

Capítulo 4

Resultados & Discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados experimentais. A discussão é feita inicialmente por família de teste (seções 4.1 a 4.3) e em seguida, compara-se as famílias relativamente em relação ao potencial de redução da emissão de material particulado (seção 4.4).

As famílias de teste estudadas são:

- **TTA – Teste de Tempo de Alimentação.**
Relativo à variação de intervalo de tempo de alimentação entre duas cargas consecutivas.
- **TLP – Teste de Líquido Pulverizado.**
Relativo à variação da forma de introdução do resíduo líquido em pequena quantidade – pulverizado ou em barricas.
- **TO₂ – Teste de O₂.**
Relativo à variação de excesso de oxigênio nos gases de combustão.

4.1. Testes de tempo de alimentação – TTA

A família de testes TTA tem como principal objetivo verificar a influência do intervalo de tempo entre duas alimentações de resíduo no forno rotativo sobre a emissão de material particulado na chaminé. A taxa horária de alimentação de resíduo é mantida constante e igual a 833 kg/h (seção 3.2).

4.1.1. Resultados experimentais

A tabela 4.1 apresenta os resultados experimentais de material particulado da família de testes TTA. As figuras 4.1 e 4.2 apresentam os resultados da tabela 4.1. A variação da rotação do forno rotativo facilita a entrada das barricas no forno rotativo. A variação da rotação do forno rotativo também alteraria o tempo de residência das barricas, caso as mesmas não fossem totalmente incineradas antes de saírem do forno rotativo. A ordem cronológica dos testes foi: TTA1, TTA2, TTA4, TTA3, TTA1*. A ordem cronológica dos testes foi feita de forma a evitar erros acumulativos, sendo portanto diferente da ordem crescente entre intervalos de tempo de alimentação: TTA1, TTA2, TTA3, TTA4. Todos estes testes foram realizados no mesmo dia.

Tabela 4.1 – Resultados experimentais de material particulado da família de testes TTA.

Teste	ΔT (minutos)	m (kg)	r.p.m.	O ₂ (%)	MP (adim)	MP 12% O ₂ (adim)
TTA1	1	14	0,321	9,7	0,46	0,36
TTA1*	1	14	0,550	10,8	0,44	0,39
TTA2	2	28	0,321	10,0	0,32	0,27
TTA3	3	42	0,550	10,2	0,47	0,39
TTA4	4	56	0,550	11,3	0,76	0,70

ΔT – Intervalo de tempo entre duas alimentações consecutivas.

m – Massa da carga unitária introduzida.

r.p.m. – Rotação do forno rotativo em r.p.m. (rotações por minuto).

O₂ (%) – Porcentagem volumétrica média real de O₂ em base seca (sem água) na saída dos gases de combustão

MP (adim) - Material particulado, adimensional de mg de MP/Nm³, em base seca, com % de O₂ média real do teste.

MP 12% O₂ (adim) – Material particulado, adimensional de mg de MP/Nm³, em base seca, com correção para 12% de O₂.

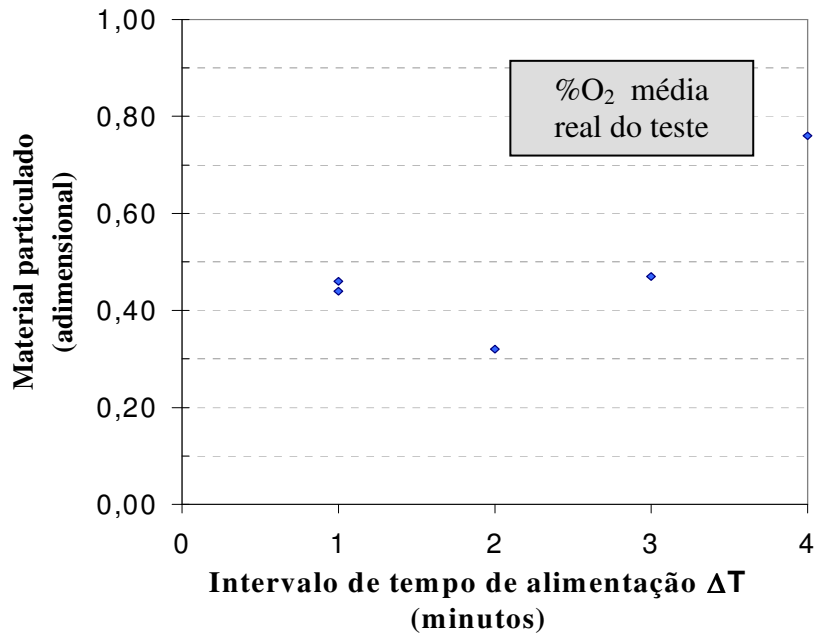


Figura 4.1- Resultados experimentais de material particulado (MP) da família de testes TTA, adimensional, na % de O₂ real do teste, indicada na tabela 4.1.

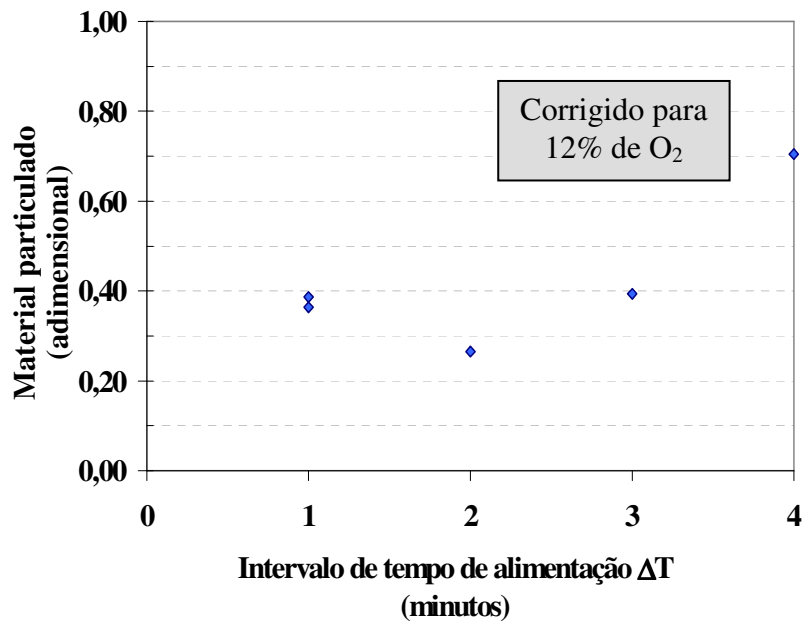


Figura 4.2 – Resultados experimentais de material particulado (MP) da família de testes TTA, corrigidos para 12% de O₂, adimensional.

4.1.2. Discussão dos resultados experimentais

Analisando-se os resultados da família de testes TTA, observa-se que o melhor intervalo de tempo entre duas alimentações consecutivas para minimização de material particulado é de 2 minutos.

