



Universitat de Girona

Estudi experimental de la influència de l'angle d'inclinació de la mostra de combustible en la velocitat de propagació de la flama.

Treball de fi de carrera d'Enginyeria Tècnica Industrial especialitzada en Química Industrial de la Universitat de Girona.

Realitzat per Laura Pou sota la direcció del Dr. Toni Pujol

Vist i plau de,

Dr. Toni Pujol

Voldria expressar el meu agraïment:

En primer lloc al tutor del meu projecte, Dr. Toni Pujol. Per la seva direcció i orientació en aquest projecte, i sobretot per la dedicació del seu temps i esforç com també per tot el que m'ha ensenyat i les facilitats que m'ha proporcionat en el transcurs de les diferents etapes d'aquest projecte.

Agrair també a Pere Mutjé, director del grup de recerca de Laboratori d'Enginyeria Paperera i Materials Polímers.

*Agrair a tots els membres del grup de **Enginyeria de Fluids, Energia i Medi Ambient** per haver-me deixat utilitzar el seu material i laboratori.*

I finalment agrair a tota la meva família i amics pel seu suport i ànims constants.

ÍNDIX

1	INTRODUCCIÓ.....	7
1.1	Antecedents.....	8
1.2	Objecte.....	9
1.3	Especificacions i abast.....	10
2	CARACTERITZACIÓ DE LA MOSTRA	11
2.1	Introducció	12
2.2	Propietats extrínseques.....	13
2.2.1	Procés de fabricació del paper de filtre.....	13
2.2.2	Característiques típiques del paper de filtre.....	18
2.3	Propietats intrínseques.....	18
2.3.1	Estructura de les fibres de la mostra	19
2.3.2	Influència de la relació cel·lulosa-aigua.....	22
3	LA COMBUSTIÓ.....	26
3.1	Conceptes bàsics.....	27
3.2	La combustió de sòlids.....	29
4	PROCÉS DE COMBUSTIÓ DE LA CEL·LULOSA.....	32
4.1	Piròlisi.....	33
4.1.1	Cinètica de la degradació tèrmica de la cel·lulosa.....	33
4.1.2	Càlcul de l'energia d'activació pel mètode Kissinger.....	39
4.2	Combustió.....	44
4.2.1	Temperatura de la flama adiabàtica.....	44
4.2.2	Velocitat de propagació	46

5	DISPOSITIU EXPERIMENTAL	49
5.1	Introducció.....	50
5.2	Instal·lació.....	51
5.3	Cambra de combustió.....	53
5.4	Elements auxiliars.....	55
5.5	Metodologia.....	57
5.5.1	Preparació de la mostra.....	57
5.5.2	Comprovacions prèvies.....	58
5.5.3	Col·locació de la cambra.....	59
5.5.4	Col·locació de la mostra.....	59
5.5.5	Buit i mescla de gasos.....	60
5.5.6	Combustió i gravació.....	62
5.5.7	Neteja dels gasos cremats.....	62
5.6	Obtenció de dades i resultats experimental.....	63
5.6.1	Extracció de dades dels vídeos.....	63
5.6.2	Obtenció de la velocitat de propagació de la flama.....	63
6	RESULTATS EXPERIMENTALS	64
6.1	Introducció.....	65
6.2	Velocitat en funció de la concentració.....	66
6.2.1	Cas angle 0°.....	66
6.2.2	Cas angle 22,5°.....	72
6.2.3	Cas angle 45°.....	77
6.2.4	Cas angle 67,5°.....	81
6.2.5	Cas angle 90°.....	86
6.3	Velocitat en funció de l'angle.....	92
6.3.1	Concentració molar d'oxigen 22%.....	92
6.3.2	Concentració molar d'oxigen 25%.....	93

6.3.3	Concentració molar d'oxigen 30%.....	94
6.3.4	Concentració molar d'oxigen 50%.....	95
7	DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.....	97
7.1	Introducció.....	98
7.2	Velocitat de propagació	99
7.3	Franja de piròlisi.....	104
7.4	Comparació amb resultats anteriors.....	107
8	RESUM DEL PRESSUPOST.....	109
9	CONCLUSIONS	111
10	RELACIÓ DE DOCUMENTS	114
11	BIBLIOGRAFIA	116

ANNEXOS

ANNEX A: DADES TÈCNIQUES DELS GASOS..... 119

A.1. Oxigen..... 120

A.2. Nitrogen..... 122

ANNEX B: ESPECIFICACIONS DELS APARELLS..... 124

B.1. Manòmetre..... 125

B.2. Bomba de buit..... 129

B.3. Càmera de vídeo..... 130

ANNEX C: FULLS DE SEGUIMENT..... 134

C.1. Full de càlcul..... 135

C.2. Full de seguiment a mà..... 136

1. INTRODUCCIÓ

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Dels diversos accidents que poden succeir en una indústria, l'incendi és el que, en termes generals, pot tenir el radi d'acció més reduït. Nogensmenys, els seus efectes poden ser terribles, ja que l'exposició als fluxos de calor produïts pot afectar a altres parts de la planta i generar altres accidents (explosions o fuites). D'altra banda, els incendis forestals són una realitat. D'aquí l'interès en realitzar un estudi sobre la velocitat de propagació de la flama, doncs és un tema de gran interès en diferents aplicacions de l'enginyeria i per qüestions de seguretat contra incendis.

Diversos estudis anteriors han permès obtenir equacions analítiques per a la velocitat de la flama quan la combustió és vertical i cap a baix. En la realitat, però, aquest procés de combustió és un cas molt particular ja que, de forma general, la combustió d'una mostra sòlida es pot produir en diferents angles d'inclinació i, fins i tot, en direcció ascendent. Tot i això, la gran majoria de dades experimentals disponibles per a combustibles sòlids fan referència a una crema vertical i cap a baix. D'aquí l'interès en realitzar més estudis experimentals on s'estudiï l'efecte de l'angle d'inclinació en la velocitat de propagació de la flama.

La mostra de combustible d'aquest projecte és un paper de filtre de composició pràcticament 100% cel·lulosa i de propietats físico-químiques conegudes. Per això, els resultats experimentals serviran, en el futur, per intentar validar nous models de propagació de flames que siguin vàlids per a qualsevol angle d'inclinació de la mostra. D'aquesta forma, les dades experimentals aquí trobades serviran per millorar la capacitat predictiva dels models de combustió.

1.2 Objecte

L'objecte del present projecte consisteix en avaluar la influència que té l'angle d'inclinació de la mostra en la velocitat de propagació de la flama. En el nostre estudi, la mostra és paper de cel·lulosa

Per poder discutir la influència de la inclinació de la mostra de cel·lulosa en la velocitat de propagació de la flama, és necessari que el projecte incorpori la caracterització de la mostra. Per això, s'han d'explicar el conjunt de reaccions químiques que tenen lloc en cadascun dels processos que donen lloc a la combustió de la cel·lulosa.

Els experiments es realitzen en funció de dues variables: l'angle d'inclinació de la mostra que va des de 0° (vertical) fins a 90° (horitzontal cap a baix) i les concentracions de la mescla d'oxigen i nitrogen (concentració d'oxigen des de 22% fins a 50% en volum).

Els resultats es compararan amb dades de la literatura i es discutiran els efectes, entre d'altres, de la composició de la mostra, la franja de piròlisi, la inclinació de la flama i la convecció natural.

1.3. Especificacions i abast

En la redacció del document s'ha seguit la normativa establerta incloent els apartats necessaris per completar un projecte final de carrera. En aquest cas, el present projecte és un estudi, per aquest motiu no s'inclou el plec de condicions.

L'abast del projecte inclou la recerca del conjunt de factors que intervenen en una combustió d'un combustible sòlid orgànic, com és la cel·lulosa, a més de la realització d'experiments en una cambra de combustió on es cremen fulls de cel·lulosa de propietats conegudes. L'experiment s'enregistra amb una càmera i la velocitat de propagació de la flama s'obté a partir d'analitzar-ne els vídeos i les imatges. La cambra de combustió permet variar el seu angle d'inclinació així com la composició inicial dels gasos. A través de l'anàlisi d'aquests vídeos i els coneixements adquirits en l'elaboració del projecte es discutiran els resultats.

L'abast del projecte no inclou ni el disseny ni la construcció de la cambra ni dels aparells de mesura que s'hagin d'utilitzar.

2. CARACTERITZACIÓ DE LA MOSTRA

2 CARACTERITZACIÓ DE LA MOSTRA

2.1 Introducció

La caracterització de la mostra és necessària per a la predicció de la velocitat de propagació de la flama, ja que en funció de quines siguin les propietats del paper de filtre la mostra es cremarà amb més o menys temps.

És important també saber quin ha sigut el procés de fabricació per així poder-ne treure unes conclusions més precises. Durant el procés de fabricació del paper de filtre, les fibres de cel·lulosa pateixen alteracions físiques i químiques de manera que el grau d'afectació en les fibres de cel·lulosa, queda reflexat en la velocitat de propagació d'una flama.

Una manera de descriure el combustible és atenent a les seves propietats intrínseques i extrínseques. Les propietats intrínseques fan referència a la composició química, al tipus de fibres de cel·lulosa que conformen el paper, relacions cel·lulosa-aigua mentre que les propietats extrínseques tracten aspectes com densitat, gruix, etc.

És per tots aquests motius que s'ha introduït aquest apartat en el projecte.

2.2 PROPIETATS EXTRÍNSEQUES

2.2.1. Procés de fabricació del paper de filtre

S'ha de tenir present que durant l'elaboració del paper les fibres de cel·lulosa pateixen diferents canvis dimensionals.

El procés de fabricació del paper de filtre consisteix en un conjunt d'operacions. Cada operació té a veure amb les propietats físiques i químiques que influenciaran d'una manera directa amb la velocitat de propagació de la flama.

Esquema general del procés de fabricació de paper:

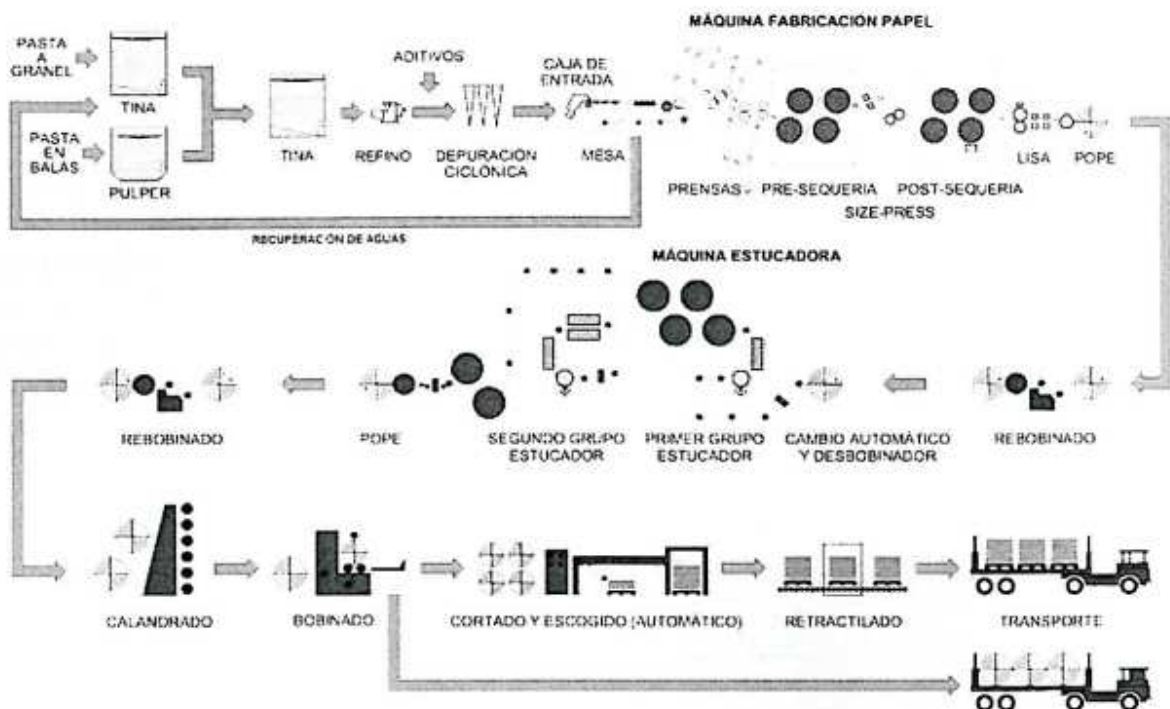


Figura 1: Esquema del procés de fabricació del paper

Tal i com s'observa en la figura 1, el procés de fabricació del paper es divideix en una sèrie d'operacions:

- Preparació de les pastes
- Formació del full
- Premsat en humit
- Secat

- Estucat
- Acabat del paper

A continuació s'explicaran molt breument quins són els processos de producció que tenen lloc a dins de cada operació, d'aquesta manera s'obtindrà una mica més d'informació sobre la constitució del paper de filtre.

Preparació de les pastes

El refinat

És l'operació en la preparació de la pasta per la qual, mitjançant l'acció d'un treball mecànic i en presència d'un medi aquós (aigua), es modifica la morfologia de les fibres i la seva estructura físico-química.

En el refinat tenen lloc els següents efectes:

- Hidratació: Degut a l'agitació de les fibres en el refinat, l'aigua penetra per les fibril·les produint un efecte d'hidratació de la fibra. Això és degut a que l'aigua i la cel·lulosa es combinen mitjançant reacció química.
- Fibril·lació: Tal i com es mostra en la figura 2, és l'alliberació i separació de les fibril·les produïdes per la ruptura parcial de les parets durant el fregament de les fulles afilades en les fibres.



Figura 2: Fibres de cel·lulosa en estat de fibril·lació.

- Tall: Les fibres pateixen ruptures i per tant, se'n disminueix la seva longitud.

Formació de la fulla:

S'entén per formació de la fulla a la disposició mitjançant la qual les fibres s'entrellacen les unes amb les altres. Es tractarà doncs, de transformar un cabal d'aquesta pasta en una làmina prima, ample i uniforme amb tots els components perfectament distribuïts. Aquesta làmina és la que més tard serà la fulla de paper de filtre.

A la Figura 3 es mostra el procediment que seguirà la pasta per a l'obtenció de la fulla.

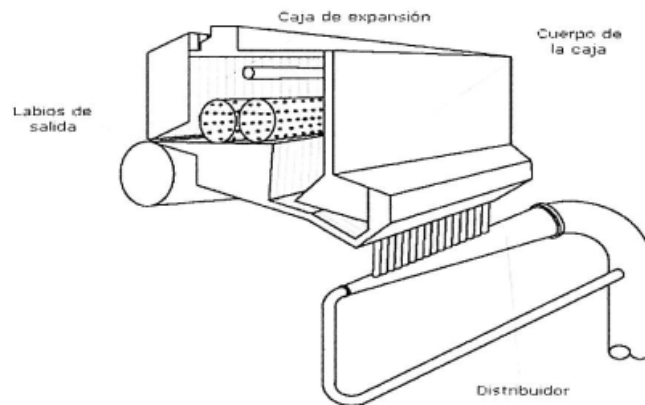


Figura 3: esquema de la caixa d'entrada.

