os métodos miscíveis consistem na alteração da permeabilidade relativa do óleo. Os métodos biológicos consistem na injeção de polímeros ou de microrganismos com o objetivo de alterarem as propriedades do óleo. Os métodos térmicos são geralmente aplicados em óleos muito viscosos, tendo também aplicação em óleos leves, mas de pouco interesse pois métodos de recuperação menos complexos apresentam ótimos fatores de recuperação. Dos métodos térmicos destacam-se alguns mais recorrentemente utilizados na indústria: injeção de água quente, injeção de vapor e combustão *in-situ*.

Os fatores de recuperação de óleo através da recuperação terciária situam-se entre os 45 % e os 65 % (Almeida, 2004).

## 1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o contributo do aumento da taxa de injeção de ar sintético no processo de combustão *in-situ*. O objectivo será atingido através do desenho e implementação de um plano experimental à escala laboratorial que pretende reproduzir condições de um reservatório real.

O tubo de combustão por ser de aço inox tem uma elevada condutividade térmica, o que faz com que o calor provocado pela frente de combustão não seja transmitido exclusivamente pela mistura mas também pelo tubo. Deste modo, são colocados termopares no interior do tubo com o objetivo de registarem a temperatura da mistura ao longo de todo o ensaio. A temperatura da mistura resulta da transferência de calor do processo de combustão e da contribuição da transferência de calor do tubo para a mistura.

Neste estudo pretendeu-se avaliar o efeito da elevada condutividade térmica do tubo na mistura, pelo que se propôs efetuar um conjunto de ensaios experimentais aumentando a taxa de injeção de ar, que por consequência provoca o aumento da velocidade da frente de combustão. Assim, foram efetuados quatro ensaios



onde se fez variar a taxa de injeção de ar. As taxas utilizadas foram de 2.5 L/min, 3.0 L/min, 3.3 L/min e 3.8 L/min.

A dissertação está dividida em cinco capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se a contextualização do tema no contexto da indústria petrolífera além de se apresentar a motivação e os objetivos do presente estudo. No Capítulo 2 é efetuada uma breve fundamentação dos principais conceitos que envolvem o processo de combustão in-situ, da importância dos ensaios em tubo de combustão e do simulador utilizado na modelação de processos térmicos. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada na realização dos ensaios experimentais e na elaboração do modelo numérico. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na campanha experimental, é efetuada uma comparação entre todos os ensaios e no ajuste do modelo numérico a partir dos ensaios laboratoriais efetuados, assim como as respectivas conclusões. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e sugeridas recomendações futuras.



## 2. Fundamentos teóricos

### 2.1. Métodos térmicos de recuperação

No presente capítulo serão abordados os principais fundamentos teóricos que sustentam o processo de combustão, e em particular os processos que ocorrem dentro do tubo de combustão.

O processo de Combustão *in-situ* insere-se nos métodos térmicos de recuperação, onde se utiliza energia sobre a forma de calor no sentido de se alterar a viscosidade do óleo do reservatório. No entanto estão associados outros efeitos decorrentes deste processo que beneficiam o aumento da recuperação de óleo, como a destilação do óleo com a vaporização das frações mais leves e a dilatação da formação, o que cria uma espécie de deslocamento miscível que se combina com os métodos térmicos. A expansão do óleo provocada pelo aumento da temperatura também tem influência no aumento da recuperação.

A temperatura do óleo tem um grande efeito na sua viscosidade, pelo que, quando um óleo é sujeito a um aumento de temperatura observa-se a diminuição acentuada da sua viscosidade. Na Figura 1 é apresentada a relação entre a viscosidade e o aumento da temperatura. Esta relação entre a viscosidade e a temperatura é mais acentuada quanto mais viscoso for o óleo nas suas condições iniciais.

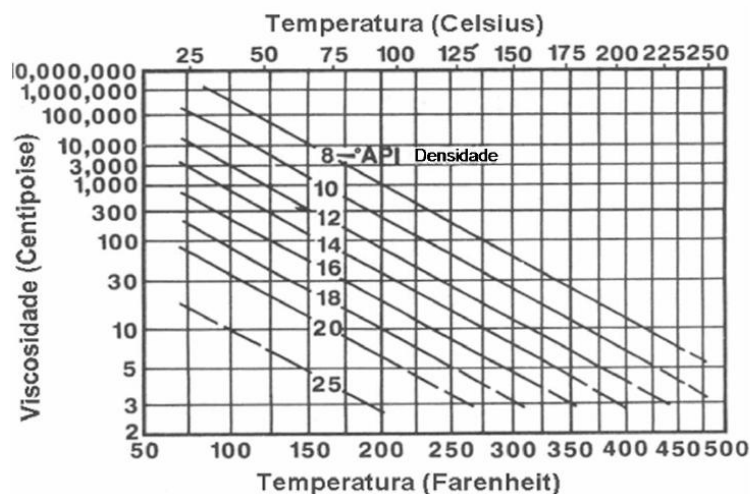


Figura 1 - Variação da viscosidade com o aumento da temperatura para óleos com diversos graus API (Silva, 2010)

Existem diversos métodos térmicos, no entanto é comum fazer-se uma classificação de acordo com a origem da energia: métodos de injeção de fluidos quentes (água ou vapor de água), onde a energia térmica é gerada na superfície e injetada no reservatório; e combustão *in-situ*, onde a energia é gerada no interior do reservatório pela oxidação do oxigênio.

Os métodos de injeção de fluidos quentes apresentam algumas desvantagens face à combustão *in-situ*: a sua aplicação está limitada à profundidade máxima do reservatório de aproximadamente 900 metros, pois as perdas de calor registadas a partir desta profundidade tornam inviável o processo de aquecimento do óleo; e os

métodos de injeção requerem a instalação de infraestruturas de superfície de grandes dimensões, difíceis de acomodar em campos *offshore*. No entanto a maior vantagem da combustão *in-situ* é que, por utilizar a energia gerada no reservatório, esta é consideravelmente maior que a energia calorífica transportada pelos fluidos injetados, com maior eficiência em termos de utilização do calor e maior eficácia nos mecanismos de acionamento (Rodriguez, 2004). Apesar das inúmeras vantagens apontadas para o processo de combustão face aos métodos de injeção de fluidos, dada a complexidade do processo de combustão outros processos de recuperação estão inerentes a menores riscos operacionais, e portanto são utilizados com maior frequência.

Sendo o processo de combustão *in-situ* âmbito deste estudo será apresentado em pormenor ao longo deste capítulo as principais características deste método.

## **2.2. Combustão *in-situ***

A combustão *in-situ* é uma das técnicas de recuperação de petróleo mais antigas, apesar de não haver registos da primeira vez que tenha sido utilizada. Julga-se que tenha surgido no início do século XX, através da injeção de ar quente, mas o registo da patente do primeiro ensaio de combustão foi efetuado em 1923 por E. R. Walcott (White, 1983).

Este processo *in-situ* não é mais que uma reação de combustão, onde pela injeção de ar no reservatório e na presença de uma fonte de ignição, um combustível, neste caso o óleo existente sofre oxidação com liberação de energia calorífica. O pico de temperatura que se liberta denomina-se por frente de combustão. Outras reações ocorrem no sentido de formarem combustível que é responsável pela reação em cadeia, permitindo que a frente de combustão percorra o reservatório desde os poços injetores até aos poços produtores.

A ignição do óleo pode ocorrer espontaneamente caso a temperatura natural do reservatório seja suficiente para promover a sua ignição e se o óleo for suficientemente reativo. Porém a maioria dos reservatórios não satisfazem estas condições, sendo necessário recorrer a fontes de energia externa, como aquecedores de fundo, injeção de vapor ou por meio de injeção de ar com um produto químico oxidável, como o óleo de linhaça, de modo a elevar a temperatura do reservatório (Burger, 1985).

A complexidade deste processo de recuperação avançada devido ao facto de combinar efeitos de movimentação de vapor, transferência de calor, reações químicas de elevada complexidade com cinéticas de reação dependentes da temperatura e da pressão, e ainda dependentes do transporte de oxigénio até à frente de combustão, entre outros, estará na origem de um equívoco quanto à sua baixa probabilidade de sucesso. Na realidade, a combustão é um processo de recuperação provado economicamente atraente, capaz de recuperar economicamente uma grande fração do óleo *in place* (White, 1983).

Apesar da técnica ter sido descoberta no nos primórdios da exploração petrolífera, esta técnica não é muito utilizada atualmente, sendo pouco expressiva a produção mundial a partir desta técnica: apenas 25 mil barris por dia (Cruz, 2010). Segundo Silva (2010), à data destacavam-se apenas quatro projetos de *CIS*: um na Romênia,

no campo de Suplacu de Barcau, que produz há mais de 34 anos e com fatores de recuperação acima de 50%, dois na Índia, nos campos Balol e Santhal, que operam há mais de sete anos, com um fator de recuperação acima de 40%, e um nos EUA, no campo de Bellevue.

Estes números mostram as dificuldades inerentes à aplicação adequada deste método. Nos EUA chegaram a desenvolver-se mais de 225 projetos de combustão, tendo uma parte considerável obtido sucesso económico, enquanto que outros falharam por diversas razões, incluindo características desfavoráveis do reservatório e dos fluidos, e problemas operacionais. No Brasil foram considerados dois projetos piloto, estando previsto um terceiro no campo de Rio Preto (Silva, 2010).

### **2.2.1. Método**

No decorrer do processo de combustão *in-situ* podem ser caracterizadas zonas distintas entre o poço injetor e o poço produtor, onde ocorrem predominantemente um conjunto de reações químicas e/ou fenómenos de transporte de calor e massa. Na Figura 2 é apresentado um esquema simplificado dessas zonas num reservatório.

- 1. Zona queimada: zona onde a frente de combustão já passou queimando e arrastando o óleo e a água, ficando a formação saturada em ar. Uma pequena porção de energia gerada pré-aquece o ar injetado à medida que este se aproxima da frente de combustão;
- 2. Zona de combustão: zona onde se situa a frente de combustão e onde ocorrem as reações de oxidação de alta temperatura, consumindo o combustível formado na região de craqueamento térmico, o coque. Estas reações são exotérmicas, pelo que é nesta zona onde se registam as temperaturas mais elevadas. O calor gerado nesta zona provoca o aumento da temperatura do óleo que é transportado adiante da frente por condução, convecção de gases de combustão, de vapores e de líquidos e pela condensação de voláteis e de vapor. É uma zona muito estreita, com apenas alguns centímetros mesmo em escala de campo;
- 3 Região de craqueamento térmico e vaporização: região constituída por uma fração volátil e um resíduo pesado não-volátil. Considera-se que nesta zona não existem reações de oxidação uma vez que não há a presença de oxigénio, visto que todo ele terá sido consumido na zona de combustão. Pela elevada temperatura, especialmente junto à zona de combustão observam-se reações de pirólise sobre as frações mais pesadas, o que provoca a quebra das cadeias de carbono, gerando frações mais leves e o coque. Nesta zona também se observa a evaporação total da água do reservatório, incluindo a água de adsorção das argilas e dos hidrocarbonetos leves com o aumento da temperatura do reservatório. Estes são transportados pelo vapor de água para jusante, onde acabam por condensar e se misturar com o óleo original (zona de condensação). Esta mistura do óleo vaporizado com o óleo original em

certos casos, e dependendo da temperatura, podem induzir num craqueamento térmico suave, designado por *visbreaking*, que tende a reduzir a viscosidade do óleo;

- 4 Patamar de vapor: região onde se observa a presença de óleo e de água nas duas fases, líquida e vapor. A temperatura nesta zona é praticamente constante e depende da pressão parcial da água na fase vapor;
- 5 Banco de água: banco de água formado pela condensação do vapor da água uma vez que a temperatura é inferior à da saturação do vapor. A temperatura e a saturação de água diminuem a jusante, aumentando a saturação de óleo;
- 6 Banco de óleo: zona onde se acumula o óleo deslocado pelo processo de combustão. Nessa zona, a água conacta, o óleo deslocado e alguns gases de combustão ocupam o espaço poroso. A temperatura é aproximadamente a mesma que a temperatura inicial do reservatório;
- 7 Zona não perturbada: esta zona ainda não foi influenciada pelo processo de combustão, registando-se apenas um aumento da saturação de gases de combustão ( $N_2$ , CO e  $CO_2$ ).

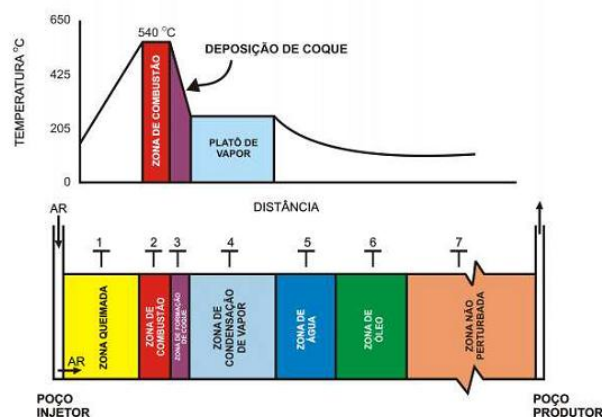


Figura 2 - Perfil de temperatura e saturação em diferentes zonas do reservatório (Gonçalves, 2010)

Na realidade em situação de campo as zonas anteriormente descritas podem aparecer sobrepostas ou em seqüências diferentes.

Das zonas apresentadas deve fazer-se especial referência a três: à zona da frente de combustão, à zona de craqueamento térmico e ao patamar de vapor. As zonas de combustão e de craqueamento térmico são caracterizadas pela ocorrência de um conjunto de reações predominantes em cada uma, pelo que serão estudadas com maior detalhe posteriormente aquando do estudo dessas reações. O patamar de vapor tem particular importância pois é considerado por alguns autores como funcionando como mecanismo de produção no processo de combustão.

Bousald (1989) considera que o patamar de vapor funciona como o principal mecanismo de deslocamento do óleo durante o processo de combustão, tendo em consideração que o óleo deslocado durante o processo de combustão provém da região a jusante da frente de combustão. Assim quanto maior a zona de vapor, mais eficiente será o processo de deslocamento.

Existem três parâmetros importantes na avaliação do patamar de vapor: a temperatura, o comprimento do patamar de vapor e a velocidade de condensação. A temperatura do patamar de vapor é controlada pelo equilíbrio de fases e está diretamente relacionada com a pressão parcial da água na fase gás e em menor grau pela saturação de água. O crescimento do patamar de vapor pode ser controlado pelo fluxo de ar, pela temperatura inicial da formação e/ou as perdas de calor (Satman & Brigham, 1981). O movimento do patamar de vapor, assim como a transferência de calor diante da frente de combustão, estão relacionados com a vaporização e condensação da água. Quando mantida a condição adiabática na zona de vapor, a velocidade do patamar de vapor é constante e usualmente o dobro da velocidade da frente de combustão (Penberthy & Berry, 1968).

### **2.2.2. Tipos de combustão**

Até este momento apenas se abordou processo de combustão com a injeção de ar de modo a sustentar a frente de combustão, todavia algumas variantes deste processo:

- *Combustão seca ou molhada*, dependendo se há ou não a injeção simultânea ou alternada de água e ar;
- *Combustão direta ou reversa*, baseada na direção da injeção de ar em função da frente de combustão;

Na combustão seca, em vez de se injetar ar com a presença de oxigênio pode ser utilizado ar enriquecido, ou seja, ar com uma concentração molar de oxigênio superior a 21%. As vantagens deste tipo de combustão incluem: aumento do calor liberado pela frente de combustão, devido ao decréscimo da razão de CO/CO<sub>2</sub> nos gases produzidos; maior miscibilidade de dióxido de carbono no óleo; e ainda a baixa pressão parcial do oxigênio que ocasiona menores custos de compressão. A grande desvantagem da injeção de ar enriquecido é o elevado custo da utilização de ar enriquecido já que é necessário instalações especializadas para aumentar a concentração molar de oxigênio (Rodriguez, 2004).

A combustão molhada é um processo muito semelhante à combustão seca, tendo como única diferença a injeção de ar e água. A grande vantagem deste processo reside no fato do calor específico da água ser muito superior ao do ar (quatro vezes mais), pelo que o transporte do calor pela frente de combustão será mais eficiente, promovendo uma redução na quantidade de ar requerido para varrer um mesmo volume do reservatório. Este processo pode melhorar a recuperação de óleo até 25%. No entanto a aplicação deste processo é limitada pela viscosidade do óleo (Gonçalves, 2010).

Na combustão direta a frente de combustão e o ar injetado movem-se na mesma direção. Durante a combustão direta a temperatura por trás da frente de combustão é elevada, indicando a acumulação de calor na formação, o que é benéfico na medida em que o ar injetado é aquecido por este calor pelo que quando atinge a frente de combustão há menores diferenças de temperatura. Contudo registam-se perdas consideráveis na fronteira do reservatório com outras formações e na zona dos poços produtores há uma acumulação considerável de óleos viscosos que permanecem à temperatura do reservatório e cuja recuperação se torna muito difícil. Na combustão reversa a frente de combustão progride no sentido oposto à direção do ar injetado. Para tal, no início do processo a injeção de ar é realizada através do poço produtor até que ocorra a ignição e que a frente de combustão progrida alguma distância, a partir desse momento procede-se à injeção a partir do poço injetor. A frente de combustão avança em direção ao poço injetor enquanto o óleo avança na direção do poço produtor. Este tipo de combustão resolve o problema de acumulação de óleos viscosos junto ao poço produtor uma vez que a zona circundante se encontra aquecida, contudo este procedimento não é tão eficiente como a combustão direta pois as frações mais leves são queimadas e as frações mais pesadas ficam atrás da frente de combustão. Outro problema com este procedimento está associado à possibilidade de ocorrer a ignição do óleo em torno do poço injetor e uma nova frente de combustão no sentido do poço produtor. Ambos os processos foram estudados quer por ensaios laboratoriais, quer por testes em campo, porém a combustão reversa nunca foi utilizada em projetos industriais (Rodriguez, 2004).

### **2.2.3.Reações químicas**

O estudo cinético das reações químicas envolvidas no processo de combustão do óleo é de extrema importância na medida em que estas são responsáveis por toda a dinâmica do processo, quer em fase laboratorial, quer em fase de campo.

O sucesso no conhecimento e compreensão do processo de combustão *in-situ* tem como base compreender o comportamento cinético de um conjunto de reações químicas que ocorrem durante o contato entre o oxigénio e o óleo. Assim será possível estabelecer os parâmetros operacionais que possibilitam a ocorrência ponderada das reações que liberam pouca energia face às que liberam maior energia e das reações responsáveis pela formação do combustível (Araújo, 2012).

A complexidade deste processo está associada a diversos fenómenos: transporte simultâneo de calor e massa num ambiente multifásico; inúmeras reações químicas de oxidação dos numerosos componentes do óleo que ocorrem em simultâneo; o carácter reacional depende da natureza do sistema óleo-rocha, que também influencia o regime de temperatura a ser estabelecido (Araújo, 2012).

De modo a simplificar a análise destas reações, estas foram agrupadas em diferentes regimes de acordo com a temperatura no reservatório:

- Reações de oxidação de baixa temperatura (*OBT*);



- Reações de média temperatura (*RMT*);
- Reações de oxidação de alta temperatura (*OAT*).

No processo de combustão pretende-se que haja a predominância de reações de oxidação de alta temperatura com a coexistência de oxidações de baixa temperatura. O regime de temperatura no reservatório é influenciado pela perda de energia para as formações vizinhas. Quando a perda é pequena e a quantidade de calor produzida é alta, a temperatura do reservatório eleva-se e a oxidação tende a ser completa, com o consumo integral do oxigénio e com a possibilidade da ocorrência da autoignição (a depender da natureza do óleo). Quando a perda de energia é significativa ou o calor liberado na reação não é suficiente para um aumento considerável da temperatura (casos de alta saturação de água ou baixa saturação de óleo), a oxidação tende a ocorrer próxima à temperatura do reservatório (Sarathi, 1999). A presença de heterogeneidades no reservatório e a ocorrência da canalização do ar, desviando-se do óleo, podem favorecer baixas vazões de ar na zona de oxidação, o que contribui para o estabelecimento de *OBT* (Pereira, 2008).

#### 2.2.3.1. Reações de oxidação de baixa temperatura (*OBT*)

Quando se está perante baixas temperaturas, inferiores a 350 °C, o oxigénio e o óleo combinam-se formando hidrocarbonetos com maior viscosidade e densidade que o óleo original, e com uma temperatura de ebulição mais elevada, além de alterarem as características de destilação do óleo. Estas reações, designadas por reações de oxidação de baixa temperatura, são heterogéneas (gás/liquido), aumentam a reatividade do óleo em altas temperaturas e dependem muito da natureza do óleo. Consequentemente, em reservatórios de óleo pesado, as *OBT* tendem a ser mais pronunciadas quando muito oxigénio é injetado (Chicuta, 2009).

Quando as perdas de calor são grandes ou as taxas de injeção são pequenas há uma maior tendência para haver a predominância das reações de baixa temperatura, com a consequente formação de maiores quantidades de combustível. A composição deste combustível é distinta do combustível formado pelas reações de oxidação de alta temperatura.

#### 2.2.3.2. Reações de média temperatura (*RMT*)

Estas reações são responsáveis pela deposição do combustível que alimentará as *OAT*. A formação do resíduo sólido (coque) resulta de reações de pirólise e de craqueamento das moléculas (Varga, 2011). As reações de pirólise são homogéneas (gás-gás) e endotérmicas, envolvendo três tipos de reações:

- *Reações de desidrogenação*, onde os átomos de hidrogénio são retirados das moléculas de hidrocarbonetos, mas os átomos de carbono permanecem intactos;
- *Reações de craqueamento*, em que há a quebra das ligações carbono-carbono das moléculas mais pesadas dos hidrocarbonetos, resultando na formação de moléculas de hidrocarbonetos com menor número de carbonos;

- *Reações de condensação*, há um aumento no número de átomos de carbono nas moléculas, conduzindo à formação de hidrocarbonetos mais pesados e ricos em carbono.

A extensão das reações de pirólise depende de fatores como a natureza do óleo, a estrutura química do óleo e da rocha, das condições de pressão e temperatura, da quantidade e qualidade do ar injetado, da presença de agentes catalíticos, entre outros. Deste modo, como os óleos mais leves são mais suscetíveis à destilação, formam menos combustível que os óleos pesados. A produção de combustível é um aspecto muito importante na quantidade de óleo produzido e na taxa de injeção da frente, ou seja, se a deposição de combustível for demasiado rápida a velocidade da frente de combustão é mais lenta, pois há mais combustível para consumir, e por consequência será necessário injetar mais ar.

A composição litológica do reservatório é outro fator que influencia as reações de pirólise, e conseqüentemente, a deposição de óleo. Mas também a saturação inicial de óleo, viscosidade e resíduo de carbono favorecem a deposição de óleo, ao contrário da razão hidrogénio-carbono e o grau API, cujo aumento causa a diminuição da sua deposição (Das, S. C. 2009).

O coque é definido como uma fração de óleo insolúvel em tolueno e que contém 80-90% de carbono e 3-9 % de hidrogénio. Em geral não é consumido mais de 5 a 6 % de óleo para a formação de combustível (Green & Willhite, 2003).

#### 2.2.3.3. Reações de oxidação de alta temperatura (OAT)

As reações de oxidação de alta temperatura são reações heterogéneas (gás-sólido e gás-líquido) e exotérmicas, ocorrendo a temperaturas superiores a 350 °C. Estas reações são caracterizadas por requererem uma elevada energia de ativação e pelo consumo de todo o oxigénio na fase de gás, uma vez que nelas o oxigénio reage com o resíduo craqueado do hidrocarboneto formado no processo da deposição. A combustão entre o oxigénio do ar injetado e o coque liberta a energia necessária para sustentar e propagar a frente de combustão, além de promover o aquecimento do óleo, reduzindo a sua viscosidade (Gonçalves, 2010).

Os principais produtos obtidos nesta reação são o monóxido de carbono e dióxido de carbono e água, além da energia calorífica gerada.

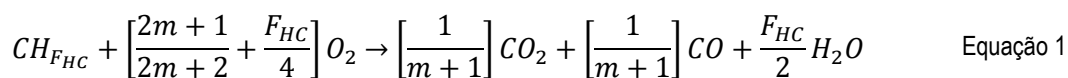
#### 2.2.3.4. Estequiometria das reações

Os ensaios em tubo de combustão não permitem definir o modelo cinético, porém oferecem dados suficientes para que se estabeleça a estequiometria das reações químicas, dado que esta apenas depende da temperatura, pressão e composição do óleo, e estas podem ser reproduzidas em ensaios de tubo de combustão (Sarathi, 1999). Os coeficientes estequiométricos das reações de craqueamento e oxidação são determinados a partir da

composição molar do nitrogênio, oxigênio, óxido e dióxido de carbono, produzidos durante o período estável do processo de combustão.

Apesar das reações de OBT e RTM serem importantes no processo de combustão, para simplificar a análise dos resultados dos ensaios laboratoriais assume-se que apenas a reação OAT é representativa do processo, razão pela qual apenas esta reação é utilizada para a análise dos resultados do tubo de combustão. Ao efetuar o estudo da combustão adotando esta aproximação considera-se que todo o oxigênio é consumido para a formação de água e óxido e dióxido de carbono, que todo o hidrogênio no combustível reage com o oxigênio para produzir água, que não é totalmente recuperada, e que todo o carbono existente no combustível é convertido em óxido e monóxido de carbono, constituindo parte dos gases produzidos (Green & Willhite, 2003).

A reação de oxidação de alta temperatura pode ser descrita pela seguinte equação estequiométrica:



Na Equação 1  $F_{HC}$  é a razão aparente Hidrogênio/Carbono,  $m$  é a razão molar entre o Dióxido de Carbono e o Monóxido de Carbono produzidos ao longo do processo e  $CH_{F_{HC}}$  é o peso molecular do combustível. Estes parâmetros são calculados a partir do balanço de massa.

A razão aparente Hidrogênio/Carbono (H/C), é designada por aparente pois esta não é determinada pela medição direta, mas por inferência da estequiometria, além de que no seu cálculo se tem em consideração apenas as OAT. Durante as OAT a razão aparente Hidrogênio/Carbono é relativamente baixa, em geral entre 1 e 3, por outro lado nas OBT o intervalo varia entre 3 e 10 (Green & Willhite, 2003).

#### **2.2.4. Controlo do processo de combustão**

Num projeto de combustão o controlo do processo é efetuado tendo em consideração, principalmente, três parâmetros: disponibilidade de combustível, requerimento de ar e fluxo de ar (Green & Willhite, 2003).

A deposição de combustível refere-se à quantidade de combustível que é depositado de tal forma que permita a progressão da frente de combustão em direção ao poço produtor, ou seja, é a massa depositada de combustível (em quilograma) por unidade de volume (metro cúbico) de formação. A partir da quantidade de combustível queimado pode ser determinada a quantidade de energia calorífica gerada, para além da determinação da quantidade de ar requerido, da velocidade da frente de combustão, do fator de recuperação de óleo e da duração do projeto.

Este parâmetro depende das propriedades do óleo, do seu grau API, da saturação em óleo, da permeabilidade e da mineralogia da rocha, assim como da temperatura da frente de combustão (Green & Willhite, 2003). A deposição de combustível pode ser determinada a partir de ensaios laboratoriais, sendo que estes ensaios têm relevado que para óleos mais pesados e viscosos há maior deposição de combustível (Reid, 1996).

O requerimento de ar é definido como sendo o volume de ar necessário para queimar uma unidade de volume do reservatório. A progressão da frente de combustão depende do combustível disponível, e portanto o volume de ar necessário para queimar uma unidade de volume do reservatório é diretamente proporcional à deposição de combustível. Assumindo que o conteúdo de combustível é constante e que é conhecida a sua composição, é possível determinar a quantidade de ar requerido para queimar o combustível depositado (KoK).

De notar que parte do ar injetado permanece na zona queimada, e não contribui para a eficiência da combustão. No caso de reservatórios de baixa pressão o volume de ar presente nesta zona queimada pode não ser relevante. Todavia, em reservatórios de alta pressão a quantidade de ar nessa zona pode ser muito elevada, constituindo um desperdício de oxigénio. O Quadro 1 ilustra o efeito da pressão no requerimento de ar para zonas queimadas a uma temperatura de 76,67 °C.

Quadro 1 - Variação do Ar requerido em função da temperatura (Green & Willhite, 2003)

<b>Pressão [psia]</b>	14,5	145,0	290,0	580,0	870,0	1160,0	1450,0	2175,0	2900,0	4350,0
<b>Ar requerido [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]</b>	6,4	6,5	6,6	6,8	7,1	7,3	7,7	8,1	9,0	9,3

Uma das razões pela qual o estudo deste parâmetro é de grande importância está relacionada com a viabilidade económica e rentável do projeto.

A injeção de ar é um dos parâmetros mais importantes no processo de combustão, uma vez que é pelo fluxo de ar injetado que o oxigénio chega até à frente de combustão. Esta pode mover-se tão rapidamente quanto o ar é fornecido para consumir a quantidade de combustível depositada, uma vez que todo o combustível deve ser queimado. Os testes de laboratório indicam que para fluxos de ar relativamente elevados a combustão é muito vigorosa, ou seja, são atingidas temperaturas de combustão mais elevadas. Todavia, para taxas de injeção sucessivamente menores o processo atinge um ponto em que a frente de combustão só continua a ser propagada se o calor for gerado a uma taxa que compense as perdas de calor para as camadas fronteira, para elevar o volume queimado desde a temperatura ambiente para a temperatura de combustão, e para compensar as perdas de calor por condução e por convecção diante da frente de combustão. Quando o calor gerado não é suficiente para compensar as perdas de calor a frente de combustão extingue-se. Deste modo a taxa de injeção de ar é uma função da deposição de combustível e das perdas de calor. (Green & Willhite, 2003)

### **2.2.5. Mecanismos de recuperação**

A elevada capacidade de recuperação de óleo associado a este processo está relacionado com os diversos mecanismos de deslocamento de fluidos que se registam no decorrer do processo, e é pela combinação de

todos eles que se registam elevados fatores de recuperação de óleo. De seguida são apresentados os mecanismos de produção presentes na combustão: (KoK)

- Mecanismo de condensação de vapor: um dos produtos da reação do oxigénio com o combustível é vapor de água. Este vapor e o vapor resultante da vaporização da água intersticial da formação, deslocam-se na direção do poço produtor, até que acabam por condensar pela diminuição da temperatura. O calor latente libertado pelo vapor de água promove o aquecimento do óleo, e consequentemente a redução da sua viscosidade e o aumento da sua mobilidade;
- Mecanismo miscível: as frações gasosas de hidrocarbonetos que provêm da destilação misturam-se com as frações gasosas de hidrocarbonetos produzidas pelas reações de craqueamento. Esta mistura, pela diminuição da temperatura, acaba por condensar e acumula-se no banco de óleo. Quando os gases condensam o calor transportado é transmitido ao óleo, provocando o aumento da sua mobilidade, e facilitando o seu deslocamento;
- Gas drive: os gases produzidos na frente de combustão transferem o calor para o óleo, reduzindo a sua viscosidade. Além disso, o dióxido de carbono dissolve-se parcialmente no óleo, o que faz com que a sua viscosidade diminua. O banco de óleo formado a jusante do patamar de vapor é deslocado principalmente pelos gases de combustão;
- Thermal drive: este é um mecanismo que resulta do efeito de todos os outros. A transferência de energia calorífica das formações vizinhas e a jusante da frente de combustão é efetuada por convecção pelos fluidos e por condução pela rocha, de tal modo que nenhum outro processo de recuperação consegue ser tão eficiente.