Verifica-se que o intervalo de tempo é significativo para a minimização de material particulado. Se compararmos, base seca a 12% de O₂, a maior emissão de material particulado (0,70 adim.), com intervalo de tempo de 4 minutos e a menor emissão de material particulado (0,27 adim.) com intervalo de tempo de 2 minutos, a relação entre ambas é de 2,6. Ou seja, a relação de tendência entre a emissão de material particulado alimentado a cada 4 minutos é em média 2,6 vezes o valor da emissão de material particulado alimentada a cada 2 minutos, com a mesma taxa horária de alimentação de resíduo (833kg/h).

Uma vez que a porcentagem de O₂ oscilou entre 9,7 e 11,3 %, um delta de 1,6 % entre o maior e menor valor, a correção para 12% de O₂ praticamente não interferiu na tendência verificada na figura 4.1, em comparação à figura 4.2. Confirmando a tendência observada nas figuras, a relação entre os testes com intervalo de tempo entre 2 e 4 minutos, na base de % de O₂ real foi de 2,4, bem próxima a 2,6.

A interferência da mudança na frequência do forno rotativo também não interviu nos resultados entre os testes TTA1 e TTA1* (tabela 4.1), que tiveram rotações diferentes, de 0,321 e 0,550, respectivamente, e diferença entre respectivos resultados adimensionais de 0,02 (% O₂ base real) ou 0,03 (corrigido para 12% de O₂).

O primeiro fator determinante dos resultados apresentados é a capacidade do forno rotativo. Para melhor ilustrar este fato, busca-se uma situação extrema: todo o volume interno do forno rotativo com resíduos durante um instante t_1 , e num segundo instante $t_2 = t_1 + \Delta t$, o volume interno do forno rotativo vazio. No instante t_1 , há excesso de combustível e falta de oxigênio para tanto combustível; em t_2 ocorre a situação inversa, há excesso de comburente e falta de combustível. Nenhuma das situações, t_1 ou t_2 é desejável do ponto de vista de processo. Assim como as tecnologias de novos queimadores buscam a melhor relação ar/combustível (IPT, 2002; Carvalho, 2001) para melhor performance, a alimentação do forno rotativo também deve buscar a melhor performance possível dentro

das limitações e tecnologias disponíveis. Portanto, o melhor cenário, por este ponto de vista, seria que a situação intermediária entre t_1 e t_2 fosse mantida a maior parte do tempo. Ou seja, que a oscilação entre a relação ar/combustível fosse a menor possível.

A situação teórica o mais longe do regime contínuo corresponde ao máximo intervalo de tempo entre duas alimentações. O caso mais próximo desta situação realizado experimentalmente é o teste TTA4. Coincidindo com a teoria citada, é o caso com maior emissão de material particulado. A mesma teoria explica a diferença entre os resultados de TTA3 e TTA4, mostrando para o intervalo de tempo de 4 minutos uma emissão de material particulado com valor de 1,7 vezes (1,6 base O_2 real e 1,8 base 12% O_2) a emissão correspondente ao intervalo de tempo de 3 minutos.

Para a diferença entre os resultados de material particulado (MP) dos testes TTA3 e TTA2, tanto pode ser possível a explicação do regime permanente, qualitativamente e quantitativamente, quanto pode ser adequada a explicação de que mesmo que qualitativamente seja melhor o intervalo de tempo de dois minutos, este não seja significativo na emissão de material particulado, uma vez que a diferença entre os resultados de MP dos testes TTA3 e TTA2 é muito próxima quantitativamente da diferença entre os resultados de MP dos testes TTA1 (e TTA1*) em relação a TTA2.

Para buscar a resposta de qual das explicações é a mais correta, um caminho é conhecer a barra de erros experimental dos testes. Para o cálculo da barra de erros experimental, é necessário calcular tanto a barra de erros experimental devido ao método de coleta de material particulado, quanto calcular a barra de erros experimental devido a oscilações de processo.

A barra de erros experimental devido ao laboratório, usando o método de propagação de erros (USP, 1992), foi menor que 10%, enquanto a diferença entre os testes TTA1, TTA1* e TTA3, sempre em relação ao testes TTA2, tanto em base de O_2 real, quanto corrigida para 12% de O_2 , foi da ordem de 30%. Ou seja, conclui-se que a barra de erros devido à precisão da amostragem de material particulado não é suficiente para explicar porque o intervalo de tempo de dois minutos apresenta melhor resultado que o intervalo de um minuto. Portanto, é necessário analisar também a barra de erros do processo. Todos demais parâmetros do processo foram mantidos os mais constantes possíveis para toda a família de testes. Ainda assim, oscilaram. Portanto, a barra de erros do

processo é desconhecida, uma vez que não se conhece atualmente a influência de cada oscilação de parâmetro do processo na emissão de material particulado na chaminé, na unidade UIR em estudo. Este trabalho, inclusive, visa ajudar a elucidar parte desta influência.

Uma referência da interferência dos outros parâmetros que pode ser usada, porém com cautela, uma vez que utiliza apenas dois pontos experimentais, é a diferença entre os resultados de MP (adim) dos testes TTA1 e TTA1*: variou entre 0,46 e 0,44, respectivamente, em porcentagem de O₂ real. Uma diferença de 0,02 em uma escala de resultados de MP que varia de 0 a 1, ou seja, uma oscilação de apenas 2% da escala.

O **apêndice K** tem os valores dos parâmetros do processo para comparação destes parâmetros após possíveis trabalhos experimentais futuros, de forma a poder se concluir se realmente alguma oscilação do processo, ou o conjunto das mesmas, nas condições semelhantes a da UIR, afeta ou não, dentro da faixa de oscilação destes parâmetros. É interessante notar que houve variações visuais da chama dentro do forno rotativo. É provável que o que ocorreu dentro do forno rotativo seja o responsável por fazer o teste TTA2 ter apresentado a menor emissão de material particulado. Além da visualização da chama, o único parâmetro que mostrou ser diferente no forno rotativo entre os testes, é o ar que entra pela abertura da tampa, porém pouco significativa para a variação de emissão de material particulado apresentada. Além disto, a variação deste ar que entra é relativa, uma vez que assim como o teste tem menor número de aberturas de tampa de alimentação também tem o maior tempo gasto com uma única abertura de porta. A cinética de combustão também pode ter sido afetada, porém não há dados experimentais coletados que comprovem esta hipótese.

O teste que apresentou a melhor chama, do ponto de vista de combustão, foi também o teste TTA2, que apresentou chama mais clara, amarelada. Os testes TTA1 e TTA3 apresentaram chama mais avermelhada, e o teste TTA3 um pouco de fuligem. O teste TTA4 foi o que apresentou mais fuligem. As figuras 4.3 a 4.6 mostram estes resultados.