La caixa d'entrada juntament amb la taula de fabricació formaran la fulla de cel·lulosa i se'n reduirà part de l'aigua que conté la pasta.

Premsat en humit:

Aquest procés es considera una continuació d'eliminació d'aigua que s'ha iniciat anteriorment a l'operació de formació de la fulla. Així doncs, al final de l'operació de premsat, la fulla contindrà tan sols un 60% d'aigua.

En la Figura 4, es pot apreciar que durant el procés, la fulla és transportada a través d'uns tambors que la pressionen i que aconseguen extreure fins a un 20% més d'aigua i a la vegada li donen en el paper unes condicions superficials i de resistència favorables per a la seva utilització posterior.

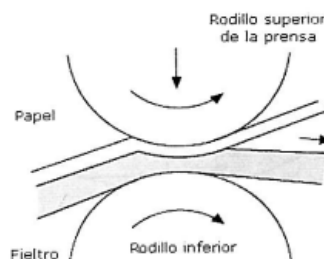


Figura 4: Contacte de la fulla i el filtre en el premsat humit.

Secat:

Quan el paper surt de la secció de premses, el seu contingut en aigua sol ser del 60%. A partir d'aquí no és possible eliminar més aigua per medis físics, sinó que l'única manera de fer-ho serà mitjançant l'aplicació de calor.

A través de l'operació de secat s'aconseguirà reduir la humitat del paper fins a un 5% d'aigua, que és el contingut que ha de tenir al final del procés de fabricació.

La operació de secat es realitza en una secció coneguda com "sequeria", en la qual el calor fa que l'aigua de la fulla s'evapori deixant-la seca. Tal i com s'ha dit anteriorment, al final d'aquesta operació el paper haurà eliminat pràcticament la totalitat de la seva aigua, quedant amb una lleugera humitat desitjada en la composició final per mantenir la seva elasticitat.

A continuació en la Figura 5 es pot veure un petit esquema d'una sequeria multi cilíndrica que és el mètode general utilitzat en qualsevol tipus de paper.

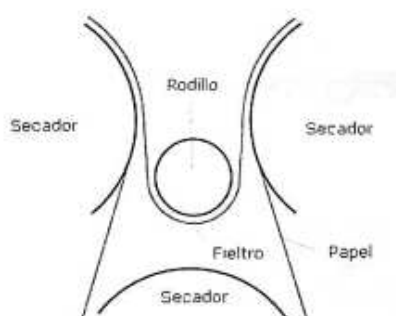


Figura 5: Secat amb cilindres secadors (Sequeria multicilíndrica)

Estucat del paper

L'operació d'estucat del paper consisteix en aplicar una sèrie de pintures que proporciona al full la finor i brillantor necessàries per tal de que la tinta s'adapti bé al paper.

El paper té una estructura porosa deguda a les fibres. Quan la tinta hi entra en contacte aquesta té tendència a estendre's en totes direccions. Per evitar això, és necessari aconseguir una superfície llisa i uniforme.

Amb la finalitat d'eliminar o tancar les cavitats del paper (macroporos) se li apliquen una sèrie d'additius que milloren la seva superfície, tornant-lo més llis, disminuint les cavitats a una mida més petita (microporos) però suficient per tal de que la tinta pugui penetrar en el paper. A la vegada també li dona propietats com brillantor, opacitat, finor i blancor.

En el cas del paper de filtre aquesta operació es porta a terme d'una manera molt superficial ja que la utilització d'aquest paper no és per escriure-hi.

Acabat del paper

Hi ha papers que tal i com surten del procés d'estucat ja són aptes per a la seva utilització. Malgrat tot, n'hi ha d'altres que requereixen un elevat acabat superficial. Aquests se'ls fa passar per una operació denominada calandrat.

Amb l'operació de calandrat es pretén millorar principalment la brillantor del paper i les propietats d'impressió.

S'ha de tenir present que durant l'elaboració del paper les fibres de cel·lulosa pateixen diferents canvis dimensionals.

2.2.2 Característiques típiques del paper de filtre

Cadascuna de les següents característiques influenciarà directament la cinètica de la combustió de la cel·lulosa.

Gramatge

El pes per unitat d'àrea és una característica fonamental del paper. En la major part del món aquesta propietat s'expressa en grams per metre quadrat. Aquesta és l'expressió recomanada pel pes base per la TAPPI (Technical Association for the Pulp & Paper Industry), descrita en els estàndards T410.

Espessor

L'espessor o gruix del paper és el calibre, expressat en mil·lèsimes de polsada, d'una sola fulla de paper sota una pressió de 7 a 9 PSI, col·locada entre dues superfícies circulars i paral·leles. En el sistema mètric l'espessor és expressat en mil·límetres i la pressió es troba en els límits de 48 a 62 kPa.

Densitat del paper

La densitat és la massa per unitat de volum o gravetat específica g/cm^3 . La densitat es pot obtenir de la massa base i l'espessor tal i com es veu en l'equació 1:

$$D = \frac{W_1}{T_1 \times 18.08} = \frac{W_2}{T_2} \quad (\text{Eq. 1})$$

on W_1 és el pes base en lliures, W_2 pes base en g/cm^2 , T_1 és l'espessor en mm i T_2 espessor en cm.

Calor específica

És la quantitat de calor necessària per elevar la temperatura d'una unitat de massa d'una substància un grau Kelvin.

La calor específica s'expressa en Joules per kilogram i Kelvin o bé, en $\text{cal/gr } ^\circ\text{C}$.

2.3 PROPIETATS INTRÍNSEQUES

2.3.1 Configuració i estructura de les fibres de cel·lulosa

La mostra de paper de filtre que s'utilitzarà per realitzar els diversos experiments d'aquest projecte està composta bàsicament de fibres de cel·lulosa.

Diferents tipus de papers de filtre, exposats a les mateixes circumstàncies, reaccionaran de manera diferent. Els diferents comportaments estaran determinats per la composició de la mostra i pel mètode de fabricació dels papers.

En aquest apartat, es concretarà la configuració i l'estructura que presenten les fibres de cel·lulosa per tal de que més endavant es pugui veure quin és el comportament de les fibres de cel·lulosa de la mostra de paper de filtre.

Matèria prima: Cel·lulosa. Configuració i estructura

- Obtenció de la cel·lulosa: Cèl·lules vegetals

La cel·lulosa és el principal component de la paret cel·lular de les cèl·lules vegetals.

Es tracta d'un polisacàrid de glucoses connectades amb enllaços β -glicosídics, formant una llarga cadena polimèrica de pes molecular variable, amb una fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$, amb un valor mínim de $n=200$.

La característica estructural de l'enllaç glicosídic β .1.4. és que forma una cadena lineal extensa altament estable, veure Figura 6, i resistent a l'atac químic i que permet la interacció amb altres cadenes paral·leles formant ponts d'hidrogen.

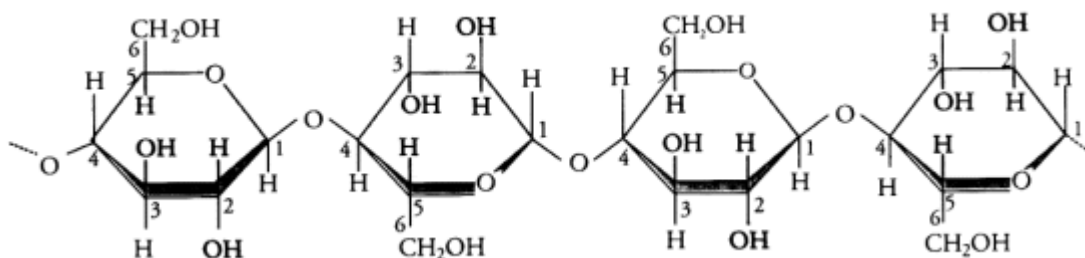


Figura 6: Estructura d'una cadena β -glucosa unides.

Les cadenes de glucosa s'associen paral·lelament entre sí per formar microfibril·les amb alta resistència a la tracció, les quals poden tenir un diàmetre variable. Ho veiem a la Figura 7:

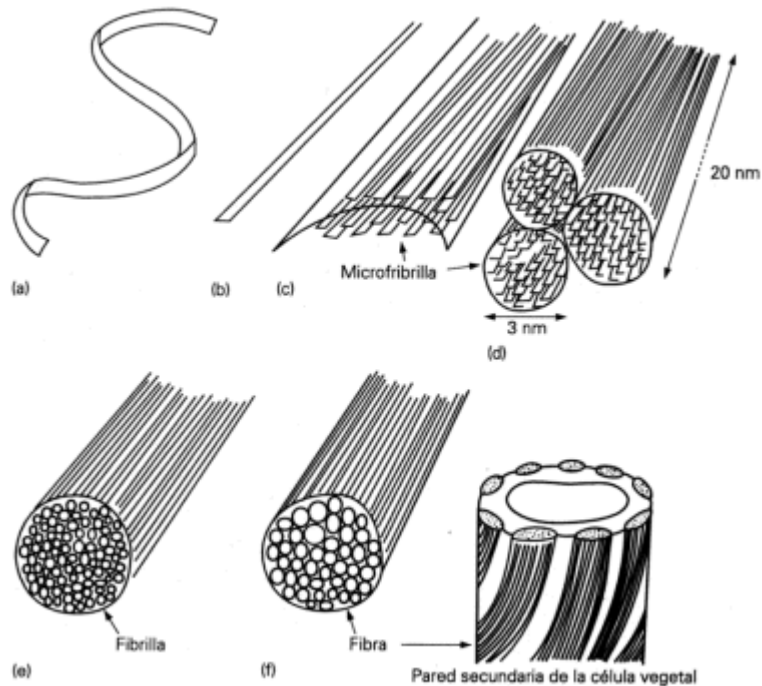


Figura 7: Aspectes de la configuració i estructura de la cel·lulosa. Tendència del polímer lineal a estendre's totalment (a i b) i a associar-se després per formar microfibrilles (c) que a la vegada s'alineen amb altres (d i e) per donar lloc a una fibra de cel·lulosa (f). (g) Orientació de les fibres en una capa de paret secundària.

En funció de l'origen d'aquestes fibres, es podran distingir dos tipus de fibra:

Fibres curtes: Aquest tipus de fibres corresponen a arbres de fusta dura com l'eucaliptus. La longitud de les fibres està compresa entre els 0,75mm i els 2mm i el contingut de cel·lulosa és més alt.

Fibres llargues: Provenen d'arbres de fusta tova, fonamentalment coníferes com l'abet i el pí. La seva longitud està compresa entre els 3 i 5mm. La pasta del paper serà més resistent.

Les fibres de cel·lulosa estan formades, a part de les microfibrilles, per hemicel·lulosa, pectines, que també són glúcids i glucoproteïnes.

No ho tindrem en compte, però les podem veure a la Figura 8:

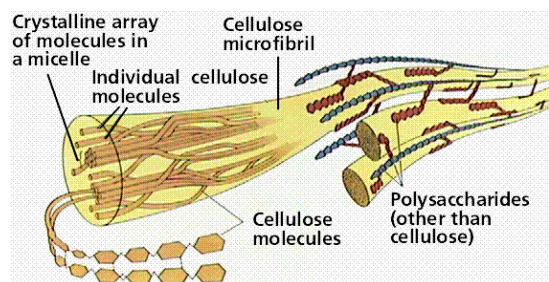


Figura 8: Configuració de la cel·lulosa

Estructura de la fibra:

La fibra està formada per diverses capes integrades en una paret primària i en una paret secundària.

Aquestes capes diverses es poden observar a la Figura 9:

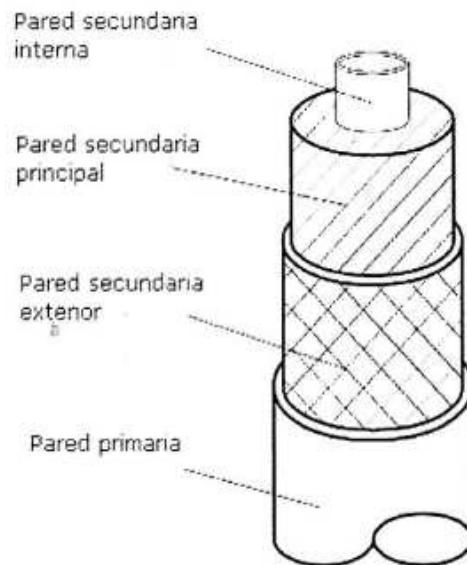


Figura 9: Estructura de la fibra

- Paret primària: Es molt prima i conté pocs filaments, creuats entre ells i orientats casi perpendicularment a l'eix de la fibra. Poden tenir fins a un 50% de lignina i es la que desapareix en el blanqueig i cocció en els processos de fabricació de pasta de paper.
- Paret secundària: Està formada per tres capes molt ben diferenciades:
 - o Paret secundària exterior (També anomenada làmina de transició): Està formada per dues capes de microfibrilles distribuïdes en sentits contraris. La capacitat d'inflament és dèbil. Té lignina.
 - o Paret secundària principal: És la més ample. Formada per microfibrilles orientades quasi paral·lelament a l'eix de la fibra. Està formada quasi totalment per cel·lulosa. La capacitat d'inflament és elevada i dóna al paper rigidesa i resistència.
 - o Paret secundària interna: És molt prima. Les microfibrilles són nombroses i estan mol apretades. El constituent principal és l'hemicel·lulosa i té una capacitat d'inflament molt alta.

2.3.2 Influència de les relacions moleculars cel·lulosa-aigua

INTRODUCCIÓ

Per a l'estudi de les relacions cel·lulosa-aigua es considerarà les fibres constituïdes per cel·lulosa únicament, és a dir, cadenes d'anhidra glucosa unides per enllaços glicosídics β .1.4. que corren al llarg de l'eix de la fibra.

En els estudis de cristal·litzat de la cel·lulosa, utilitzant mètodes químics, s'obtenen valors de l'ordre del 90-95%. Aquest grau de cristal·litzat explica que la cel·lulosa no és totalment soluble en aigua com sembla que hauria de ser pels tres grups OH que conté cada unitat d'anhidraglucosa.

El sistema cel·lulosa-aigua està constituït per un polímer de cadena llarga, altament polar i un líquid bastant polar. La quantitat d'aigua admesa per la cel·lulosa dependrà del grau de cristal·linitat, de manera que a mesura que augmenta el percentatge de cel·lulosa amorfa, augmenta l'accessibilitat de l'aigua. El grau d'inflement de la cel·lulosa està limitat.

El mecanisme d'admissió d'aigua, el grau d'inflement i les seves limitacions, i les possibilitats d'augmentar la quantitat d'aigua admesa són qüestions de gran importància en la fabricació del paper.