### **2.2.6. Aplicabilidade do método de combustão in-situ**

A combustão pode ser aplicada em diversos tipos de reservatórios, porém exige-se um elevado conhecimento das propriedades petrofísicas do reservatório e do óleo (Reid, 1996). De seguida é apresentado um conjunto de propriedades que devem ser avaliadas na aplicação de um processo de combustão *in-situ*:

- Natureza da Formação: o tipo de rocha não é importante, desde que o sistema de matriz / óleo seja suficientemente reativo para sustentar a combustão. Outro aspecto importante é a existência de caminhos preferenciais uma vez que estes são prejudiciais pois impedem que haja o varrimento homogéneo de todo o reservatório pela frente de combustão;
- Profundidade: a profundidade deve ser suficientemente grande para garantir a contenção do ar injetado no reservatório. Não há limite de profundidade, a não ser que isso possa afetar a pressão de injeção;
- Pressão: a pressão pode ter implicações na economia do processo, mas não afeta aspectos técnicos da combustão;
- Temperatura: a temperatura apenas interfere no processo de ignição;

- **Espessura do reservatório:** a espessura deve ser maior do que cerca de 4 metros para evitar perdas excessivas de calor para as formações vizinhas. Formações muito espessas podem apresentar problemas de eficiência de varredura por causa da segregação gravitacional;
- **Permeabilidade:** a permeabilidade deve ser suficiente para garantir o fluxo do ar injetado. A injectividade de ar é especialmente importante para os reservatórios de óleo pesado;
- **Porosidade e saturação em óleo:** Estas duas propriedades têm de ser suficientemente grandes para permitir recuperação de petróleo economicamente viável;
- **Natureza do óleo:** Em projetos de óleo pesado, este deve ser facilmente oxidável em condições de reservatório. Esta relação deve ser determinada através de ensaios laboratoriais.

Com base em estudos laboratoriais e com a experiência adquirida nos diversos projetos realizados foi definido um conjunto de critérios que são aconselháveis para se aplicar este método de recuperação num campo. Os *screenings* desses critérios são apresentados no Quadro 2 e no Quadro 3 para as propriedades do óleo e do reservatório, respetivamente.

Quadro 2 - *Screening* dos critérios das propriedades do óleo para aplicação da combustão in-situ (Green & Willhite, 2003)

Parâmetros	<i>Grau API</i>	<i>Viscosidade (cp)</i>	<i>Composição</i>
<b>Limite</b>	> 10	< 5000	Presença de componentes asfaltenos
<b>Aconselhável</b>	> 16	1200	

Quadro 3 - *Screening* dos critérios das propriedades do reservatório para aplicação da combustão in-situ (Green & Willhite, 2003)

Parâmetros	<i>Saturação em óleo (%)</i>	<i>Tipo de formação</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>Permeabilidade média (mD)</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
<b>Limite</b>	> 50	Arenitos alta porosidade	> 3	> 50 <sup>4</sup>	3505	> 37,8
<b>Aconselhável</b>	> 72				1067	> 57,2

Existem inúmeras dificuldades operacionais na aplicação deste método, sendo que a maioria é, provavelmente, o controlo do avanço da frente de combustão. Dependendo das características do reservatório, como por exemplo, a formação de canais preferenciais resultantes das heterogeneidades da rocha, e da distribuição de fluidos, a frente de combustão pode não avançar de forma uniforme, resultando num baixo varrimento da frente de combustão ao longo do reservatório. A indústria petrolífera tem enfrentado dificuldades no controlo deste processo, como seja o facto da frente de combustão avançar de um modo mais irregular que a frente de injeção, e da, ou devidos à diferença de densidade entre o gás e o óleo. Efectivamente, o acompanhamento da frente de combustão é uma fase crítica do processo, podendo o seu avanço ser realizado através da monitorização da temperatura ao longo do tempo e dos produtos das reações de oxidação no poço produtor. A técnica de sísmica 4-D também pode ser utilizada para o acompanhamento da frente térmica ao longo do tempo (Pereira, 2008).

Outro ponto que está associado ao processo de combustão são as questões de risco e segurança inerentes a este processo, que são tanto maiores quanto maiores forem as temperaturas e as reações que ocorrem no reservatório. Reações químicas que ocorrem nos tubos dos poços injetores e produtores, problemas de corrosão que ocorrem quando o gás injetado não é devidamente desidratado ou os gases expulsos apresentam elevadas concentrações de enxofre são ocorrências da aplicação deste processo. São ainda relatados casos da formação de emulsões no reservatório ou na superfície (Gonçalves, 2010).

Por fim, refere-se a importância dos compressores de ar, uma vez que se estes pararem o gás não será injetado e a frente de combustão acabará por se apagar (Rodriguez, 2004).

### **2.3. Tubo de combustão *in-situ***

A execução de projetos de combustão *in-situ* à escala de campo requerem que seja elaborado um estudo técnico-económico preliminar bastante rigoroso. Este estudo contempla o conhecimento de um conjunto de parâmetros tais como: a concentração de óleo por unidade de volume do reservatório queimado; a composição do óleo, a taxa de oxigénio necessária para queimar o óleo, a pressão de injeção, o volume varrido pela frente de combustão, a taxa de produção de óleo e de recuperação, o investimento necessário e os custos operacionais envolvidos.

Um dos processos mais adequados para este estudo envolve a realização de ensaios laboratoriais que procuram estimar alguns destes parâmetros. O tubo de combustão é uma forma de simular fisicamente um pequeno volume do reservatório submetido a condições que procuram reproduzir as condições existentes nos reservatórios. Geralmente são preenchidos com testemunhos nativos do reservatório ou amostras representativas do material da matriz e do óleo e a combustão é promovida com a ignição do óleo. Deste modo é recolhida informação importante para a aplicação deste método à escala de campo.

Além dos baixos custos e riscos inerentes, outra das grandes vantagens da realização de ensaios laboratoriais, é que estes possibilitam a realização da parametrização de propriedades do reservatório, dos fluidos ou ainda de condições operacionais. Deste modo é possível inferir qual o comportamento do sistema pela alteração de uma das propriedades, e assim compreender quais as propriedades com maior importância no processo.

Uma consideração muito importante relativamente aos ensaios de combustão e aos resultados que deles se obtêm é que apesar de se procurar representar todas as condições do reservatório nos ensaios de laboratório não é possível fazer uma representação idêntica das mesmas, pelo que as diferenças observadas nos resultados de laboratório e de campo são meramente indicadoras se o processo se está a comportar de modo semelhante com o que foi projetado através dos ensaios laboratoriais, ou se se observam diferenças significativas. As perdas de calor são um dos elementos em que ensaios de laboratório e aplicação de campo divergem muito. Nos ensaios em tubo de combustão estas são representadas por condições que não conseguem ser satisfeitas na

aplicação em projetos reais, ou seja, garantir que as perdas de calor sejam mínimas, graças ao sistema adiabático e à velocidade da frente de combustão que é relativamente elevada.

(Reid, 1996) indica que os ensaios em tubo de combustão apresentam fatores de recuperação que entre 60 % e 90 % face à quantidade de óleo inicial. Contudo estes valores estão associados ao facto destes ensaios serem realizados utilizando materiais de elevada porosidade e elevadas saturações de óleo.

#### **2.4. Simulador numérico térmico**

À semelhança dos ensaios experimentais, a simulação surge na tentativa de estudar vários cenários possíveis e perceber como o sistema responde. Apesar da simulação ser um método mais barato que a realização de ensaios experimentais, esta requer o conhecimento de determinados parâmetros, cuja obtenção apenas poderá ser efetuada a partir dos ensaios experimentais. Além disso, estes ensaios permitem calibrar os modelos numéricos. Outra grande vantagem da simulação está associada ao facto de se poder variar os parâmetros do processo de uma forma rápida e expedita, permitindo fazer análise de sensibilidade a diferentes parâmetros.

O processo de combustão pode ser simulado recorrendo a simuladores numéricos, onde são utilizados coeficientes de equilíbrio para representar o estado das fases e dos componentes em função da pressão, do volume e da temperatura (PVT). Além disso, estes modelos requerem que a equação de estado dos fluidos seja ajustada com as propriedades dos componentes presentes nos fluidos (a massa molecular, a gravidade específica, a composição molar, a viscosidade, a temperatura e a pressão crítica). A qualidade da equação de estado será melhor quanto mais próximas forem as propriedades em relação às condições operacionais. A simulação efetuada neste estudo foi realizada através do STARS (Steam, Thermal and Advanced Processes Reservoir Simulator) - versão 2012.10, simulador numérico trifásico de múltiplos componentes da CMG (Computer Modeling Group Lta.), adequado para a simulação de processos de recuperação térmica de óleo.

O principal fenómeno a modelar na combustão é o aumento da temperatura no reservatório, e este aumento promove consequentemente a redução da viscosidade do óleo. Para a modelação deste fenómeno torna-se necessário recorrer a equações de balanço de massa e de energia não-lineares fortemente interligadas. Por outro lado, existem reações químicas que ocorrem durante o processo e que cuja modelação se torna necessária. A sua modelação pode ser efetuada por dois métodos distintos: considerar reações controladas por reagentes, onde se promove a reação instantânea do oxigénio ao entrar em contato com o óleo; ou considerar que as reações são controladas por cinética, onde as reações químicas ocorrem em determinadas velocidades (Gonçalves, 2010).

Como se fez referência anteriormente, o processo de combustão depende da natureza do óleo, e pelo aumento da temperatura durante o processo as propriedades do fluido variam continuamente. Como tal torna-se necessário efetuar a modelação do comportamento das fases para várias temperaturas.



O software utilizado na modelação do comportamento de fase e propriedades dos fluidos foi o WinProp - versão 2012.10, também da CMG. Este software permite a modelação do comportamento do fluido em condições de reservatório e de superfície, sendo ainda possível caracterizar com precisão sistemas de fluidos do reservatório por meio de analogias ou experiências de laboratório PVT.

### 3. Metodologia

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na mistura que representa o meio poroso saturado, a descrição do aparato experimental e dos procedimentos utilizados nos ensaios efetuados e a metodologia adotada na elaboração do modelo numérico do tubo de combustão.

#### 3.1. Materiais utilizados na mistura

Um volume infinitesimal do reservatório em estudo foi representado por uma mistura de areia, argila, água e óleo. A areia utilizada foi uma areia industrial da Mineração Jundu Ltda, com uma granulometria compreendida entre 0.177 milímetros e 0.250 milímetros, previamente lavada e seca na estufa e a argila utilizada foi a BENT CREME 331/325 da BrasilMinas, constituída de bentonita. Os fluidos utilizados foram água destilada e um óleo pesado (15,03 API), proveniente da Bacia de Espírito Santo. Para representar as condições do reservatório foram utilizadas as saturações iniciais de 50 % de óleo, 25 % de água e 25% de gás.

O Quadro 4 sintetiza as quantidades de cada componente utilizadas na mistura utilizada no tubo de combustão.

Quadro 4 – Quantidades teóricas de cada componente requeridas para a elaboração do meio poroso saturado

Componente na mistura	Quantidade [kg]
Óleo [M <sub>oil</sub> ]	0.766
Água [M <sub>wt</sub> ]	0.312
Areia [M <sub>wt</sub> ]	4.853
Argila [M <sub>wt</sub> ]	0.255

#### 3.2. Aparato experimental

O aparato experimental de um ensaio de combustão *in-situ* é composto por um conjunto de sistemas específicos: sistema de injeção de ar, tubo de combustão e jaqueta de vácuo, sistema de produção de fluidos, sistema de análise de gás, e um sistema de controlo de dados. Na Figura 3 é apresentado um esquema dos equipamentos que compõem o aparato experimental utilizados nos ensaios de combustão *in-situ*. No Quadro 5 é apresentada a listagem dos equipamentos utilizados e respectivas marcas.

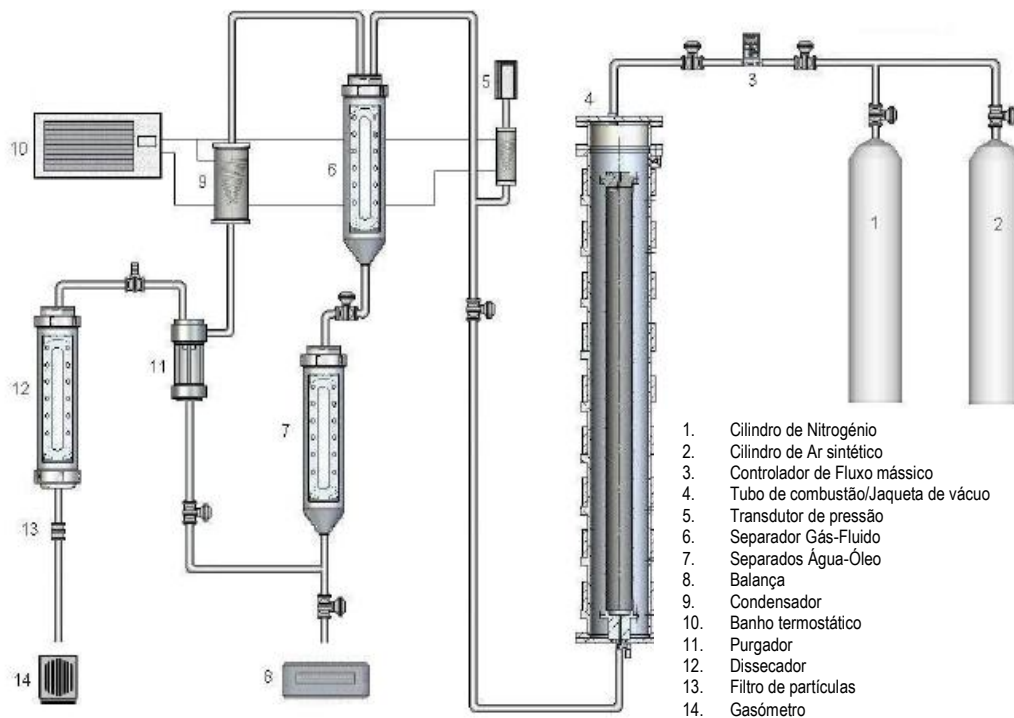


Figura 3 - Representação esquemática dos principais elementos que compõem o aparato experimental dos testes de combustão *in-situ* (Gonçalves, 2010)

Quadro 5 - Lista de equipamentos utilizados nos ensaios experimentais

EQUIPAMENTO	MODELO
<i>Controlador de Fluxo Mássico</i>	Aalborg GF 17 Mass Flow Controller, modelo 8270, fluxo entre 0-5 L/min
<i>Termopares</i>	Tipo J, Iron Constantan, faixa -40 a +750°C
<i>Transmissor de Pressão</i>	Zurich, modelo PSI-420, faixa 0-50 bar, saída: 4-20mA
<i>Válvula de Contrapressão (10 atm)</i>	Tescom, série 26 1700, faixa 0-500 psi
<i>Programa para Aquisição de Dados</i>	Eclipse SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition System) da Elipse Software
<i>Gasómetro</i>	Precision Scientific Inc., faixa 0,1-3000 L/h
<i>Balança</i>	Ohaus, modelo Adventurer, faixa 0-4100 g, 0,01 g por divisão
<i>Banho Termostatizado</i>	Tecnal, modelo TE-184, faixa -10°C a 99,9°C
<i>Cromatógrafo</i>	DCT - CG90. Gases: Argônio, Padrão Primário, Ar sintético
<i>Karl Fischer</i>	Titulador Karl Fischer Volumétrico 841 Titrande, Methrom Forno ThermoPrep modelo 832 KF

De seguida é apresentada uma breve descrição dos principais elementos que constituem cada um e qual a sua importância no ensaio de combustão.

### **3.2.1. Sistema de injeção de ar**

O sistema de injeção de ar é composto por um fluxímetro no qual é definida a taxa de injeção de ar que se pretende utilizar no ensaio. Um manómetro é colocado antes do fluxímetro para controlar a pressão do cilindro. Uma válvula de segurança é colocada antes do tubo de combustão para garantir que não ocorrem pressões acima de 50 bar e que não há a passagem de fluidos do tubo para o fluxímetro. Na Figura 4 são apresentados os principais elementos que fazem parte do sistema de injeção utilizado.

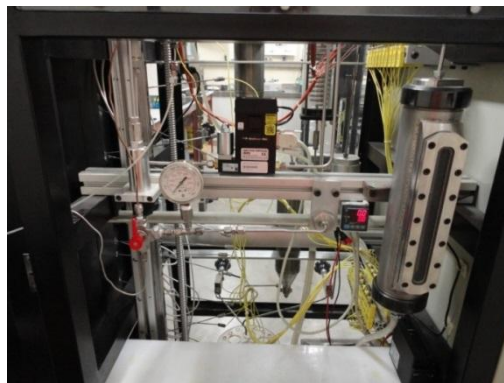


Figura 4 – Sistema de injeção de ar

### **3.2.2. Tubo de combustão e jaqueta de vácuo**

O tubo de combustão é constituído por um tubo em aço inoxidável tipo 316 L com um diâmetro externo de 7.7 centímetros, um diâmetro interno de 6.9 centímetros e uma altura de 100 centímetros. No seu interior existem dois tubos guias onde são colocadas duas sondas termométricas (uma fixa e outra móvel). No topo há uma conexão pela qual é injetado o ar sintético ao longo do ensaio e na sua base é colocada uma rede de 0.074 milímetros, com o intuito de evitar possíveis entupimentos por finos. Na Figura 5 são apresentados o tubo de combustão e o seu interior.



Figura 5 - Tubo de combustão com os tubos guia onde são colocadas as sondas fixa e móvel.

As sondas termométricas apresentam 10 termopares cada uma, e estes termopares permitem fazer a leitura da temperatura da mistura ao longo da experiência. Na sonda fixa cada termopar está espaçado de 10 centímetros enquanto que na sonda móvel os termopares estão espaçados de 2.53 centímetros. A sonda móvel vai descendo ao longo do tubo à medida que a frente de combustão avança, sendo este movimento controlado pelo software Elypse SCADA. Na Figura 7 são apresentadas as diversas posições que a sonda móvel ocupa ao longo do ensaio.

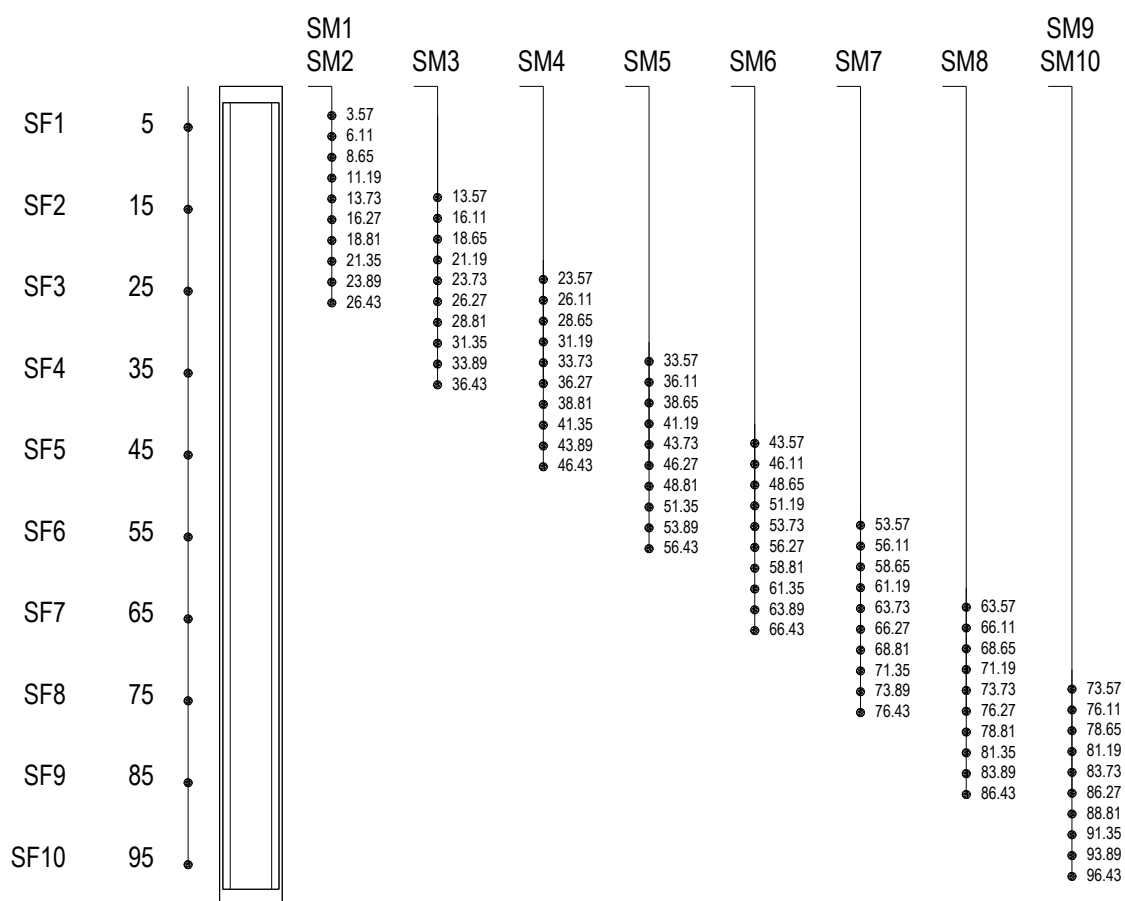


Figura 6 – Posição da sonda fixa e as várias posições ocupadas pela sonda móvel ao longo do ensaio [em centímetros]

Durante o ensaio o tubo de combustão é encaixado dentro da jaqueta de vácuo. A jaqueta de vácuo é constituída por um tubo em inoxidável tipo 304 com um diâmetro externo de 16 centímetros e 0.7 centímetros de espessura e um comprimento de 112 centímetros. No espaço anular entre a jaqueta e o tubo de vácuo é realizado através de uma bomba de vácuo, sendo estabilizado em 0.6 mbar. A sua importância reside no facto deste possibilitar a minimização das perdas de calor do tubo de combustão, dado que limita a transferência de calor por radiação, procurando criar uma condição adiabática para o sistema. Na Figura 7 é apresentada a jaqueta de vácuo e a Figura 8 é apresentada a bomba de vácuo.



Figura 7 - Jaqueta de vácuo



Figura 8 - Bomba de vácuo

Para ajudar a minimizar as perdas de calor são colocados oito resistores equidistantes ao longo da jaqueta, por meio dos quais é realizado o controlo adiabático do processo. Estes são também utilizados para aquecerem a mistura durante o pré-aquecimento até se atingir a temperatura de referência do reservatório. Entre cada resistor é colocada uma placa de isolante térmico para evitar a interferência do calor nas diversas secções. É possível observar na Figura 7 os resistores referidos.

Além destes resistores é ainda colocada uma resistência com capacidade de aquecimento até aos 500° C no topo do tubo de combustão, que possibilita a ignição do óleo de linhaça. A resistência é apresentada na Figura 9.



Figura 9 - Resistência colocada na camisa utilizada na ignição do óleo

Para se registar a temperatura ao longo da jaqueta e na camisa do tubo de combustão são colocados conjuntos de termopares em posições específicas. É através destes termopares que se faz o controlo da condição adiabática do ensaio, ou seja, se a temperatura no exterior do tubo de combustão for menor do que a temperatura na mistura (registada pelas sondas termométricas) o resistor ao redor da jaqueta é ligado até que as temperaturas da parede externa e da mistura se equalizem, mantendo uma condição adiabática.

A jaqueta é protegida por uma caixa de aço revestida por isolante térmico para conservar o calor em volta da mesma, tal como se pode observar na Figura 10.



Figura 10 - Caixa de aço que reveste o tubo e a jaqueta

### **3.2.3. Sistema de produção de fluidos**

O sistema de produção de fluidos é constituído por um conjunto de separadores de fluidos (líquido-gás, óleo-água e gás-água), no entanto o sistema de separação óleo-água não se mostrou muito eficiente.

Após a saída dos fluidos do tubo de combustão estes passam por um transdutor de pressão, pelo qual é registada a pressão de produção dos fluidos, até que se acumulam num separador líquido-gás. Aqui os líquidos acumulam-se no fundo do separador e o gás no topo. Existe um segundo separador de líquidos onde se pretendia fazer a separação entre água e óleo, contudo este não se mostrou eficiente, pelo que em seguida os fluidos são coletados pelas provetas colocadas sobre a balança enquanto que o gás passa por um condensador, ligado a um banho termostático, para que toda a água que possa existir sob a forma de vapor de água seja condensada e acumulada no purgador. O gás passa depois por uma válvula de contrapressão, que garante que a pressão de produção se mantenha constante ao longo do sistema de produção. Ao passar pela válvula de contrapressão o gás fica submetido à pressão atmosférica e passa um dissecador constituído de uma coluna de permanganato de potássio para retirar possíveis compostos de enxofre e por um filtro para reter qualquer material particulado. Em seguida o gás segue para o sistema de análise de gases.

Na Figura 11 são apresentados todos os elementos que constituem o sistema de produção de fluidos.

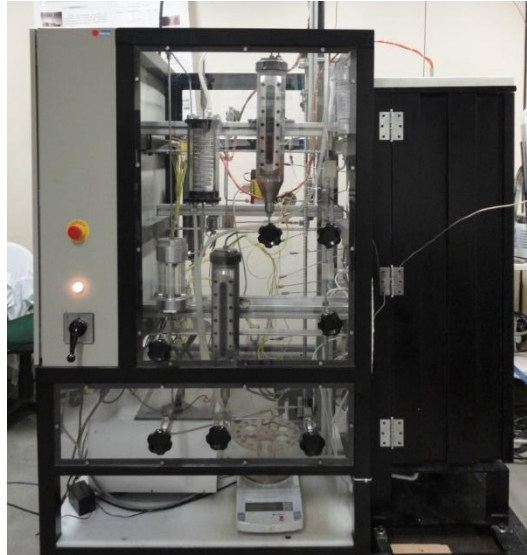


Figura 11 - Sistema de produção de fluidos

#### **3.2.4. Sistema de análise de gases**

O sistema de análise de gases é composto por um gasómetro, um analisador de gases e pela análise cromatográfica dos gases produzidos. O gasómetro permite a leitura da taxa de produção de gases no tempo assim como regista a produção acumulada de gases ao longo do ensaio. O analisador de gases permite fazer a leitura instantânea da composição dos gases produzidos, recorrendo a um conjunto de células de medição para alguns gases, incluindo o monóxido e o dióxido de carbono e oxigénio. Como este equipamento não efetua a leitura da concentração de Nitrogénio, esta é obtida a partir da normalização da concentração dos restantes gases. Este equipamento é utilizado como monitor em tempo real da ocorrência da combustão. Para isso é tomado como referência a concentração do oxigénio no gás produzido. Se esta concentração for abaixo de 5 % é indicativo que há o consumo de oxigénio e que está a ocorrer a combustão no interior do tubo.

Além do analisador de gases são ainda coletadas amostras de gases em sacos tipo *Tedlar* com capacidade de 0.5 L. Estas amostras são efetuadas em períodos específicos e são submetidas a uma análise cromatográfica gasosa simples. Desta análise são medidas as concentrações de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_1$  e  $\text{N}_2$  através de um detector de condutividade térmica. Uma vez que não foi possível medir a concentração de  $\text{O}_2$ , esta foi calculada pelo balanço das concentrações dos restantes componentes.

O sistema de análise de gases produzidos é apresentado na Figura 12. Na Figura 13 e na Figura 14 são apresentados o gasómetro e o analisador de gases, respectivamente.





Figura 12 - Sistema de análise de gases



Figura 13 - Gasómetro

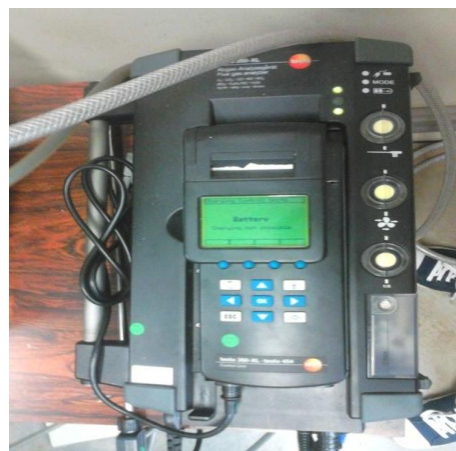


Figura 14 - Analisador de gases

É importante referir que no primeiro ensaio efetuado, se detectou que o gasómetro não estava a funcionar devidamente, pois não expelia os gases produzidos, o que provocou o excesso de gases no tubo, resultando na extinção da frente de combustão. Por esta razão nos ensaios seguintes o gasómetro foi colocado no final do sistema de análise de gases, para garantir que se existisse algum problema na saída de gases este seria imediatamente desconectado sem prejuízo para o ensaio.

### **3.2.5. Sistema de aquisição e controlo de dados**

O sistema de aquisição e controlo de dados é constituído pelo software *Elipse SCADA - Supervisory, Control and Data Acquisition System*. Este software permite fazer as leituras e acionar diversas operações.

As temperaturas registadas pelos termopares instalados nas sondas termométricas (10 termopares em cada uma), oito termopares instalados na camisa do tudo de combustão e oito termopares instalados na jaqueta de vácuo, as medições na balança à medida que são produzidos fluidos e as pressões de injeção e de produção são observadas no painel de “Diagramas” deste software. O software permite ainda fazer a leitura da vazão do

controlador de fluxo mássico, da vazão volumétrica do gasómetro e da temperatura do banho termostático, contudo os equipamentos utilizados no estudo não são compatíveis com o software, pelo que estes dados foram registados manualmente. O programa foi definido para fazer as leituras a cada 30 segundos. Na Figura 15 observa-se o painel “Diagramas” do *Elipse SCADA*.

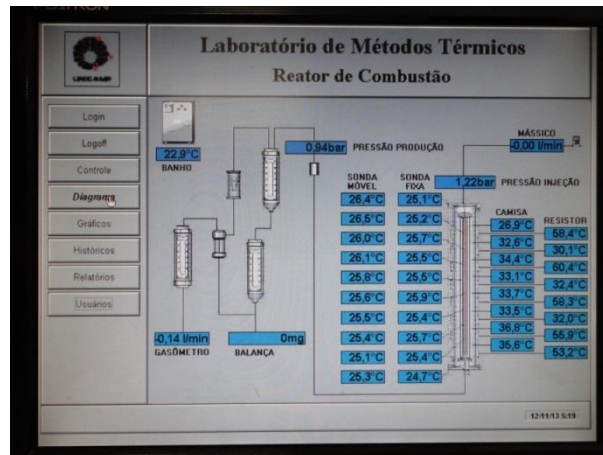


Figura 15 - Painel “Diagramas” do software *Elipse SCADA*

Além das leituras referidas o software permite ainda acionar um conjunto de equipamentos:

- Controlo da ignição: permite ligar e desligar a resistência colocada no topo do tubo de combustão e definir a sua temperatura;
- Controlo do movimento: permite iniciar o movimento da sonda móvel de modo a fazer a leitura da temperatura à medida que a frente de combustão avança;
- Controlo de aquecimento: permite ligar os resistores colocados na jaqueta de vácuo. Quando se aciona o pré-aquecimento só o primeiro, o terceiro, o quinto, o sétimo e o oitavo resistores são ligados, o modo de aquecimento liga todos os resistores.