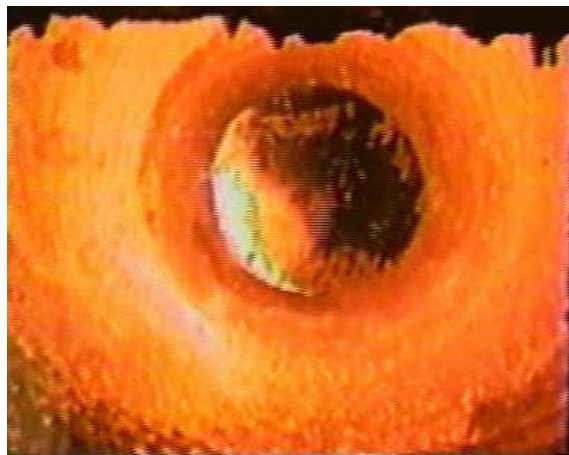
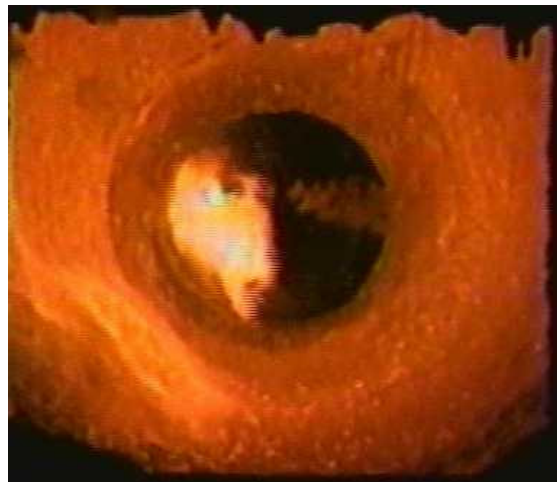
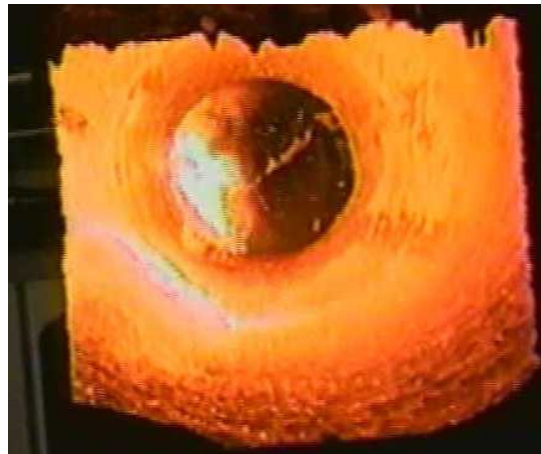


Figura 4.3 – Fotos das chamas durante teste TTA1. Observam-se momentos diferentes predominantes durante o teste.



Figura 4.4 – Fotos das chamas durante teste TTA2. Observam-se momentos diferentes predominantes durante o teste.

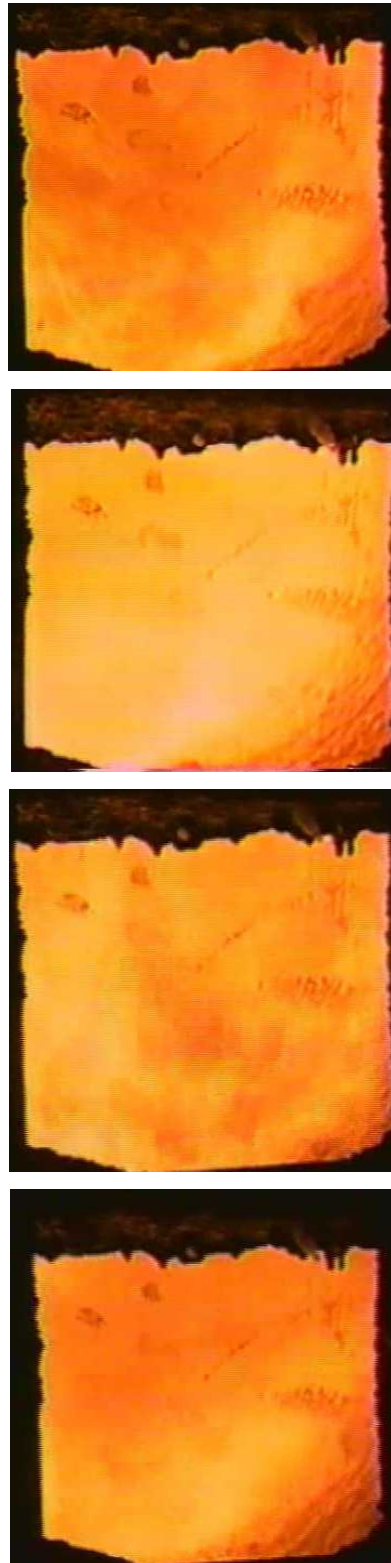


Figura 4.5 – Fotos das chamas durante teste TTA3. Observam-se momentos diferentes predominantes durante o teste.

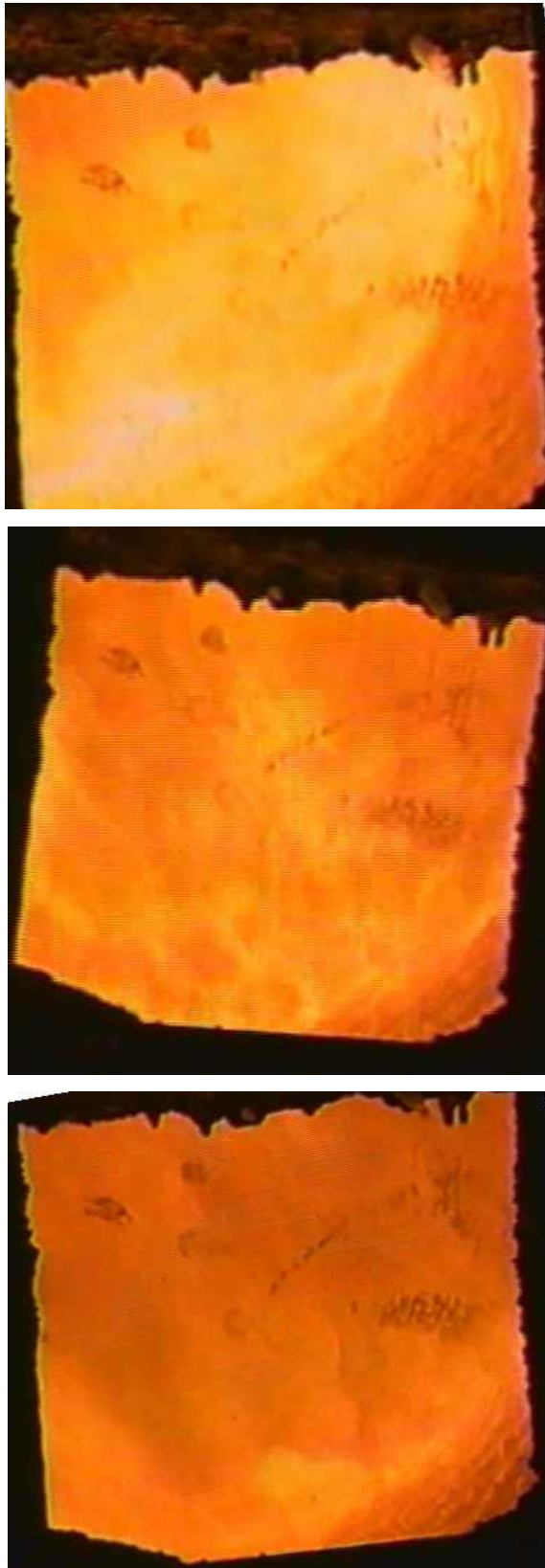


Figura 4.6 – Fotos das chamas durante teste TTA4. Observam-se momentos diferentes predominantes durante o teste.