La cel·lulosa seca és extremadament higroscòpica, és a dir que agafa ràpidament humitat. La sorció, s'efectua ràpidament en les zones amorfes de la cel·lulosa. No es coneix exactament la sorció en les zones cristal·lines, però sí que se sap que la humitat no origina canvis en els espais cristal·lins.

Les variacions produïdes en els següents dos processos tenen lloc en atmosferes amb una humitat relativa que pot anar de 0 al 100%.

ADSORCIÓ

Ja sabem que la cel·lulosa està formada per zones cristal·lines i amorfes. Les cristal·lines, amb un grau molt elevat d'ordre, hi ha un seguit d'enllaços establers que en conseqüència provoquen la inaccessibilitat de l'aigua. Les zones amorfes presenten una gran quantitat de grups hidroxils lliures que poden agafar aigua, produint la separació de molècules o parts de molècules que poden moure's lliurement sota la influència de l'energia tèrmica.

L'adsorció implica un canvi en les molècules del líquid, ja que passen d'un estat de llibertat dinàmica a una fixació sobre la superfície del sòlid. Es podria considerar com un pas de

líquid a sòlid i en conseqüència hi haurà una variació de densitat, així com un despreniment de calor. També hi ha un despreniment de calor en la unió de l'aigua als grups hidroxils de la cel·lulosa. En resum, l'adsorció és un procés exotèrmic.

La primera capa d'aigua adsorbida per la cel·lulosa queda unida a aquesta i les característiques més importants d'aquesta aigua són: densitat anormalment elevada, no es congela, no pot actuar com a dissolvent i no respon amb facilitat als canvis d'humitat. D'aquesta manera es poden adsorbir varies capes d'aigua amb forces de retenció cada vegada menors, fins a un punt que no és possible més adsorció. Es pot retenir fins a un 4% d'humitat. A partir del 4% les forces de retenció són més dèbils.

IMBIBICIÓ

Després de l'adsorció, la cel·lulosa continua agafant aigua, però sense variacions d'energia. Es tracta de l'aigua d'imbibició, que s'aguanta únicament per oclusió de les cadenes moleculars. És una aigua lliure.

A mesura que les cadenes moleculars adquireixen major llibertat de moviment, s'originen nous espais que poden ser emplenats d'aigua immobilitzada i ocluida per les cadenes moleculars.

La imbibició és el procés que realment produeix l'inflament de la cel·lulosa, un inflament que per altra banda està limitat per l'alt grau de cristalinitat de la cel·lulosa.

Els dos processos anteriorment citats s'efectuen simultàniament.

Si ara la cel·lulosa s'introdueix a l'aigua, es pot observar que absorbeix de 2 a 3 vegades el seu pes d'aigua. Aquesta aigua emplena els porus i el volum de les fibres. Es tracta d'una absorció capil·lar, que pot considerar-se com extrínseca ja que no afecta a l'inflament ni a les propietats físiques. La cel·lulosa absorbeix aigua com si fos una esponja.

La Taula 1 mostra un quadre de resum:

Tipus de sorció	% d'aigua	
Adsorció	Max. 4 - 6%	Humitat relativa 0 – 100%
Imbibició	28 - 30%	
Absorció capil·lar	200 - 300%	Immersion en aigua
Aigua lliure	> 300%	

Taula 1: Tipus de sorció que pateix la cel·lulosa en condicions d'humitat relativa i d'immersió en aigua.

HISTÈRESIS

Les fibres cel·lulòsiques, agafant o cedint humitat, aconseguen l'equilibri amb l'atmosfera que les rodeja. La humitat d'equilibri depèn de dos factors:

- 1) De les condicions de la fibra com a resultat de tractaments físics o químics previs.
- 2) De les condicions de la fibra respecte al cicle de sorció i desorció.

Començant amb un equilibri al 100% d'humitat relativa, la sorció d'aigua ha tingut lloc en cada hidroxil disponible i no és possible anar més lluny, ja que una major sorció està bloquejada per una xarxa altament cristal·lina.

En la desorció hi ha una evaporació d'aigua de la fibra. Els hidròfils de la cel·lulosa que s'havien separat, queden novament units a altres hidròfils contigus.

Si tornem a sotmetre la cel·lulosa a una atmosfera de major humitat relativa, alguns d'aquests enllaços no es separaran, es tornaran inaccessibles com a conseqüència de la formació de zones cristal·lines i en conseqüència la quantitat d'aigua de sorció disminuirà.

Això explica el perquè les fibres que han estat secades admeten menys aigua que les que no.

INFLAMENT

La sorció d'aigua produeix un inflament en la fibra amb un augment de les seves dimensions.

La fibra es pot arribar a inflar un 1% en longitud i entre 15 – 20% en diàmetre, i la variació de volum és de l'ordre del 35% per humitats relatives de 0 a 100%

És molt important el percentatge d'hemicel·luloses associades a la fibra, així com la seva distribució a través de la fibra, ja que són més amorfes que la cel·lulosa.

Mesurar l'inflament seria mesurar els canvis reals en el volum de la fibra, o el que seria el mateix, mesurar l'aigua involucrada en l'inflament. Aquesta aigua es pot mesurar mitjançant tècniques de centrifugació, amb les quals es pretén separar l'aigua que no està retinguda a l'interior de la fibra.

3 LA COMBUSTIÓ

3 LA COMBUSTIÓ DE SÒLIDS

3.1 Conceptes bàsics

En aquest apartat del projecte s'explicarà molt breument els aspectes fonamentals que cal conèixer per tal de discutir posteriorment la influència de l'angle d'inclinació d'una mostra en la velocitat de propagació de la flama.

Conceptes físics i químics:

La combustió:

Una combustió és una reacció d'oxidació que va acompanyada d'un despreniment d'energia. En les reaccions químiques d'oxidació-reducció hi ha un bescanvi d'electrons entre un oxidant, que els guanya i un reductor, que els perd. Perquè tingui lloc una reacció d'oxidació-reducció cal que hi hagi, doncs, un agent oxidant (l'oxigen) i un agent reductor (gasos despresos en el procés de piròlisi de la cel·lulosa).

Elements que formen la combustió d'una substància:

Hi ha quatre factors essencials que tenen lloc en la combustió d'una mostra gasosa: combustible, comburent, energia i les reaccions en cadena. (Tetraedre del foc)

1) Comburent i combustible:

En una reacció de combustió l'agent oxidant s'anomena comburent i l'agent reductor s'anomena combustible.

En aquest projecte el comburent serà l'oxigen i variarà en un rang de concentracions, del 22%, 25%, 30% i 50%. La resta serà concentració de nitrogen. El combustible seran els gasos despresos durant el procés de piròlisi del paper de filtre de cel·lulosa.

2) Energies d'activació/reacció:

Perquè es produeixi una reacció de combustió cal que els reactius (comburent i combustible) es trobin en unes condicions favorables per reaccionar.

L'energia necessària per a l'inici de la reacció s'anomena energia d'activació i és subministrada per les fonts d'ignició.

En una reacció endotèrmica els productes que es formen contenen més energia que els reactius. Per això, i a fi que la reacció continuï, cal una aportació constant d'energia.

En una reacció exotèrmica, els productes que es formen contenen menys energia que els reactius. Quan la quantitat d'energia que es desprèn en una reacció és molt elevada, hi ha

emissió de radiació lluminosa o flames. El mecanisme que té lloc en la combustió de la cel·lulosa s'explicarà a l'apartat 4. Procés de combustió de la cel·lulosa.

3) *Reacció en cadena:*

La combustió és un fenomen complex durant el qual apareixen moltes reaccions químiques en cadena.

La propagació de la flama va vinculada a aquest últim factor, ja que com bé s'explicarà en l'apartat 4. Procés de combustió de la cel·lulosa, la reacció en cadena és el causant principal de la propagació d'una flama.

3.2 La combustió de sòlids:

La combustió de sòlids consta de dos processos:

- La piròlisi del sòlid
- La combustió dels gasos despresos en la piròlisi

La piròlisi marca l'inici de la descomposició tèrmica del sòlid. Si es manté la font de calor, pot tenir lloc la ignició del combustible gasos després del sòlid.

La piròlisi i la combustió solen anar lligades entre sí, tot i que no té perquè ser així. En l'apartat 4.1 Cinètica de la degradació tèrmica de la cel·lulosa el combustible no combustiona, sinó que es degrada tèrmicament a través de la piròlisi.

A continuació s'explicarà a grans trets què passa en cada procés i quins són els paràmetres que s'hauran de tenir en compte alhora d'avaluar quina influència té l'angle d'inclinació de la mostra en la velocitat de propagació de la flama.

La piròlisi

La piròlisi és el procés de descomposició tèrmica de la matèria en un ambient inert. Aquest fenomen és d'una complexitat notable, ja que s'hi duen a terme tota una sèrie de reaccions de deshidratació, despolimerització, repolimerització i craqueig (Velo, 1998) per efecte de la temperatura (reaccions primàries, majoritàriament endotèrmiques) i de la interacció sòlid-vapor (reaccions secundàries de caire exotèrmic).

Els productes que s'obtenen de la piròlisi són:

- Una fase gasosa combustible
- Una fase líquida
- Una fase sòlida carbonosa (char)

Les condicions d'operació del procés (temperatura, velocitat d'escalfament i temps de residència) tenen un paper fonamental en els rendiments obtinguts per a cada fracció de producte (Orfao, Antunes i Figueiredo, 1999).

La combustió a la fase gas

Segons el procés pel que es posen en contacte el combustible i el comburent (ambdós en fase gas), la combustió pot ser premesclada o per difusió.

La flama es pot propagar de dues maneres diferents: si el combustible i el comburent estan prèviament mesclats es parla d'una flama premesclada, si per contra el fenomen de

propagació està controlat per la velocitat amb la qual s'efectua per difusió la mescla dels reactius, es parla de flama de difusió.

La flama, que prové de la reacció d'oxidació d'oxigen i fuel, serveix per mantenir una font externa de calor per a la generació de gasos (piròlisi) del material verge no cremat i, així, continuar l'avançament del front de combustió.

Així doncs, la combustió de gasos pot produir dos tipus de flama:

- Flama difusiva
- Flama premesclada

Flama difusiva:

En la flama difusiva tenim l'oxidant i el reactant separats i en la regió on es barregen es genera la flama. Aquest és el cas que té lloc en aquest projecte. Tal i com s'observa a la Figura 10, el combustible i el comburent no estan mesclats prèviament.

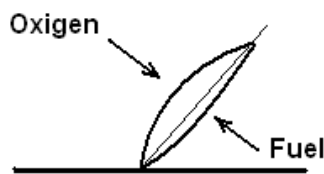


Figura 10: Esquema de flama difusiva

En primer lloc ha de produir-se un procés de difusió de massa i formació de la mescla abans de l'inici de la combustió. Quan el combustible utilitzat està en fase líquida aquest procés de difusió massica és més complicat i els combustibles normalment s'injecten a grans pressions, de fins a 2000 bars.

Flama premesclada:

La flama premesclada està composta per una barreja de reactant i oxidant. A diferència de la flama difusiva, en flames premesclades, els reactius es mesclen homogeniament amb anterioritat. Això fa que, en aquest cas, la ignició s'ha d'iniciar per un agent extern. La Figura 11 que es veu a continuació mostra la premescla d'oxigen i fuel abans no tingui lloc la flama.

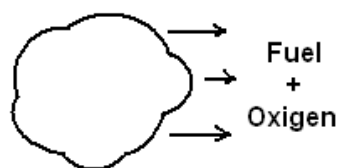


Figura 11: Premescla d'oxigen i fuel abans de la ignició.

D'aquesta forma, la flama premesclada separa la zona on trobem els residus de la combustió de la zona on trobem els reactius, que és cap a on es propaga la flama.

Per últim, en funció de la naturalesa de la mescla i de les condicions de confinament, la flama prèviament mesclada pot propagar-se a velocitat subsònica, que és el que vindria a ser una deflagració, o bé a velocitat supersònica, com és una detonació.

4 PROCÉS DE COMBUSTIÓ DE LA CEL·LULOSA

4.1 Piròlisi

4.1.1 Cinètica de la degradació tèrmica de la cel·lulosa

La complexitat de la degradació tèrmica de la cel·lulosa es focalitza en un llarg nombre de fases de reaccions paral·leles i consecutives. Tot i així, aquest apartat explicarà aquesta cinètica a partir de la divisió d'aquest conjunt de reaccions en 3 fases.

El mètode de termogravimetria modulada (MTG) permet calcular l'energia d'activació (E) com una funció del grau de descomposició, α . $E(\alpha)$ representa uns valors fiables d'energies d'activació per a diferents passos de la descomposició.

La Figura 12 que es mostra a continuació s'obté a partir d'utilitzar el MTG i és el resultat de la descomposició tèrmica oxidativa d'una mostra de cel·lulosa de cotó en una atmosfera manipulada (aire) amb un increment de temperatura constant a $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (Mamleev et al., 2007).

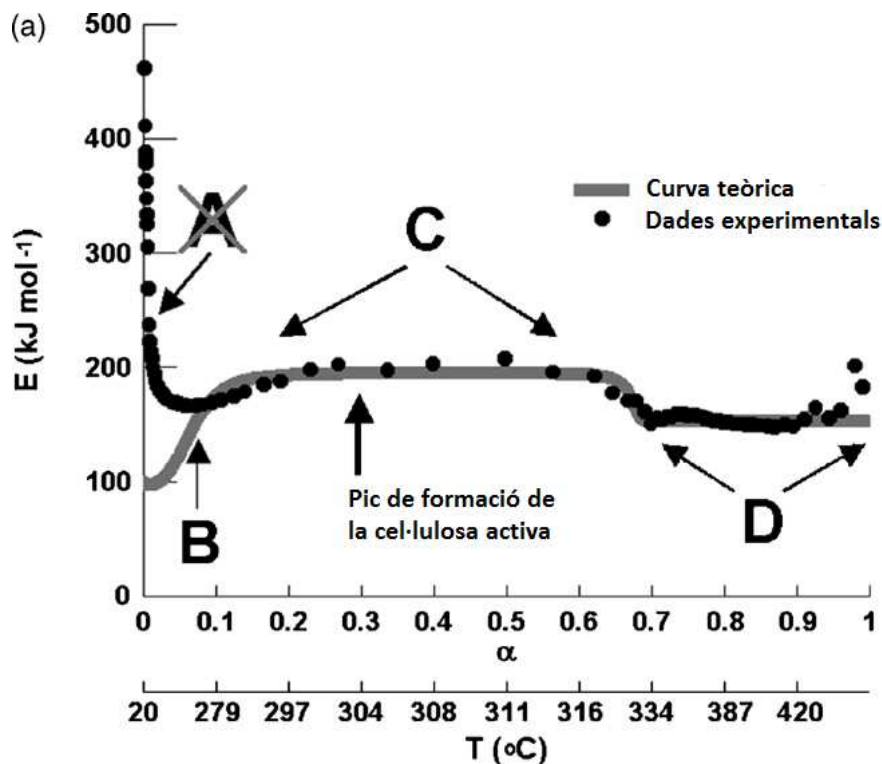


Figura 12: Resultats de l'aproximació de l'energia d'activació en funció del grau de descomposició (Mamleev et al., 2007).