Na Figura 16 é apresentado o painel “Controle” do *Elipse SCADA*.

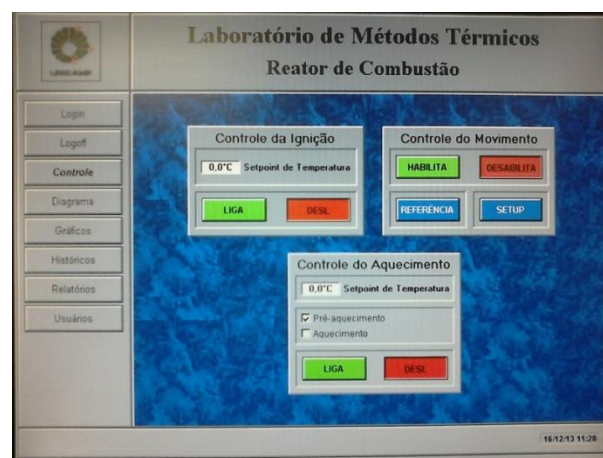


Figura 16 - Painel "Controle" do software *Elipse SCADA*

### 3.2.6. Densímetro

O ensaio para aferir a massa específica do óleo é efetuado recorrendo a um densímetro digital, apresentado na Figura 17. A partir da densidade do fluido é possível aferir qual o grau API do óleo produzido.



Figura 17 – Densímetro

### 3.2.7. Dean-Stark

O equipamento Dean-Stark é utilizado para fazer a medição da humidade em amostras sólidas cujo princípio de funcionamento é baseado no princípio da imiscibilidade de solventes. O equipamento apresentado na Figura 18 foi utilizado para estimar a saturação residual de óleo e de água na mistura.



Figura 18 – Dean-Stark

## 3.3. Procedimento experimental

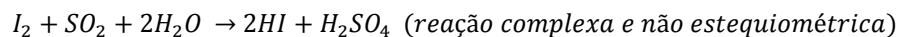
Os procedimentos experimentais utilizados nos diversos processos efetuados ao longo do presente estudo foram efetuados de acordo com os ensaios de combustão *in-situ* já realizados no laboratório de Métodos de Recuperação Térmica do Departamento de Engenharia de Petróleos da UNICAMP e, em particular, com os procedimentos adotados por (Chicuta, 2009) e (Gonçalves, 2010).

O ensaio experimental de um tubo de combustão pode ser dividido em diversas etapas: procedimentos preliminares; mistura dos componentes; ensaio de combustão; análise de gases produzidos, análise das propriedades do óleo e da mistura produzidos.

### **3.3.1.Procedimentos preliminares**

De acordo com o que foi referido anteriormente, inicialmente foi efetuado um estudo preliminar às características do óleo, em particular do teor de humidade e da sua densidade de modo a obter no tubo de combustão uma mistura com as saturações de óleo, água e gás previamente configuradas.

O teor de humidade é determinado efetuando uma titulação Karl Fischer. Neste método devem ser colocados aproximadamente 0.1 gramas de óleo num vial transparente e lacrado com um septo de PTFE/Silicone e tampa de alumínio. De seguida é preenchido o balão com metanol, colocada a amostra no forno acoplado ao titulador e inicia-se o processo de titulação através do software TIAMO da Methron. Neste processo o reagente Karl Fisher (RKF), que é constituído por uma mistura de iodo ( $I_2$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), piridina ( $C_5H_5N$ ) e metanol ( $CH_3OH$ ), reage com a água que evaporou da amostra de óleo que foi aquecida no forno, ocorrendo uma reação onde o iodo é reduzido pelo dióxido de enxofre, de acordo com a reação seguinte:



Quando se observa o consumo de toda a água da amostra a reação termina. É através do volume de RKF gasto na titulação da amostra que o software determina o seu teor de humidade.

O ensaio para determinar a massa específica do óleo é efetuado recorrendo a um densímetro digital. Este faz uso do princípio de empuxo de Arquimedes. A impulsão é a força que provoca a flutuação dos corpos nos líquidos, sendo proporcional a densidade ( $\rho$ ), ao volume do corpo ( $V$ ) e à aceleração da gravidade ( $g$ ), sendo regido de acordo com a equação:

$$I = \rho * V * g$$

Através desta relação de proporcionalidade é possível determinar a densidade uma vez que a aceleração da gravidade é conhecida e constante, o volume do densímetro igualmente conhecido e a impulsão que é igual ao peso.

Conhecendo o valor da densidade do óleo ( $\rho_o$ ) na pressão atmosférica e 15.56 °C é possível determinar o grau API e determinar a quantidade de óleo necessária para obter uma mistura com as saturações desejadas (50 % de óleo, 25 % de água e 25% de gás). O grau API é definido pela fórmula seguinte:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho_o} - 131,5$$

### **3.3.2. Mistura dos componentes**

Após o cálculo das quantidades de óleo, água, areia e argila necessárias, procede-se à sua pesagem e mistura. Inicialmente misturam-se a areia e a argila e de seguida acrescenta-se a água. Por fim é adicionado o óleo até se obter uma mistura homogênea, que deve ser pesada. Na Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22 são apresentados os componentes utilizados na mistura porosa, areia, argila, água e óleo, respetivamente. Na Figura 23 é apresentada a mistura final obtida.



Figura 19 - Areia



Figura 20 - Argila

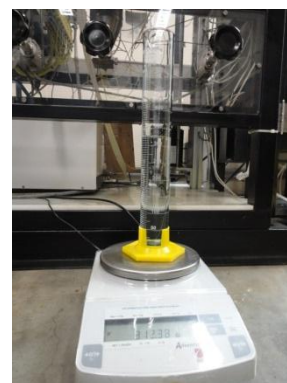


Figura 21 - Água destilada



Figura 22 - Óleo



Figura 23 - Mistura homogênea

### **3.3.3. Preenchimento do tubo de combustão**

O preenchimento do tubo de combustão deve ser efetuado do topo para base. Para tal o tubo é posicionado na vertical, de forma invertida, sendo preenchido com 2 centímetros de areia limpa grossa entre 0.500 e 0.841 milímetros, suficiente para cobrir o bico injetor. De seguida são colocados mais 2 centímetros de com areia grossa entre 0.500 e 0.841 milímetros saturada com 5 mililitros de óleo de linhaça. Este procedimento procura prevenir futuros entupimentos do tubo e proporcionar uma melhor distribuição e deslocamento dos fluidos.

A mistura é colocada no tubo em porções de 100 grama e a cada 6 porções, o conteúdo é socado de forma a diminuir a porosidade da mistura no tubo. Os últimos 2 centímetros do tubo são também preenchidos com areia

limpa grossa entre 0.500 e 0.841 milímetros. Na Figura 24 é apresentada a areia grossa utilizada com e sem óleo de linhaça.



Figura 24 - Areia grossa com óleo de linhaça (à esquerda) e sem óleo (ao centro e direita)

No caso de sobrar mistura esta é pesada para se determinar a quantidade da mistura que foi colocada no tubo, e através desse dado, calcular a porosidade e as saturações realmente obtidas. No caso contrário, falta mistura para preencher completamente o tubo, o volume em falta é preenchido por areia grossa, cuja quantidade é medida para se calcular a porosidade e as saturações obtidas.

Por fim, é efetuado um teste de estanqueidade do tubo através da injeção de nitrogénio pela tubulação de injeção do tubo de combustão enquanto a saída de produção é tamponada. O tubo é ligeiramente pressurizado com o nitrogénio de forma de possibilitar a observação de possíveis vazamentos nas ligações. Se não houver vazamentos, o tampão é retirado e o tubo despressurizado.

#### **3.3.4. Instalação do tubo de combustão**

Após se garantir que não existem fugas no sistema procede-se à instalação do tubo de combustão na jaqueta de vácuo. A resistência elétrica de ignição é colocada no topo do tubo, aproximadamente à altura do óleo de linhaça e os terminais da resistência são ligados ao circuito de ignição.

De seguida é feita a ligação do sistema de injeção ao flange superior e a linha de produção ao flange inferior. Após se verificar que não há nenhum curto circuito da alimentação da ignição com a jaqueta de vácuo esta pode ser fechada e vedada. É então efetuada a ligação de todos os termopares que medem a temperatura da camisa do tubo de combustão e da jaqueta.

Por fim são introduzidas as sondas termométricas nos tubos guias, sendo que a sonda móvel é apenas alinhada, pois seu movimento efetivo dentro do tubo guia ocorre de forma automatizada através do seu acionamento no *Elipse SCADA*.

### **3.3.5. Pré-aquecimento e pressurização do sistema**

A partir desta etapa praticamente todo o ensaio é controlado pelo software *Elipse SCADA*. O sistema de controlo permite definir o pré-aquecimento, ou seja, onde os resistores em torno da jaqueta de vácuo são ligados de modo a que a temperatura da mistura aumente e estabilize numa temperatura próxima da temperatura de referência (53 °C no caso de estudo).

Assim que a temperatura estabiliza, inicia-se a pressurização do sistema pela injeção de nitrogénio na saída e entrada do tubo de combustão e na linha de produção de fluidos. O controlo da pressão do sistema é efetuado pelo painel de diagrama, observando-se a leitura dos transdutores de pressão de injeção e produção. Assim que a pressão do sistema chegue próxima à pressão de produção programada para o teste é interrompida a injeção de nitrogénio.

Após a pressurização do sistema é iniciado o vácuo na jaqueta, o controlador de fluxo de massa é pré-definido para a taxa desejada, mas ainda mantido desligado, o analisador de gases é “zerado”, o banho termostático é ligado e definida a temperatura de condensação, e é efetuada a tara da balança para medir a quantidade de fluidos produzidos.

### **3.3.6. Ignição**

A resistência elétrica é ativada através do painel de controlo do software *Elipse SCADA* para a temperatura de ignição (500 °C neste estudo). A resistência é ligada, sendo a monitorização da temperatura no início do tubo efetuado pelo painel “Diagramas”, observando-se o aumento da temperatura nos primeiros termopares da sonda fixa. Quando a temperatura no primeiro termopar da sonda fixa, localizado a 5 centímetros do topo do tubo, atinge a temperatura de referência, aciona-se o controlador de fluxo de massa no modo controlado para iniciar a injeção de ar.

É habilitada a sonda termométrica móvel e ajusta-se o controlo dos resistores da jaqueta para o modo de aquecimento.

### **3.3.7. Injeção de ar**

A partir do momento em que se começa a injeção de ar sintético dá-se início ao processo de combustão. Pelo contato do oxigénio com o óleo e o combustível depositado pelas reações de craqueamento ocorrem as reações de oxidação a alta temperatura.

Assim que se observa o deslocamento da frente de combustão até ao segundo termopar é desligada a resistência de ignição.

Durante o processo de combustão é necessário recolher os seguintes dados:

- Monitorizar início da produção de gás, observando-se a movimentação do gasómetro, e realizar leituras do gasómetro a cada 10 minutos para o cálculo da vazão média de produção de gases;
- Realizar leituras do analisador de gases a cada 10 minutos, para futuro balanço estequiométrico;
- Coletar a cada 40 minutos aproximadamente uma amostra de gás em saco do tipo *Tedlar*;
- Monitorar a produção de óleo e água, coletando em provetas graduadas, a cada 5 minutos assim que se observa o início da produção de óleo. Este intervalo pode ser aumentado ou diminuído consoante a produção observada.

Assim que se observa a chegada da frente ao final da mistura, indicado pelo aumento da percentagem de oxigénio nos gases produzidos para um nível próximo do ar injetado (cerca de 20%), a injeção de ar é interrompida.

É de salientar que durante a injeção de ar a pressão de injeção vai diminuindo, até que estabiliza num valor ligeiramente superior à pressão de produção. Este decréscimo da pressão de injeção deve ser acompanhado pelo decréscimo da pressão no cilindro de ar sintético, mantendo uma diferença aproximada de 2 a 4 bar.

Por fim, são recolhidos os fluidos produzidos para sua posterior análise.

### **3.3.8. Análise cromatográfica de gases produzidos**

As amostras de gases recolhidas após o início da injeção de ar sintético (a cada 40 minutos) são submetidas a uma análise cromatográfica de modo a determinar a sua composição. O objetivo desta análise é poder determinar qual o período onde a composição do gás se manteve aproximadamente constante, designado período estável. Este será o período sobre o qual se deverão observar os resultados com maior detalhe. Além disso, é a partir da cromatografia gasosa que se determina a concentração de nitrogénio nos gases produzidos, já que o analisador de gases não faz a sua medição e é necessário o seu conhecimento para que se possa efetuar o balanço estequiométrico. Este procedimento é bastante importante, pois é a partir dele que é possível obter determinados parâmetros fundamentais para a análise de resultados (ar requerido, fração ar/combustível, razão H/C, entre outros).

A análise cromatográfica foi efetuada no Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos do CEPETRO-Unicamp.

### **3.3.9. Análise das propriedades do óleo produzido e da mistura remanescente**

Procedendo do mesmo modo como foi determinado o teor de água do óleo original, deve ser determinado o teor de água das amostras de fluidos produzidos através do método de Karl Fischer. O estudo da densidade das amostras é fundamental para aferir o aumento do grau API ao longo do ensaio de combustão. Os ensaios de densidade foram realizados de acordo com o procedimento apresentado anteriormente.



O estudo da saturação residual de óleo e de água é efetuado recorrendo ao Dean-Stark. O princípio de funcionamento é baseado no princípio da imiscibilidade de solventes, nesse caso, o tolueno e a água. Uma amostra da mistura é colocada num saco de papel filtro e colocada sobre um balão onde é colocado o tolueno. O tolueno ao ser aquecido evapora e vai varrendo a amostra, provocando a evaporação do óleo. O condensador existente no topo do equipamento faz com que a água condense e se acumule numa proveta. Como a água tem uma densidade maior que o tolueno, esta acumula-se no fundo da proveta, possibilitando a medição da quantidade de água residual que havia na amostra.

### 3.4. Desenho experimental

Foram programados quatro ensaios experimentais em tubo de combustão onde se fez variar a taxa de injeção de ar. O ensaio onde se utilizou uma taxa de injeção de 3.0 L/min foi realizado no âmbito do doutoramento de (Mercado, Ensaio em Tubo de Combustão Seca, 2013), razão pela qual as pressões de injeção e de produção são diferentes das pressões dos restantes ensaios. O Quadro 6 sintetiza as condições operacionais em que cada ensaio foi realizado.

Quadro 6 - Condições operacionais dos ensaios realizados

Id do Ensaio	<i>ETCIS 1</i>	<i>ETCIS 2</i>	<i>ETCIS 3</i>	<i>ETCIS 4</i>
Taxa de injeção [L/min]	2.5	3.0	3.3	3.8
Pressão de injeção [bar]	17	27	17	17
Pressão de produção [bar]	10	20	10	10

O primeiro procedimento efetuado na campanha experimental foi a determinação do teor em água e da densidade do óleo original. A partir do teor de água no óleo foi possível determinar qual a massa de óleo necessária para produzir uma mistura porosa com as saturações e porosidade pretendidas. O teor em água do óleo original foi aproximadamente de 7 %. Sabendo a densidade do óleo determinou-se o seu grau API. A densidade do óleo foi determinada a partir do densímetro tendo sido obtida uma densidade de 0.966, correspondente a um grau API de 15 °API. A importância do grau API está associada ao facto de durante o processo de combustão as propriedades do óleo vão sendo alteradas, tendo-se registado em ensaios anteriores um aumento do grau API à medida que o óleo vai sendo produzido, ou seja, a qualidade do óleo produzido no final do ensaio deverá ser melhor do que a qualidade do óleo original.

### 3.5. Modelo de simulação

Com base no modelo físico de laboratório foi elaborado um modelo numérico do tubo de combustão onde se procurou reproduzir as mesmas condições utilizadas em laboratório, podendo comparar a resposta do modelo

numérico com os resultados obtidos experimentalmente. Neste capítulo são apresentadas as principais etapas do ajuste do modelo numérico construído utilizando o simulador numérico STARS® da CMG, versão 2010.10.

O objetivo da modelação do tubo de combustão serve para calibrar os parâmetros da combustão para o meio e o óleo utilizados no modelo de simulação. O processo de simulação da escala de campo para a escala de reservatório segue a seguinte metodologia:

- Simulação do tubo de combustão em malha radial e cartesiana: pretende-se avaliar qual a diferença na resposta do processo de combustão na alteração da malha radial para a malha cartesiana, uma vez que a geometria do tubo de combustão difere dos elementos de volume do reservatório;
- Simulação 1D: não é considerada a camisa de aço que induz uma transferência de calor para o meio que não existe no reservatório. As dimensões das células são alteradas de modo a manter a relação de aspecto das células do reservatório. O escoamento de fluidos passa a ser efetuado na direção horizontal;
- Simulação 2D: é considerado o modelo de um quarto de *five spot* para a modelação em 2D;
- Simulação 3D: modelo de campo.

As principais etapas realizadas na presente simulação numérica foram as seguintes:

- Criação de um modelo de fluidos representativo do óleo utilizado;
- Criação do modelo numérico do tubo representativo do modelo físico utilizado na realização dos ensaios experimentais satisfazendo os seguintes critérios:
  - Ajuste das condições operacionais no modelo numérico;
  - Ajuste do perfil de temperatura ao longo do tubo de combustão;
  - Ajuste da velocidade da frente de combustão e do consumo de combustível;
  - Ajuste da produção de fluidos.

De seguida é apresentada a metodologia utilizada na elaboração do modelo de tubo de combustão.

### **3.5.1. Modelo de fluidos**

Dada a necessidade de obter um modelo de fluidos que representasse o comportamento do óleo utilizado na campanha experimental recorreu-se ao software de modelação de fluidos WinProp da Computer Modelling Group (CMG), versão 2012.10. Foi utilizada a equação de estado de Peng Robinson de 1978 e foi ajustada aos dados fornecidos por (Mercado & Trevisan, Modelo de Fluidos de um óleo da Bacia de Espírito Santo, 2012)

O modelo de fluidos criado apresenta propriedades semelhantes ao óleo usado nos ensaios sendo caracterizado por 3 pseudocomponentes:  $H_2StoC_3$ ,  $IC_{4toC_{19}}$  e  $C_{20+}$ .

### 3.5.2. Descrição do modelo de simulação

O tubo de combustão foi representado por com uma *grid* radial de 4x1x100 divisões nas direções  $r$ ,  $\theta$  e  $k$ , respetivamente, totalizando 100 centímetros de comprimento, 7.31 centímetros de diâmetro exterior e 6.93 centímetros de diâmetro interior do tubo de combustão. O volume ocupado pelos tubos-guia dos termopares foi desprezado. A completação dos poços injetor e produtor foi efetuada nas células (1, 1, 2) e (1, 1, 99), respetivamente, e foi considerado um escoamento linear e adotou-se uma geometria cilíndrica com uma base circular com um raio de 0.5 centímetros.

No modelo foi considerada uma pressão de 11.64 bar, correspondendo à pressão média do ensaio durante o período estável, e uma temperatura de média 51 °C, que corresponde à temperatura média da mistura antes da injeção de ar.

Para as propriedades do meio poroso e do tubo de combustão foram utilizadas as propriedades utilizadas por (Mercado, Numerical Simulation of a Dry Combustion Tube Test for a Brazilian Heavy Oil, 2013). Foi considerada uma permeabilidade de 15303 mD para o meio poroso e para células que simulam a areia colocada na base e no topo do tubo (células 1:3, 1, 2:5 e células 1:3, 1, 98:99), foi considerada uma permeabilidade de  $1 \times 10^7$  milidarcy. A porosidade utilizada foi de 43.14 %. As propriedades térmicas do tubo e do meio poroso são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Propriedades da mistura porosa e da parede do tubo de combustão

	<i>Meio poroso</i>	<i>Tubo de combustão</i>
<b>Porosidade [%]</b>	46.02	0
<b>Permeabilidade Absoluta [mD]</b>	15 303	0
<b>Condutividade Térmica da Rocha [J/m-min-°C]</b>	458	804
<b>Condutividade Térmica da Fase Óleo [J/m-min-°C]</b>	8	0
<b>Condutividade Térmica da Fase Água [J/m-min-°C]</b>	37	0
<b>Condutividade Térmica da Fase Gás [J/m-min-°C]</b>	2	0
<b>Capacidade Térmica Volumétrica da Formação [J/m<sup>3</sup>.°C]</b>	$2,35 \times 10^6$	$1.93 \times 10^6$

As curvas de permeabilidade foram utilizadas de acordo com o *template* do STARS, fazendo-se algumas adaptações para o caso de estudo, nomeadamente adequar o volume de óleo residual às curvas em questão. As curvas utilizadas são apresentadas na Figura 25 e Figura 26.

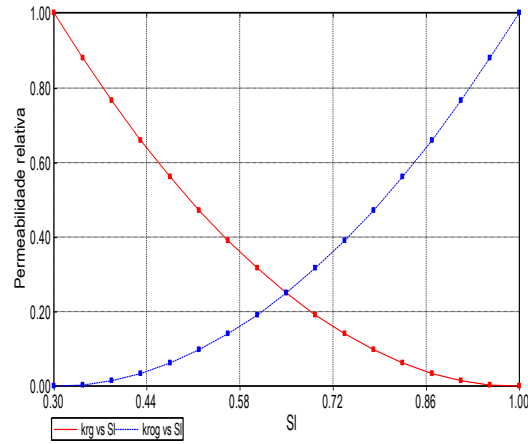
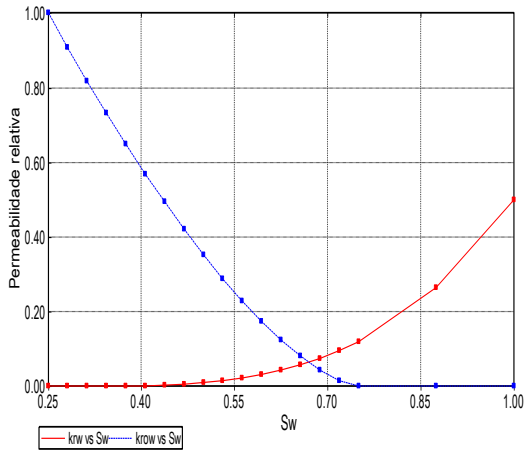


Figura 25 - Curva de permeabilidade relativa água-óleo      Figura 26 - Curva de permeabilidade relativa gás-líquido

O modelo de fluidos foi carregado no STARS e foram adicionados outros componentes ao modelo existente: água, oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono. A água e o dióxido de carbono foram introduzidos na medida em que ambos são produtos das reações que ocorrem durante o processo de combustão. O nitrogênio e o oxigênio são os componentes do ar sintético (80 % de nitrogênio e 20 % de oxigênio) que é injetado ao longo do ensaio, além de fazerem parte dos gases efluentes. A taxa de injeção utilizada foi de 3.8 L/min.

De salientar que dada a pequena concentração de monóxido de carbono produzido no ensaio experimental optou-se por não o considerar no modelo de fluidos, já que iria aumentar o tempo computacional do modelo, sendo considerado apenas a produção de dióxido de carbono. A saturação inicial de fluidos respeitou a saturação de fluidos utilizada nos ensaios experimentais: 50% de óleo, 25 % de água e 25 % de gás.

De acordo com o que se apresentou no capítulo anterior, durante o processo de combustão ocorrem diversas reações químicas. O modelo de reações utilizado é composto por um conjunto de quatro reações que permitem caracterizar este processo. Estas reações são apresentadas no Quadro 8. Os parâmetros de cinética apresentados no Quadro 9 foram os mesmos de (Mercado & Trevisan, Numerical Simulation of a Dry Combustion Tube Test for a Brazilian Heavy Oil, 2013).

Quadro 8 - Estequiometria das equações utilizadas no modelo do tubo de combustão

<b>Craqueamento</b>	$1,0000 [C_{20+}] \rightarrow 1,6823[IC_4toC_{19}] + 24,5202 [Coque]$
<b>Oxidação do Coque</b>	$1,0000 [Coque] + 1,2692 [O_2] \rightarrow 0,5762 [H_2O] + 0,9863 [CO_2]$
<b>Oxidação da Fração Pesada</b>	$1,0000 [C_{20+}] + 62,2442 [O_2] \rightarrow 28,2575 [H_2O] + 48,3663 [CO_2]$
<b>Oxidação da Fração Média</b>	$1,0000 [IC_4toC_{19}] + 18,4995 [O_2] \rightarrow 8,3984 [H_2O] + 14,3749 [CO_2]$

Quadro 9 - Propriedades das reações químicas (Mercado & Trevisan, Numerical Simulation of a Dry Combustion Tube Test for a Brazilian Heavy Oil, 2013)

<b>Parâmetros</b>	<i>Fator de Frequência</i>	<i>Energia de ativação</i>	<i>Entalpia</i>
<b>Craqueamento</b>	3475	62180	0
<b>Oxidação do coque</b>	25.6	49700	442600
<b>Oxidação da Fração Pesada</b>	7159100	71488	22087000
<b>Oxidação do Média</b>	71591	149370	6564600



## 4. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo serão apresentadas as condições em que cada ensaio foi realizado, assim como será efetuada uma análise aos resultados dos quatro ensaios experimentais. Da mesma forma são apresentados os resultados da simulação e ajuste do modelo numérico aos resultados do ensaio experimental onde foi utilizada uma taxa de injeção de 3.8 L/min.

### 4.1. Resultados experimentais

Os ensaios em tubo de combustão pretendem representar um elemento do reservatório a uma distância tal do poço injetor de tal modo que não se sintam efeitos do processo de ignição. Por este motivo a análise dos resultados obtidos ao longo dos ensaios é efetuada apenas num período onde estes efeitos não tenham influência no processo de combustão, designado por período estável. Para tal, o período estável é considerado onde a produção de gases é constante e os perfis da frente de temperatura são semelhantes, sendo apenas nesse período que os resultados são avaliados.

De acordo com o que se referiu anteriormente, o ensaio em tubo de combustão permite o estudo dos perfis de temperatura dos quais é determinada a velocidade de propagação das frentes de combustão e condensação. Adicionalmente permitem obter dados como, a taxa de produção de gases, água e óleo, a composição dos gases produzidos, o teor de água no óleo produzido e o fator de recuperação. Estes dados permitem efetuar a determinação de outros parâmetros, como a razão aparente de Hidrogénio/Carbono, razão Ar/Combustível, razão Oxigénio/Combustível, fração de Oxigénio utilizado. A análise destes elementos é realizada de seguida para cada ensaio.

#### 4.1.1. Resultados do ensaio ETCIS-1

A realização do ensaio *ETCIS-1* teve como objetivo estudar o comportamento do processo de combustão quando se utiliza uma taxa de injeção de ar sintético abaixo do valor padrão (3.0 L/min), tendo sido utilizada uma taxa de 2.5 L/min (TI 2.5 L/min).

O ensaio durou cerca de 682 minutos (aproximadamente 11h37min) e não foram registadas quaisquer anormalidades no seu decorrer. O período estável do ensaio ocorreu entre os 120 e os 310 minutos. Na Figura 27 é apresentado um cronograma com as etapas mais relevantes do ensaio.

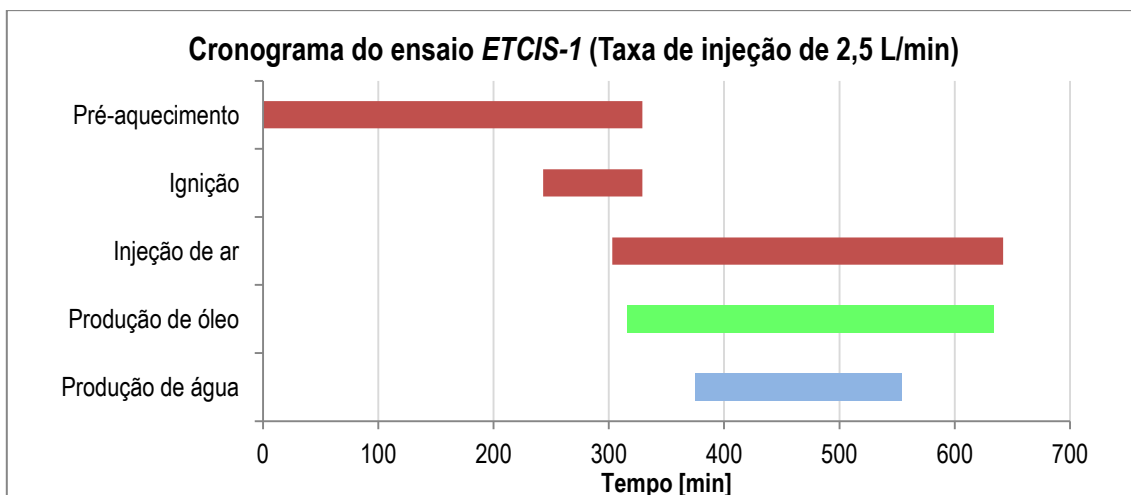


Figura 27 - Cronograma do ensaio ETCIS-1 (TI 2.5 L/min)

A frente de combustão foi estável e contínua durante todo o ensaio, apresentado a velocidade de propagação, durante o período estável, de 4,1 m/dia (0,0029 m/min). De acordo com o Gráfico 1 é possível observar que a temperatura da frente de combustão foi decrescendo ligeiramente ao longo do ensaio, o que pode indicar uma perda de energia ao longo da combustão. Contudo a temperatura manteve-se acima dos 400 °C, indicando a predominância de reações de oxidação de alta temperatura. No Gráfico 1 é também apresentada a posição da frente de combustão ao longo do ensaio.

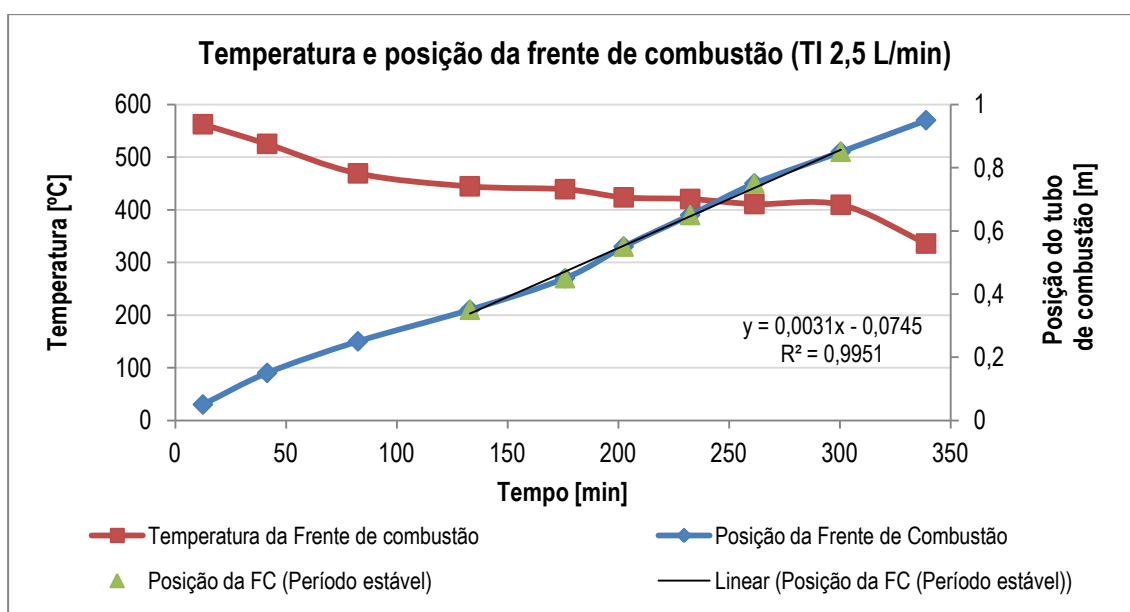


Gráfico 1 - Temperatura e Posição da Frente de combustão ao longo do ensaio ETCIS-1 (TI 2.5 L/min)

O decréscimo da temperatura também se observa no Gráfico 2 e no Gráfico 3, onde são apresentados os perfis de temperatura ao longo do ensaio. O Gráfico 2 apresenta a temperatura registada em pontos fixos em função do tempo. No Gráfico 3 os dados da sonda fixa são combinados com os dados registados pela sonda móvel, de modo a refinar a temperatura entre os termopares da sonda fixa, permitindo uma melhor definição do pico de temperatura na frente de combustão. Neste gráfico cada linha está associada a um tempo específico, que se



inicia com a injeção de ar, de modo a apresentar o perfil de temperatura para esse tempo ao longo do tubo de combustão.