A fuligem apareceu pouco visualmente nos testes TTA1, pouco mais no teste TTA3 e foi bem visível no teste TTA4. A variação da geração desta fuligem é um indicador de que realmente há em alguns instantes baixa relação de comburente/combustível e estes instantes são mais significativos para os testes TTA4, seguido do teste TTA3 e depois para o teste TTA1. Já o teste TTA2 não apresentou fuligem visível, devido ao segundo fator determinante dos resultados desta família de testes.

As diferenças entre as chamas das fotos apresentadas são parecidas com as apresentadas em testes com diferentes quantidades de enriquecimento da porcentagem de oxigênio (Sindicic, 2002). Analisou-se, portanto, a porcentagem de oxigênio para o resíduo em cada teste e comparou-se estes valores, além de seus desvios, como indicam as tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2 – Vazão de oxigênio puro para o forno rotativo para família de testes TTA.

Vazão de gás oxigênio puro para o Forno Rotativo					
(Nm³/h)					
Teste	TTA1	TTA1*	TTA2	TTA3	TTA4
média	95,5	100,2	100,2	100,2	100,2
máximo	103,8	103,8	103,2	102,6	103,2
mínimo	49,2	97,8	97,8	97,8	97,8
des. padrão	14,0	1,3	1,1	0,9	0,9

Tabela 4.3 – Vazão de ar para o resíduo para o forno rotativo para família de testes TTA.

Vazão de ar para o resíduo no Forno Rotativo					
(Nm³/h)					
Teste	TTA1	TTA1*	TTA2	TTA3	TTA4
média	1471	1468	1471	1468	1469
máximo	1479	1479	1479	1476	1479
mínimo	1464	1461	1461	1461	1461
des. padrão	3,5	2,9	3,7	3,2	3,5

Tabela 4.4 – Média da % O₂ no ar de alimentação para o resíduo no forno rotativo para família de testes TTA.

O ₂ no ar para o resíduo (%)					
Teste	TTA1	TTA1*	TTA2	TTA3	TTA4
média	25,8	26,0	26,0	26,0	26,0

Dos resultados das tabelas 4.2, 4.3, e 4.4 conclui-se que a porcentagem média de O₂ foi constante e que as oscilações das vazões de ar e oxigênio puro para o resíduo foram mínimas, excelentes se considerarmos que estamos em escala industrial. Ou seja, a variação da coloração da chama não foi devido à variação da porcentagem de oxigênio no ar enriquecido para o resíduo.

4.2. Testes de modo de introdução de resíduo líquido - TLP

A família de testes TLP (teste com líquido pulverizado ou TLNP – teste com líquido não pulverizado) tem como principal objetivo verificar a influência do modo de introdução de pequena quantidade de resíduo líquido sobre a emissão de material particulado na chaminé (seção 3.2).

O resíduo líquido pode ser introduzido pulverizado (testes TLP) ou colocado juntamente com o resíduo sólido, no interior das barricas (testes TLNP).

As figuras 4.7 e 4.8 mostram a preparação das barricas com adição de resíduo líquido.



Figura 4.7 - Preparação da barrica de papel com vidro dentro da barrica preta plástica.



Figura 4.8 - Adição do álcool ao vidro dentro da barrica plástica imediatamente anterior à incineração da mesma.

4.2.1. Resultados experimentais

Foram realizados dois testes com o resíduo líquido pulverizado: TLP1 e TLP2, semelhantes.

Também foram realizados dois testes com o resíduo líquido juntamente com o resíduo sólido, no interior de barricas: TLNP1 e TLNP2, semelhantes.

Estes testes foram feitos em duplicata visando uma maior garantia das conclusões sobre o modo de introdução de líquido, pulverizado ou em barricas.

Os testes TLP1 e TLP2 foram feitos com álcool pulverizado e vidro em barricas de papel.

Já os testes TLNP1 e TLNP2 foram feitos com álcool e o vidro juntos em cada barrica de papel, e esta dentro de barrica preta plástica, para não ocorrer vazamento de álcool nem haver risco para o operador responsável pela alimentação manual do resíduo na entrada do forno rotativo.

Foram realizados dois testes em branco (Bco): TLPBco – teste com queima da degasagem de aminas e gás natural; TLNPBco – teste com queima da degasagem de aminas, gás natural e barricas pretas plásticas. Os dois testes em branco foram feitos para confirmar a diferença na emissão de material particulado na chaminé devido ao modo de introdução de líquido, pulverizado ou não, e confirmar que a diferença entre os testes TLP (TLP1 e TLP2) e TLNP (TLNP1 e TLNP2) são devido ao modo de introdução de líquido e não devido à presença das barricas pretas adicionadas.

Tabela 4.5 - Resultados experimentais de material particulado da família de testes TLP.

Teste	Líquido pulverizado (kg/h)	Líquido em barrica (kg/h)	O ₂ (%)	MP (adim)	MP 12% O ₂ (adim)	Barrica preta
TLPBco	0	0	8,7	0,03	0,02	não
TLP1	132	0	8,7	0,48	0,35	não
TLP2	132	0	8,3	0,27	0,19	não
TLNPBco	0	0	12,8	0,06	0,07	sim
TLNP1	0	132	12,8	0,91	1,00	sim
TLNP2	0	132	9,5	0,98	0,77	sim

Demais resultados experimentais: **apêndice L.**

4.2.2. Discussão dos resultados

Analisando-se os resultados dos testes (tabela 4.5), verifica-se que é representativa a minimização da emissão de material particulado devido à pulverização de líquido.

A relação entre a emissão de material particulado com o líquido em barrica é em (média 3,3 vezes) maior que a emissão de material particulado com o líquido pulverizado.

Confirmou-se, conforme esperado das teorias (seção 2.11.1), que quanto maior a relação superfície/volume, melhor a qualidade da queima do resíduo líquido. O líquido queima superficialmente. Quando fica com muito volume e pouca área de troca, gera fuligem (grafite) devido à má qualidade da queima.

Foram incinerados 4,5 kg de álcool em cada barrica de vidro, a cada 2 minutos. No total de uma hora, foram incinerados 132 kg de álcool. Juntamente a este álcool, foram incinerados 420 kg de vidro. Ou seja, a porcentagem de resíduo líquido na barrica foi de 32,1% em massa. Se forem considerados os outros resíduos, também secos, que foram incinerados juntamente, devem ainda ser adicionados 6 rolos de Liners de 20 Kg cada e 10 pacotes de fardos plásticos de 16 kg cada, totalizando 835kg/h de resíduos totais. Deste total, 16,16 % (em massa) é álcool.