La Figura 12 mostra com la funció $E(\alpha)$ té tres fases molt clares, la fase B, C i D. La fase A és un error de les restriccions de l'aparell que s'ha utilitzat per mesurar les energies d'activació.

FASE B:

A l'inici de la descomposició tèrmica, l'oxigen interacciona amb la superfície de la cel·lulosa resultant un 3% de la pèrdua de massa.

A la fase B té lloc un increment de temperatura delimitada entre els 0°C i 295°C aproximadament. Amb un grau de conversió que va de $0 < \alpha < 0,2$.

El pendent pronunciat amb el que s'inicia la descomposició significa que les reaccions d'oxidació que hi tenen lloc acceleren la taxa de pèrdua de massa de la mostra i en conseqüència la despolimerització de la cel·lulosa per sota dels 295°C.

Aquesta oxidació de la cel·lulosa té lloc a temperatures molt baixes. Tal i com ens mostra la Figura 13, el polímer de cel·lulosa pateix una reacció d'oxigenació.

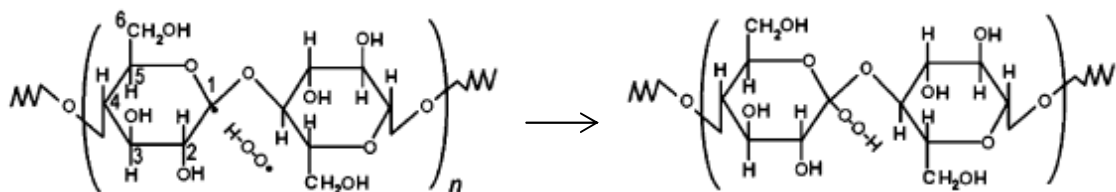


Figura 13: Oxigenació de la cel·lulosa (Mamleev et al., 2007)

Això provoca una desestabilització de l'estructura cristal·lina que presenta inicialment i l'anomenat complex "cel·lulosa activa".

L'equació 2 és una expressió útil per a la determinació experimental de la cinètica E de qualsevol ordre i en graus de conversió molt baixos:

$$\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\alpha E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (\text{Eq. 2})$$

i s'obté a partir d'un model d'un sol pas del tipus Arrhenius en el límit de valors d' α petits. A la l'equació 2, R és la constant del gas ideal, A és el factor preexponencial i T és la temperatura.

Per poder avaluar les constants cinètiques de la reacció d'oxidació que té lloc, la Figura 14 mostra l'aproximació de les corbes cinètiques d'oxidació implementades per graus de conversió molt petits i temperatures baixes mitjançant la fórmula anterior.

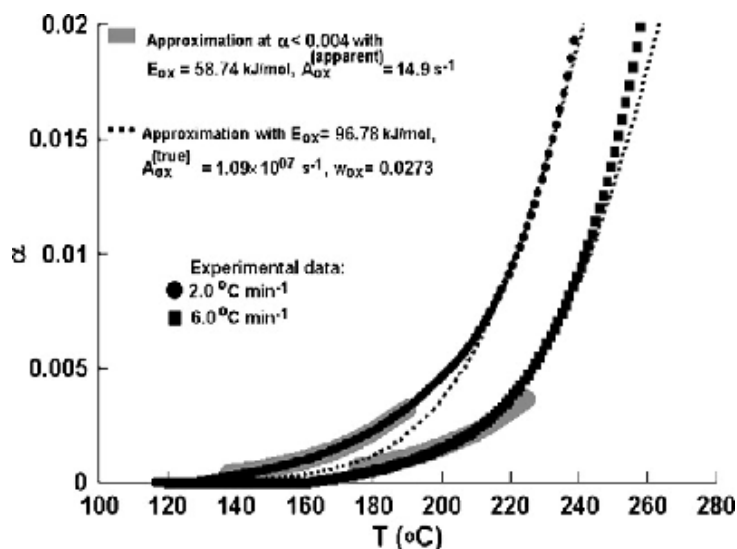


Figura 14: Fragments inicials de les corbes cinètiques dins del rang de la temperatures relativament baixes.

A la Figura 14 es mostren diferents intervals de pèrdua de massa, $0.0005 < \alpha < 0.004$ i $0.005 < \alpha < 0.02$.

En una atmosfera inert la cel·lulosa no perd la seva massa en aquest rang de temperatures. Els efectes que es mostren a la Figura 14 són causats únicament per la presència d'oxigen.

Per calcular les constants de la taxa d'oxidació s'utilitza el mètode de termogravimetria. Mitjançant aquest mètode, doncs, obtindrem el valor de l'energia d'activació E que té lloc en la oxidació de la cel·lulosa per a graus de conversió baixos i temperatures baixes, $E_{ox} = 96,78\text{ kJ/mol}$.

En aquesta fase, totes les unitats de repetició de la macromolècula de cel·lulosa són igualment accessibles per a l'oxigen.

Dins la fase B, a un grau de conversió molt baix ($< 0.4\%$) i a la temperatura de 210°C aproximadament, l'oxigen inicia el procés d'abstracció d'hidrogen, per tant s'inicia la deshidratació de la cel·lulosa.

La hidròlisi de la cel·lulosa:

Aquest procés consisteix en la dissociació de l'aigua al llarg de la cadena de cel·lulosa formant anhidrocel·lulosa provocant l'escissió ocasional de la cadena, però mantinguent β -1,4-esquelet del polisacàrid.

La Figura 15 mostra la formació de la anhidrocel·lulosa:

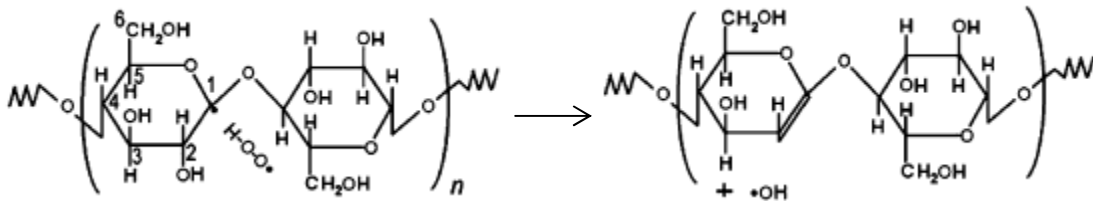


Figura 15: Hidròlisi de la cel·lulosa (Mamleev et al., 2007)

L'oxidació i la deshidratació de la cel·lulosa provoquen l'aparició de petites cavitats entre les fibres de cel·lulosa que contenen aigua, volàtils i carbó. Aquestes cavitats ocasionen la deformació de l'estructura cristal·lina que presenta inicialment la cel·lulosa, i la formació de zones amorfes.

L'increment constant de temperatura fa augmentar la concentració de la substància que contenen aquestes cavitats fins que s'allibera de les fibres provocant la pèrdua de massa de la cel·lulosa.

El procés pel qual s'inicia la pèrdua de massa significativa és la despolimerització, Figura 16, que és conseqüència o no de la deshidratació i oxidació de la cel·lulosa.

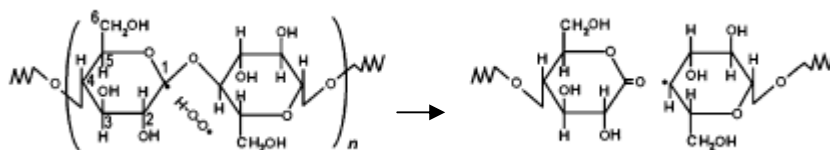


Figura 16: Despolimerització de la cel·lulosa

Amb la despolimerització de la cel·lulosa es formen un seguit de radicals lliures que afavoriran l'acceleració del procés de degradació tèrmica de la cel·lulosa.

FASE C:

L'inici d'aquesta fase no està clarament diferenciat, ja que el conjunt de reaccions en cadena que tenen lloc en la fase B continuen tenint lloc en la fase C. Tot i així es podria dir que el rang de temperatures de piròlisi que delimiten aquesta fase va dels 295°C als 320°C.

A partir dels 295°C augmenta exponencialment la formació de volàtils, CO_2 i H_2O , és per això que molts dels estudis realitzats per calcular l'energia d'activació es basen en mesurar l'increment de concentració de volàtils.

Tal i com mostra la Figura 17, en la despolimerització en la fase C de la cel·lulosa apareix un nou compost anomenat Levoglucosan (Memleev et al., 2007).

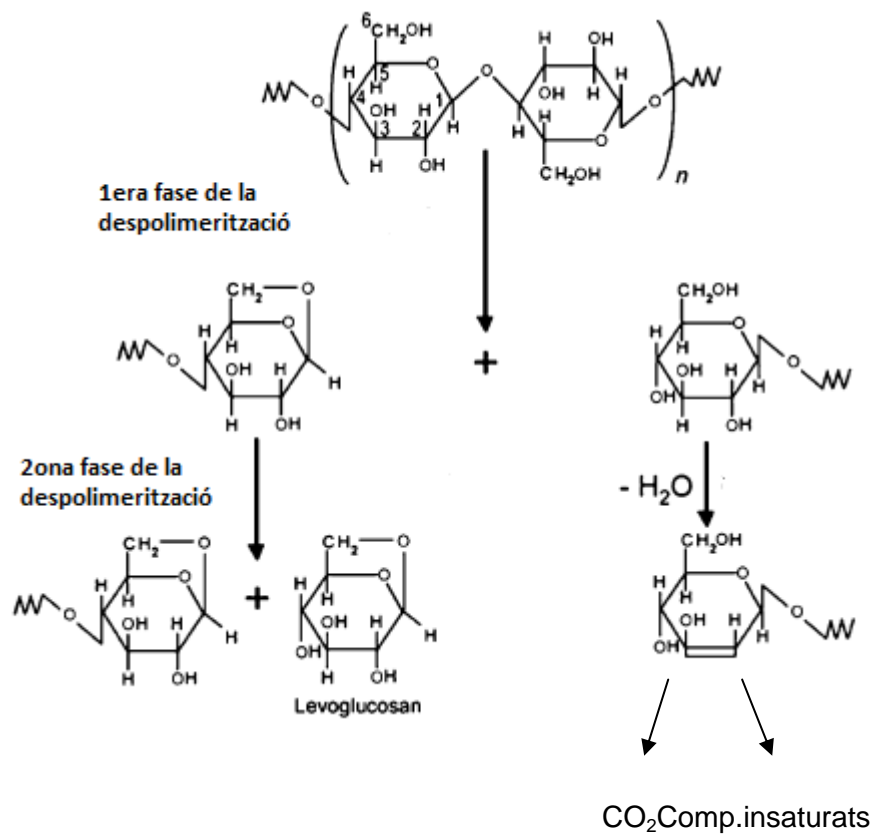


Figura 17: Despolimerització de la cel·lulosa (Mamleev et al., 2007)

Durant la despolimerització l'oxigen interacciona amb les mol·lècules de cel·lulosa en totes les fases. Després de la deshidratació de la cel·lulosa, l'oxigen reacciona amb els radicals lliures donant lloc a la formació d'aigua.

En el cas de que no hi hagi presència d'oxigen, és a dir, en atmosfera inerta, la concentració de tar (CO_2 i H_2O) disminuirà per a una mateixa temperatura i la concentració de levoglucosan augmentarà fins a formar el 60% del volàtil del tar.

El levoglucosan es troba en les petites cavitats que es creen entre les fibres de cel·lulosa. L'increment de la temperatura provocarà l'augment de la concentració d'aquesta mescla fins arribar a volatilitzar-ne una part.

Tal i com es mostra en la Figura 17, en la deshidratació del procés de despolimerització de la cel·lulosa s'obté un radical que a temperatures altes d'una piròlisi ràpida esdevindrà en CO_2 . Si pel contrari tenim una piròlisi lenta, s'obtidran components cíclics insaturats.

FASE D:

Aquesta fase consisteix en l'oxidació carbonitzada del residu.

En la Figura 12 es veu com l'energia d'activació d'aquesta fase disminueix i es manté estable en tot el procés.

No s'han realitzat estudis sobre aquesta fase, ja que es considera que es la fase menys interessant del procés de degradació tèrmica de la cel·lulosa.

Davant la gran complexitat d'aquesta cinètica, i a grans trets, la degradació tèrmica de la cel·lulosa consisteix en un seguit de reaccions endotèrmiques de despolimerització que es complementen entre elles donant noves concentracions de volàtils i carbó.

4.1.2 Càlcul de l'energia d'activació pel mètode Kissinger

El mètode Kissinger permet calcular i avaluar a través d'anàlisis termogravimètrics l'energia d'activació E que té lloc en el procés de degradació tèrmica de la cel·lulosa, així com la constant cinètica d'aquest, k_0 .

Pel càlcul d'aquesta energia d'activació es van realitzar quatre TGAs al laboratori d'anàlisis tèrmiques de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona amb varies velocitats d'escalfament: 2K/min, 5K/min, 10K/min i 20K/min.

A continuació es mostra el desenvolupament del procés basant els càlculs en un dels anàlisis, concretament 2K/min.

TGA 2K/min

A la Figura 18, s'observa la gràfica obtinguda en l'anàlisi termogravimètric escalfant la mostra per conducció dins d'un termogravímetre a 2K per minut.