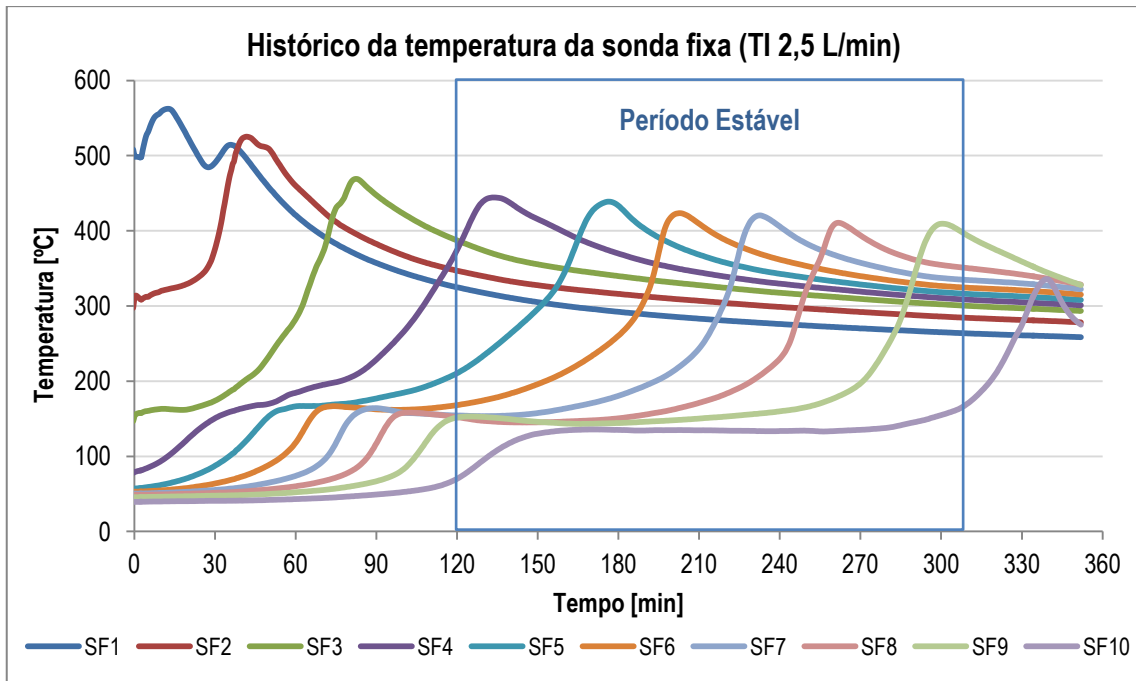


Gráfico 2 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio ETCIS-1 (TI 2.5 L/min)

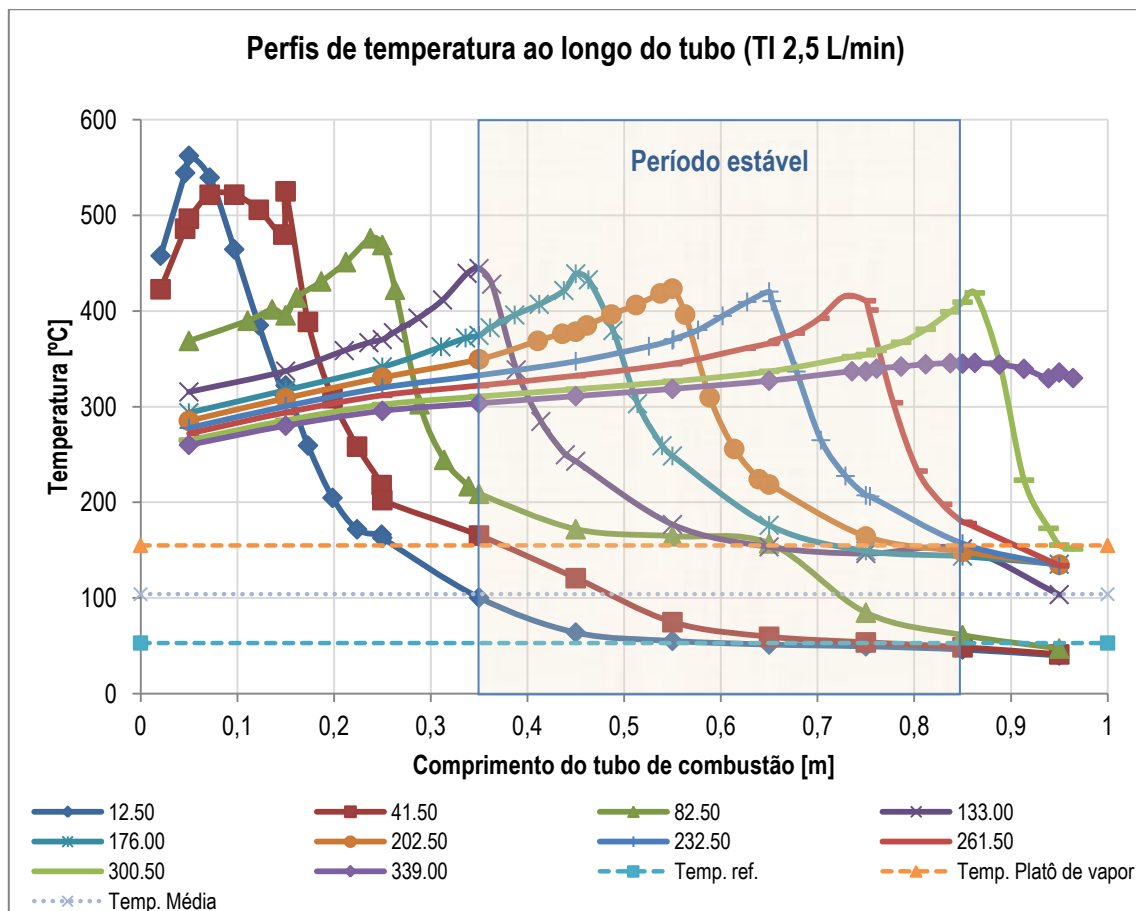


Gráfico 3 - Perfis de temperatura ao longo do tubo para o ensaio ETCIS-1 (TI 2.5 L/min)

No Gráfico 3 são também apresentadas as temperaturas de referência e do patamar de vapor, 53 °C e 155 °C, respectivamente. Além disso é apresentada a temperatura média de 104 °C, medida entre a temperatura do patamar de vapor e a de referência. Para cada valor da temperatura média observado regista-se o tempo correspondente a cada perfil e a distância correspondente, permitindo a determinação da velocidade da frente de condensação. De acordo com o Gráfico 4 a velocidade da frente de condensação foi de 7.8 m/dia (0.0053 m/min) o qual permaneceu aproximadamente constante ao longo do ensaio.

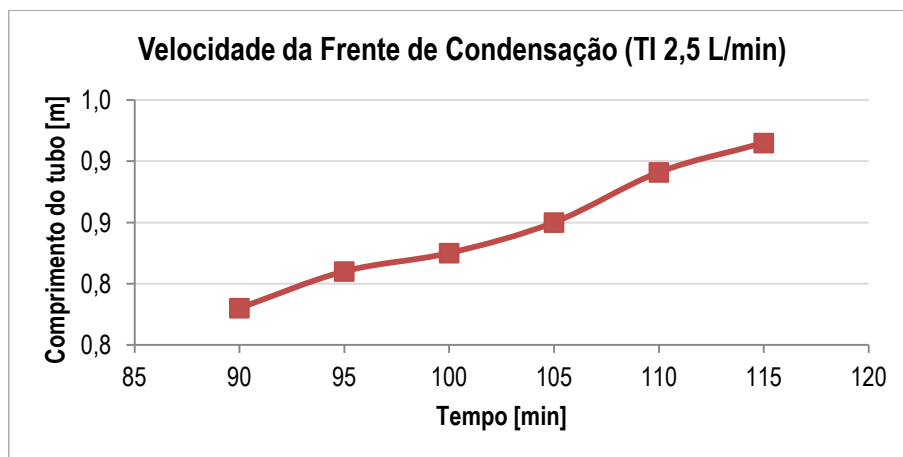


Gráfico 4 - Posição da frente de condensação no ensaio *ETCIS-1* (TI 2.5 L/min)

A produção de óleo iniciou-se quase de imediato após o início da injeção de ar sintético, seguida de um período de estagnação na produção de fluidos. A primeira gota de água foi identificada por volta dos 100 minutos, momento em que se regista um aumento da produção total de fluidos. O volume efetivo de água e de óleo produzidos foram determinados após a análise do teor em água de cada amostra. No Gráfico 5 é apresentada a produção de fluidos ao longo do ensaio.

A massa de fluidos produzida foi de 984,57 grama, que representa 91 % da massa de fluidos existentes na mistura inicial. O volume de fluidos produzido foi de 1030,00 mililitros (702,69 mililitros de óleo e 327,31 mililitros de água), que representa 93 % do volume de fluidos inicial introduzido no tubo de combustão. Com base nestes resultados inferiu-se um fator de recuperação de óleo de 95 %.

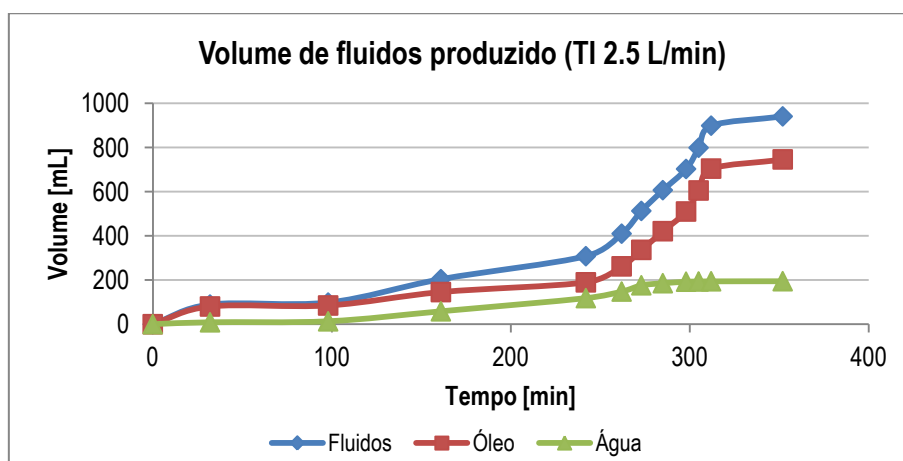


Gráfico 5 - Produção acumulada de fluidos no *ETCIS-1* (TI 2.5 L/min)

No que respeita à qualidade do óleo produzido observou-se um aumento significativo do grau API, tendo se obtido 19 °API na última amostra, em comparação com o óleo original que apresenta 15 °API. No Gráfico 6 é apresentado o grau API de algumas amostras recolhidas no ensaio. É importante referir que a aferição da densidade foi referente ao fluido produzido, ou seja, havia a presença de água, pelo que a densidade medida é ligeiramente maior que a densidade real do óleo. Por esse motivo foi efetuada a correção do grau API a partir da densidade do óleo original, do teor de água e da densidade do fluido medida.

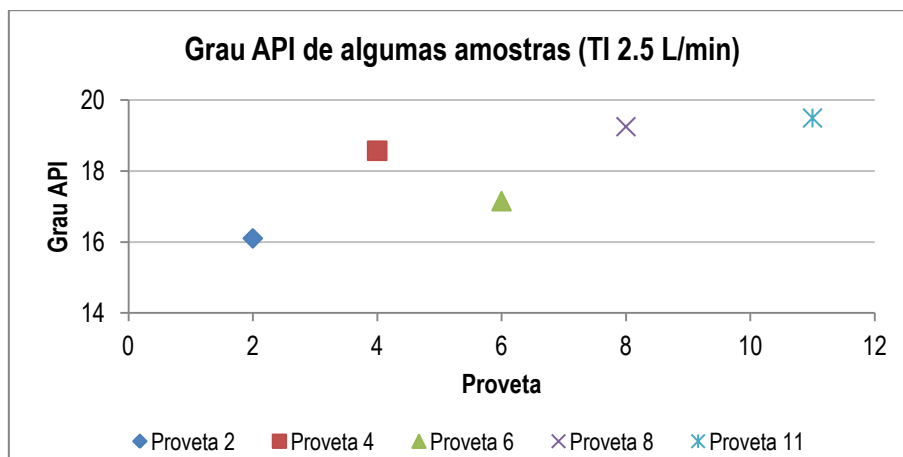


Gráfico 6 - Grau API de algumas provetas do ensaio *ETCIS-1* (TI 2.5 L/min)

A produção de gases foi constante ao longo do tempo, tendo sido registada uma taxa aproximadamente de 2,7 L/min. A diferença entre a taxa de injeção e a taxa de produção de gases está relacionado com a descalibração do gasómetro. No Gráfico 7 é apresentada a taxa de produção de gases e a produção acumulada de gases ao longo do ensaio.

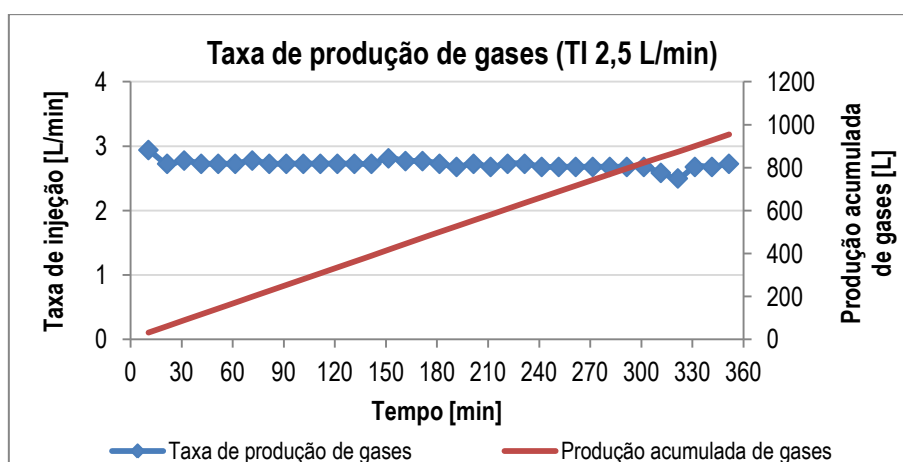


Gráfico 7 - Taxa de produção de gases e produção acumulada de gases ao longo do ensaio *ETCIS-1* (TI 2.5 L/min)

A produção de gases foi consistente com o processo de combustão com predominância das reações de oxidação a alta temperatura, apresentando uma percentagem de oxigénio muito reduzida, sempre abaixo de 3 %, e de N<sub>2</sub> acima dos 80 %. As concentrações dos gases produzidos obtidas a partir do analisador de gases e do cromatográfico são apresentadas no Gráfico 8 e no Gráfico 9, respetivamente.

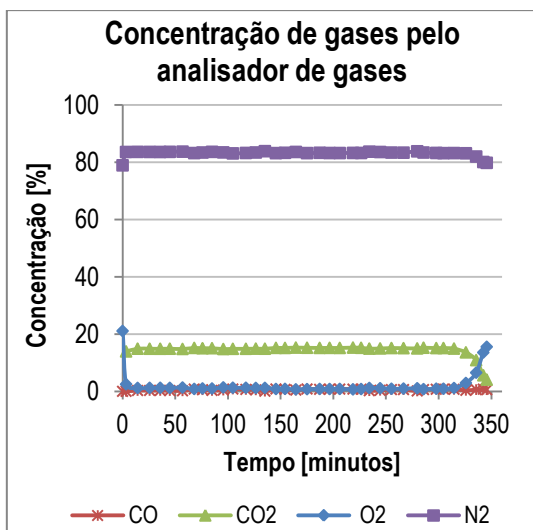


Gráfico 8 - Concentrações de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> registadas pelo analisador de gases ao longo do ensaio ETCIS-1 (TI 2.5 L/min)

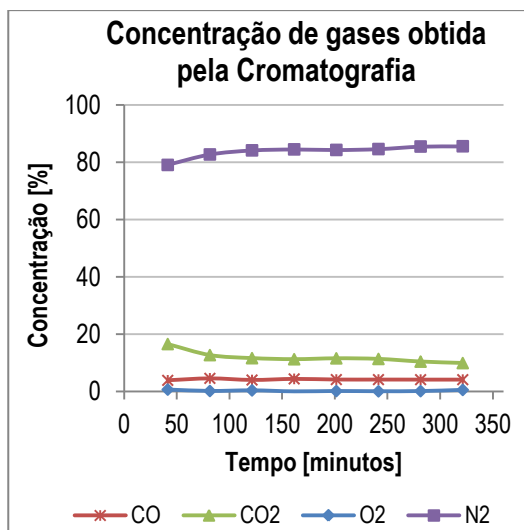


Gráfico 9 - Concentrações de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> ao longo do ensaio obtidas a partir do cromatógrafo - ETCIS-1 (TI 2.5 L/min)

No Quadro 10 são apresentadas as concentrações médias de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no período estável obtidas pelos dados do analisador de gases e do cromatógrafo. A partir da concentração dos gases produzidos são determinados diversos parâmetros que permitem a caracterização da combustão, contudo optou-se por apresentá-los apenas aquando da sua comparação com os parâmetros obtidos para os restantes ensaios.

Quadro 10 - Concentrações médias de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia (TI 2.5 L/min)

Concentração média no período estável (%)	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Analisador de gases	83.4	0.6	15.2	0.9
Cromatografia	84.3	3.9	11.8	0.1

Os resultados obtidos na análise do teor de óleo residual da mistura final indicam um teor de óleo residual na mistura final inferior a 1 %. O baixo teor de óleo na mistura final era espectável dado que esta não apresentou qualquer resíduo sólido com aparência de coque. Na Figura 28 são apresentadas amostras da mistura final recolhidas a cada 20 centímetros, de onde se observa que a mistura apresenta uma coloração mais clara no topo do tubo e vai progredindo para uma cor mais escura na sua base. Isto está relacionado com as maiores temperaturas registadas no topo do tubo de combustão, e é indicativo de que houve um ótimo varrimento da frente de combustão.

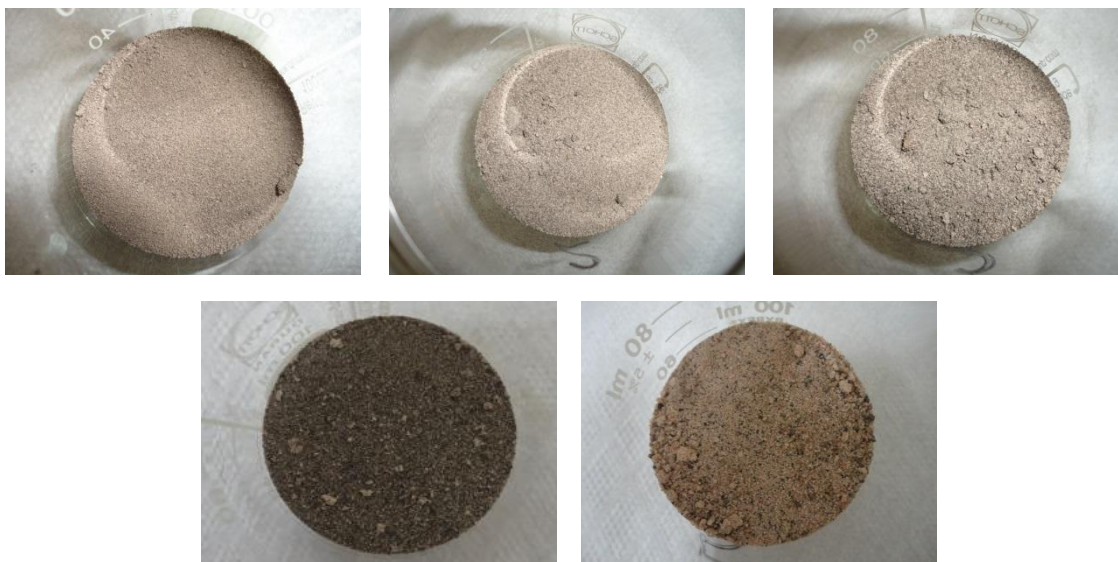


Figura 28 - Amostras da mistura após a combustão - Em cima: a 10 centímetros da base do tubo (à esquerda); a 30 centímetros da base (ao centro); a 50 centímetros da base (à direita). Em baixo: a 70 centímetros da base (à esquerda); a 90 centímetros da base (à direita) - *ETCIS-1* (TI 2.5 L/min)

#### 4.1.2. Resultados do ensaio ETCIS-2

No ensaio ETCIS-2 foi utilizada a taxa de injeção de 3.0 L/min, a mais utilizada em ensaios de tubo de combustão. O ensaio durou cerca de 642 minutos (aproximadamente 10h40min), sendo mais rápido que o ensaio com a taxa de 2,5 L/min, tal como era esperado. Na Figura 29 é apresentado o cronograma do ensaio ETCIS-2.

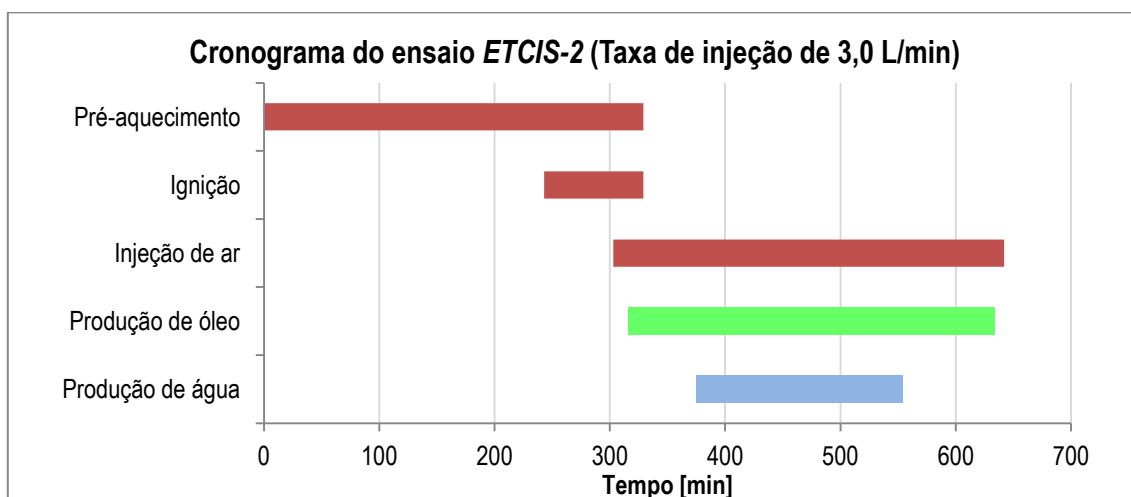


Figura 29 - Cronograma do ensaio ETCIS-2 (TI 3.0 L/min)

A frente de combustão foi estável e contínua ao longo do ensaio. A velocidade de propagação foi de 4.9 m/dia (0.0034 m/min) no período estável que decorreu entre os 110 e os 290 minutos. A temperatura registada foi superior a 400 °C, o que indica a predominância de reações de oxidação de alta temperatura. O Gráfico 10 apresenta a temperatura e a posição da frente de combustão.

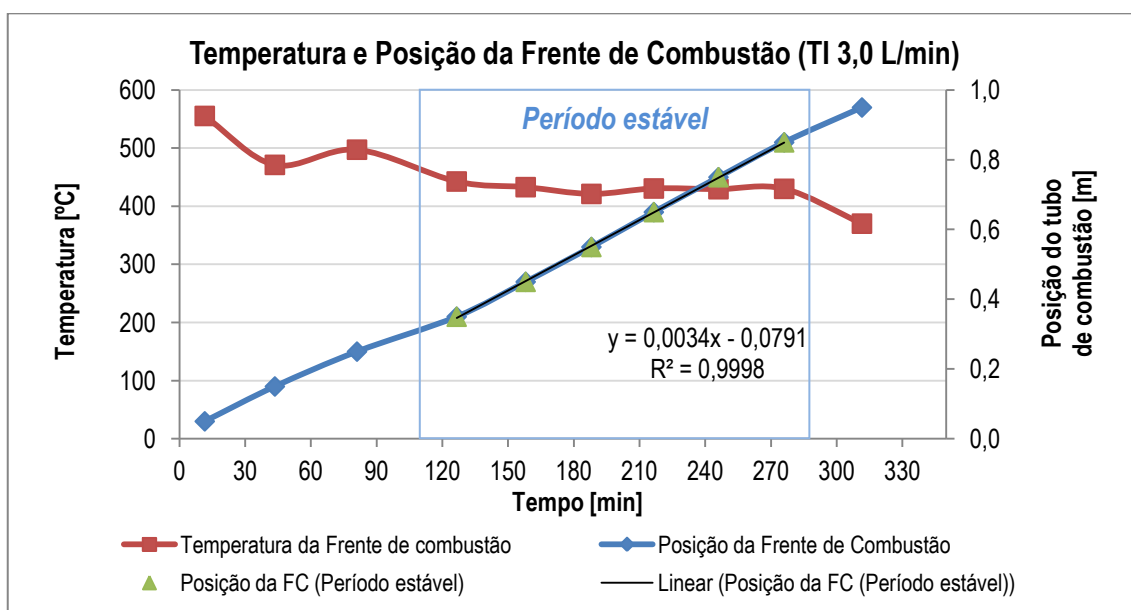


Gráfico 10 - Temperatura e posição da frente de combustão ao longo do ensaio ETCIS-2 (TI 3.0 L/min)

No Gráfico 11 são apresentados os perfis de temperatura ao longo do ensaio. O Gráfico 12 apresenta o perfil de temperatura ao longo do tubo de combustão com os dados das duas sondas.

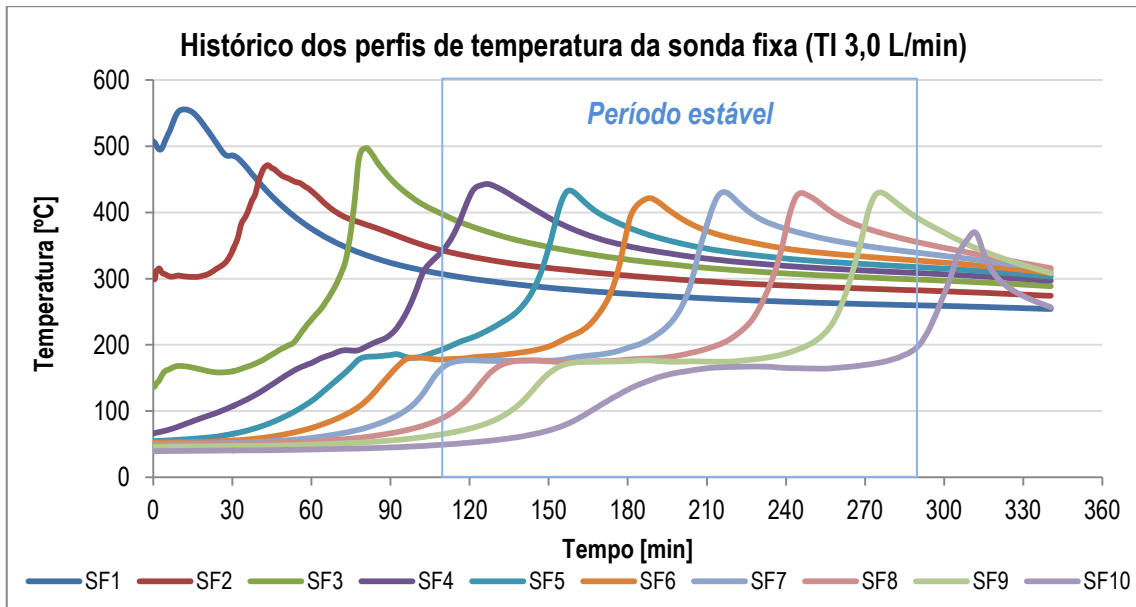


Gráfico 11 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio ETCIS-2 (TI 3.0 L/min)

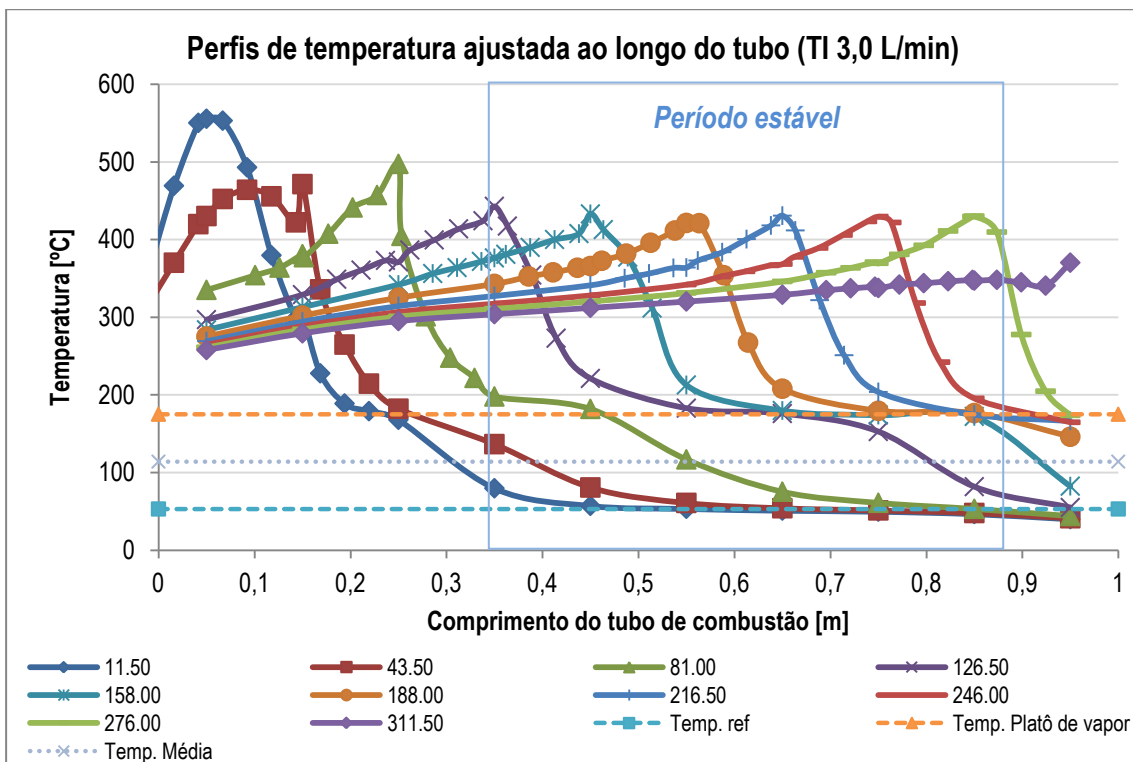


Gráfico 12 - Perfis de temperatura ajustadas ao longo do tubo ETCIS-2 (TI 3.0 L/min)

Pelos gráficos atrás apresentados observa-se a existência de uma frente de combustão que progride constantemente ao longo do tubo. O Gráfico 12 permite ainda observar um patamar de vapor regular com temperatura aproximada de 175 °C. A velocidade da frente de condensação obtida foi de 7.6 m/dia (0.0044 m/min), de acordo com o Gráfico 13.