Caso fosse colocado maior porcentagem de líquido nas barricas, a tendência seria aumentar a diferença média de 3,3 vezes para resultados ainda mais relevantes de material particulado.

Portanto, para casos de queima semelhantes ao dos testes, é significativa a redução da emissão de material particulado (diminui 3,3 vezes) caso se pulverize todo o resíduo líquido, ao invés de deixá-lo na barrica, mesmo que seja em pequena quantidade.

Além de todos os fatores ainda citados, vale lembrar que a pulverização depende muito do sistema de pulverização: tipo de bico (apêndice G), pressão do líquido na entrada do bico, viscosidade e densidade do líquido. Estes fatores também são interferentes nos resultados de emissões. Um jato de líquido, ao invés de uma boa pulverização, causa em sua superfície superior uma camada de fuligem preta.

Não pulverizar o líquido não é recomendado: piora significativamente a qualidade da queima, além de gerar muita fuligem e picos de CO. A comparação entre picos de CO dos testes com pulverização de líquido e sem pulverização de líquido podem ser vistos nas figuras 4.9 e 4.10.

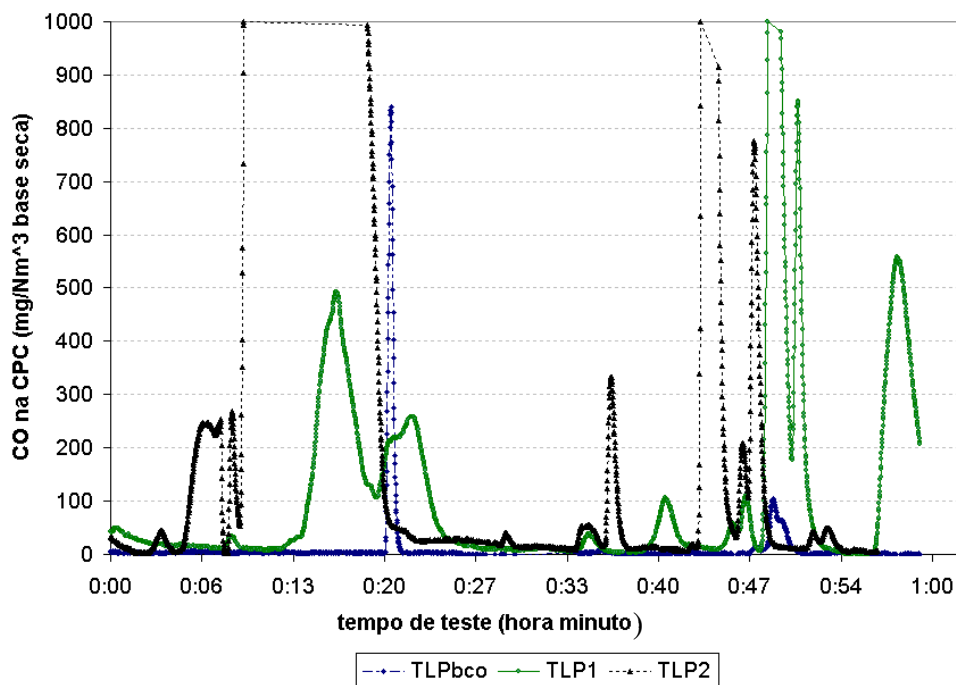


Figura 4.9 – Emissão de CO na saída da câmara de pós combustão durante testes com o resíduo líquido pulverizado

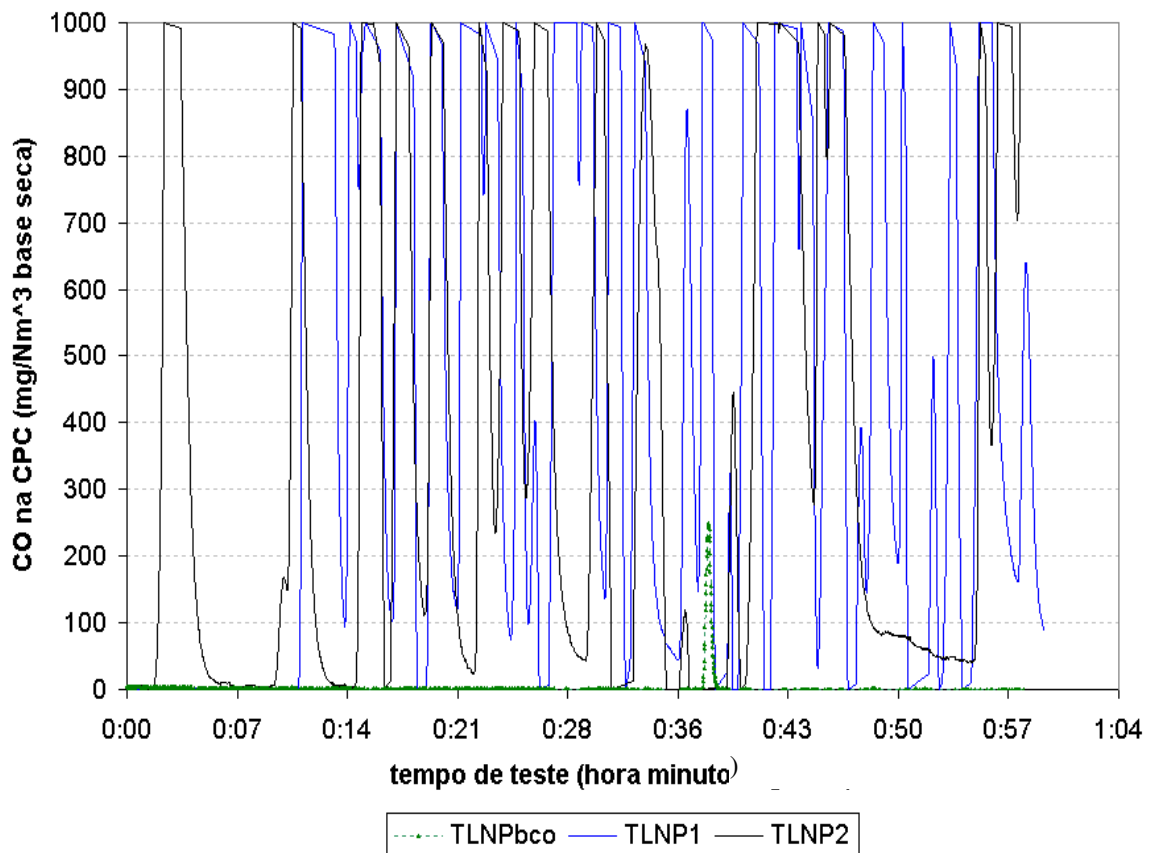


Figura 4.10 – Emissão de CO na saída da câmara de pós combustão durante testes com o resíduo líquido acondicionado em barricas.