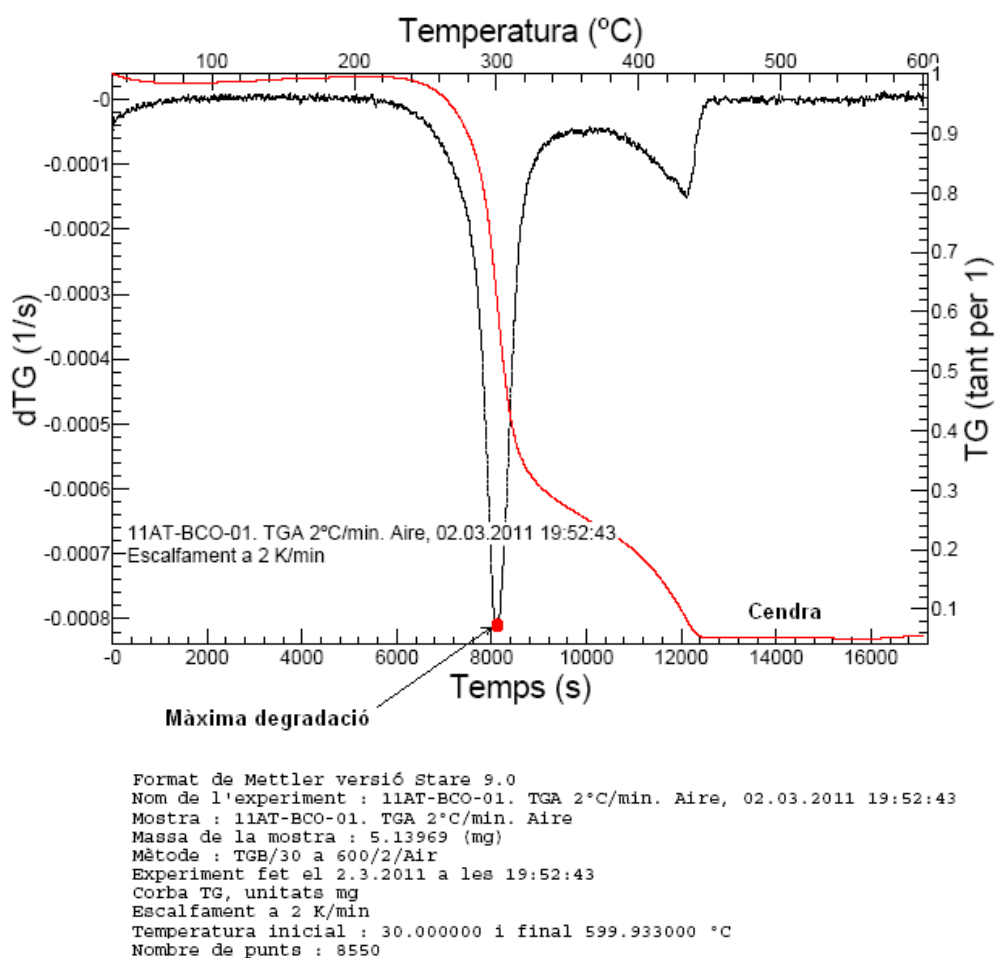


Figura 18: Gràfica del TGA 2K/min

A mesura que va passant el temps, la cel·lulosa es va degradant tèrmicament, és a dir, augmenta l'aparició de volàtils i char entre els porus d'aquesta per les reaccions d'oxidació fins que s'alliberen d'entre les fibres a través de les reaccions de descomposició provocant l'inici de la pèrdua de massa.

La corba d'anàlisi termogravimètrica en els quatre experiments es caracteritza per una caiguda brusca de massa en la zona dels 300-375°C.

Càlcul de l'energia d'activació E:

Primer de tot s'igualava el diferencial de pèrdua de massa m amb l'equació d'Arrhenius.

$$\frac{-dm}{dt} = k_0 (m - m_f) e^{-E/RT}$$

on t és el temps, R és la constant del gas ideal i m_f la massa final.

Considerem la temperatura de piròlisi de referència com l'obtinguda en el punt màxim de degradació tèrmica i per tant, en el punt on la derivada de la corba haurà de ser 0.

$$\frac{d}{dt} \left(-\frac{dm}{dt} \right) = 0 = \frac{dm}{dt} k_0 e^{-E/RT} + (k_0 (m - m_f)) e^{-E/RT} \frac{E}{RT^2} \cdot \frac{dT}{dt}$$

En aquest punt, es passa una part de la igualtat a l'altra banda i s'anul·len alguns dels factors:

$$-\frac{dm}{dt} \cancel{k_0 e^{-E/RT}} = \cancel{k_0 (m - m_f)} \cancel{e^{-E/RT}} \frac{E}{RT^2} \frac{dT}{dt}$$

$$-\frac{dm}{dt} = (m - m_f) \frac{E}{RT^2} \frac{dT}{dt}$$

Tenint en compte l'expressió inicial, és a dir que la diferència de pèrdua de massa és igual a $k_0(m - m_f)e^{-E/RT}$:

$$k_0 \cancel{(m - m_f)} e^{-E/RT} = \cancel{(m - m_f)} \frac{E}{RT^2} \frac{dT}{dt} \longrightarrow k_0 e^{-E/RT} = \frac{E}{RT^2} \frac{dT}{dt}$$

$$e^{-E/RT} = \frac{E}{RT^2} \frac{dT}{dt} \frac{1}{k_0} \longrightarrow -\frac{E}{RT} = \ln \left(\frac{E}{RT^2} \frac{dT}{dt} \frac{1}{k_0} \right)$$

Es desenvolupa el logaritme neperià:

$$-\frac{E}{RT} = \ln\left(\frac{E}{Rk_0}\right) + \ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right) \longrightarrow \ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right) = -\frac{E}{RT} - \ln\left(\frac{E}{Rk_0}\right)$$

que ens permetrà determinar E i k₀.

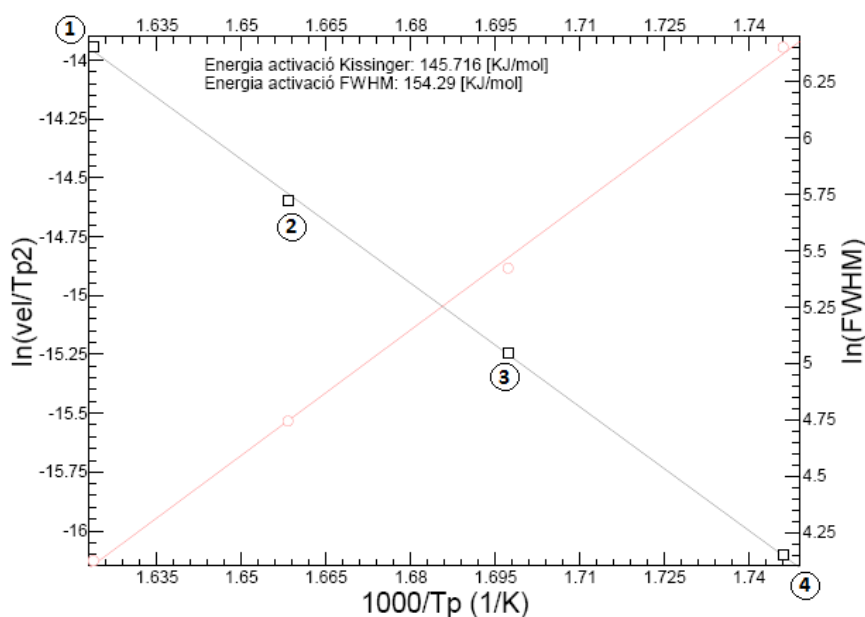
En els quatre TGAs realitzats s'han trobat diferents temperatures de piròlisi de referència per a diferents velocitats d'escalfament.

dT/dt (K/min)	Temperatura de piròlisi (K)
2	573
5	590
10	603
20	616

Taula 2: Resultats dels 4 TGA. Temperatures de piròlisi de referència trobades per a diferents velocitats d'escalfament.

A la Taula 2 s'observa que en augmentar la velocitat d'escalfament, augmenta la temperatura de piròlisi.

A partir d'aquestes dades i realitzant els càlculs pertinents es podrà obtenir la gràfica de la Figura 19 que es mostra a continuació.



Ajust Kissinger
Energia d'activació : 145.716 [KJ/mol]
Energia d'activació : 1.51024 [eV/at]
Terme preexponencial: 3.45726e+010 [1/s]
Errors del pendent i coordenada a l'origen 0.271701 [1/K] i 0.456983
coeficient de correlació lineal : 0.99976

Figura 19: Ajust Kissinger pels valors trobats dels 4 TGAs

Càlcul de l'Energia d'activació:

Punt 1:

TGA 20K/min, $T_p=616^\circ\text{K}$

$$y = \ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right) \longrightarrow \ln\left(\frac{20\text{K}}{60\text{s}} \frac{1}{616^2}\right) = -13,95$$

$$x = 1000/T_p = 1000/616 = 1,62$$

Punt 2:

TGA 10K/min, $T_p=603^\circ\text{K}$

$$y = \ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right) \longrightarrow \ln\left(\frac{10\text{K}}{60\text{s}} \frac{1}{603^2}\right) = -14,59$$

$$x = 1000/T_p = 1000/603 = 1,66$$

Punt 3:

TGA 5K/min, $T_p=590^\circ\text{K}$

$$y = \ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right) \longrightarrow \ln\left(\frac{5\text{K}}{60\text{s}} \frac{1}{590^2}\right) = -15,24$$

$$x = 1000/T_p = 1000/590 = 1,69$$

Punt 4:

TGA 2K/min, $T_p=573^\circ\text{K}$

$$y = \ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right) \longrightarrow \ln\left(\frac{2\text{K}}{60\text{s}} \frac{1}{573^2}\right) = -16,10$$

$$x = 1000/T_p = 1000/573 = 1,74$$

A partir d'aquests càlculs s'obté la taula 3:

x	Y
1,62	-13,95
1,66	-14,59
1,69	-15,24
1,74	-16,10

Taula 3: Resultats pel mètode de Kissinger

Càlcul de la recta de regressió:

$$y = a + bx$$

$$y = 15,60 - 18,22x$$

L'expressió de la recta queda relacionada amb l'expressió de la manera següent:

$$\underbrace{\ln\left(\frac{dT}{dt} \frac{1}{T^2}\right)}_y = \underbrace{-\frac{E}{RT}}_{bx} - \underbrace{\ln\left(\frac{E}{Rk_0}\right)}_a$$

S'igualen les dues expressions:

$$-18,22 = -E/RT$$

$$E = 145,716 \text{ kJ/mol}$$

L'energia d'activació que té lloc en el procés de degradació tèrmica de la mostra de cel·lulosa trobada pel mètode Kissinger és de 145,716kJ/mol.

Càlcul de la constant cinètica k_0 :

$$a = -\ln\left(\frac{E}{Rk_0}\right)$$

$$15,60 = -\ln\left(\frac{145,716}{Rk_0}\right) \longrightarrow k_0 = 3,3 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

La constant cinètica trobada pel mètode Kissinger és de $3,3 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$.

4.2.1. Temperatura de la flama adiabàtica

El càlcul de la temperatura de la flama adiabàtica segueix el model proposat per Greenberg i Ronney (1993).

La temperatura de la flama adiabàtica s'obté a partir d'aplicar un model unidimensional de flama prima, on el gruix de la flama és negligible i acceptant que la posició de la flama separa les regions d'oxidant i reactant (cas de flama difusiva). En aquesta situació, Greenberg i Ronney (1993) demostren que la temperatura de la flama adiabàtica T_f es pot expressar amb

$$T_f = T_\infty + \left(\frac{q - L_v}{c} + T_v - T_\infty \right) \left(1 - \frac{1}{(1 + Y_{O_2} / f)} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

On:

T_f = Temperatura de la flama

T_∞ = Temperatura ambient,

q = Calor de reacció de la combustió,

L_v = Calor de vaporització,

c = calor específica del gas,

T_v = Temperatura de piròlisi,

Y_{O_2} = Concentració inicial d'oxigen en massa,

f = coeficient estequiomètric oxigen/fuel,

Per al cas de la nostra mostra de cel·lulosa, la calor de reacció de la combustió és $Q = 1,67 \cdot 10^7 \text{ Jkg}^{-1}$, el calor latent de vaporització és $L_v = 7,5 \cdot 10^5 \text{ Jkg}^{-1}$ i $f = 1,185$. La temperatura ambient és de 300K. La calor específica del gas és de 1218 J/kgK.

El valor utilitzat per la temperatura de vaporització és $T_v = 620\text{K}$, extret d'anteriors anàlisis termogravimètrics realitzats en el laboratori i acceptats d'acord amb altres valors que s'han trobat en la literatura (Bhattacharjee et al.2005).

Els diferents valors obtinguts de la temperatura de la flama aplicant la fórmula (1) per a diferents concentracions d'oxigen es mostren a la Taula 4:

XO ₂	Temperatura de la flama (K)
22	2594
25	2820
30	3186
50	4410

Taula 4: Temperatura de la flama en funció de la concentració d'O₂.

Per a la concentració més alta d'oxigen, 50%, la temperatura de la flama adiabàtica augmenta fins als 4410K. Una temperatura molt superior que la que presenta la flama per una concentració d'oxigen del 22%, 2594K.

En la Taula 4 es pot observar que l'increment de la temperatura de la flama augmenta a mesura que augmenta la concentració d'oxigen.

4.2.2. Càlcul de la velocitat de propagació de la flama.

L'expressió per a la velocitat característica de propagació de la flama es realitza estudiant un volum de control obtingut a partir de la discussió de Comas i Pujol (2012). Els tres volums de control que es mostren a la Figura 20 s'utilitzen per mostrar la fase gas i la fase sòlid.

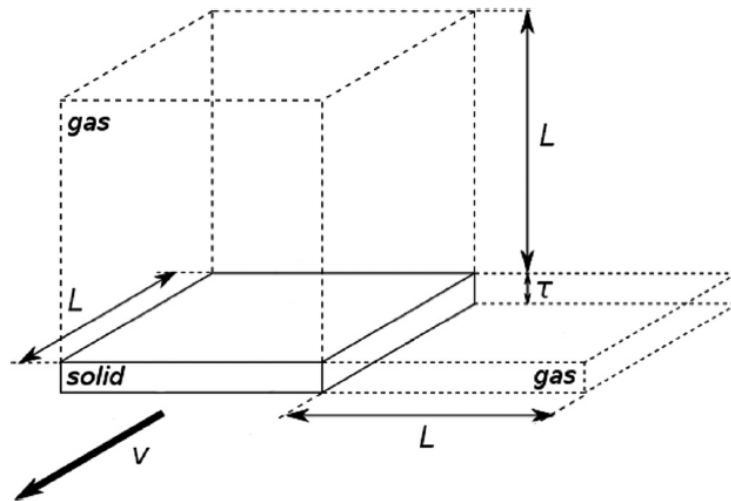


Figura 20: Volums de control a la fase sòlida i a la gas

La fase sòlida del volum de control es troba a la temperatura de vaporització (T_v). A sobre i al lateral del volum de control de la fase sòlida hi han els volums de control en fase gas, tots dos es troben a la mateixa temperatura T_f , és a dir, a temperatura de la flama.

Es considera temperatura ambient, T_a , a la part del volum de control de la fase sòlida verge.

La conducció a través de la fase gas és el principal mecanisme de transmissió de calor de la flama a la superfície del sòlid, l'equació del balanç d'energia per la fase sòlida del volum de control és:

$$\rho_s c_s V_d \frac{(T_v - T_a)}{L} L^2 \tau_s \sim \lambda_g \frac{(T_f - T_v)}{L^2} L^3 + \lambda_g \frac{(T_f - T_v)}{L^2} L^2 \tau_s$$

On, per simplicitat, s'utilitza la longitud característica $L = \alpha_g / U$. Per poder definir L , α_g és la difusivitat de la fase gas i U és la velocitat convectiva induïda per la diferència de densitats que s'esdevenen a la fase gas durant el procés de combustió.