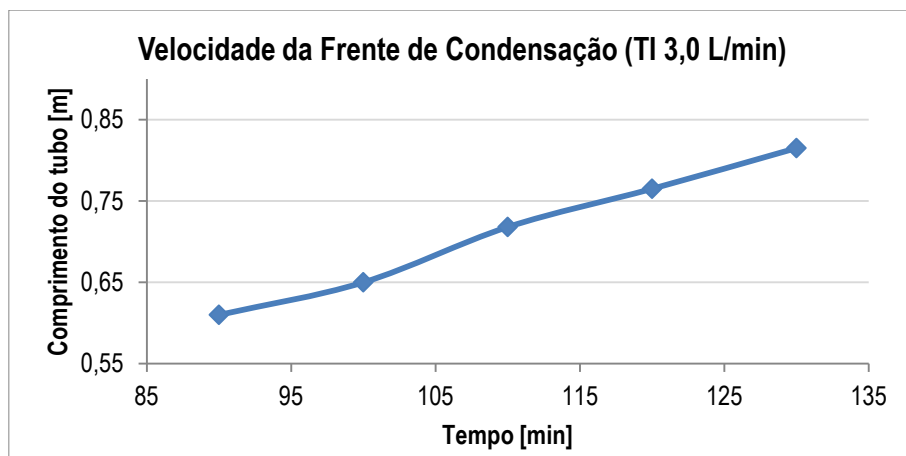


Gráfico 13 - Posição da frente de condensação no ensaio *ETCIS-2* (TI 3.0 L/min)

À semelhança do ensaio *ETCIS-1*, a produção de óleo antecedeu a produção de água, no entanto neste ensaio a produção de fluidos, apresentada no Gráfico 14, foi constante ao longo de todo o ensaio. A massa de fluidos produzidos foi de 985.44 g, 10 % menor que a quantidade inicial utilizada na mistura, 1091.79 g. O volume de fluidos produzido foi de 972 mililitros (623.76 mililitros de óleo e 348.24 mililitros de água), 132.00 mililitros a menos que o volume inicial. O fator de recuperação de óleo foi de 85 %.

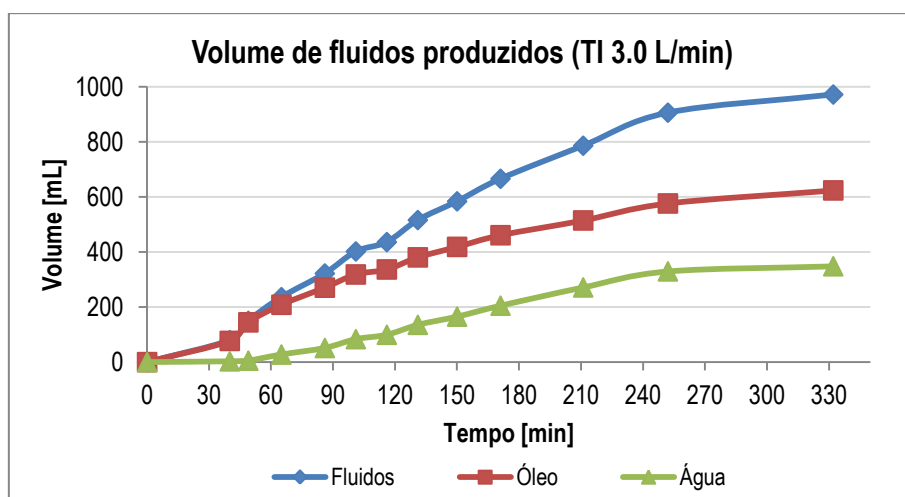


Gráfico 14 - Produção acumulada de fluidos do ensaio *ETCIS-2* (TI 3.0 L/min)

O grau API foi determinado para 5 amostras, mostrando que este vai aumentando gradualmente ao longo do tempo, excepto na última amostra cuja o valor excede 8 °API relativamente ao óleo original, de acordo com o que se pode observar no Gráfico 15.



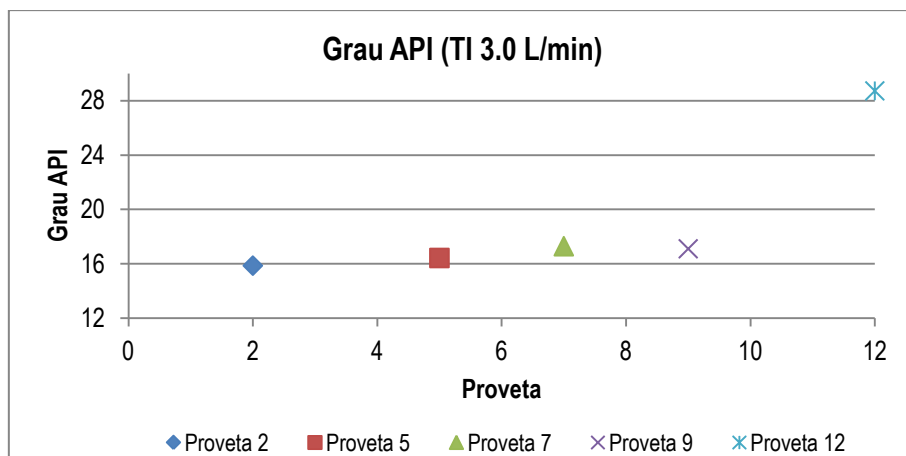


Gráfico 15 - Grau API de algumas provetas do ensaio *ETCIS-2* (TI 3.0 L/min)

A produção de gases iniciou-se quase de imediato com a injeção de ar sintético, tendo sido registada uma taxa média de 3 L/min. No Gráfico 16 é apresentada a taxa de produção de gases assim como a produção acumulada de gases. A taxa de produção de gases foi praticamente constante, o que se traduz numa produção contínua de gases ao longo do ensaio.

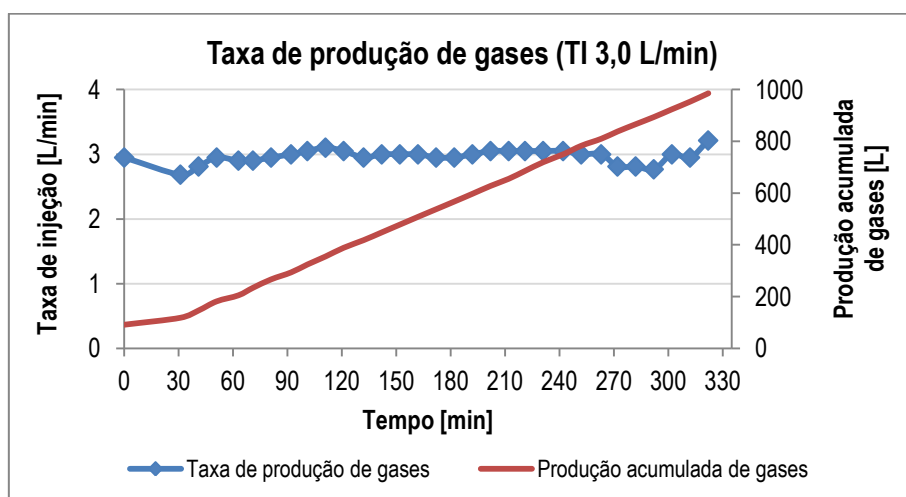


Gráfico 16 - Taxa de produção de gases e produção acumulada de gases ao longo do ensaio *ETCIS-2*

No Gráfico 17 e no Gráfico 18 são apresentadas as concentrações de gases registadas pelo analisador e pelo cromatógrafo, respetivamente. Como se referiu anteriormente, a análise das concentrações de gases é também utilizada para o cálculo de alguns parâmetros da combustão (razão Hidrogénio/Carbono, consumo de combustível, razão ar-combustível, ar requerido, entre outros) no período estável. No Quadro 11 são apresentadas as concentrações médias de  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  e  $O_2$  no período estável obtidas pelos dados do analisador de gases e do cromatógrafo.

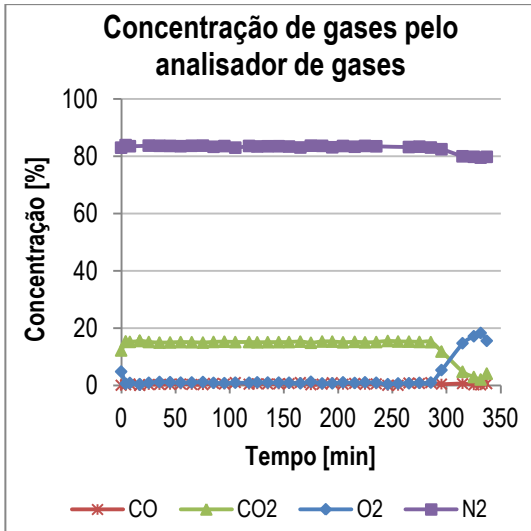


Gráfico 17 - Concentrações de O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> registadas pelo analisador de gases ao longo do ensaio ETCIS-2

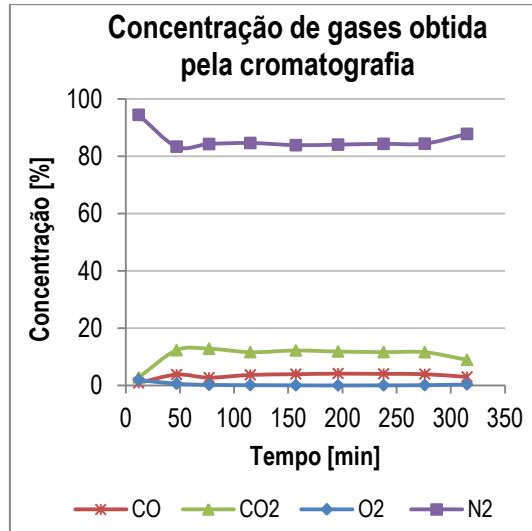


Gráfico 18 - Concentrações de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> obtidas a partir do cromatógrafo - ETCIS-2

Quadro 11 - Concentrações médias de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia (TI 3.0 L/min)

Concentração média no período estável [%]	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Analisador de gases	83.4	0.6	15.2	0.9
Cromatografia	84.3	3.9	11.8	0.1

O teor de óleo residual em todas as amostras da mistura final foi inferior a 0,5 %. Na Figura 30 são apresentadas as amostras da mistura recolhidas do tubo após o ensaio de combustão que foram utilizadas para a determinação do teor residual de óleo.

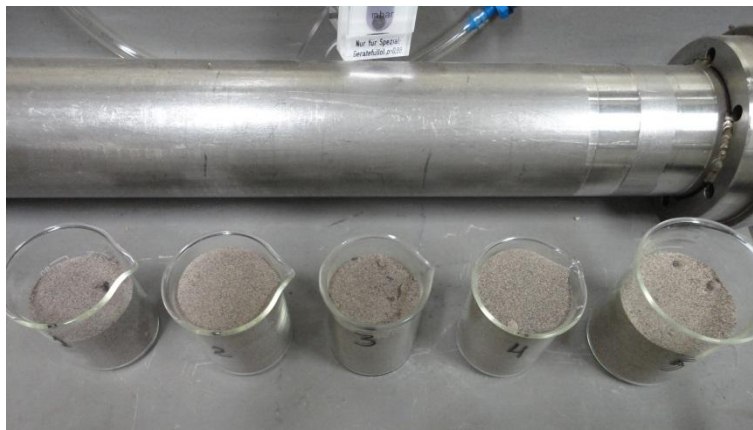


Figura 30 - Amostras da mistura após a combustão do ensaio ETCIS-2 (TI 3.0 L/min)

### 4.1.3. Resultados do ensaio ETCIS-3

O ensaio ETCIS-3 pretendeu estudar o comportamento da combustão face ao aumento da taxa de injeção de ar sintético, tendo o ensaio sido efetuado com uma taxa de injeção de 3.3 L/min. O ensaio durou cerca de 593 minutos (aproximadamente 9h53min). Na Figura 31 é apresentado um cronograma com as etapas mais relevantes no ensaio.

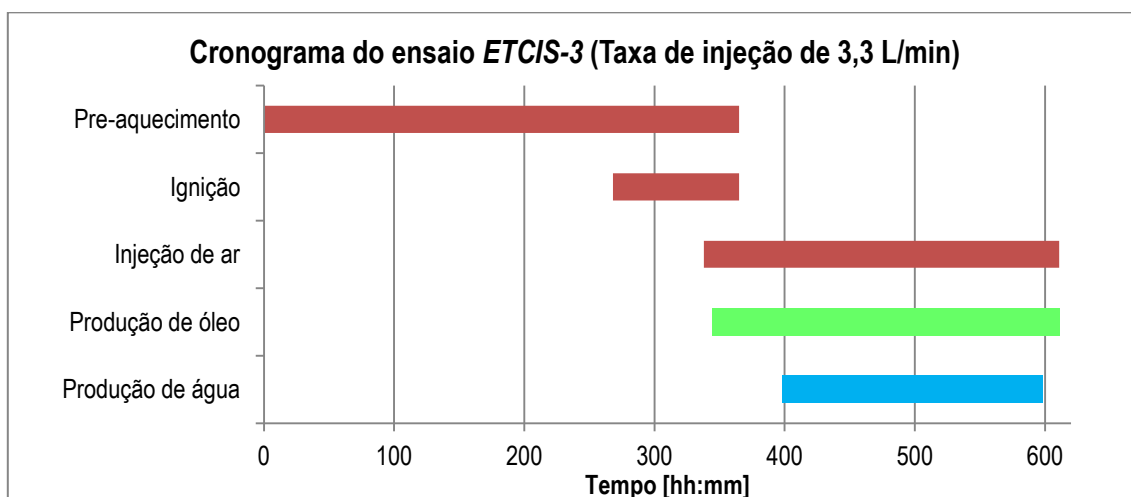


Figura 31 - Cronograma do ensaio ETCIS-3 (Taxa de injeção de 3.3 L/min)

A velocidade da frente de combustão foi constante ao longo de todo o ensaio, aproximadamente 5,47 m/dia (0,0038 m/min). No Gráfico 19 é apresentada a temperatura e a posição da frente de combustão ao longo do ensaio. O período estável do ensaio foi considerado entre os 80 e os 240 minutos.

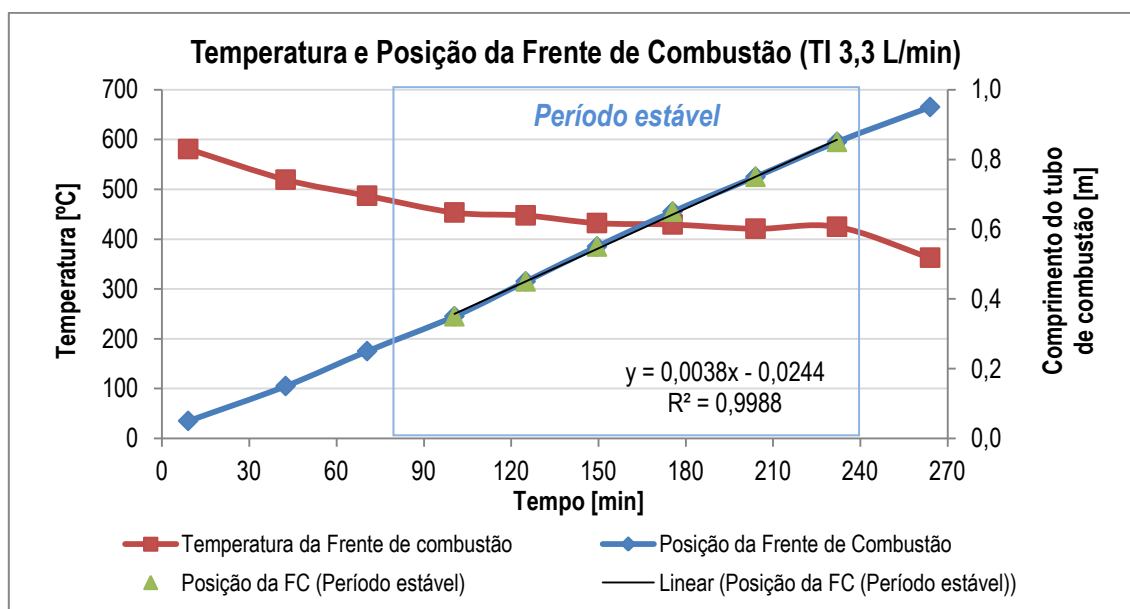


Gráfico 19 - Temperatura e posição da frente de combustão do ensaio ETCIS-3 (TI 3.3 L/min)

No Gráfico 20 e no Gráfico 21 são apresentados os perfis de temperatura ao longo do tempo e ao longo do tubo de combustão, respectivamente.

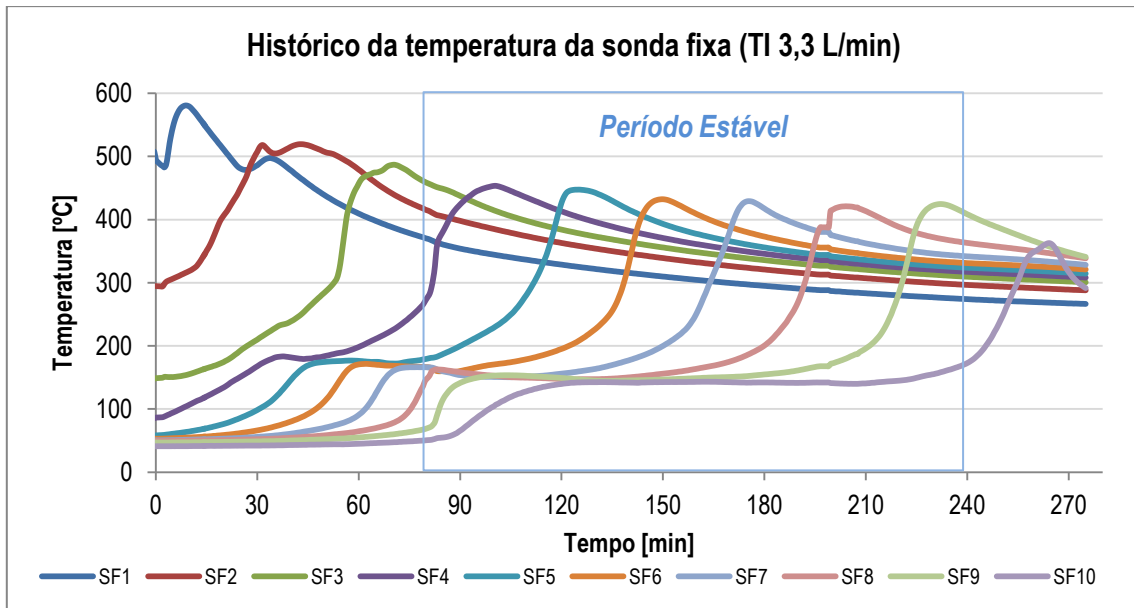


Gráfico 20 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio ETCIS-3 (TI 3.3 L/min)

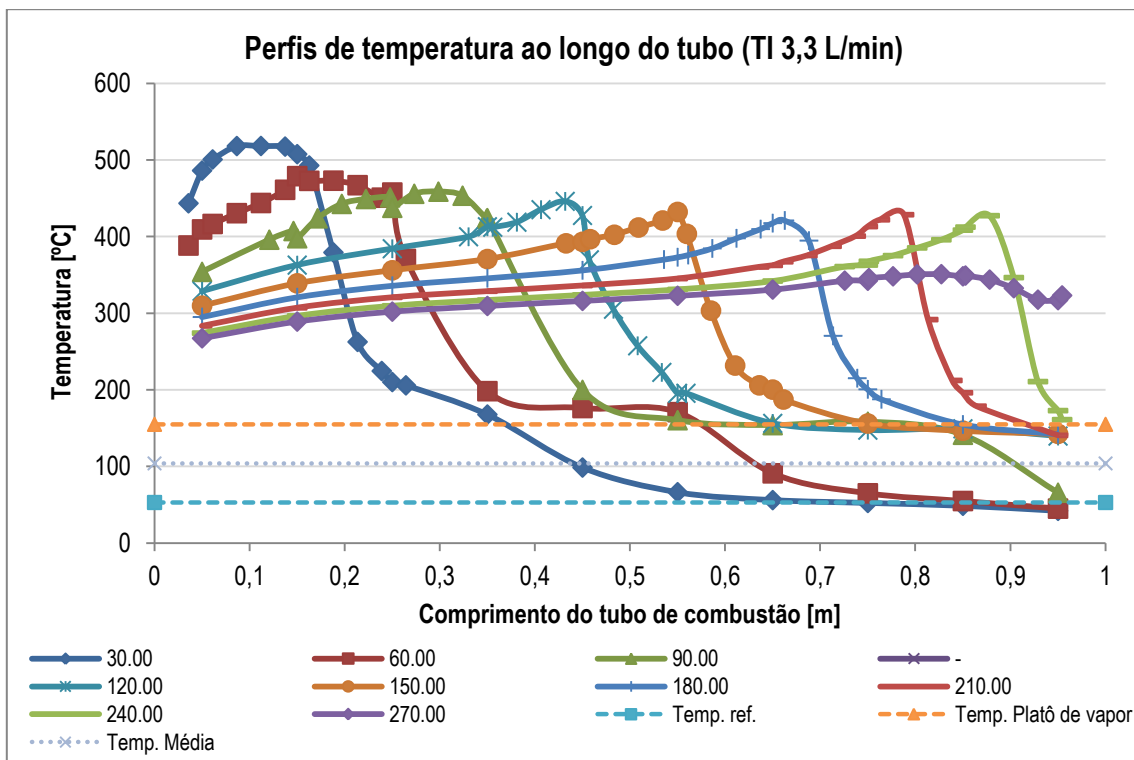


Gráfico 21 - Perfis de temperatura ao longo do tubo com as sondas fixa e móvel ETCIS-3 (TI 3.3 L/min)

No Gráfico 21 são apresentadas as temperaturas de referência e do patamar de vapor, 53 °C e 155 °C respectivamente. A velocidade da frente de condensação, apresentada no Gráfico 22, foi de 7.5 m/dia (0.0052 m/min).

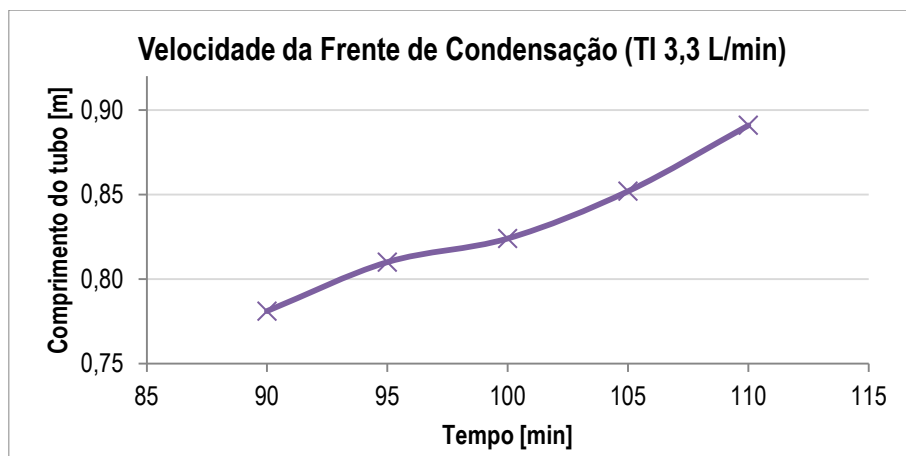


Gráfico 22 - Posição da frente de condensação no ensaio ETCIS-3 (TI 3.3 L/min)

A produção acumulada de fluidos é apresentada no Gráfico 23, de onde se observa que houve uma produção constante de fluidos até que por volta dos 150 minutos a produção de água estabilizou e houve uma produção acentuada de óleo. Esta situação pode indicar que o banco de água se encontra a jusante do banco de óleo.

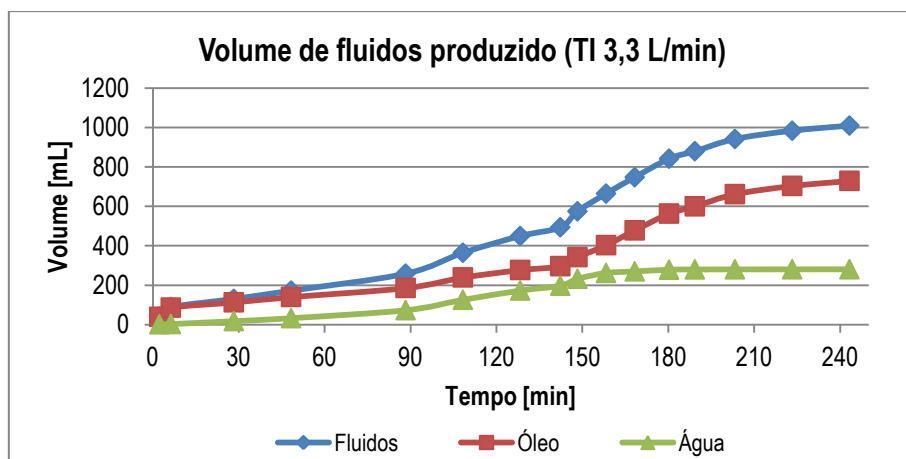


Gráfico 23 - Produção acumulada de fluidos no ensaio ETCIS-3 (TI 3.3 L/min)

A massa de fluidos produzidos, 905.55 g, foi 16 % menor que a massa de fluidos na mistura original, 1075.76 g. A partir do volume de fluidos produzidos, 1009.00 mililitros (678.57 mililitros de óleo e 330.43 mililitros de água), determinou-se o fator de recuperação do ensaio, que foi de 92 %.

A taxa de produção de gases permaneceu constante ao longo de todo o ensaio, tal como se observa no Gráfico 24.

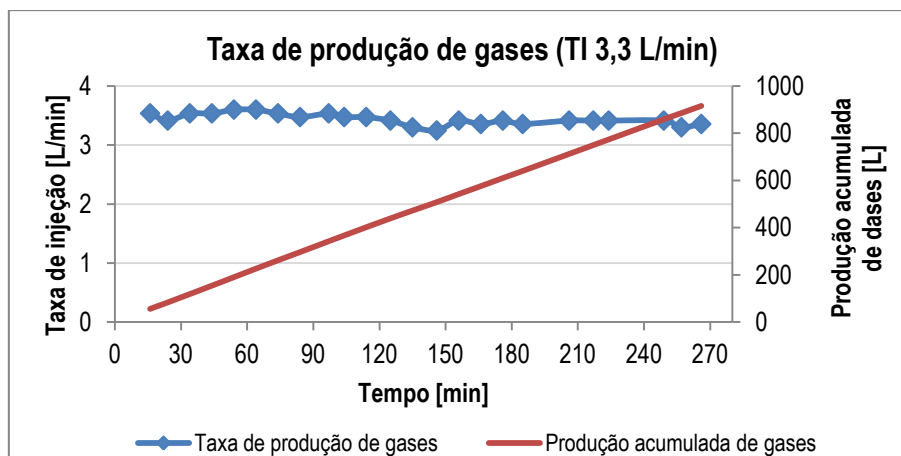


Gráfico 24 - Taxa de produção de gases e respectiva produção acumulada no ensaio ETCIS-3 (TI 3,3 L/min)

As concentrações de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> registadas pelo analisador de gases e obtidas a partir da cromatografia são apresentadas respetivamente no Gráfico 25 e no Gráfico 26. No Quadro 12 são apresentadas as concentrações médias dos gases produzidos no período estável.

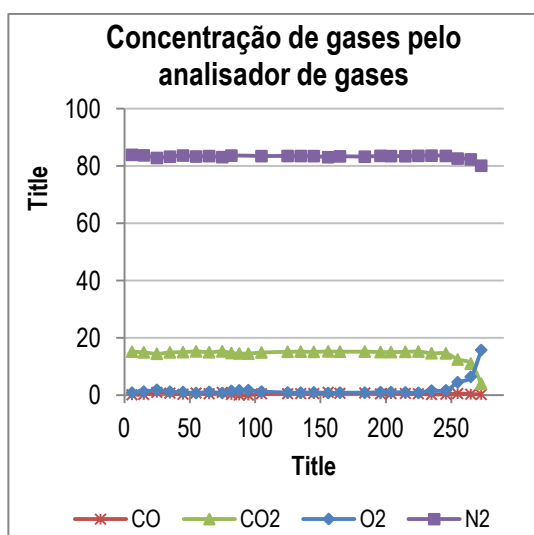


Gráfico 25 - Concentração de O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> ao longo do ensaio registadas pelo analisador de gases - ETCIS-3

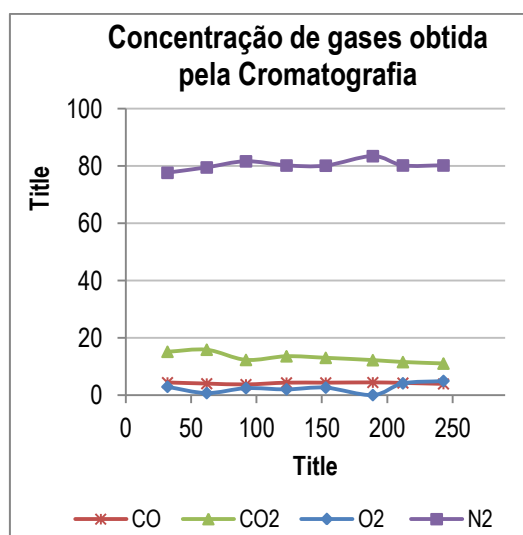


Gráfico 26 - Concentrações de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> ao longo do ensaio obtidas a partir do cromatógrafo - ETCIS-3

Quadro 12 - Concentrações médias de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia

Concentração média no período estável [%]	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Analisador de gases	83.40	0.54	15.02	1.04
Cromatografia	81.10	4.17	12.50	2.23

Tal como se observou nos ensaios anteriores, a mistura final apresentou uma cor muito semelhante à cor da mistura de areia e argila na zona da resistência de ignição, e foi escurecendo à medida que se aproximava da

base do tubo. O teor de óleo residual foi menor que 1 %. Na Figura 32 são apresentadas as amostras da mistura final recolhidas a cada 20 centímetros.