Observação da figura 4.10: Para o teste TLNP1 a periodicidade média dos picos de CO é coincidente com o intervalo de tempo de alimentação, entre 0:14 minutos e 1 hora e 04 minutos. Já para o teste TLNP2, houveram vários picos de CO, porém a periodicidade média não coincidiu exatamente com o intervalo de tempo de alimentação.

A qualidade da queima foi observada durante o experimento. A queima com o resíduo líquido pulverizado mostra luz amarela bem clara, pouca fuligem. A queima do resíduo líquido junto com o resíduo sólido nas barricas apresenta fumaça preta saindo da barrica.

Observação quanto à incineração de vidro

Percebe-se que, quando se queima vidro, o mesmo escorre pelas paredes do forno rotativo. Cria-se uma camada vítrea única, que aparentemente protege os refratários. O problema é quando esta camada resfria em paradas, sendo que gruda os refratários e trinca, por não haver sistema de dilatação. O refratário passa a cair em pedaços. É sugerido, portanto, reestudo da incineração de vidro do ponto de vista econômico do processo, uma vez que uma das manutenções mais caras do incinerador é a troca de refratários.

4.3. Testes de excesso de oxigênio nos gases de combustão – família de testes TO2

A família de testes TO2 (Testes que estudam excesso de O₂) tem como principal objetivo verificar o quanto o excesso de ar interfere na qualidade da queima. Em todos os testes, o ar utilizado para a queima do resíduo entra com ar enriquecido com faixa de 23±1% de oxigênio. Não foi utilizada maior % de O₂ no ar para o resíduo pois a lança já estava no máximo (próximo a 100Nm³/h de O₂ puro) na situação de teste mais crítica (maior excesso na saída dos gases de combustão) (seção 3.2).

4.3.1. Resultados experimentais

A tabela 4.6 mostra os resultados experimentais, com destaque também para a temperatura na câmara de pós combustão. Demais registros experimentais: **apêndice M**. As figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados experimentais para emissão de material particulado, respectivamente corrigido para 12 % O₂ e % O₂ real.

Tabela 4.6 – Resultados experimentais da família de testes TO2 para MP.

TESTE	T CPC (°C)	O2 (%)	MP (adim)	MP 12% O2 adim
TO2 Bco ABC	1067+-70	18,3	0,19	0,64
TO2A	1046+-99	13,3	0,58	0,68
TO2B	1070+-76	14,9	0,64	0,94
TO2C	1156+-81	8,8	0,37	0,27
TO2 Bco DE	751+-19	15,8	0,09	0,16
TO2D	1106+-33	11,1	0,46	0,42
TO2E	1152+-43	9,5	0,18	0,14

TO2 – Teste que estuda excesso de O2

Bco- Branco

A, B,C,D,E – cada letra é um teste, segue o alfabeto de acordo com a ordem cronológica

Bco ABC – branco feito antes dos testes TO2A, TO2B, e TO2C

Bco DE - branco feito antes dos testes TO2D, TO2E (este segundo conjunto de testes foram realizados em dia diferente do conjunto de testes: Bco ABC, TO2A, TO2B, TO2C)

T CPC (°C) – Temperatura dos gases na câmara de pós combustão.

O2 (%) – Porcentagem volumétrica média real de O2 em base seca

MP (adim) - Material particulado, adimensional de mg de MP/Nm³, em base seca, com % de O2 média real do teste.

MP 12% O2 (adim) – Material particulado, adimensional de mg de MP/Nm³, em base seca, com correção para 12% de O2.

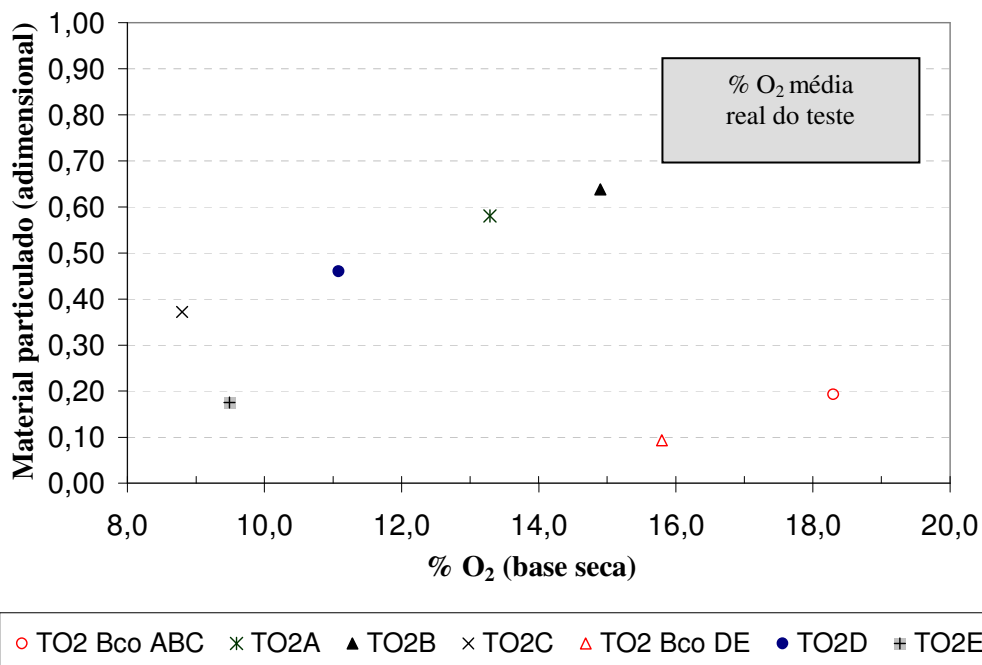


Figura 4.11- Resultados experimentais de material particulado (MP) da família de testes TO2 , na % de O2 real do teste, indicada na tabela 4.6.Eixo x: %O2 (base seca) nos gases de exaustão.