L'equació anterior, excloent el darrer terme que només és important quan l'efecte de les vores és destacable, permet obtenir una expressió per a la velocitat de propagació de la flama (de Ris, 1969):

$$v_f = \frac{\pi \lambda_{\text{gas}}(T_f - T_v)}{4 \tau \rho_s c_s (T_v - T_\infty)} \quad (\text{Eq. 4})$$

On, λ_{gas} és la conductivitat del gas, T_f és la temperatura de la flama, T_v la temperatura de piròlisi 620K, ζ és la meitat del gruix del paper, 0,00933 cm, ρ_s és la densitat del paper 461,95kg/m³, c_s calor específica del paper 1180J/kgK i T_∞ la temperatura ambient 300K. El factor $\pi/4$ a l'equació (4) s'ha inclòs per tal de reproduir l'expressió de de Ris elaborada a partir d'un complex model de combustió.

Aplicant la formula (Eq. 4) per a diferents concentracions d'oxigen amb un angle d'inclinació de 90° de la mostra, s'obtidran uns valors diferents de velocitat de propagació, això es pot observar a la Taula 5 que es mostra a continuació:

XO2	Conductivitat del gas (W/km)	Temperatura de la flama (K)	Velocitat de propagació (cm/s)
22	0,087	2594	0,84
25	0,093	2820	0,99
30	0,102	3186	1,27
50	0,132	4410	2,44

Taula 5: Velocitats de propagació per diferents concentracions.

Els valors de la conductivitat del gas s'han extret de dades tabulades a partir de resultats experimentals.

Per tant, augmentant la concentració d'oxigen, tant la conductivitat del gas com el valor de la temperatura de la flama, augmentaran i, per tant s'incrementarà la velocitat de propagació d'aquesta.

Els valors teòrics obtinguts de la velocitat de de propagació són molt semblants als experimentals. Per una concentració d'oxigen del 22% la velocitat calculada segons de Ris és de 0,84cm/s el qual s'assembla molt als valors que es mostren en la Figura 52.

En augmentar la concentració d'oxigen la velocitat de propagació de la flama es troba entre l'1,010 i 1,040cm/s. Si s'observa la taula 5, la velocitat de propagació per aquestes mateixes condicions és de 0,99cm/s.

Per altra banda, quan la concentració d'oxigen és del 30%, el valor teòric trobat per l'equació 4 és de 1,27cm/s. Aquesta vegada la velocitat teòrica no correspon amb la velocitat trobada experimentalment. Dos dels tres casos realitzats presenten una velocitat de propagació de 1,65cm/s i el tercer cas 0,8cm/s. Aquest distanciament dels resultats s'atribueix a que en augmentar la concentració d'oxigen per un mateix angle augmenten les inestabilitats en la flama provocant corrents convectius que afavoreixen a la velocitat de propagació d'aquesta.

Per últim, quan tenim una concentració d'oxigen del 50% la velocitat teòrica calculada és més baixa que la tenim en els experiments del laboratori.

Aquesta fórmula serveix per la combustió de mostres que es troben en angles d'entre 0 i 45° i concentracions baixes, ja que a mesura que s'incrementa la concentració i l'angle d'inclinació, els valors teòrics s'allunyen dels experimentals i per tant la fórmula no permet calcular amb exactitud la velocitat de propagació que té la flama.

5 DISPOSITIU EXPERIMENTAL

5. DISPOSITU EXPERIMENTAL

5.1 Introducció

Seguir una bona metodologia per realitzar els experiments permetrà aconseguir un procés experimental segur, exacte i precís per tal d'obtenir dades fiables que posteriorment ens serviran per analitzar i discutir la influència que té l'angle d'inclinació de la mostra i la concentració d'oxigen en la velocitat de propagació de la flama.

Els experiments s'han realitzat en atmosferes d'O₂-N₂ amb una amplada de paper a cremar de 4 cm i en quatre concentracions d'oxigen (en %) diferents en volum: 22, 25, 30 i 50.

Per tal d'obtenir unes dades prou representatives, s'ha repetit tres vegades el mateix experiment per a un angle i una concentració fixada. Per tant, el número d'experiments efectuats ha estat de 60. La següent Taula 6 s'ha utilitzat com a guia i s'ha anat identificant amb un número cada experiment completat. La numeració és de l'1 al 60. Alfa és l'angle d'inclinació de la cambra de combustió i per tant, de la mostra.

Concentració oxigen (%)	alfa			alfa			alfa			alfa			alfa		
	0°			22.5°			45°			67.5°			90°		
22	4	5	6	13	14	15	16	17	18	37	38	39	49	50	51
25	7	8	9	28	29	30	19	20	21	40	41	42	52	53	54
30	1	2	3	31	32	33	22	23	24	43	44	45	55	56	57
50	10	11	12	34	35	36	25	26	27	46	47	48	58	59	60

Taula 6 : Experiments realitzats

5.2. Instal·lació

L'esquema de la instal·lació es pot veure a la següent Figura 21, on s'observen les diferents parts que la componen. A partir d'aquesta figura s'explicarà la instal·lació.

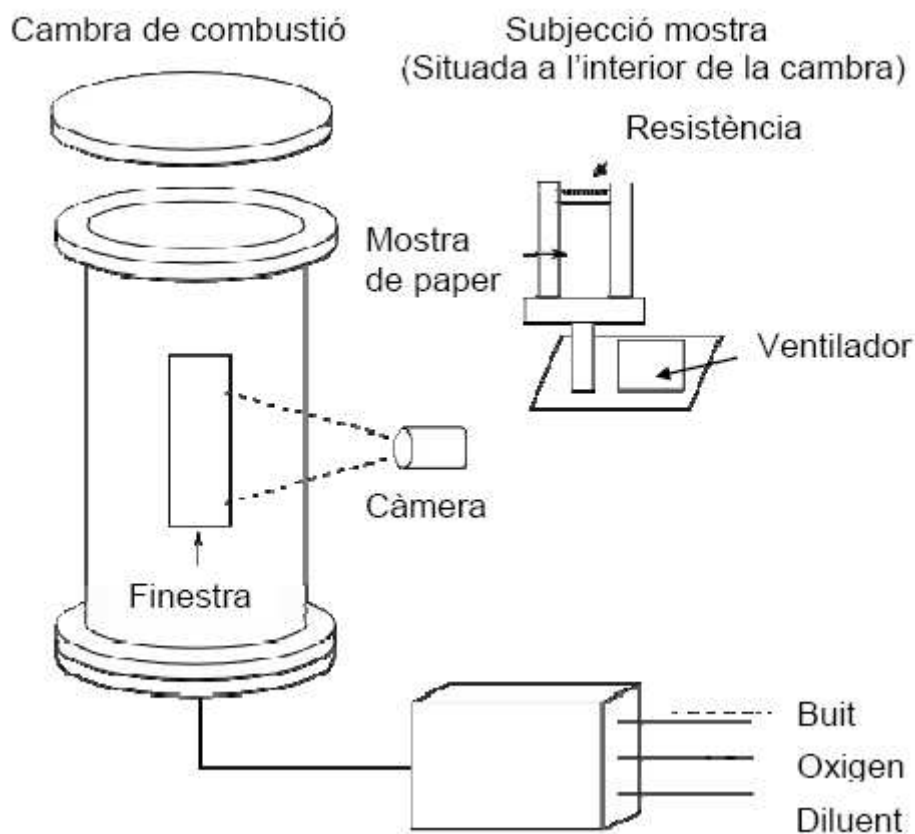
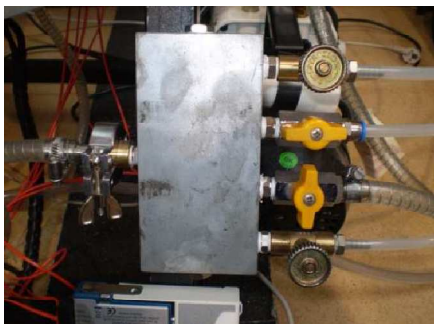


Figura 21 : Instal·lació per realitzar els experiments.

Les ampolles de gasos es troben a l'exterior de l'edifici PII on hi ha un armari metàl·lic amb les ampolles de gasos. Aquestes estan equipades amb uns manòmetres que indiquen la pressió de cadascuna, tant la d'oxigen com la de nitrogen. Les dades tècniques dels gasos, tant de l'oxigen com del nitrogen, es poden trobar a l'annex A. Dades tècniques dels gasos. De cada ampolla surt un conducte que arriba fins l'interior del laboratori. Dins el laboratori, aquest conducte té un petit manòmetre que indica la pressió a la que arriba el gas amb una vàlvula per regular-la. Des d'aquí i fins l'entrada de la cambra hi ha un petit tram més de conducte amb una vàlvula que té la funció de obrir/tancar el pas dels gasos cap a l'entrada de la cambra de combustió. Des d'aquest punt i fins a l'entrada de la cambra es substitueixen els conductes per uns tubs flexibles de silicona.

L'entrada de la cambra consta de quatre vàlvules, tal i com es pot veure a la Figura 22. D'aquestes, dues són vàlvules de gasos (de tipus rodeta, per poder tenir un millor control de la quantitat de gas que entra, ja que s'ha d'arribar a una pressió molt concreta) l'altra vàlvula és per obrir i tancar el circuit des de la bomba de buit fins ala cambra de combustió, i l'última vàlvula s'utilitza per introduir aire comprimit a dins lacambra. La funció d'aquesta última connexió és d'activar l'aire comprimit cada cop que s'ha finalitzat un experiment i així netejar l'interior de la cambra dels gasos producte dela combustió.



- Vàlvula 1 (superior): oxigen.
- Vàlvula 2 (mostrada oberta) aire comprimit.
- Vàlvula 3 (tancada): cap a la bomba buit.
- Vàlvula 4 (inferior): diluent.

Figura 22 : Vàlvules fixes a la bancada

Bomba de buit

La bomba de buit te la funció de fer el buit dins la cambra de combustió. A partir d'aquí s'omple l'interior de la cambra amb les fraccions d'oxigen i nitrogen per obtenir la concentració desitjada per a cada experiment.

Finalment, els gasos que es desprenen de la combustió se'n van per un tub flexible (amb una vàlvula de bola per obrir itancar el pas del gas) que desemboca a l'exterior del laboratori (al carrer). D'aquesta manera, s'obre aquesta vàlvula així com l'entrada d'aire comprimit a la cambra, i s'obté un circuit d'aire a pressió que facilita la neteja ràpida dels gasos que s'han després durantla combustió.

5.3. Cambra de combustió

La cambra de combustió és l'aparell on tenen lloc els experiments. Aquesta ha estat dissenyada i fabricada per l'àrea de Mecànica del Fluids del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona. El material utilitzat per fabricar-la és majoritàriament acer i té forma cilíndrica. La part superior es cobreix amb una tapa circular d'alumini que té fixats quatre espàrrecs. Aquests s'introdueixen als forats passants que hi ha en una platina soldada al cos cilíndric de la cambra, de manera que el conjunt queda fixat ambunes femelles de palometa collades als espàrrecs. D'aquesta forma, la introducció/extracció del combustible a cremar és fàcil i ràpida. En aquesta tapa hi ha instal·lat un manòmetre de precisió.

Entre la tapa i el cos hi ha una junta tòrica que deixa l'interior de la cambra totalment estanc. D'aquesta manera, permet assolir el buit en l'interior i aconseguir la concentració d'oxigen desitjada sense cap pèrdua. Per altre banda, a la figura s'observa que a la part cilíndrica de la cambra hi ha practicada una obertura amb una tapa de metacrilat de 5 mm collada al cos de la cambra. Aquesta tapa va collada amb cargols passants amb les corresponents femelles a dins la cambra. És per aquesta finestra per on s'han gravat en vídeo tots els experiments amb una càmera Sony.



Figura 23: Finestra cambra de combustió.

Pel que fa a l'interior de la cambra de combustió que es pot veure a la Figura 23 , hi hainstal·lat un petit ventilador per poder barrejar correctament els gasos i una resistència

encarregada d'escalfar el material de combustió i provocar la ignició (s'activa amb l'interruptor d'ignició, veure Figura 25).

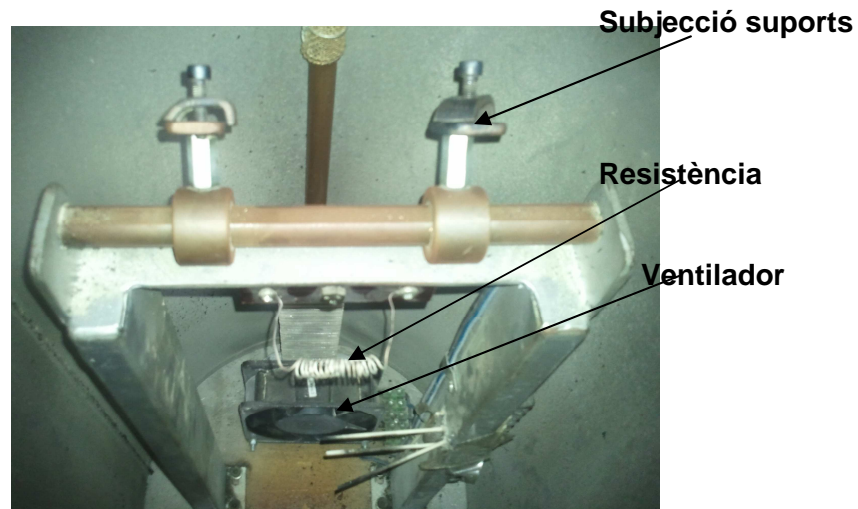


Figura 24 : Part interior de la cambra de combustió.

Aquests dos elements es poden activar/desactivar quan és necessari a través de tres interruptors fixats a la bancada. Els interruptors es poden veure a la següent Figura 25:



Figura 25: Interruptors fixos a la bancada.

Tot i que a la figura hi ha tres interruptors, el de calefacció que activa una resistència tèrmica per escalfar la barreja fins assolir una certa temperatura no es fa servir en aquest experiment.

Finalment, senyalar que tots els tubs de la instal·lació de gasos comentats a l'anterior apartat d'aquesta memòria estan connectats a la placa de vàlvules fixada a la bancada. Cal recordar que aquesta placa de vàlvules permet el pas dels gasos de combustió i d'aire comprimit a dins la cambra així com també el pas de la línia de buit.

5.4 Elements auxiliars

A més de la cambra de combustió i la instal·lació de gas hi han altres elements estrictament necessaris per poder desenvolupar els experiments: el manòmetre de la tapa de la cambra de combustió, la càmera de vídeo, l'ordinador, l'estació meteorològica de la universitat i la bomba de buit. A continuació s'explica cadascun d'aquests elements:

- El manòmetre WIKA CPG1000 és l'encarregat de mesurar en tot moment la pressió que hi ha a l'interior de la cambra de combustió, i està situat a la tapa superior de la cambra, tal com es veu a la Figura 26. La fitxa tècnica de l'aparell es troba a l'annex D. Especificacions dels aparells, hi ha la fitxa tècnica d'aquest aparell.



Figura 26: Situació del manòmetre.

- La càmera de vídeo SONY HDR-CX100E: enregistra a través de la finestra que hi ha a la cambra de combustió tot el procés de combustió del material a cremar. Aquesta va situada sobre un trípod que la manté subjecte, segura i a més, permet el moviment en direcció vertical aconseguint així el seguiment de la flama durant l'experiment.