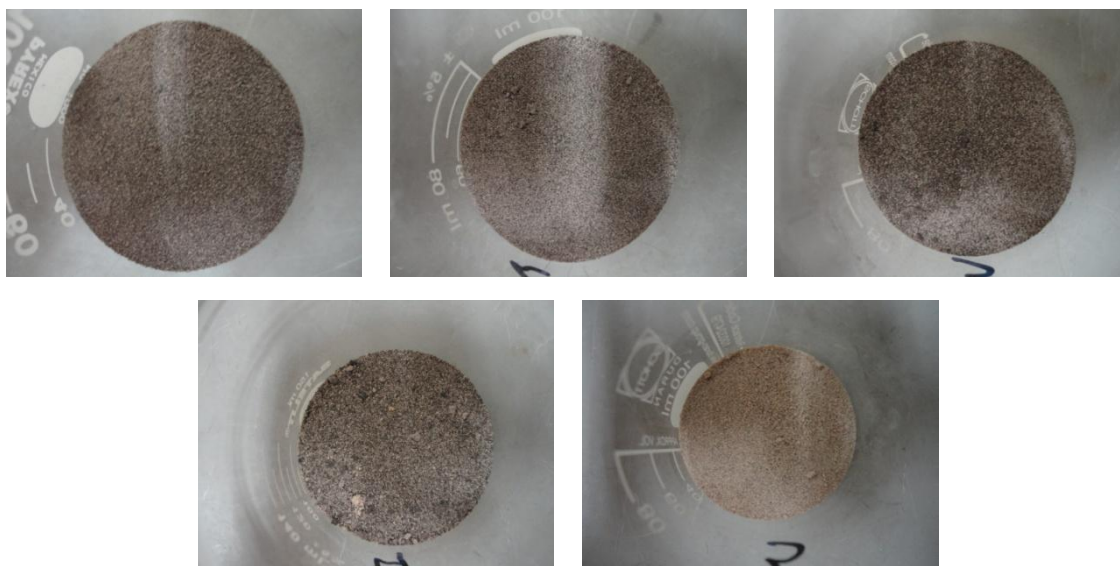


Figura 32 - Amostras da mistura após a combustão - Em cima: a 10 centímetros da base do tubo (à esquerda); a 30 centímetros da base (ao centro); a 50 centímetros da base (à direita). Em baixo: a 70 centímetros da base (à esquerda); a 90 centímetros da base (à direita) - ETCIS-3 (TI 3.3 L/min)

#### 4.1.4. Resultados do ensaio ETCIS-4

O ensaio ETCIS-4 foi realizado utilizando a maior taxa de injeção de ar sintético de 3.8 L/min. O ensaio durou cerca de 550 minutos (aproximadamente 09h10min), tendo sido o ensaio mais rápido de todos. Na Figura 33 é apresentado o cronograma do ensaio ETCIS-4.

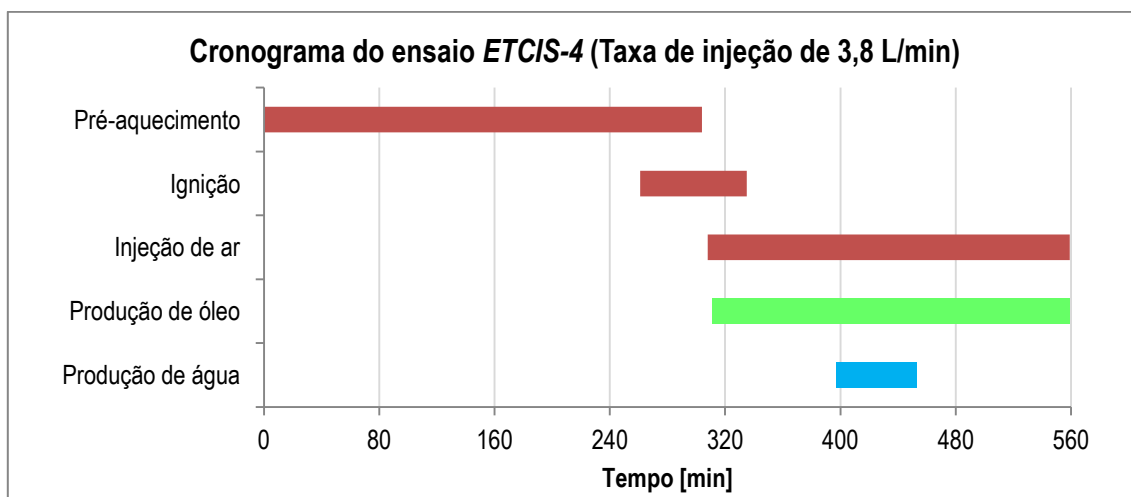


Figura 33 - Cronograma do ensaio ETCIS-4 (Taxa de injeção de 3.8 L/min)

A velocidade da frente de combustão foi constante ao longo de todo o ensaio, aproximadamente 6.34 m/dia (0.0044 m/min). No Gráfico 27 são apresentadas a temperatura e a posição da frente de combustão ao longo do ensaio. O período estável do ensaio ocorreu entre os 70 e os 210 minutos.

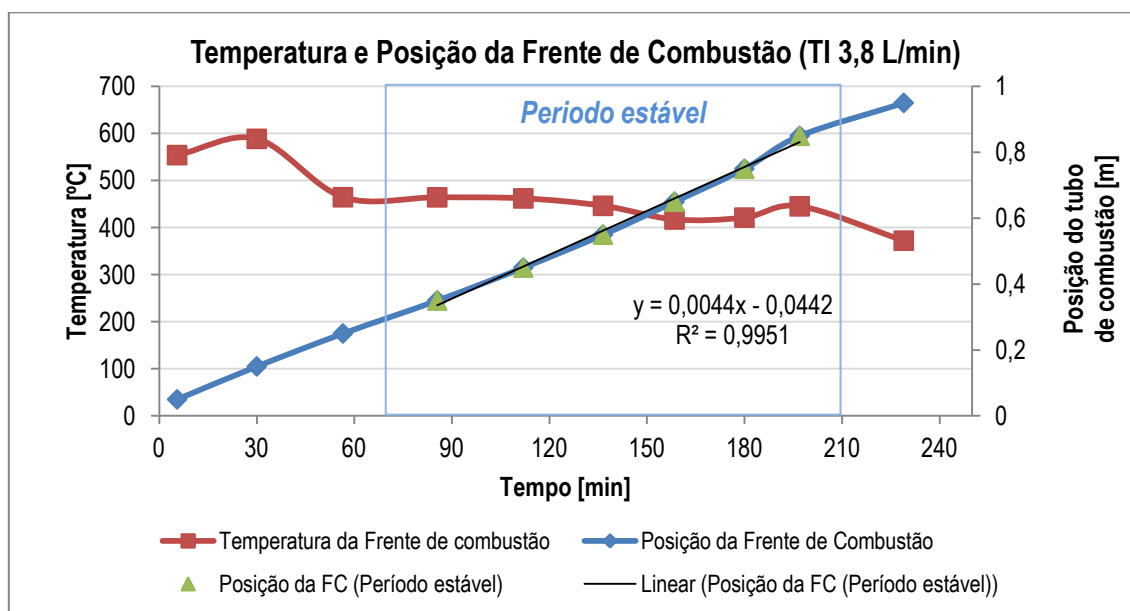


Gráfico 27 - Temperatura e posição da frente de combustão do ensaio ETCIS-4

Os perfis de temperatura registados pela sonda fixa ao longo do ensaio são apresentados no Gráfico 28. O Gráfico 29 apresenta o perfil de temperatura ao longo do tubo de combustão com os dados das duas sondas.



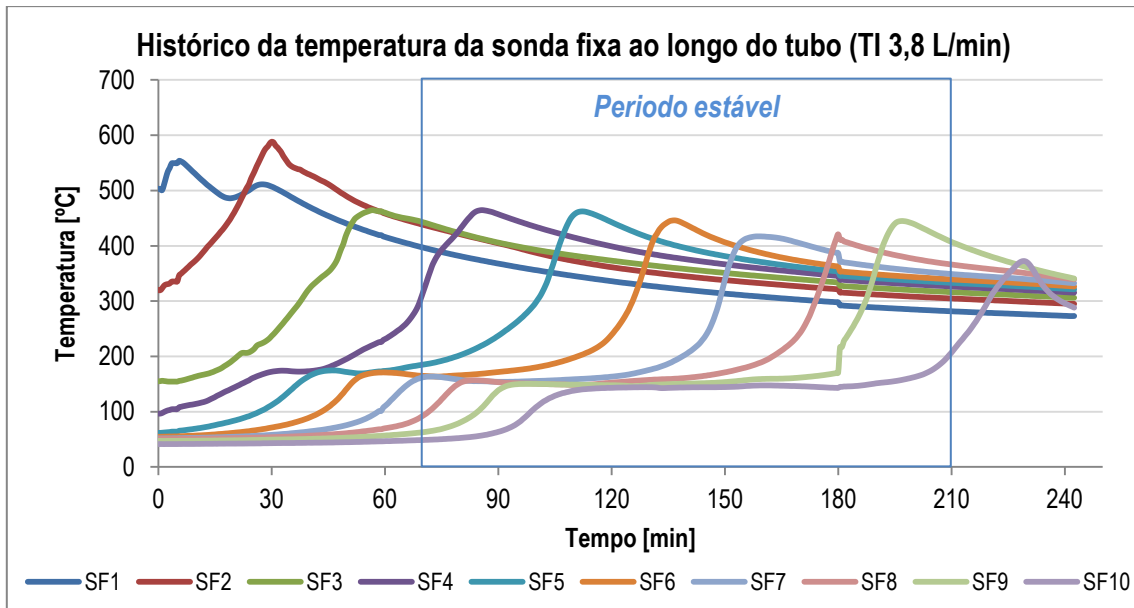


Gráfico 28 - Histórico da temperatura na sonda fixa ao longo do ensaio – ETCIS-4

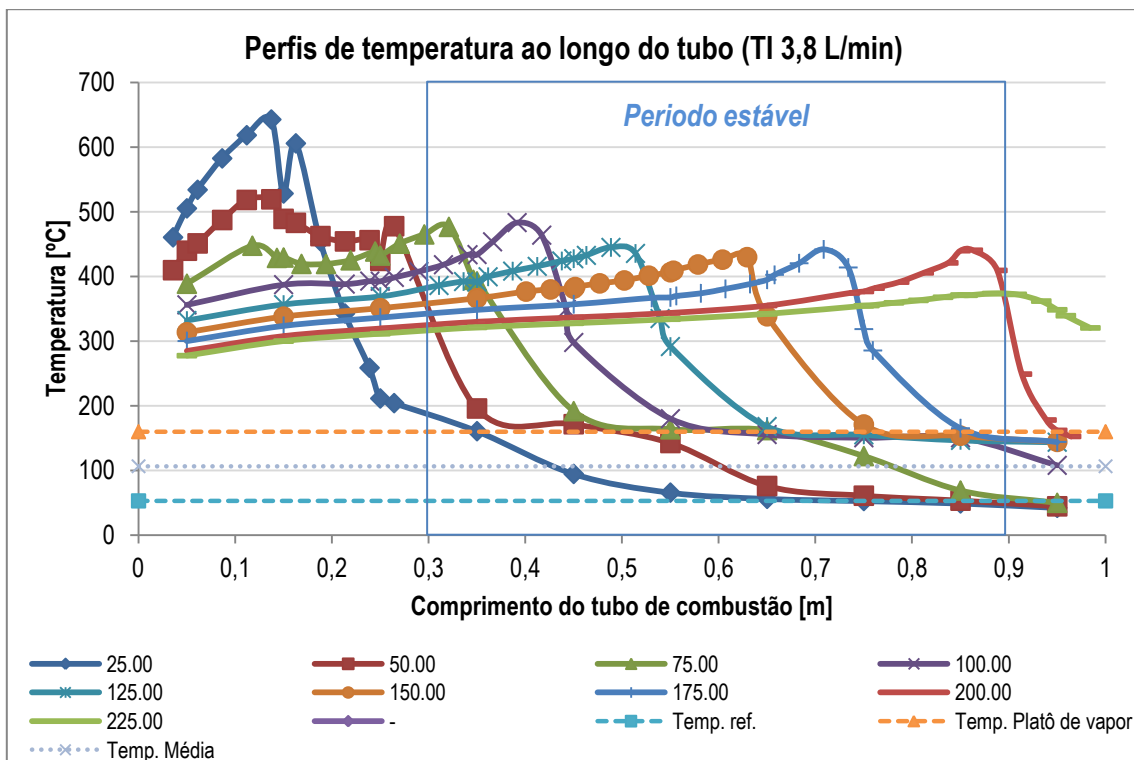


Gráfico 29 – Perfil da temperatura ao longo do tubo com as sondas fixa e móvel – ETCIS-4

No Gráfico 29 podem ser observadas as temperaturas de referência e do patamar de vapor, 53 °C e 155 °C respectivamente. A velocidade da frente de condensação foi de 7.5 m/dia (0.0052 m/min) e é apresentada no Gráfico 30.

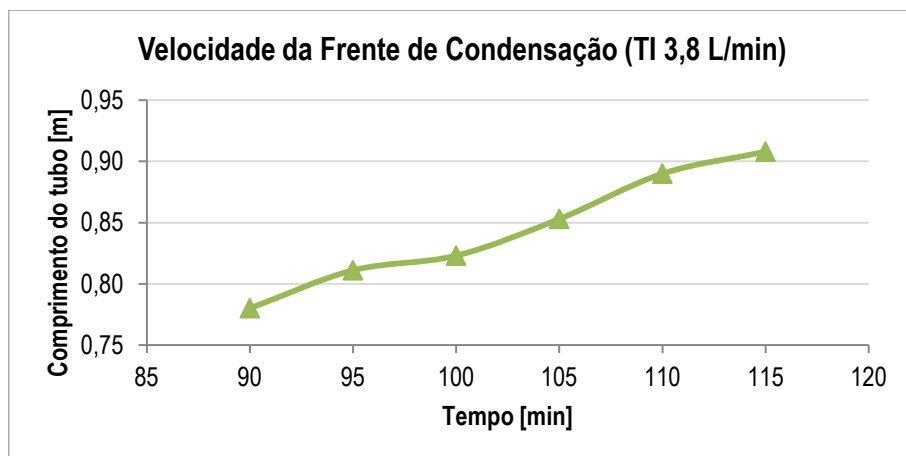


Gráfico 30 - Posição da frente de condensação no ensaio *ETCIS-4*

A produção de fluidos é apresentada no Gráfico 31, e à semelhança do ensaio *ETCIS-3*, observa-se que após a estabilização da produção de água a produção de óleo regista um ligeiro aumento.

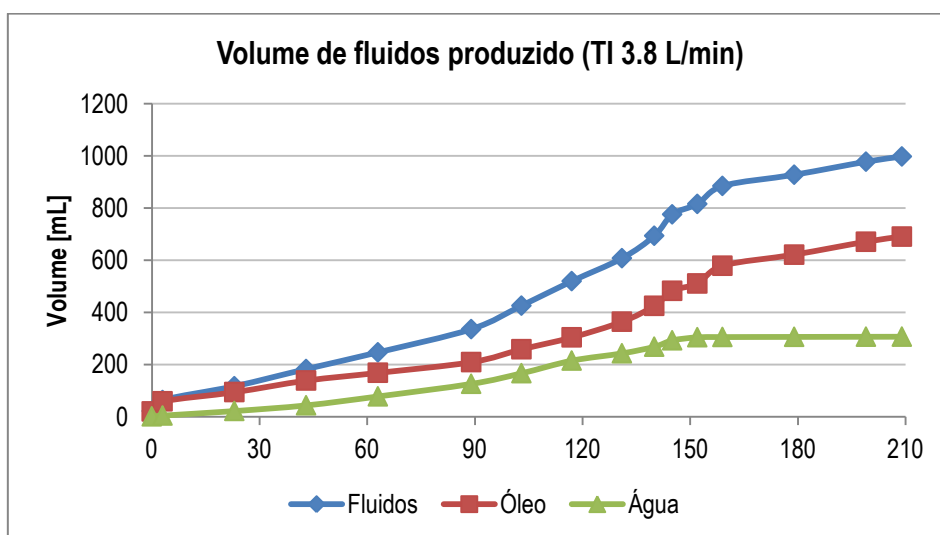


Gráfico 31 - Produção acumulada de fluidos no ensaio *ETCIS-4*

Neste ensaio foram produzidos 954.11 g de fluidos, sendo que na mistura inicial foram introduzidos 1015 g, o que indica uma diminuição de 6 %. Quanto ao volume produzido, registou-se um total de 998.00 mililitros de fluidos (644.81 mililitros de óleo e 353.19 mililitros de água), que comparando com os 688 mililitros de óleo introduzidos na mistura inicial se reflete num fator de recuperação de 94 %.

No Gráfico 32 é apresentada a taxa de produção de gases, que permaneceu constante ao longo de todo o ensaio.

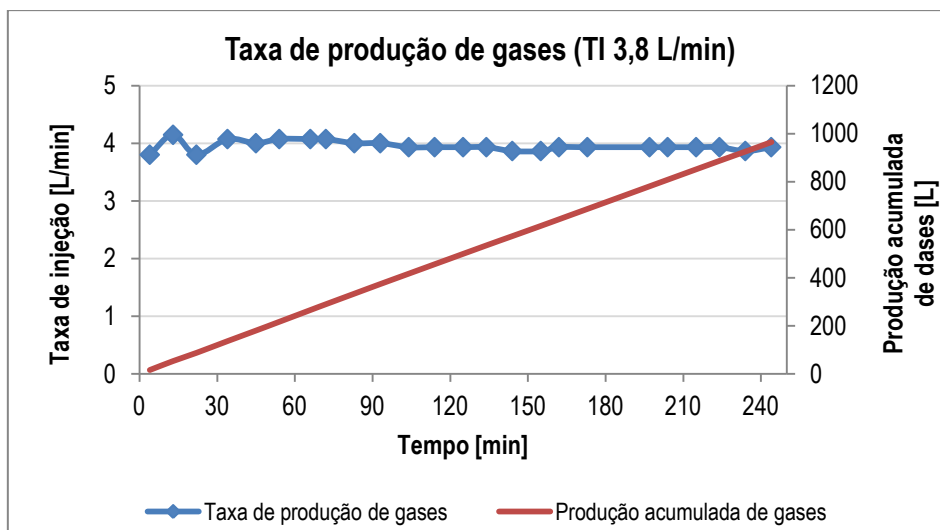


Gráfico 32 – Taxa de produção de gases e respectiva produção acumulada no ensaio ETCIS-4

As concentrações dos gases produzidos registadas pelo analisador de gases e obtidas a partir da cromatografia são apresentadas no Gráfico 33 e no Gráfico 34, respectivamente. O Quadro 13 sintetiza as concentrações médias dos gases produzidos durante o período estável.

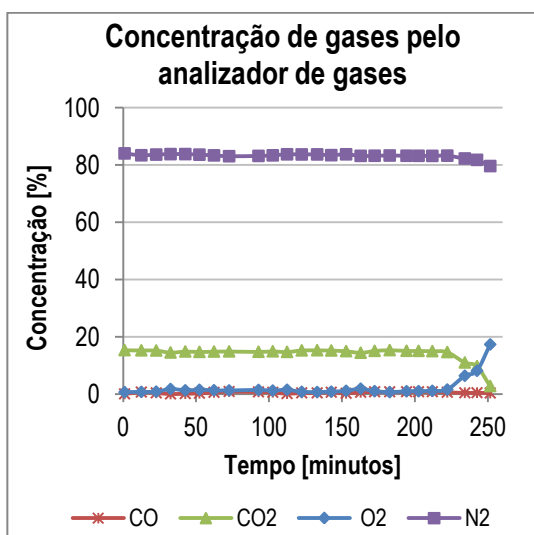


Gráfico 33 - Concentração de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> ao longo do ensaio registadas pelo analisador de gases

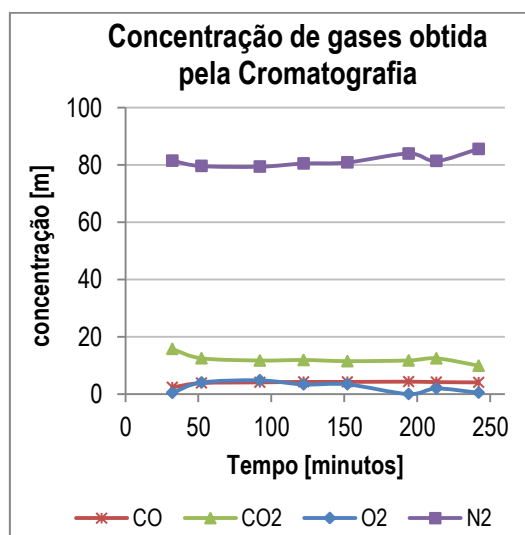


Gráfico 34 - Concentrações de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> ao longo do ensaio obtidas a partir do cromatógrafo

Quadro 13 - Concentrações médias de N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no período estável obtidas pelo analisador de gases e cromatografia

Concentração média no período estável [%]	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Analisador de gases	83.4	0.6	15.0	1.1
Cromatografia	84.6	4.1	11.2	0.1

Tal como se observou nos ensaios anteriores, a mistura porosa final apresentou uma cor muito semelhante à cor da mistura de areia e argila na zona da resistência de ignição, e foi escurecendo à medida que se aproximava da

base do tubo. O teor de óleo residual foi menor que 1 %. Na Figura 34 são apresentadas as amostras da mistura final recolhidas a cada 20 cm.



Figura 34 - Amostras da mistura após a combustão - Em cima: a 10 centímetros da base do tubo (à esquerda); a 30 centímetros da base (ao centro); a 50 centímetros da base (à direita). Em baixo: a 70 centímetros da base (à esquerda) a 90 centímetros da base (à direita) - ETCIS-4 (TI 3.8 L/min)

## 4.2. Comparação dos resultados obtidos na campanha experimental

A comparação dos resultados obtidos nos diversos ensaios realizados foi efetuada através do estudo de diversos parâmetros dos quais se destacam os seguintes: velocidade da frente de combustão, velocidade da frente de condensação, produção de fluidos, produção de gases, temperatura da camisa do tubo de combustão e da jaqueta de vácuo.

Todos os ensaios foram realizados de acordo com o mesmo procedimento, contudo não é possível reproduzir precisamente a mesma mistura, pelo que o Quadro 14 sintetiza as principais propriedades de cada mistura.

Quadro 14 - Propriedades da mistura porosa em cada ensaio

Id do Ensaio	<i>ETCIS-1</i>	<i>ETCIS-2</i>	<i>ETCIS-3</i>	<i>ETCIS-4</i>
Taxa de injeção [L/min]	2.5	3.0	3.3	3.8
Massa da rocha (areia e argila) [g]	5112.0	5111.7	5117.2	5113.8
Massa de óleo [g]	768.1	777.1	755.2	757.7
Massa de água [g]	311.9	314.8	320.6	316.0
Saturação de óleo [%]	50.0	50.0	50.0	43.7
Saturação de água [%]	25.0	25.0	25.0	22.3
Saturação em gás [%]	25.0	25.0	25.0	34.0
Porosidade [%]	43.1	43.1	43.1	46.2

### 4.2.1. Frente de Combustão

Os perfis de temperatura da frente de combustão dos ensaios apresentados no Gráfico 35 indicam que a temperatura da frente foi superior a 400 °C, em particular durante o período estável, indicando a predominância das reações de oxidação de alta temperatura durante o processo de combustão em todos os ensaios.

A posição que a frente de combustão ocupou ao longo de cada ensaio é apresentada no Gráfico 36. A partir da posição da frente de combustão é possível determinar a sua velocidade, que é definida como a taxa de avanço da zona de combustão. Esta velocidade é determinada a partir da posição da frente de combustão em cada tempo. De acordo com (Zhang, Liu, & Che, 2013) a velocidade da frente é diretamente proporcional à quantidade de oxigénio injetada (fluxo de ar) e inversamente proporcional à quantidade de combustível depositado. Pelo Gráfico 36 e pelo Quadro 15 observa-se essa proporcionalidade da velocidade de propagação da frente de combustão com a taxa de injeção de ar.

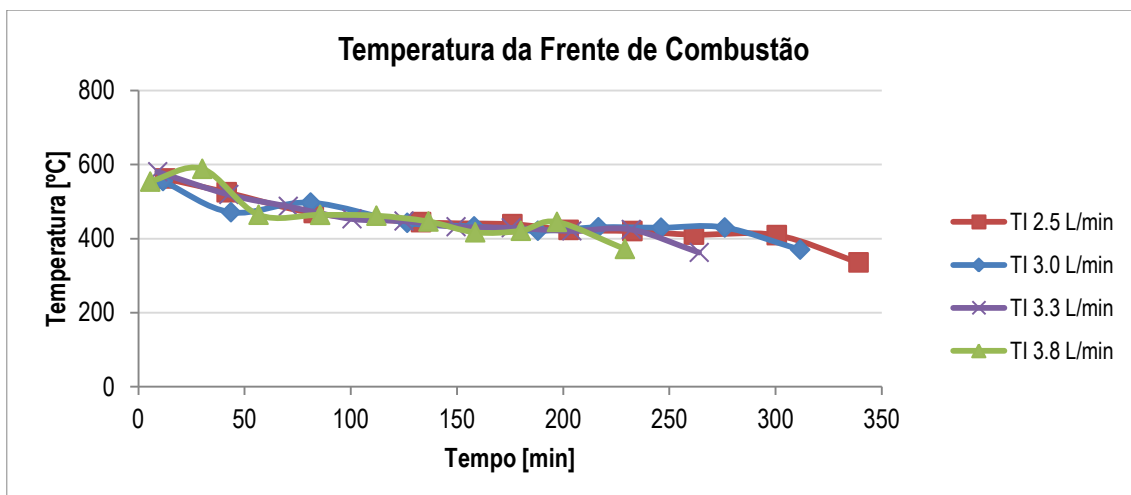


Gráfico 35 - Temperatura da frente de combustão nos diversos ensaios

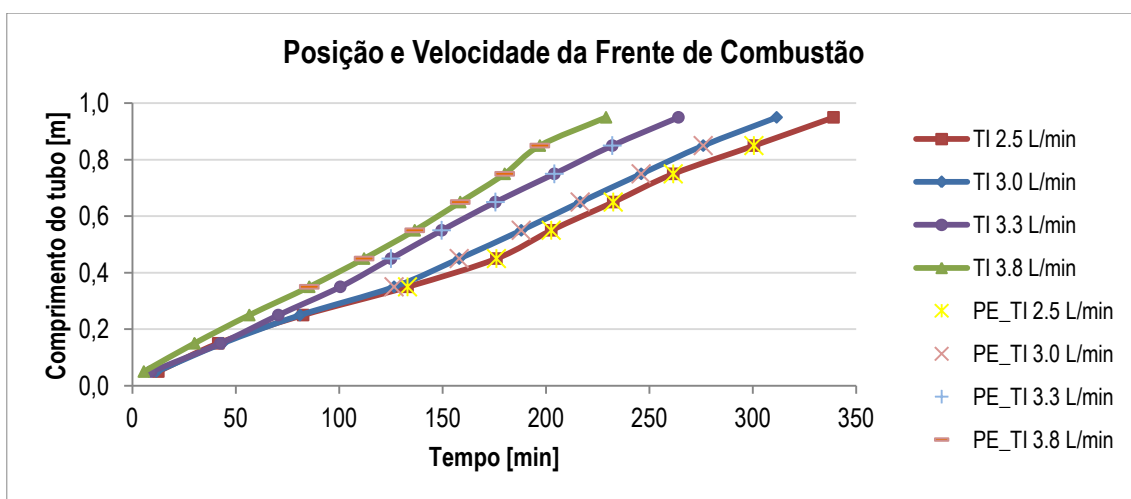


Gráfico 36 - Posição da frente de combustão nos diversos ensaios

Quadro 15 - Velocidade da frente de combustão nos diversos ensaios

Taxa de injeção [L/min]	2.5	3.0	3.3	3.8
Velocidade da frente de combustão	0.0029 m/min 4.2 m/dia	0.0034 m/min 4.9 m/dia	0.0038 m/min 5.5 m/dia	0.0044 m/min 6.3 m/dia

A análise da velocidade com que a frente de combustão se propagou também pode ser avaliada pelo tempo em que a sonda móvel se deslocou. No Quadro 16 são apresentados os tempos em que a sonda desceu nos diversos ensaios realizados. Este permite observar que no ensaio com maior taxa de injeção a velocidade da frente foi superior antecipando a descida da sonda móvel. Quando se comparam os dois primeiros ensaios observa-se que a primeira descida da sonda móvel no primeiro ensaio ocorreu ligeiramente antes da primeira descida do segundo ensaio, ao contrário do que seria suposto, já que o aumento da taxa de injeção deveria promover uma temperatura maior. Contudo no período inicial do processo de combustão há uma grande interferência do calor gerado pela resistência de ignição. Observando as temperaturas médias no período inicial

destes ensaios observa-se que a temperatura é maior no ensaio com menor taxa de injeção. Nas restantes descidas da sonda móvel verifica-se que a frente de combustão foi mais lenta nos ensaios com menor taxa de injeção.

Quadro 16 - Registo de descida da sonda móvel nos diversos ensaios

Taxa de injeção	1ª descida [min]	2ª descida [min]	3ª descida [min]	4ª descida [min]	5ª descida [min]	6ª descida [min]	7ª descida [min]
2.5 L/min	73.5	121.5	165.0	196.5	225.5	256.0	292.0
3.0 L/min	75.5	116.5	152.5	180.0	209.5	240.5	270.0
3.3 L/min	62.5	92.0	119.5	144.0	170.5	199.0	224.5
3.8 L/min	59.0	79.5	107.5	132.0	153.5	178.5	191.5

#### 4.2.2. Patamar de vapor

No processo de combustão, após ocorrer o pico de temperatura, ou seja, após a frente de combustão, existe uma queda acentuada da temperatura, onde há a deposição de combustível, até que esta atinge uma temperatura que se mantém praticamente constante numa parte do tubo de combustão. Esta zona, onde o perfil de temperatura é praticamente isotérmico, é definida por zona ou patamar de vapor.

Como se observou anteriormente nos gráficos dos perfis de temperatura (Gráfico 3, Gráfico 12, Gráfico 21 e Gráfico 29), em todos os ensaios formou-se um patamar de vapor claramente definido. No Quadro 17 são apresentados os resultados obtidos pela análise dos patamares de vapor dos ensaios.

Quadro 17 – Temperatura para determinar a velocidade da frente de condensação

Taxa de injeção [L/min]	Temperatura de Referência [°C]	Temperatura do patamar de vapor [°C]	Temperatura média [°C]
2.5	53	150	102
3.0	53	175	114
3.3	53	150	102
3.8	53	150	102

A temperatura do patamar de vapor é fortemente influenciada pela pressão parcial do vapor de água, sendo por essa razão que no ensaio com a taxa de 3.0 L/min a temperatura do patamar foi maior, já que este ensaio foi realizado a uma pressão maior que os restantes ensaios.

O estudo do patamar de vapor e da sua taxa de crescimento fornece importantes informações sobre o mecanismo de produção de fluidos, no entanto para efetuar esta análise é conveniente determinar a velocidade da frente de condensação.