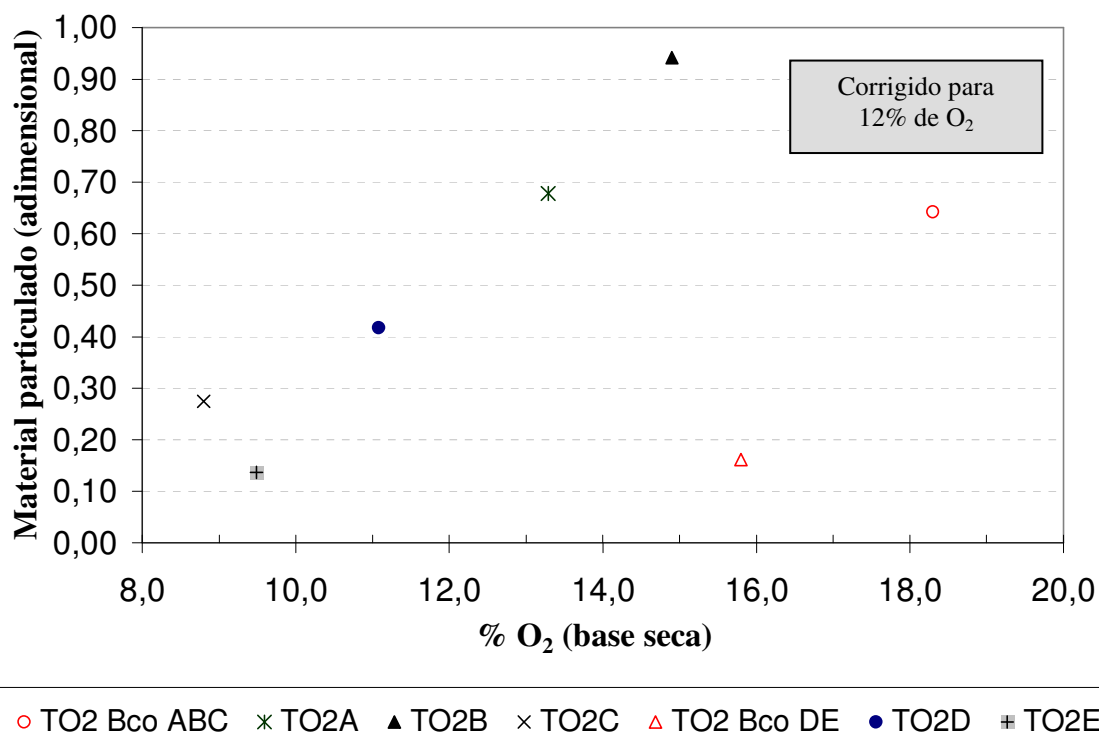


Figura 4.12 - Resultados experimentais de material particulado (MP) da família de teste TO2, corrigidos para 12% de O₂, adimensional. Eixo x: %O₂ (base seca) nos gases de exaustão.

4.3.2. Discussão dos resultados

Analisando-se a tabela 4.6 e as figuras 4.11 e 4.12, verifica-se que é significativa a influência da % de O₂ real na emissão de material particulado (MP).

A correção para 12 % de O₂ contribui parcialmente para a diferença de emissão de MP em diferentes % de O₂. Esta diferença pode ser vista pela diferença de inclinação dos pontos plotados entre as figuras 4.11 e 4.12.

A correção de O₂ é feita para evitar a diluição do poluente. Portanto, ela aumenta o resultado para concentrações maiores que 12% e diminui pra concentrações de O₂ menores que 12%.

Matematicamente, a correção para 12% de O₂ é representada pela figura 4.13, plotando-se o fator de correção para porcentagens de O₂ de 0 até 30%, (equação 3.1).

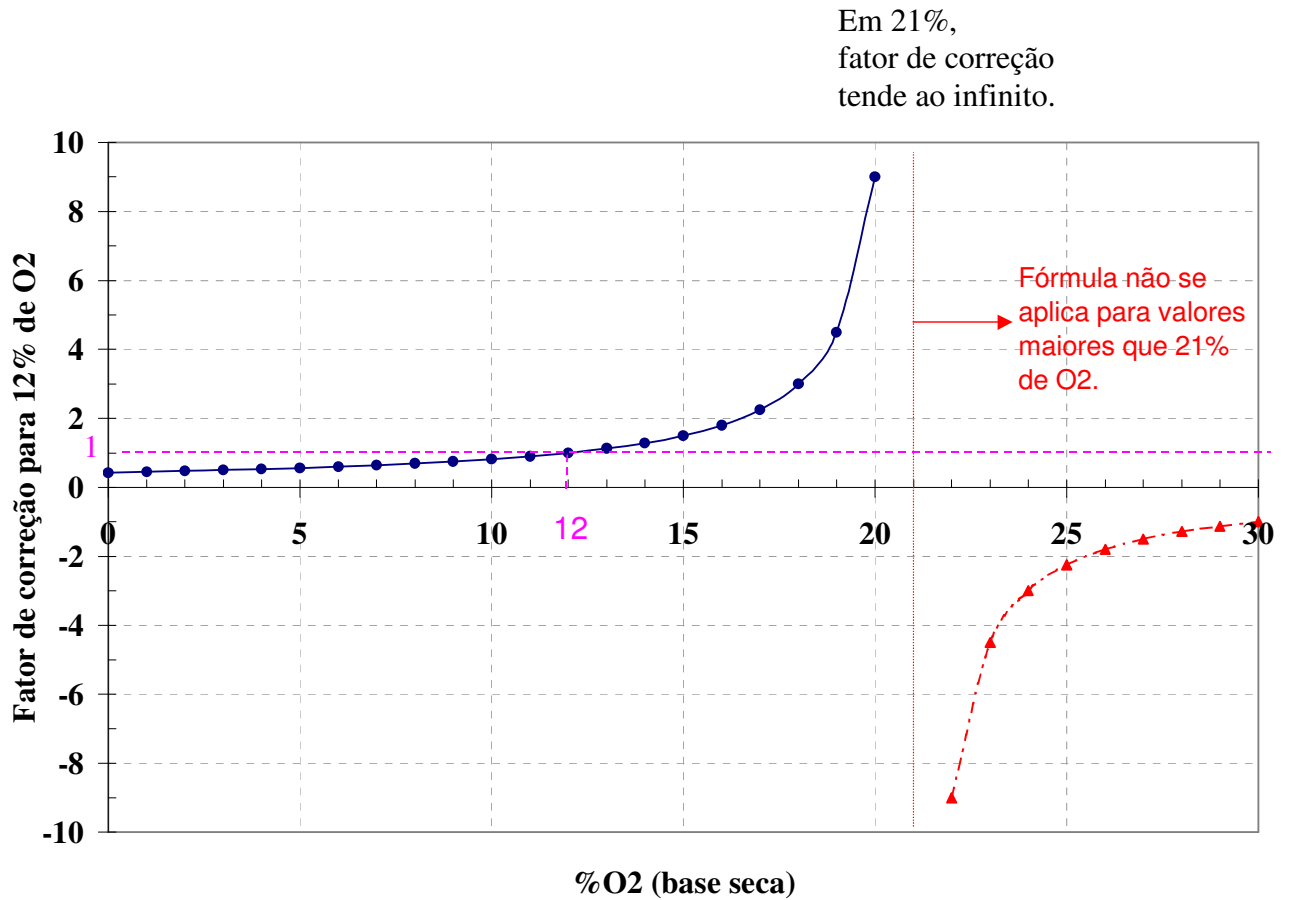


Figura 4.13 - Fator de correção para 12% de O₂ (equação 3.1).

Analisando-se a figura 4.13, observa-se:

- É observado que o fator de correção para 12 % de O₂ na faixa de 0 a 12% de O₂ real varia de 0,4285 a 1,000. Já para a faixa de 12 a 21% de O₂ real na saída dos gases de combustão, o valor varia de 1 até infinito, ou seja, o fator de correção é muito mais significativo para valores de O₂ acima de 12%.