Pel que fa a la resolució i especificacions tècniques d'aquest aparell es poden trobar a l'annex D. Especificacions dels aparells.

- L'ordinador: està situat dins mateix del laboratori i té incorporat wifi. Totes les dades recollides durant l'experiment a més d'anar manuscrites, també s'han introduït en un full de càlcul. També després de cada dia d'experiments es passen a l'ordinador tots els vídeos enregistrats per la càmera de vídeo i queden guardats al disc dur.

- L'estació meteorològica: no és un element primari en aquest estudi, però s'obtenen dades d'interès necessàries per desenvolupar els experiments, com la temperatura exterior,

humitat relativa exterior i sobretot pressió atmosfèrica. Aquesta estació està situada a l'exterior de l'edifici P-II de l'Escola Politècnica Superior a molt poca distància del laboratori on s'han realitzat els experiments. Les dades que obté es poden consultar en qualsevol moment a la web de la Universitat de Girona, i s'actualitzen cada 15 minuts.

- Bomba de buit TELSTAR 2G-6: és l'aparell que s'encarrega d'aconseguir el buit dins la cambra de combustió. Aquest element és pot veure a la Figura 27. Aquesta operació s'ha de fer un cop per experiment. La bomba de buit tarda aproximadament 7 minuts a fer el buit a la cambra i és capaç d'arribar a aconseguir un molt bon buit, només deixant a l'interior de la cambra uns 2,5 mbars de pressió absoluta.

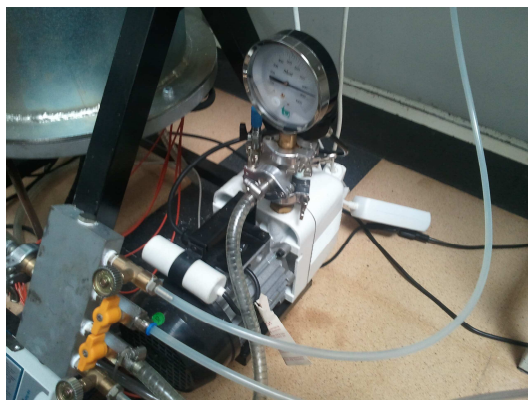


Figura 27 : Bomba de buit.

És molt important assolir un bon buit de l'interior de la cambra, ja que d'aquest depèn la fiabilitat en la concentració desitjada. Per obtenir un correcte funcionament de la bomba de buit, el nivell d'oli s'ha d'haver comprovat cada dia abans de començar a fer experiment a través d'un visor que hi ha a la part frontal de la seva carcassa. Pel que fa a les especificacions i dades tècniques de la bomba de buit es troben a l'annex B. Especificacions dels aparells.

5.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.5.1 Preparació de la mostra:

Les dimensions que han de tenir les mostres són: 25 cm de llarg i una amplada constant de 4cm.

El marcatge de les mostres consisteix en una recta de 22cm. Cada centímetre té una marca amb el número de centímetre que toca al costat. En qualsevol cas, el marcatge ha de quedar al centre dels 4 centímetres a cremar. A la següent Figura 29, es pot veure com queden les mostres amb les respectives marques i línies auxiliars.

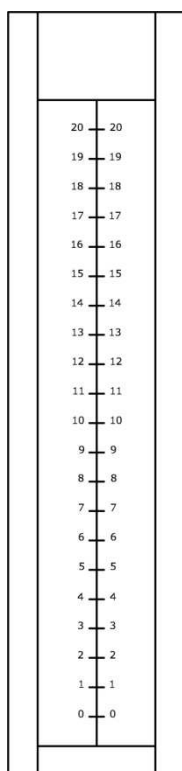


Figura 28: Mostra preparada per ser analitzada

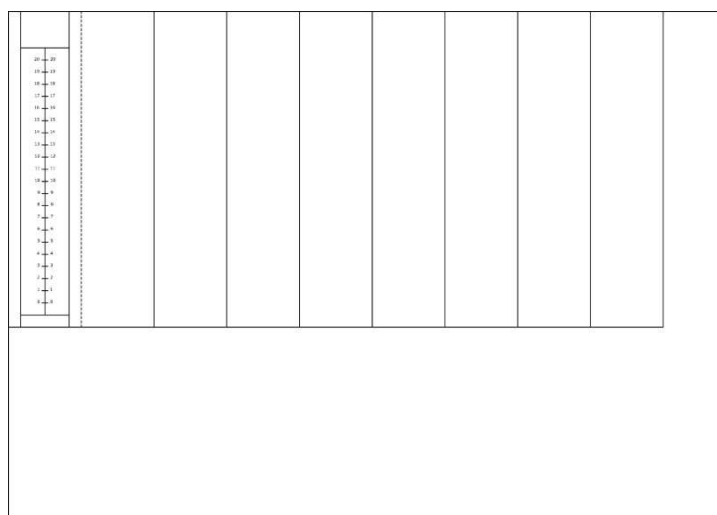


Figura 29: Paper de filtre DIN-A2 on farem marques corresponents a les dimensions que ha de tenir cada mostra

La ignició és a la part superior de la mostra, Figura 28, i la propagació de la flama en qualsevol dels angles d'inclinació de la mostra, va de la marca de 20 cm cap a la de 0 cm.

Una vegada es tenen les mostres marcades i tallades, és molt important que no continguin molècules d' H_2O , ja que així aconseguim unes condicions de totes les mostres més homogènies (Veure punt 2.3 Influència de la relació cel·lulosa aigua). Així doncs, per tal de

ometre, en els assajos, un factor que ens condicionaria i molt la combustió, es col·loquen les mostres dins d'un forn que hi ha habilitat al laboratori a una temperatura de 127 °C durant un mínim de 2h (400K) (Zhang et al., Comb. Flame, 90, 71-83, 1992) i seguidament un mínim de 24 hores dipositades en una caixa aïllada de l'exterior amb absorbent (silica gel) fins just abans al seu ús (Frey i T'ien, Comb. Flame, 26, 257-267, 1976).

5.5.2. Comprovacions prèvies

Abans de treure la mostra de la caixa amb l'absorbent i començar l'experiment, s'han de fer unes comprovacions prèvies:

- S'ha de comprovar que les vàlvules de subministrament dels gasos en el laboratori estan tancades tal i com mostren les Figures 30 i 31:



Figura 30: Aixetes finals de subministrament



Figura 31: Aixetes capals manoreductors (conjunt manòmetre i regulador de pressió).

- Obertura de les vàlvules en les ampolles dels gasos: Situades a l'exterior del edifici P-II en una caseta que s'ha d'obrir amb una clau. A continuació s'ha de comprovar si els manòmetres principals marquen pressió, si és així s'obre l'aixeta que es troba a la mateixa ampolla. Aquestes s'obren amb una vàlvula circular girant en sentit horari i es tanquen en sentit antihorari.
- Obertura de les vàlvules en els manoreductors del laboratori: Els manoreductors són el conjunt d'aparells que hi ha a la sortida dels gasos en el punt de distribució en el laboratori. Abans del manòmetre, hi ha una vàlvula de bola que s'ha d'obrir en cada punt de subministrament. Una vegada oberta, el manòmetre ha d'indicar pressió (aproximadament 6 bars). De totes formes, s'han de mantenir tancades les sortides a l'exterior per tal de no perdre gas.

- Angle d'inclinació de la mostra: Abans de començar l'experiment comprovar que l'angle d'inclinació de la cambra de combustió és el que li correspon d'acord amb l'experiment que toca. Mitjançant el transportador que hi ha al costat de la cambra i un mecanisme de fixació, es pot inclinar la cambra 360°, fixar a l'angle desitjat, en el nostre cas, 0°, 22'5", 45°, 67'5", 90°.

5.5.3. Col·locació de la cambra

Per tal de veure quina és la influència de l'angle de combustió de la mostra en la velocitat de propagació cal inclinar la cambra amb els graus corresponents a l'experiment.

En primer lloc, per evitar possibles accidents, cal treure la tapa superior de la cambra afluixant i extraient les femelles dels espàrrecs passants.

La cambra consta d'un transportador lateral que permet inclinar la cambra 360°. Al costat del transportador i a cada banda de la cambra hi ha un mecanisme per fixar o alliberar la cambra de l'angle en què es troba posicionada. Per inclinar la cambra només cal accionar el mecanisme i inclinar-la els graus desitjats. Sense moure la cambra de la inclinació que presenta, es colla i fixa a través d'aquest mateix mecanisme.

5.5.4. Col·locació de la mostra

En primer lloc, s'ha de col·locar correctament la mostra en uns suports que van subjectes dins la cambra de combustió. Per això, es treu la tapa superior de la cambra de combustió afluixant i extraient les femelles que estan collades als espàrrecs passants. Al fons de la cambra de combustió hi ha dipositat un conjunt de plaques d'alumini amb una cinta mètrica incorporada que s'han d'extreure.

En aquest moment, s'extreu la mostra de la caixa amb absorbent i es col·loca als suports deixant que quedi 1 cm de mostra entre els suports d'alumini. Per fixar-la es fa ús de cinta adhesiva. S'ha de comprovar que les plaques de subjecció d'alumini estiguin paral·leles a la distància desitjada per a l'amplada de paper assajada (4 cm). Finalment, el conjunt anirà subjecte a un suport d'encaix mascle que s'unirà perfectament amb la corresponent femella mecanitzada dins la cambra de combustió. S'introdueix de nou a la cambra de combustió. La resistència que produeix la ignició i que es troba fixa a l'interior de la cambra, ha de tocar completament el paper.

5.5.5. Buit i mescla de gasos

Aquest procés és divideix en cinc subprocessos:

1. Pas previ
2. Buit de la cambra de combustió
3. Introducció d'oxigen
4. Introducció del gas inert (en aquest cas nitrogen)
5. La barreja.

En primer lloc s'ha d'engegar l'ordinador de sobretaula i carregar una plantilla de càlcul de l'open office. Aquesta s'ha d'omplir amb les dades corresponents i guardar-la amb la numeració de l'experiment i la data en el mateix directori. Per emplenar les dades de l'estació meteorològica, es va via web a l'adreça:

<http://copernic.udg.es/gfa/estacio/dades.htm>.

Una vegada omplert el full de càlcul, aquest automàticament indica quin és el buit que s'ha d'assolir i quina és la pressió d'oxigen i la total (aquesta última hauria de ser igual a 1 bar ja que aquesta és la pressió total objectiu per a tots els experiments).

Per a cada experiment s'ha d'omplir un full de seguiment (imprès prèviament) amb una taula que conté les dades més importants de cada experiment. Tant del full de càlcul que s'executa i s'omple a l'ordinador com del full que s'omple manualment, els podem trobar a l'annex C.1 Full de càlcul i C.2 Full de seguiment respectivament. Aquests fulls de càlculs són creats d'abans de l'execució d'aquest projecte per membres de l'Àrea de Mecànica de Fluids del Dept. d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial.

A continuació, es fa el buit de la cambra de combustió. Per completar aquest pas correctament, es tapa la cambra de combustió i es collen fort les femelles. A continuació s'engega el manòmetre que hi ha situat a la tapa de la cambra de combustió i és posa a zero.

Per altra banda, s'ha de tancar la vàlvula de sortida de la tapa inferior (l'aixeta amb mànec negre que hi ha a la tapa inferior de la cambra) i també totes les vàlvules de la placa de vàlvules menys la que va cap a la bomba de buit. Llavors, es pot engegar la bomba de buit. En aproximadament 7 o 8 minuts s'hauria d'arribar a fer el buit fins al valor desitjat que marca el full de càlcul (casella groga corresponent a "Buit mínim").

Aquest valor de buit permet que la quantitat d'aire residual en l'interior de la cambra no alteri de forma significativa (<0.05%) la concentració d'oxigen assolida tal i com han demostrat estudis previs amb la mateixa cambra (Pujol i Comas, 2011). En el moment en què s'observa el valor desitjat de pressió mínima assolida en el manòmetre, s'ha de tancar la vàlvula de la placa de vàlvules i, després, parar la bomba de buit. Finalment, el valor observat al manòmetre s'ha d'apuntar tant al full de càlcul (casella verda que diu "Buit obtingut") com en el de seguiment.

En tercer lloc, s'obre l'aixeta d'oxigen situada al punt final de subministrament i per tant s'ha introduït l'oxigen dins la cambra de combustió.

Seguidament, s'obre amb molta precaució la vàlvula corresponent a la placa de vàlvules per tal que el pas d'oxigen a la cambra sigui gradual. Mentrestant, s'ha de vigilar que la pressió en el manòmetre del manoreductor no disminueixi molt. Una vegada s'arriba al nivell d'oxigen que s'indica al full de càlcul, es tanca l'aixeta de la placa de vàlvules i a continuació l'aixeta de la xarxa de distribució. Per últim, igual que al segon pas, s'ha d'apuntar el valor observat al manòmetre al full de càlcul (casella groga que diu "Pressió O2") i al de seguiment.

El quart pas a completar es la introducció del gas inert a la cambra de combustió.

Aquest procediment es idèntic a la introducció d'oxigen a la cambra de combustió, que s'ha explicat al segon pas. Tan sols varia la casella d'introducció en el full de càlcul i seguiment del valor llegit al manòmetre, en aquest cas és: casella groga on diu "Pressió N2".

Per últim i en cinquè lloc, es fa la barreja de gasos. Per barrejar els gasos es prem l'interruptor del ventilador intern de la cambra de combustió que provoca un corrent durant 2 minuts. A continuació es tanca l'interruptor i es deixa que els corrents dels gasos generats en la barreja tornin al repòs durant 3 minuts. Aquests minuts s'han controlat mitjançant un programa informàtic que fa la funció de cronòmetre.

5.5.6 Combustió del sòlid i gravació:

Abans d'activar l'interruptor d'ignició s'ha de preparar la càmera de vídeo. Aquesta ha de tenir la bateria carregada i suficient memòria lliure per a la gravació de l'experiment. La càmera de vídeo s'ha de col·locar al seu trípod fixat davant la finestra de la cambra de combustió, amb la imatge centrada i enfocada amb el combustible a cremar. En aquest punt, es prem el botó "rec" de la càmera per començar a gravar. Tot seguit, s'ha d'activar l'interruptor d'ignició i la resistència comença a escalfar-se, fins el punt que comença la combustió. En aquest moment, s'ha de desactivar la ignició i gravar amb la imatge centrada tota la combustió del sòlid. Quan s'ha cremat tot el combustible s'ha d'apagar la càmera de vídeo i descarregar el vídeo a l'ordinador mitjançant un connector USB. La càmera de vídeo té un programa per aquest efecte que, a més, els permet visualitzar i captar la imatge a 25 fotogrames per segon.

5.5.7. Neteja dels gasos cremats

Un cop finalitzada la combustió de la mostra, s'ha de netejar la cambra dels gasos producte abans d'obrir-la.