### 4.2.3. Frente de Condensação

Após o patamar de vapor observa-se uma nova zona onde há o decréscimo da temperatura gerado pelas perdas de calor, pelo qual se condensam os fluidos na fase de vapor. Esse fenómeno gera a formação de uma frente de condensação que contribui com o deslocamento dos fluidos. A velocidade com que este fenómeno ocorre é designada por velocidade de condensação. A posição da frente de condensação em função do tempo é apresentada no Gráfico 37. A partir deste gráfico pode ser estimada a velocidade da frente de condensação.

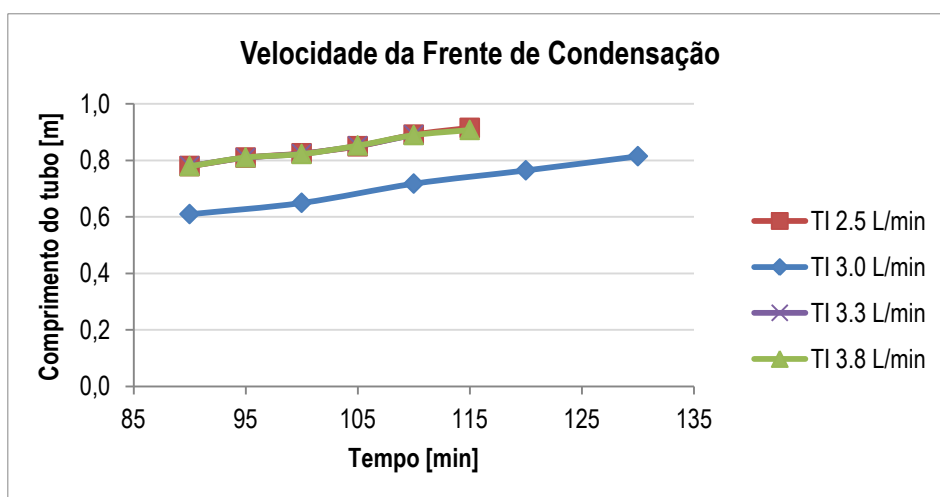


Gráfico 37 - Velocidade da frente de condensação nos diversos ensaios

A partir da diferença das velocidades da frente de combustão e da frente de condensação pode avaliar-se o crescimento do patamar de vapor. Dado que a velocidade da frente de combustão aumenta com o aumento da taxa de injeção, e a velocidade da frente de combustão é praticamente constante, o crescimento do patamar de vapor é menor quanto maior a taxa de injeção.

No Quadro 18 encontram-se sintetizadas as velocidades das frentes de combustão e condensação e de crescimento do patamar de vapor.

Quadro 18 – Velocidades das frentes de combustão e condensação e crescimento do patamar de vapor nos diversos ensaios

Taxa de injeção	2.5 L/min	3.0 L/min	3.3 L/min	3.8 L/min
Velocidade da frente de combustão	4.2 m/dia	4.9 m/dia	5.5 m/dia	6.3 m/dia
Velocidade da frente de condensação	7.8 m/dia	7.6 m/dia	7.5 m/dia	7.5 m/dia
Crescimento do patamar de vapor	3.6 m/dia	2.7 m/dia	2.0 m/dia	1.2 m/dia

A importância do crescimento do patamar de vapor está relacionada com o facto de este poder funcionar como mecanismo de produção de óleo, ou seja, quanto maior o comprimento do patamar de vapor mais calor é



transmitido até zonas mais afastadas da frente de combustão. Este aquecimento promove a redução da viscosidade do óleo, e assim, antecipa-se a produção de óleo.

#### 4.2.4. Produção de fluidos

A produção de fluidos registada indica que para maiores taxas de injeção a produção de fluidos há uma produção prévia de fluidos. Este aumento pode ser observado no Gráfico 38.

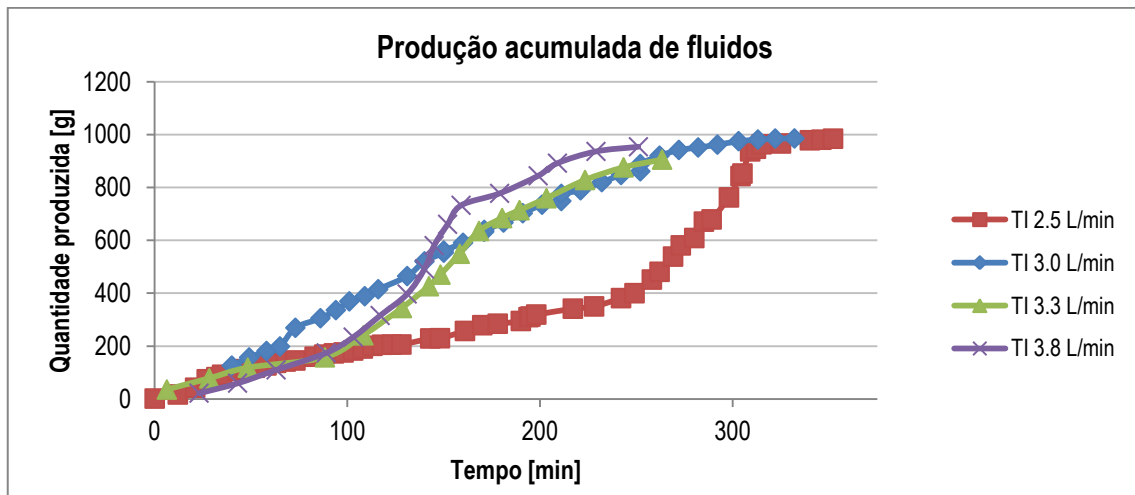


Gráfico 38 - Produção acumulada de fluidos nos diversos ensaios

No Gráfico 39, Gráfico 40, Gráfico 41 e Gráfico 42 são apresentados os volumes de fluidos produzidos ao longo dos respectivos ensaios. Em geral observa-se um período inicial com produção de fluidos a taxa constante seguida de uma produção significativa de óleo e água. Contudo, apesar da produção de água estabilizar a produção de óleo mantém a sua taxa de crescimento. Esta mudança na taxa de produção pode ser indicativa da chegada de um banco de água seguida de um banco de óleo ao poço produtor.

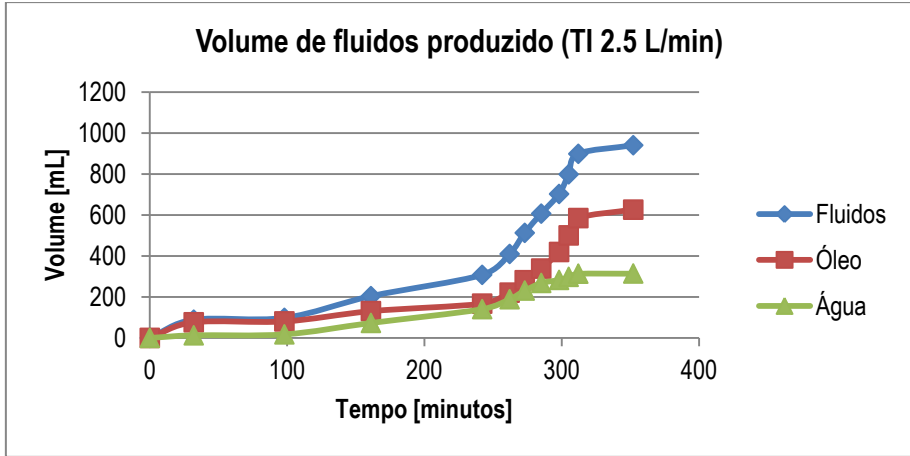


Gráfico 39 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 2.5 L/min

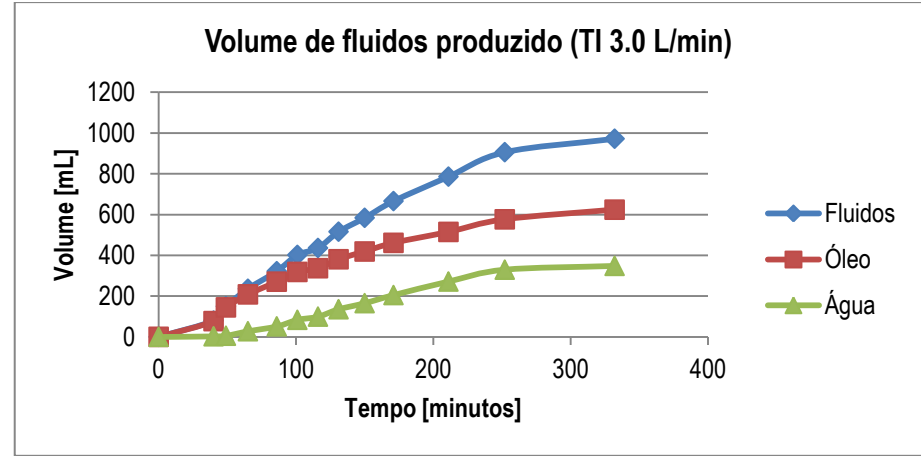


Gráfico 40 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 3.0 L/min

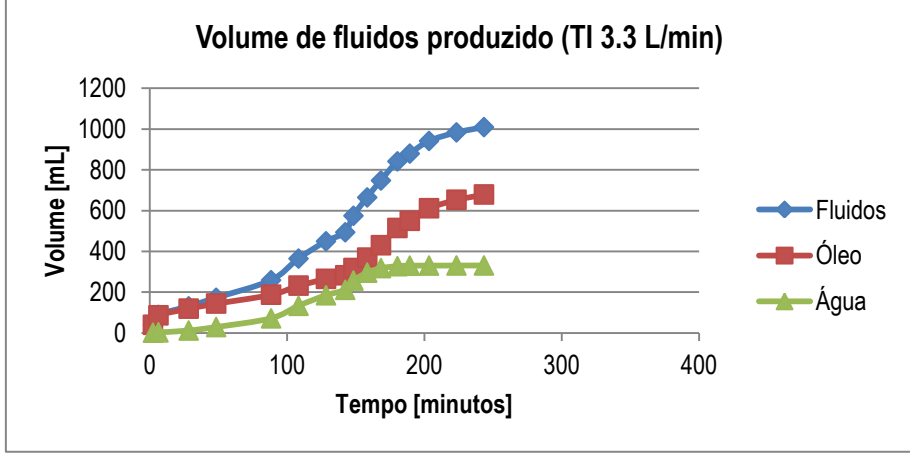


Gráfico 41 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 3.3 L/min

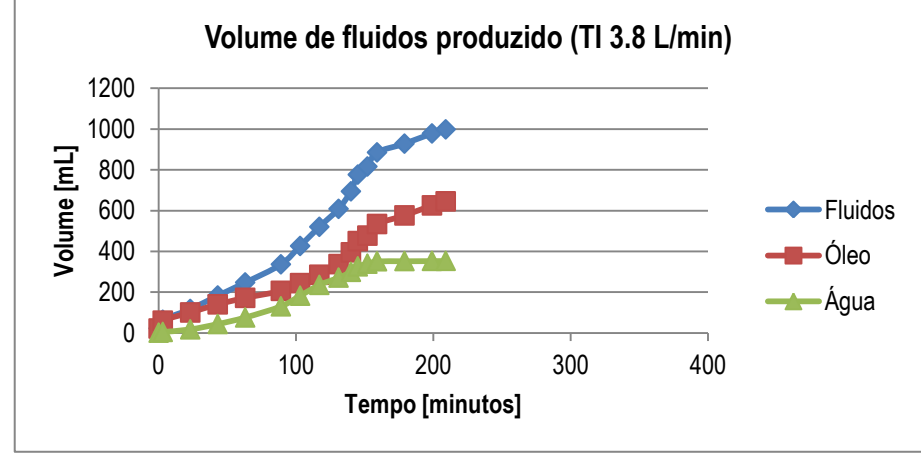


Gráfico 42 – Volume de fluidos produzidos no ensaio com taxa de injeção de 3.8 L/min

No Gráfico 43 são discriminados os volumes de óleo e água produzidos em cada ensaio, de onde se observa que não existem diferenças significativas nos volumes produzidos nos diversos ensaios.

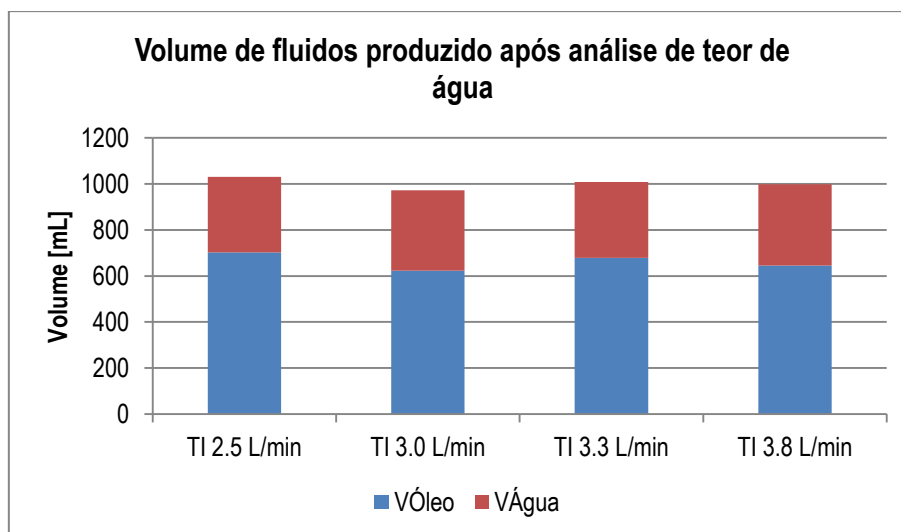


Gráfico 43 - Volume de óleo e água produzidos nos diversos ensaios

A partir da quantidade de óleo e de água produzidos é possível determinar o fator de recuperação obtido em cada ensaio. No Quadro 19 são apresentados os dados referentes à produção de fluidos de cada ensaio, assim como o fator de recuperação em cada um. De acordo com os resultados apresentados observa-se que o fator de recuperação é sempre acima de 85 %, tendo sido atingido no máximo uma recuperação de 95 %. Estes valores estão associados, entre outros fatores, ao facto de se estar a utilizar um meio poroso com elevada porosidade e saturação de óleo, além de que o reduzido diâmetro do tubo induz a que haja um varrimento total do tubo de combustão.

Quadro 19 - Fluidos produzidos nos diversos ensaios

Taxa injeção [L/min]	Volume de óleo na mistura [mililitros]	Volume de água na mistura [mililitros]	Volume após Produção [mililitros]		Volume após Karl Fischer [mililitros]		Fator de recuperação [%]
			VÓleo	VÁgua	VÓleo	VÁgua	
2.5	736	368	951	79	703	327	95.0
3.0	736	368	759	213	624	348	85.0
3.3	736	368	951	58	679	330	92.0
3.8	688	351	954	34	645	353	94.0

A produção de fluidos inicia-se praticamente desde o início da injeção de ar a uma taxa relativamente reduzida. Os fluidos que condensam e se acumulam a jusante do patamar de vapor, ao chegarem ao poço produtor provocam um aumento da produção de fluidos, em especial de água. Esta mantém-se ainda durante uma porção do patamar de vapor, até que a produção de água estabiliza e se regista uma produção exponencial de óleo. A partir destas observações pode inferir-se que no patamar de vapor existem duas zonas distintas: uma onde há

uma elevada saturação de óleo, localizada mais próxima da zona de craqueamento; e outra onde se verifica a coexistência de óleo e água, mais próxima do poço produtor. Pelo facto da permeabilidade relativa da água ser maior que a permeabilidade relativa do óleo, a água acumula-se mais próximo do poço produtor que o óleo, o que pode indicar que o banco de água se encontra a jusante do banco de óleo. À medida que a frente de combustão progride, a zona de deposição do combustível aproxima-se do poço produtor e o patamar de vapor vai sendo cada vez mais curto até que deixa de existir e deixa de haver produção de óleo.

Quando se comparam os históricos de temperatura dos diversos ensaios regista-se que nos ensaios onde foi utilizada uma taxa de injeção maior há uma produção de óleo antecipada face ao ensaio com menor taxa de injeção. Esta diferença na produção de fluidos está relacionada com o funcionamento do patamar de vapor como mecanismo de produção. Para ensaios onde há menor taxa de injeção de ar o patamar de vapor é maior além de que a zona compreendida desde o fim da deposição de combustível até ao fim do patamar de vapor é consideravelmente maior. Deste modo pode assumir-se que no ensaio com menor taxa de injeção grande parte do óleo acabou por se acumular nesta zona, sendo esse o motivo que explica a produção tardia do óleo neste ensaio.

A partir dos ensaios de densidade observou-se a diminuição da densidade específica à medida que o óleo vai sendo produzido, o que indica que houve uma alteração química, ou seja, houve um *upgrading* do óleo pesado. No Quadro 20 é apresentado o grau API de algumas amostras de óleo coletadas ao longo dos ensaios.

Quadro 20 - Grau API de algumas amostras de óleo colectadas ao longo dos ensaios

2.5 L/min		3.0 L/min		3.3 L/min		3.8 L/min	
Proveta	API	Proveta	API	Proveta	API	Proveta	API
2	16.11	2	15.86	2	16.94	2	16.30
4	18.58	5	16.42	5	17.42	5	17.67
6	17.16	7	17.29	8	18.50	8	18.26
8	19.26	9	17.10	11	16.66	11	18.62
11	19.50	12	28.72	15	21.31	15	20.71

#### **4.2.5. Produção de gases**

Nos ensaios em tubo de combustão são recolhidos diversos dados como temperatura, pressão e composição do óleo, que permitem que se estabeleça a estequiometria das reações químicas que ocorrem durante o processo. (Sarathi, 1999) Os coeficientes estequiométricos das reações de oxidação e craqueamento são determinados a partir da composição molar do nitrogénio, oxigénio, óxido e dióxido de carbono, produzidos durante o período estável do processo de combustão.

As concentrações de gases foram registadas pelo analisador de gases e determinadas através da análise cromatográfica. As concentrações obtidas pelos dois métodos são semelhantes, apenas se registando uma menor concentração de oxigénio nas amostras submetidas à cromatografia, mas maior concentração de

monóxido de carbono, no analisador de gases. No Gráfico 44 são apresentadas as concentrações registadas pelo analisador de gases e pelo cromatógrafo.

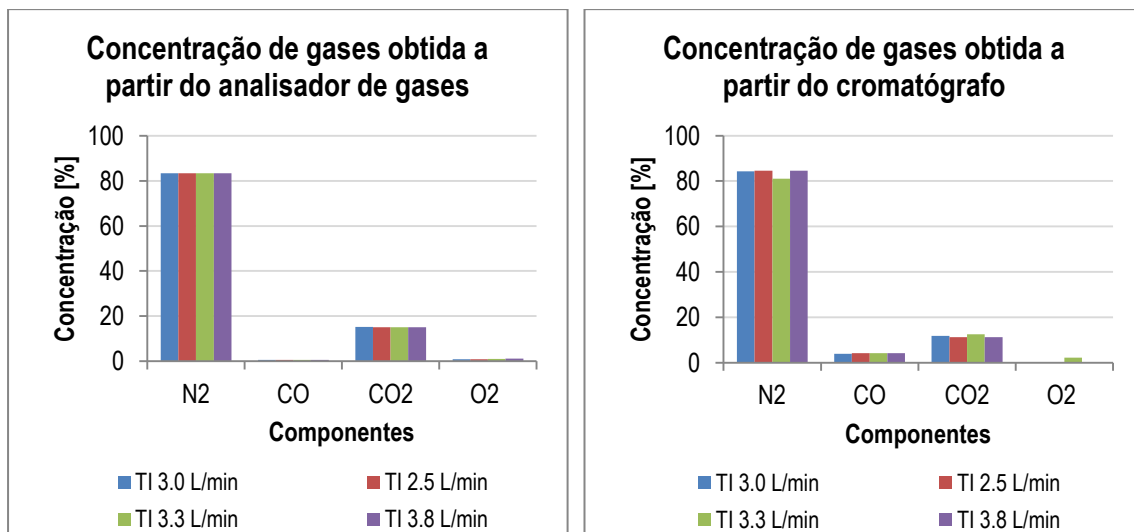


Gráfico 44 - Concentração de gases registada pelo analisador de gases (à esquerda) e pelo cromatógrafo (à direita)

A partir das concentrações de gases foi possível determinar determinados parâmetros que caracterizam o processo de combustão. Os resultados obtidos para estes parâmetros não apresentaram variações significativas para os diversos ensaios, especialmente quando se faz a comparação dos dados obtidos pelo analisador de gás. No Quadro 21 são apresentados os parâmetros da combustão para cada ensaio, de onde se observa que os parâmetros que registam maiores diferenças são a razão aparente de Hidrogénio/Carbono, a razão ar-combustível, o consumo de combustível e ar requerido.

Avaliando as concentrações de gases resultantes da combustão registou-se em todos os ensaios as concentrações de oxigénio e de dióxido de carbono foram maiores e que a concentração de monóxido de carbono foi menor quando medidas pelo analisador de gases face aos resultados obtidos pela cromatografia.

Quadro 21 – Concentração de gases produzidos e parâmetros da combustão determinados no período estável dos diversos ensaios

Parâmetros	Taxa de injeção 2.5 L/min		Taxa de injeção 3.0 L/min		Taxa de injeção 3.3 L/min		Taxa de injeção 3.8 L/min	
	ETCIS-1		ETCIS-2		ETCIS-3		ETCIS-4	
	Analizador de gases	Cromatografia	Analizador de gases	Cromatografia	Analizador de gases	Cromatografia	Analizador de gases	Cromatografia
[O <sub>2</sub> ]	0.91	0.09	0.86	0.05	1.04	2.23	1.09	2.71
[N <sub>2</sub> ]	83.39	84.60	83.41	84.25	83.40	81.10	83.36	81.24
[CO]	0.58	4.11	0.58	3.94	0.54	4.17	0.57	4.22
[CO <sub>2</sub> ]	15.11	11.20	15.15	11.75	15.02	12.50	14.99	11.83
Razão aparente de H/C	1.16	2.04	1.16	1.86	1.16	0.83	1.15	0.91
Razão ar-Combustível [m <sup>3</sup> std/kg]	11.92	11.61	11.89	11.43	12.02	11.19	12.02	11.57
Fração de oxigénio utilizado [Fração]	0.96	1.00	0.96	1.00	0.95	0.89	0.95	0.87
Excesso de oxigénio [Fração]	0.05	0.00	0.04	0.00	0.05	0.12	0.05	0.15
Fração de oxigénio convertido em óxidos de carbono [Fração]	0.77	0.63	0.77	0.65	0.77	0.81	0.77	0.79
Consumo de combustível [kg/m <sup>3</sup> ]	18.90	19.68	20.88	21.95	19.96	20.85	19.54	19.78
Ar Requerido [m <sup>3</sup> std/m <sup>3</sup> ]	225.22	228.49	248.31	250.82	230.17	223.81	234.85	228.89
Razão (CO <sub>2</sub> +CO)/CO	26.95	3.72	27.15	3.98	28.76	4.00	27.13	3.81
Razão (CO <sub>2</sub> +CO)/N <sub>2</sub>	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.21	0.19	0.20
Razão (CO <sub>2</sub> )/CO	25.95	2.72	26.15	2.98	27.76	3.00	26.13	2.81

A razão aparente Hidrogénio/Carbono (H/C) permite avaliar a estabilidade da combustão. Em ensaios de combustão este parâmetro deve variar entre 1 e 3, uma vez este é o intervalo para o qual se verifica a predominância das reações de oxidação de alta temperatura (Zhang, Liu, & Che, 2013). Outro aspecto importante da razão H/C é que para valores acima de 1 este também é indicativo de que a maior parte do combustível é proveniente da fração pesada do óleo.

Analisando os valores obtidos pelo analisador de gases, a razão H/C é praticamente igual em todos os ensaios, sendo ligeiramente menor no ensaio com maior taxa de injeção. No entanto quando se efetua a mesma análise através dos dados da cromatografia observa-se que taxas de injeção maiores o valor obtido é bastante menor. A razão aparente H/C destes ensaios foi anormalmente baixa, pois a análise cromatográfica revelou uma concentração de oxigénio anormalmente alta. Apesar da concentração registada, esta está dentro do intervalo indicativo de que a combustão está a ocorrer no interior do tubo.

A razão ar-combustível informa qual o volume de ar injetado é necessário para queimar 1 kg de combustível. Pelos resultados obtidos observa-se que não existe uma variação significativa nos diversos ensaios, variando entre 11.9 e 12.2 m<sup>3</sup>std/kg nos resultados obtidos através do analisador de gases e de 11.2 a 11.6 m<sup>3</sup>std/kg pela cromatografia.

Um menor consumo de combustível indica que se requer uma menor quantidade de ar injetado. Este parâmetro é também muitas vezes considerado como indicador da deposição de combustível durante o processo de combustão, o que indica que há maior deposição com o aumento da taxa de injeção. Este resultado vai ao encontro do que se esperava, visto que se previa que menores taxas de injeção promovessem menores velocidades da frente de combustão, e conseqüentemente, maior quantidade de combustível depositado.

A partir do consumo de combustível pode fazer-se uma previsão qualitativa do fator de recuperação dos diversos ensaios, uma vez que quanto menor for o consumo de combustível, menor será o volume de óleo queimado pelo processo e assim maior a recuperação de óleo. Esta consideração apenas é válida por se ter registado uma percentagem de óleo residual muito reduzida. Deste modo, e tendo sido comprovado pela produção de óleo, observou-se que foi para o ensaio com a menor taxa de injeção que o fator de recuperação foi maior.

O requerimento de ar indica o volume de ar injetado necessário para queimar 1 m<sup>3</sup> de areia. A fração de oxigénio utilizado foi superior a 95 % em todos os ensaios, à exceção do ensaio onde foi utilizada uma taxa de 3.3 L/min e que foi avaliado através da cromatografia, cuja fração de oxigénio utilizada foi de 89%. Considerando a análise através do analisador de gases foi obtido um excesso de oxigénio de 5%, enquanto que para a cromatografia este parâmetro foi de 12 % no ensaio com concentração de oxigénio de 2.23 %, e 2.71 % nos restantes ensaios. A fração de oxigénio convertido em óxidos de carbono foi semelhante em todos os ensaios. Este parâmetro é indicativo de que o oxigénio foi utilizado predominantemente para as reações de oxidação de alta temperatura.

#### 4.2.6. Transferência de calor ao longo do tubo

Pelo facto do tubo de combustão ser de aço inox tem uma elevada condutividade térmica comparativamente à condutividade da mistura que representa o meio poroso saturado. Isto faz com que a transferência de calor por condução através da parede de aço seja mais rápida do que na mistura. Pela diferença de temperatura gerada por esse fenómeno ocorre uma transferência de calor da parede de aço para a mistura porosa diante da zona de combustão. Essa contribuição de calor favorece a formação e crescimento do patamar de vapor, que a sua vez contribui numa maior proporção com a produção dos fluidos e por tanto da eficiência do processo de combustão.

A seguinte análise pode ser efetuada para explicar a influência da transferência de calor na parede do tubo: para menores taxas de injeção a velocidade de propagação da frente de combustão é menor, contudo a temperatura da frente de combustão é aproximadamente a mesma em todas as taxas injetadas, o que induz que a taxa de transferência ao longo do tubo será semelhante em todos os ensaios. Assim, para zonas afastadas da frente de combustão a influência da transferência de calor do tubo para a mistura será consideravelmente maior para taxas de injeção menores, ou seja, para o mesmo ponto da frente de combustão, para ensaios com menores taxas de injeção o calor transferido ao longo da camisa chegará a zonas mais próximas do poço produtor que nos ensaios com maior taxa de injeção. E é este aquecimento que promove o aumento do comprimento do patamar de vapor para menores taxas de injeção.

Pelo Gráfico 45 observa-se a influência da temperatura da camisa na formação do patamar de vapor.

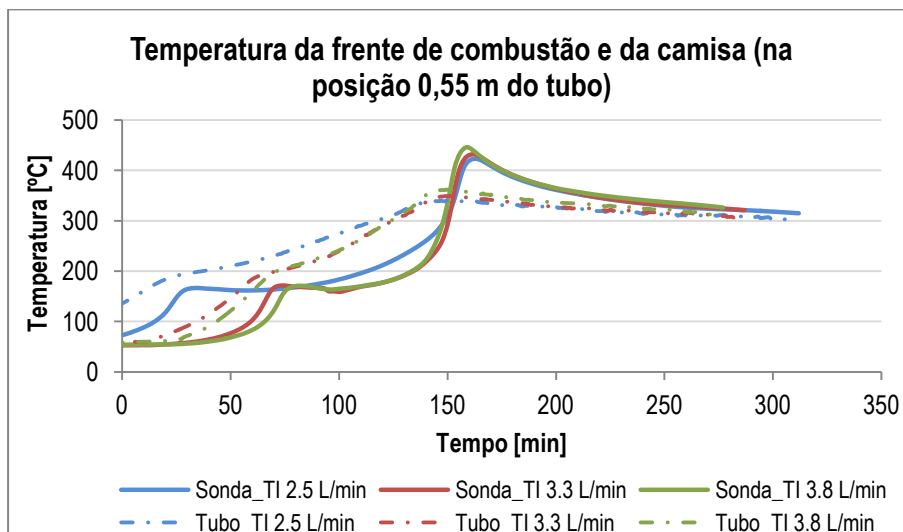


Gráfico 45 - Temperatura da mistura e da camisa quando a frente de combustão se encontra na posição 0,55 m do tubo de combustão

Com base na análise anterior, pode inferir-se que pelo aumento da taxa de injeção, e por conseguinte da velocidade da frente de combustão, há uma diminuição do comprimento do patamar de vapor resultante da menor contribuição do calor transferido do tubo para a mistura. A condutividade térmica do tubo é maior que da mistura, deste modo, quanto maior a velocidade da frente de combustão, menor será o contributo do calor transferido do tubo para a mistura.



Uma consideração final deve ser feita acerca do controlo adiabático utilizado nos ensaios experimentais. O controlo adiabático permite que os resistores acompanhem o avanço da frente de combustão, ou seja, o calor libertado pelos resistores é maior na zona onde está a frente de combustão. Supostamente este deveria ser efetuado pela temperatura da sonda fixa, contudo, observou-se que na verdade é efetuado pela temperatura da camisa. Assim, a temperatura da camisa é incrementada em zonas por onde a frente de combustão ainda não passou ou não se fez sentir, aumentando o efeito de transferência de calor para a mistura.

### 4.3. Modelação numérica

A partir dos resultados dos ensaios experimentais do tubo de combustão pretendeu-se efetuar o ajuste do modelo numérico. A calibração do modelo numérico iniciou-se pelo ajuste das saturações iniciais de fluidos e gás, de seguida foram ajustadas as curvas de permeabilidade relativa e alguns parâmetros cinéticos, e finalmente efetuou-se o ajuste das perdas de calor no tubo.

O ajuste do tubo de combustão foi efetuado considerando os resultados do último ensaio realizado, ou seja, utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min. No Gráfico 46 é apresentado o histórico de temperaturas do ensaio com o modelo base definido no capítulo 3, onde se observa o resultado do ajuste inicial do modelo numérico aos resultados do ensaio experimental. Neste gráfico observa-se que o modelo numérico inicial apresenta uma velocidade da frente de combustão maior, além de que a temperatura da frente de combustão é significativamente maior. A produção de combustível apresentada no Gráfico 47 é indicativa que é necessário proceder ao seu aumento no modelo numérico, e a produção de fluidos é apresentada no Gráfico 48 onde se observa uma produção deficiente de óleo e excessiva de água.