A influência da % de O₂ real na emissão de material particulado não é só devido à correção para 12 % de O₂, exigido atualmente por lei. A inclinação da figura 4.7 demonstra que a variação do excesso de ar também representa variação na emissão de material particulado, devido à qualidade da queima. Para o conjunto de resíduos incinerados, a

precisão do valor devido à medição de MP é menor que 10%. Além deste erro, há prováveis precisões a serem consideradas devido a oscilações de processo, ainda desconhecidas.

Verifica-se que a melhor qualidade de queima é com excesso de ar na saída dos gases de combustão com aproximadamente 9,5% de O₂ ou menor. A diferença de valores entre os testes com 9,5% e 8,8% de O₂ pode ser tanto devido a erros experimentais, quanto pode ser que a queima com 9,5% de excesso de O₂ seja realmente melhor que a queima com 8,8% de O₂. Esta questão só poderá ser respondida através de vários testes experimentais nesta faixa, além de se conhecer os erros experimentais devido a cada variação de cada etapa do processo da UIR, para cada tipo de resíduo, na UIR. A diferença entre os resultados experimentais entre os testes com 8,8% de O₂ e 9,5% de O₂, para base de O₂ real, é de 0,13. Sendo dois os testes experimentais, são suficientes 0,65, ou seja 6,5% do valor do teste com maior valor de MP (1,000, em todas famílias de testes), como erro experimental total, para que ambos os testes tenham resultados experimentais semelhantes. Para valores acima de 9,5% de excesso de O₂ na saída dos gases, a emissão de material particulado também piora com o aumento de excesso de ar devido à piora da qualidade da queima.

A literatura (seção 2.9.1) mostra que para a queima de ultraviscosos em caldeiras, no caso específico do parâmetro “excesso de ar”:

“ I. A partir de um dado excesso de ar, relativamente alto, acréscimos adicionais implicam no aumento da taxa de emissão de material particulado, tendo as funções derivadas aproximadamente constantes.

II. Existe uma faixa de excessos de ar, compreendida entre os genericamente denominados “alto” e “baixo”, em que o excesso de ar tem pouca influência na taxa de emissão de material particulado.”

O item I pode ser comparado com a faixa de 9,5% ou mais de O₂ nos gases de combustão. Já o item II pode ser comparado com a faixa de até 9,5% de O₂. A curva que expressa a correlação entre as duas variáveis em questão, segundo esses trabalhos, tem a forma apresentada na figura 2.2. Vale ainda lembrar, que conforme literatura (seção 2.9.1), os pontos tracejados desta curva mudam de acordo com as propriedades do combustível,

das características do equipamento de combustão e das demais variáveis operacionais. Ou seja, para estes resultados experimentais serem aplicados, é necessário determinar o ponto ótimo para cada tipo de combustível, para cada tipo de incinerador, fixando-se demais condições operacionais para efeito de comparação.

Enfim, a partir dos resultados experimentais, pode-se concluir principalmente que o excesso de ar é realmente significativo na emissão de material particulado. Alguns números que ilustram este fato são: considerando-se a média de emissão de MP entre 8,8% de O₂ e 9,5% de O₂, (0,205 %O₂ real e 0,275 corrigido para 12% de O₂) sobre o valor de maior emissão (teste TO2B, com 0,64 de MP com % de O₂ real e 0,94 corrigido para 12% de O₂), tem-se uma melhoria de 4,6 (para correção de 12% de O₂) e 2,3 (para % de O₂ real). Ou seja, em base de O₂ real, a emissão com o maior excesso de ar testado é 2,3 vezes o valor da emissão com a média entre as emissões dos dois menores excessos de ar testados. Com base corrigida para 12% de O₂, a emissão com excesso de ar é 4,6 vezes o valor da emissão com a média entre as emissões dos dois menores excessos de ar testados.

Verifica-se, pela figura 4.6, valores de teste em branco com resultados de emissão de material particulado bem maiores que os valores de emissão de material particulado juntamente com o resíduo. Tais valores estão corrigidos para 12 % de O₂. Estes valores são aparentemente contraditórios. Porém, vale lembrar que a porcentagem de excesso de O₂ na saída dos gases durante os testes em branco é significativamente maior e a correção para MP entra justamente na correção para 12% de O₂. Ou seja, também verificou-se que os testes em branco tiveram valores satisfatórios, por serem valores menores que os valores de emissão de material particulado quando incinerados resíduos, em porcentagem de O₂ real de teste (figura 4.7).

A saída com diferentes % de O₂ nos gases de combustão equivale à diferentes porcentagens de excesso de ar. Sendo que não foi feita análise de % de carbono e de hidrogênio em cada resíduo incinerado, foi estimado para alguns hidrocarbonetos o quanto valeria esta relação entre diferentes % de O₂ na saída dos gases e excesso de ar =>**Apêndice N.**

Observações quanto à figura 4.12 e a equação 3.1:

1. Sendo que a fórmula oficial atualmente usada e exigida pela CETESB foi feita para ar atmosférico (21% de O_2 e 79% N_2), é necessário reformular a correção de excesso de ar (equação 3.1) de forma mais adequada, de forma a considerar o enriquecimento com O_2 puro e conseqüentemente, porcentagem diferente de 21% de O_2 no ar de entrada.
2. É também necessário considerar que a quantidade de N_2 na UIR, que é inerte, diminui significativamente devido ao enriquecimento de O_2 puro (Sindicic, 2002), o que faz com que o volume total de gases da exaustão também seja menor com o enriquecimento com O_2 puro no ar de alimentação, se comparado com o volume total de gases de saída com a mesma quantidade de O_2 que entra no sistema, em alimentação com apenas ar atmosférico (21% de O_2).
3. A fórmula é aplicável para valores de porcentagem de oxigênio de 0 até 21% no ar de combustão, não sendo aplicável para valores maiores que 21%.

4.4. Comparação entre as famílias em relação ao potencial de redução da emissão de material particulado

Tendo como objetivo comparar as famílias de testes TTA, TPL e TO2 em relação ao potencial de redução de material particulado, foi criada a tabela 4.7.

Família	máximo /mínimo de MP
TTA	2,4
TPL	2,3
TO2	2,5

Tabela 4.7 – Comparação entre as famílias de testes.
O máximo /mínimo de MP é calculado conforme itens 4.1, 4.2 e 4.3.
Sempre em base de % de O_2 real.

A partir da tabela 4.7, observa-se que ambas as famílias são equipotenciais, dentro das barras reais de erros de testes e dentro das condições e faixas experimentais testadas.

Reduzir a emissão de material particulado em torno de 2,3 a 2,5 vezes em base real é realmente muito interessante do ponto de vista industrial, visando minimizar ao máximo os impactos ambientais. Isto caso as mesmas sejam vistas independentemente.

O resultado final pode ser ainda melhor, mantendo-se o ar de alimentação para o resíduo com 30% de O₂ (ar atmosférico enriquecido com O₂ puro), caso simultaneamente a carga sólida seja adicionada a cada dois minutos, a carga líquida seja totalmente pulverizada por lança adequada, e paralelamente seja feito o ajuste do excesso de ar para minimizar a emissão de material particulado.