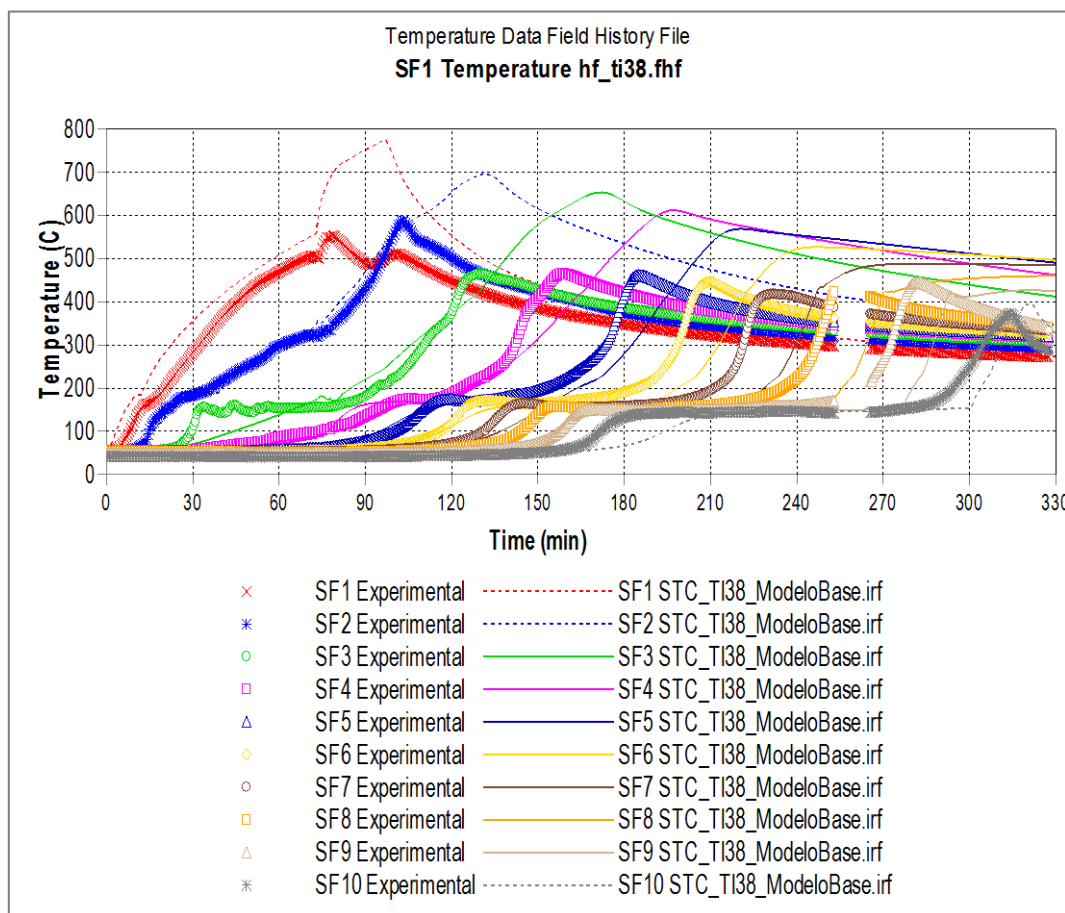


Gráfico 46 - Histórico de temperaturas do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo base definido no capítulo 3

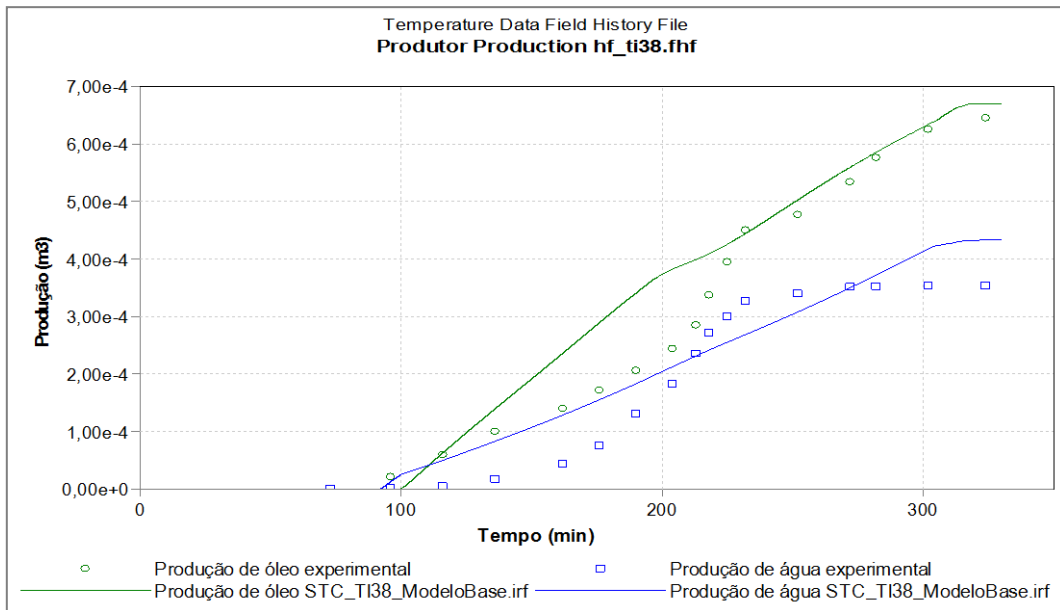


Gráfico 47 - Histórico de produção acumulada de fluidos do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo base definido no capítulo 3

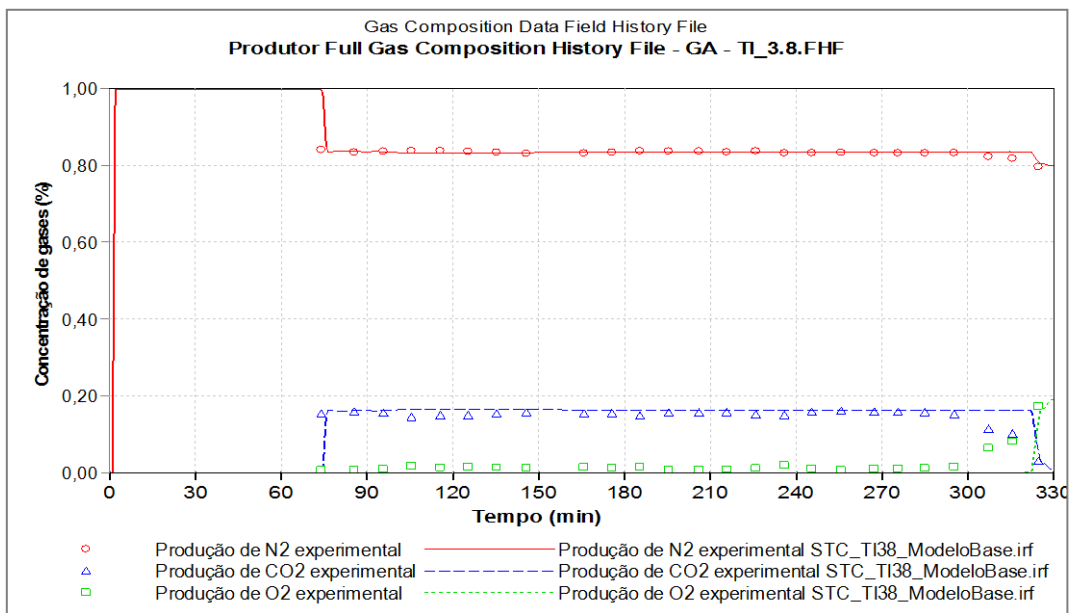


Gráfico 48 - Histórico da composição do gás produzido do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo base definido no capítulo 3

#### 4.3.1. Ajuste das saturações iniciais

O modelo base apresentava as saturações iniciais que se previa existirem na mistura (50 % de óleo, 25 % de água e 25 % de gás), contudo no ensaio em questão sobrou mistura porosa, pelo que as saturações iniciais e a porosidade foram novamente estimadas e o modelo foi ajustado com esses parâmetros. As saturações recalculadas foram de 44% de óleo, 22 % de água e 34 % de gás. A porosidade também foi recalculada tendo

sido obtido um valor de 46,02 %. O modelo foi alterado e verificou-se que as quantidades de óleo e de água originais ainda não correspondiam à quantidade inicialmente utilizada no ensaio. Por esta razão as saturações iniciais foram alteradas no modelo de simulação de modo a ajustar a quantidade inicial de fluidos. A alteração das saturações e porosidade no modelo numérico é sintetizada no Quadro 22. No mesmo quadro é apresentado o volume de fluidos inicialmente na mistura.

Quadro 22 - Propriedades do meio poroso e volume inicial de fluidos *in place* obtida pelo ajuste da saturação inicial de fluidos e gás no modelo numérico

	<i>Modelo experimental</i>	<i>Modelo numérico inicial</i>	<i>Modelo numérico ajustado</i>
<b>Porosidade [%]</b>	43	43	46.02
<b>Saturação de óleo [%]</b>	50	50	46
<b>Saturação de água [%]</b>	25	25	20
<b>Saturação de gás [%]</b>	25	25	34
<b>Volume de óleo [mililitros]</b>	6.88E-04	7.43E-04	7.29E-04
<b>Volume de água [mililitros]</b>	3.51E-04	3.70E-04	3.16E-04

#### 4.3.2. Ajuste das curvas de permeabilidade relativas

A partir do modelo ajustado procedeu-se ao ajuste das curvas de permeabilidade relativas, em particular pelo ajuste da percentagem de óleo residual observado no ensaio experimental. As curvas de permeabilidade relativas têm particular incidência no fluxo dos fluidos ao longo do meio poroso. As curvas de permeabilidade relativa ajustadas são apresentadas na Figura 35 e na Figura 36.

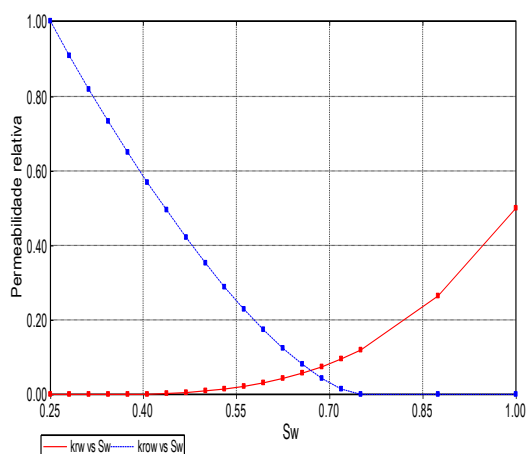


Figura 35 - Curva de permeabilidade relativa água-óleo

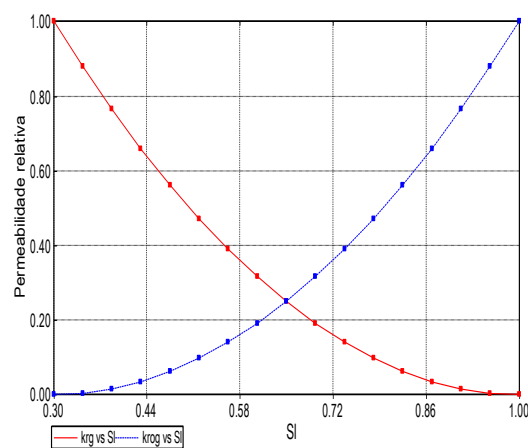


Figura 36 - Curva de permeabilidade relativa gás-liquido

### **4.3.3. Ajuste da energia de ativação**

A quantidade de combustível depositado no modelo inicial era substancialmente inferior à estimada no ensaio experimental, que foi aproximadamente  $19,6 \text{ Kg/m}^3$ . No sentido de aumentar a quantidade de combustível depositado no modelo de simulação aumentou-se a energia de ativação da reação de craqueamento para  $7,2 \times 10^4 \text{ J/gmole}$ . Com este procedimento foi possível aumentar a quantidade de combustível, e consequentemente a temperatura da frente de combustão.

### **4.3.4. Ajuste das perdas de calor**

Levando em conta que durante o período da ignição não existe fluxo de fluidos no sistema e que as temperaturas atingidas na sonda fixa são altas, é escolhido como referência para realizar o ajuste das perdas de calor. Por outra parte as perdas são consideradas só nas tampas superior e inferior da jaqueta, considerando que nas laterais é realizado um controlo adiabático do processo por meio das resistências instaladas na jaqueta. No quadro XX, são resumidas as mudanças realizadas no modelo para obter o ajuste. Com este procedimento foi possível diminuir a temperatura da frente de combustão, em especial no início do tubo. No Gráfico 49 são apresentados os perfis de temperatura do ensaio e do modelo numérico e no Gráfico 50 é apresentada a quantidade de combustível depositado ao longo do ensaio. A produção de fluidos encontra-se no Gráfico 51 e a composição do gás produzido no Gráfico 52.

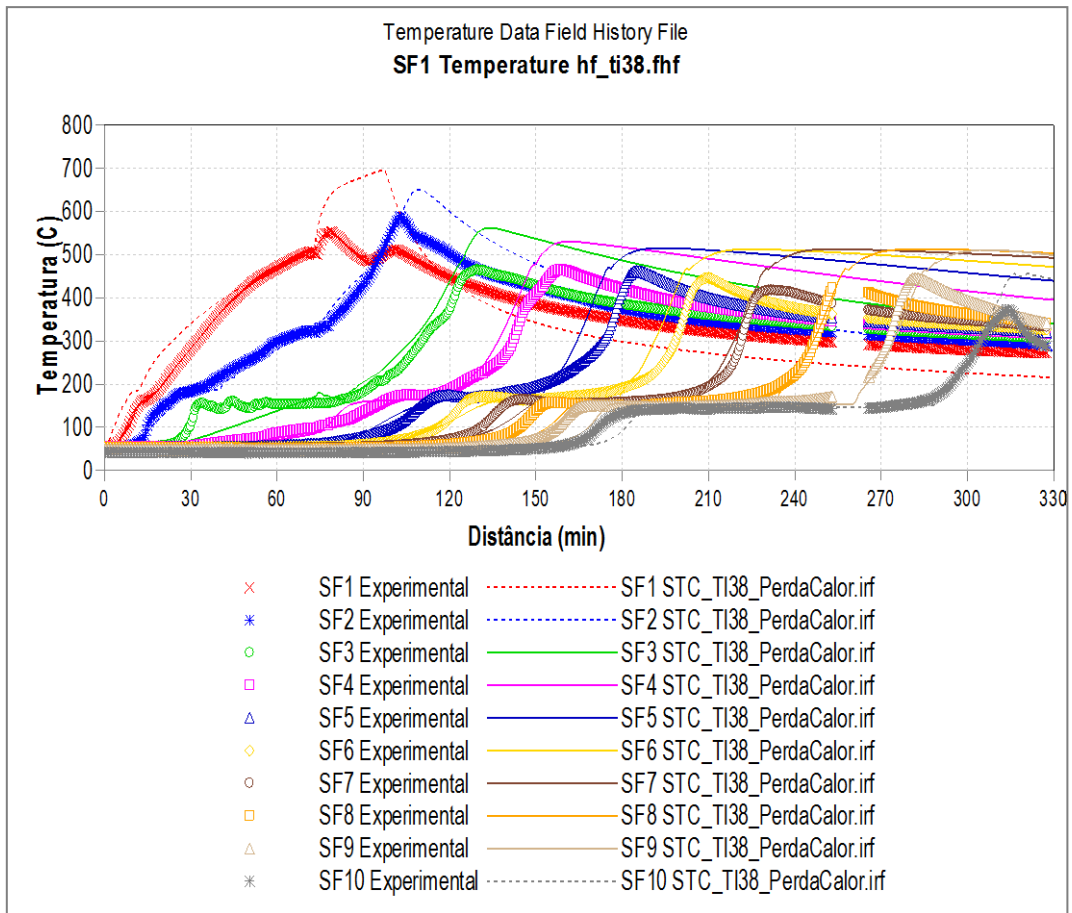


Gráfico 49 - Histórico de temperaturas do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo numérico ajustado

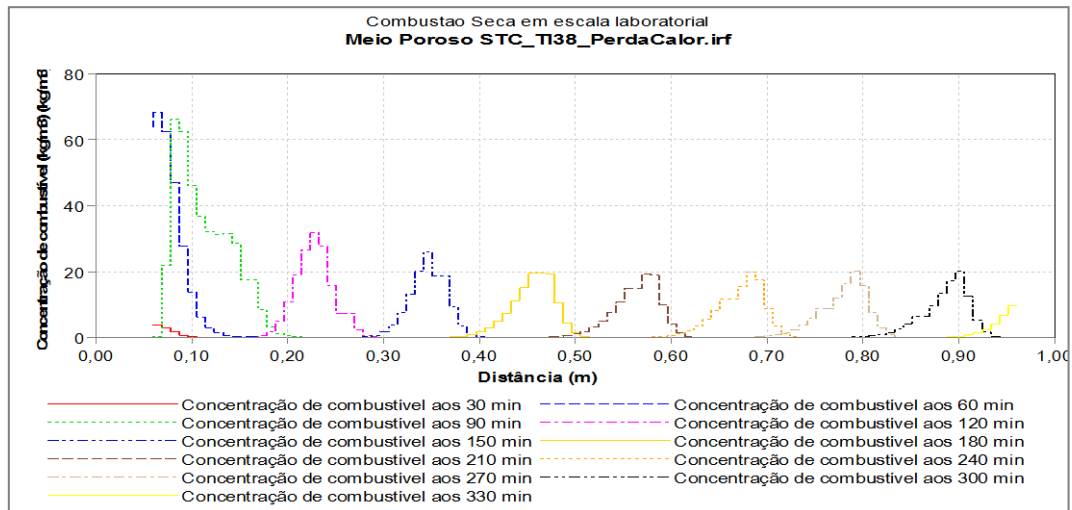


Gráfico 50 - Concentração de combustível ( $\text{kg/m}^3$ ) no modelo numérico ajustado

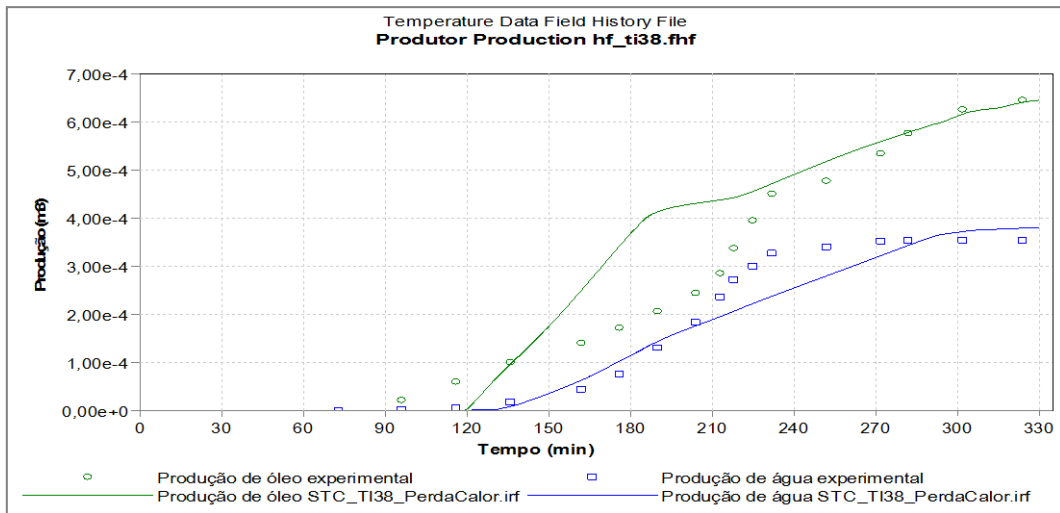


Gráfico 51 - Histórico de produção de fluidos do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo numérico ajustado

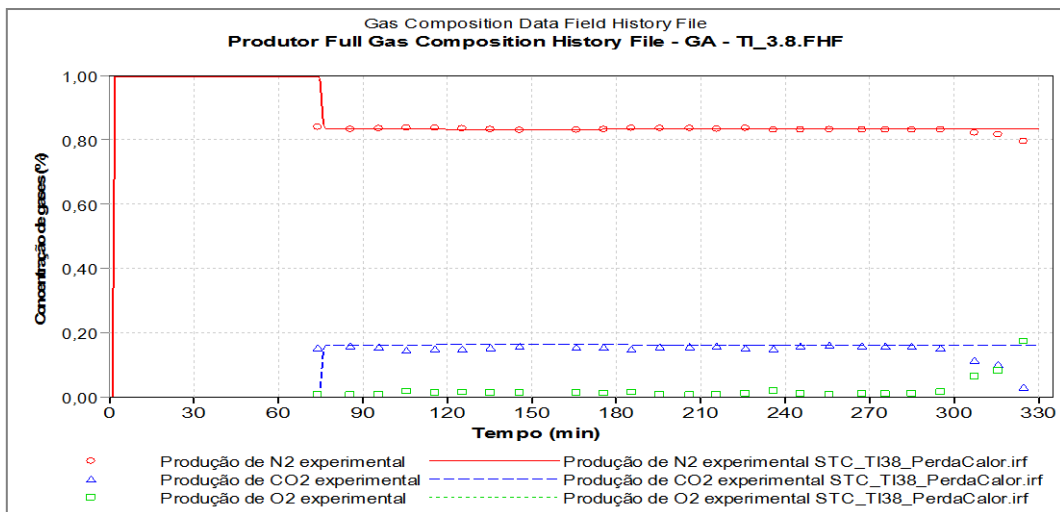


Gráfico 52 - Histórico da composição do gás produzido do ensaio em tubo de combustão utilizando uma taxa de injeção de 3.8 L/min e resultados da simulação numérica do modelo numérico ajustado

Com base na comparação dos dados experimentais e dos resultados do modelo numérico do tubo de combustão pode inferir-se que o modelo apresentado representa os principais fenômenos observados no decorrer do ensaio experimental. É de registrar apenas que a temperatura do modelo de simulação foi um pouco superior às temperaturas registadas no ensaio experimental e que não foi possível ajustar o início da produção de fluidos. É importante salientar que o modelo numérico não considera dois fatores com especial importância:

- A transferência de calor ao longo da camisa não é reproduzida no modelo, e deste modo o a influência que esta tem na produção de fluidos não pode ser reproduzida;
- O controlo adiabático não é reproduzido e este tem influência na produção de fluidos.

Todavia considera-se que globalmente este modelo é representativo do ensaio em tubo de combustão.





## 5. Conclusões e Recomendações

O presente estudo teve como objetivo avaliar o contributo do aumento da taxa de injeção de ar sintético no processo de combustão através de ensaios laboratoriais e a respectiva modelação numérica. Para tal foram desenhados e realizados 4 ensaios experimentais

Tendo em conta o que se descreveu sobre o processo de combustão *in-situ* pode concluir-se que este é bastante interessante, pois ocorre a separação da parte do óleo de maior valor para ser produzida, enquanto a fração mais pesada é queimada seletivamente e seus resíduos permanecem no local mais conveniente: o próprio reservatório. Resulta como se houvesse uma “refinaria dinâmica” desenvolvida no próprio reservatório (Moczydlower, 2006).

### 5.1. Conclusões

A análise dos resultados experimentais e numéricos permite concluir o seguinte sobre o processo de combustão *in-situ*:

- *Temperatura da frente de combustão*: em todos os ensaios efetuados a temperatura da frente de combustão, durante o período estável, foi superior a 400 °C;
- *Velocidade da frente de combustão*: a velocidade da frente de combustão é diretamente proporcional à taxa de injeção, ou seja, quanto maior a taxa de injeção maior a velocidade da frente de combustão;
- *Velocidade da frente de condensação*: a velocidade da frente de condensação não se mostrou sensível à alteração da taxa de injeção;
- *Crescimento do patamar de vapor*: o patamar de vapor apresenta um comprimento maior para menores taxas de injeção. Este crescimento é afetado pela influência da transferência de calor do tubo para a mistura;
- *Mecanismo de produção de fluidos*: observou-se que existem 3 etapas distintas na produção de fluidos:
  - Inicialmente a produção ocorre a uma taxa reduzida e constante;
  - Quando a frente de condensação atinge o poço produtor observa-se um aumento da produção de fluidos, especialmente de água;
  - Quando a produção de água começa e estabilizar, regista-se um aumento considerável na produção de óleo.
- *Produção de gases*: a produção de gases é praticamente constante desde o início da injeção de ar. Quando se comparam os resultados obtidos pelo analisador de gases e pela cromatografia, considera-se que o analisador de gases é um método que, apesar de estar associado a uma maior incerteza nas leituras observadas, é um método mais prático que a cromatografia, e cujo tratamento de dados é bem

mais rápido, sendo um instrumento fundamental para monitorar o processo de combustão ao longo do ensaio;

- *Qualidade do óleo produzido*: o processo de combustão revela-se um ótimo método de produção de óleo pesado, além de melhorar consideravelmente a qualidade do óleo produzido. As últimas amostras recolhidas apresentaram um aumento de 25 % do grau API;
- *Varrimento da frente de combustão*: observou-se que a percentagem de óleo residual na mistura final é abaixo de 1 %, indicativo do varrimento uniforme ao longo de todo o tubo de combustão.
- *Modelo de simulação*: o modelo de simulação apresentado reproduz os principais fenómenos do processo de combustão, podendo servir de base para a modelação do modelo à escala de reservatório.

## 5.2. Recomendações futuras

Considera-se que o trabalho contribui para melhorar a compreensão dos processos que correm durante o processo de combustão in-situ e que novos ensaios experimentais devem considerar as seguintes recomendações:

- Seria adequado que fosse possível efetuar a leitura da pressão em alguns pontos no interior do tubo de combustão, em particular para observar a influência da pressão no patamar de vapor;
- As posições onde a sonda móvel regista as temperaturas deveriam ser reajustadas, pois, em geral, esta efetua grande parte da leitura na zona queimada, não permitindo o refinamento da temperatura na zona entre a frente de combustão e o patamar de vapor;
- O controlo adiabático deveria ser efetuado pelas temperaturas da sonda fixa e não pela camisa, para minimizar a transferência de calor do tubo para a mistura, e consequentemente, o efeito sobre o patamar de vapor;
- Efetuar a modelação do tubo de combustão considerando a transferência de calor ao longo do tubo e incluir o sistema de controlo adiabático, já que ambos têm uma importância nos mecanismos de produção de fluidos.

## 6. Bibliografia

- Almeida, A. S. (2004). Recursos Energéticos do Brasil: Petróleo, Gás, Urânio e Carvão - Petrobras. Rio de Janeiro.
- Araújo, J. S. (2012). *Estudo paramétrico do Processo de combustão in situ*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Bousald, S. (1989). Multiple-Quenched Fireflood Process Boosts Efficiency. *Journal Petroleum Technology*, SPE 16739.
- Bressam, L. W. (2008). *Recuperação Avançada de Petróleo*. CEPAC.
- Burger, J. (1985). *Thermal Methods of oil Recovery*. Paris: Editions Technip.
- Castiñeira, P. P. (2008). *Estudo da viabilidade econômica de projetos de recuperação suplementar para campos com alto grau de exploração*. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Projeto final .
- Chen, B. (2012). *Investigation of in-situ combustion kinetics using the isoconversional principle*. Universidade de Stanford.
- Chicuta, A. M. (2009). *Estudo Experimental Sobre Recuperação de Óleo Pesado através da Combustão In situ – Dissertação de mestrado em Ciências da Engenharia de Petróleo*. Unicamp, Campinas.
- Costa Silva, A. (2001). *Lição de Síntese - A integração dos Dados e da Informação Sísmica, Geológica, Petrofísica e de Produção na Construção de Modelos Descritivos de Reservatórios de fluidos*. Lisboa.
- Cruz, R. O. (2010). *Combustão In-Situ considerações sobre projeto e simulações numéricas em escala de laboratório e de campo*. Unicamp, Campinas.
- Farouq Ali, S. M. (1997). *Practical Heavy Oil Recovery*. Alberta.
- Gonçalves, L. I. (2010). *Estudo Experimental da Combustão Molhada na Recuperação de Oleo Pesado - Tese de Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo*. Unicamp, Campinas.
- Greaves, M. X. (2003). *Main Mechanism for Stability of THAI – “Toe-to-heel Air*. Petroleum Society’s Canadian International Petroleum Conference, Calgary.
- Green, D. W., & Willhite, G. P. (2003). *Enhanced Oil Recovery*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- Gutierrez, D. M. (2009). The Challenge of Predicting Field Performance of Air Injection Projects Based on Laboratory and Numerical Modelling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, p. 48.
- KoK, M. V. *Enhanced Oil Recovery Techniques*. Middle East Technical University.
- Kumar, M., & Garon, A. M. (1991). *An Experimental Investigation of the Fireflooding*. SPE 17392-PA, SPE Reservoir Engineering, Vol. 6, n. 1.

- Mamora, D. D. (1993). *Kinetics of in situ combustion*. Stanford University.
- Mercado, D. (2013). *Ensaio em Tubo de Combustão Seca - Rio Preto Oeste*. Unicamp.
- Mercado, D. (2012). *Modelo de Fluidos Rio Preto Oeste*. Unicamp, Campinas.
- Mercado, D. (2013). *Numerical Simulation of a Dry Combustion Tube Test for a Brazilian Heavy Oil*. Unicamp, Campinas.
- Penberthy, W., & Berry, H. a. (1968). Some fundamentals of steam-plateau behavior in combustion oil recovery. *Society of Petroleum Engineers of AIME , SPE 2213*.
- Pereira, A. N. (2008). *Estudo termoanalítico e cinético da combustão de óleo pesado*. Campinas.
- Reid, T. B. (1996). *Thermal process for heavy oil recovery in-situ combustion handbook - Principles and practices*.
- Ribeiro, G. B. (2009). *Simulação numérica de combustão "In-situ" em escala laboratorial – Dissertação de mestrado em Ciências da Engenharia de Petróleo*. Unicamp, Campinas.
- Rodriguez, J. (2004). *Experimental and Analytical Study to Model Temperature Profiles and*. Texas A&M University.
- Sarathi, P. (1999). *In-Situ Combustion Handbook -- Principles and Practices*. United States: USDOE Office of Fossil Energy (FE) (US).
- Satman, A., & Brigham, W. a. (1981). *In-situ Combustion Models for the Steam Plateau and for Fieldwide Oil Recovery*. Stanford: Stanford University Petroleum Reserach Institute.
- Schlumberger. (s.d.). [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors06/sum06/heavy\\_oil.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors06/sum06/heavy_oil.pdf).  
Obtido em 04 de Abril de 2014, de [www.slb.com](http://www.slb.com):  
[https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors06/sum06/heavy\\_oil.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors06/sum06/heavy_oil.pdf)
- Silva, R. R. (2010). *Análise numerica dimensional aplicada a combustão in-situ (CIS)*. Unicamp, Campinas.
- Varga, J. V. (2011). *Cinética de Combustão de Óleo Pesado por Calometria de Taxa acelerada*. Unicamp, Campinas.
- White, P. D. (1983). *Thermal Recovery Methods*. PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma.
- Zhang, X., Liu, Q., & Che, H. (2013). Parameters Determination during In Situ Combustion of Liaohe Heavy Oil. *Energy & Fuels* , 3416–3426.