En primer lloc s'obre l'aixeta de la tapa inferior de la cambra de combustió que té un mànec negre. A continuació, s'obre l'aixeta de la placa de vàlvules que porta aire comprimit. En aquest punt, s'obre l'aixeta de final de subministrament d'aire comprimit (durant uns 30 segons), però s'ha de tenir en compte no superar mai els 2 bars que és la pressió màxima que pot mesurar el manòmetre de precisió.

Amb aquest procés s'aconsegueix que els gasos cremats surtin per la vàlvula de la tapa inferior de la cambra de combustió i circulin fins a l'exterior de l'edifici. Una vegada netejada la cambra s'han de tancar les vàlvules de manera ordenada i en ordre invers al del procés d'obrir-les.

5.6. Obtenció de dades i resultats experimentals.

5.6.1 Extracció de dades dels vídeos

Totes les dades relatives al desplaçament de la flama i al seu comportament s'han extret gràcies a la gravació individual de cadascun dels experiments completats. Per tant, per a cada experiment, s'ha obtingut un vídeo. Aquest vídeo es pot visualitzar al ordinador amb la instal·lació d'un programa adient.

En el nostre cas, s'utilitza el mateix programari que proporciona el fabricant de la càmera de vídeo. Aquest programa permet visualitzar els vídeos emmagatzemats a l'ordinador, que prèviament s'han passat per un cable USB de la càmera a l'ordinador. A part d'això, a l'hora de visualitzar el vídeo, aquest es pot aturar en qualsevol moment en una imatge o instant de temps concret. S'ha de tenir present que cada segon de vídeo gravat amb aquesta càmera està compost de 25 fotogrames que en continu formen l'animació. Com s'ha comentat anteriorment, els papers tenen una mida de 25 cm d'alçada dels quals estan marcats 20 cm. Cada centímetre té una marca amb el número corresponent. El que s'ha d'extreure dels vídeos és el temps en segons més els fotogrames en aquell instant en què la flama assoleix cada centímetre marcat, és a dir, s'obtenen els temps quan la combustió arriba als 20 cm, als 19 cm, 18 cm, 17 cm, etc.

5.6.2 Obtenció de la velocitat de propagació de la flama

Mitjançant un programa d'ordinador anomenat Origin s'han pogut elaborar totes les gràfiques de cadascun dels experiments. En aquest programa s'han copiat les dades introduïdes al full de càlcul amb les dades de temps per a cada centímetre de combustible cremat.

La representació d'aquestes dades (posició de la flama vs. temps) en un gràfic X-Y permet aplicar una anàlisi estadística. Per exemple, podem fer la regressió lineal de la posició en funció del temps i obtenir el pendent de la recta. Cal notar que el pendent d'aquesta recta de regressió lineal correspondrà a la velocitat de propagació de la flama.

6 RESULTATS EXPERIMENTALS

6 RESULTATS EXPERIMENTALS

6.1 Introducció

Aquest estudi experimental té com a principal objectiu l'obtenció de les velocitats de propagació de la flama en diferents angles d'inclinació de la mostra per varies concentracions d'oxigen. Tots els resultats obtinguts es discutiran críticament, per, més endavant, poder-ne extreure conclusions.

En aquest apartat de la memòria, però, l'objectiu és presentar cadascuna de les mesures obtingudes. Per fer-ho, aquí es presenten les dades en format gràfic, obtingudes d'una manera ordenada i classificant els diferents casos a estudiar. Després de cada figura hi ha una petita descripció de les característiques més rellevants. La presentació de la velocitat de propagació de la flama deduïda a partir dels resultats experimentals es durà a terme en el capítol 4.

Per aquest motiu, la interpretació dels resultats experimentals s'ha estructurat en 5 apartats generals pels diferents angles de combustió de la mostra: per angle= 0° , angle= $22,5^\circ$, angle= 45° , angle= $67,5^\circ$ i angle= 90° i cadascun d'aquests amb les quatre concentracions molars d'oxigen (en %) diferents: 22, 25, 30 i 50.

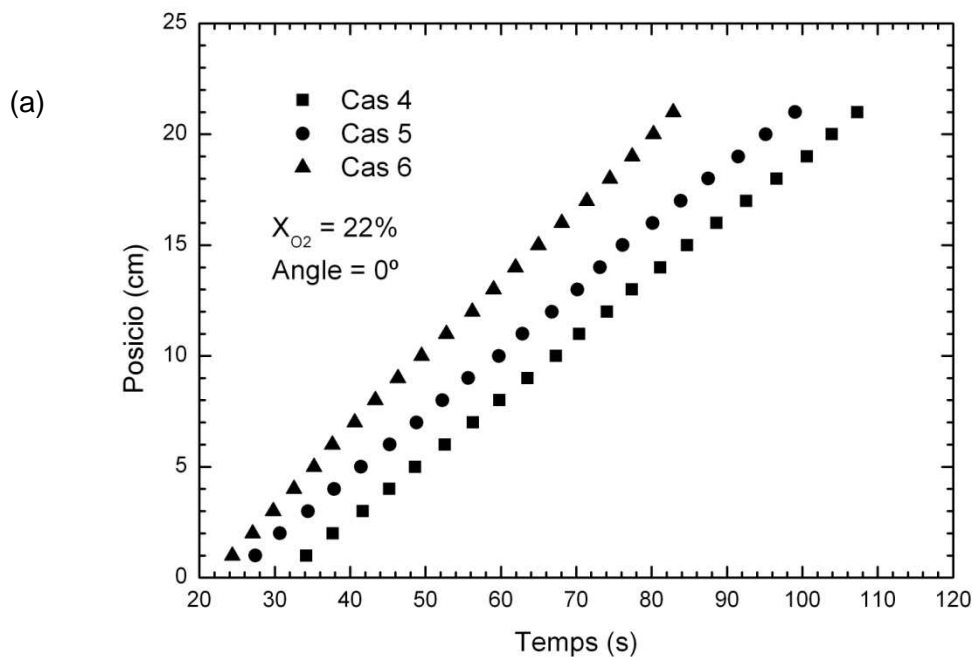
Les gràfiques escollides per presentar les dades obtingudes en els experiments han estat de punts. En les gràfiques, els punts representen la posició de la flama en funció del temps. A l'eix d'abscisses s'ha col·locat el temps en segons i en l'eix d'ordenades la posició (x) en centímetres, on $X = 2 \text{ cm}$ i $X = 22 \text{ cm}$ corresponen a les cotes 20 i 0, respectivament, de les mostres de la figura x.

En qualsevol cas, cadascuna de les gràfiques consta de tres experiments per a un mateix valor de concentració objectiu.

6.2. VELOCITAT EN FUNCIÓ DE LA CONCENTRACIÓ

6.2.1 CAS ANGLE 0°:

La Figura 32 mostra les dades de posició i temps per a la flama en els casos 4, 5 i 6 en una concentració molar d'oxigen objectiu del 22%.



(b)

Cas	Velocitat de propagació (cm/s)
4	0,274
5	0,281
6	0,336

Figura 32 : (a) Representació gràfica angle de combustió de 0° i concentració molar d'oxigen objectiu del 22%. Cas 4, $X_{O_2} = 21,47\%$; Cas 5, $X_{O_2} = 21,96\%$; Cas 6, $X_{O_2} = 22,06\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 4, $v_{\text{propagació}} = 0,274 \text{ cm/s}$; Cas 5, $v_{\text{propagació}} = 0,281 \text{ cm/s}$; Cas 6, $v_{\text{propagació}} = 0,336 \text{ cm/s}$

Aquest cas és amb la concentració d'oxigen més baixa.

El cas 6 no segueix la mateixa linealitat que els casos 4 i 5. De totes maneres la concentració molar d'oxigen en el cas 6 és del 22,06%, percentatge que s'acosta i molt a la concentració molar d'oxigen objectiu.

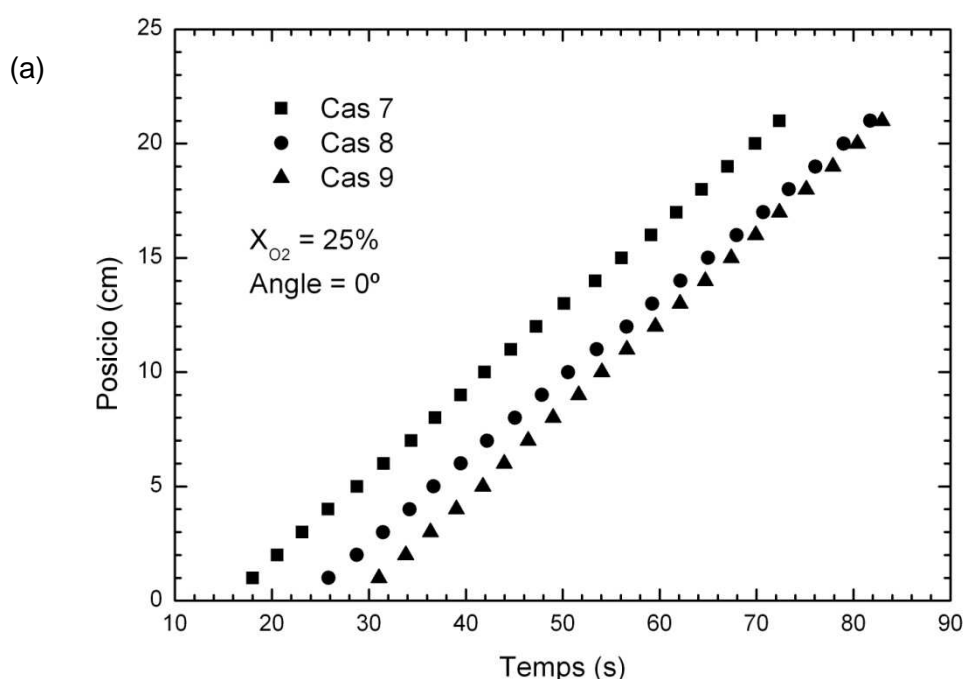
L'explicació a aquest fet podria anar relacionada amb un excés d'oxigen en el moment de obrir la vàlvula i arribar a la pressió corresponent al percentatge d'Oxigen que es vol obtenir.

En els fulls de seguiment la pressió obtinguda de l'oxigen és de -780,2mbars i la pressió final de la cambra de -0,5mbars s'allunyen de les pressions objectives, que havien de ser de -781.35mbars per l'oxigen i -3.3mbars de pressió final. Aquest increment en la proporció de gasos provocarà un augment en la velocitat de propagació de la flama.

Tal i com es pot comprovar a la taula de velocitats de propagació (b) de la Figura 32, el cas 6 té una velocitat de 0,336cm/s. La combustió en aquest cas augmenta 0,010cm/s més que els altres dos casos. El cas 6 tarda 58,52 segons a cremar-se, 15 segons més ràpid que en els altres dos.

La velocitat de propagació del cas 6 pot està alterada per culpa de que la temperatura de dins de la cambra sigui més alta de lo normal, després d'haver realitzat tants experiments.

Augmentant la concentració molar d'oxigen fins a un 25%, s'observa el següent comportament:



(b)

Cas	Velocitat de propagació (cm/s)
7	0,365
8	0,357
9	0,386

Figura 33 : (a) Representació gràfica angle de combustió de 0° i 25% d'oxigen (objectiu). Cas 7, $X_{O_2}=25,2\%$; Cas 8, $X_{O_2}=24,71\%$; Cas 9, $X_{O_2}=24,81\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 7, $v_{propagació}= 0,365\text{cm/s}$; Cas 8, $v_{propagació}=0,357\text{cm/s}$; Cas 3, $v_{propagació}= 0,386\text{cm/s}$

En la Figura 33 es pot deduir que l'experiment 9 presenta un pendent lleugerament més pronunciat que el cas 7 i 8. A la taula de velocitats de propagació dels tres casos, queda clarament reflectit. La velocitat de propagació del cas 9 és de 0,386cm/s, mentre que les velocitats dels casos 7 i 8 de 0,3654cm/s i 0,3565cm/s respectivament.

Observant els fulls de seguiment i tenint en compte el full de càlcul, s'observa que l'experiment 9, la pressió final de la cambra de combustió està per sobre de l'objectiva. Doncs la pressió final en l'experiment és de -0.5mbars i la objectiva de -6.34mbars. Aquesta diferència podria provocar una combustió més ràpida i en conseqüència un pendent més pronunciat en la representació gràfica de la velocitat de combustió de l'experiment.

Si es comparen els casos 7,8 i 9 amb els de la figura anterior (casos 4,5 i 6, per concentració d'oxigen del 22%) un 3 % de diferencia de concentració molar en oxigen provoca que la flama tardi gairebé 20 segons menys en recórrer la mateixa distància.

Els resultats per a una concentració d'oxigen del 30% es mostren a la Figura 34.

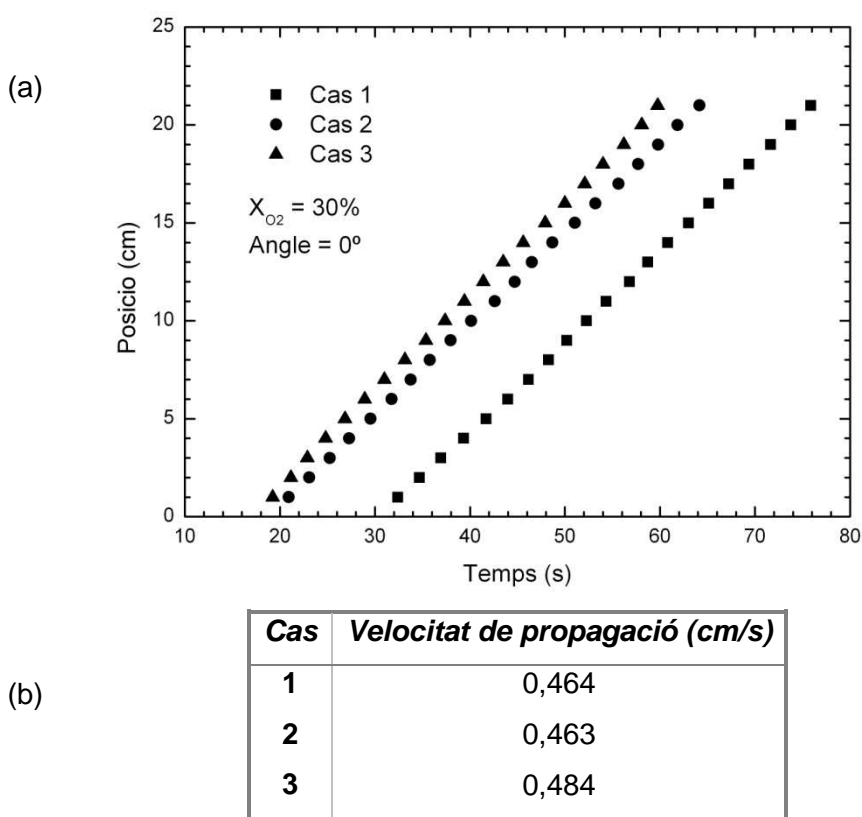
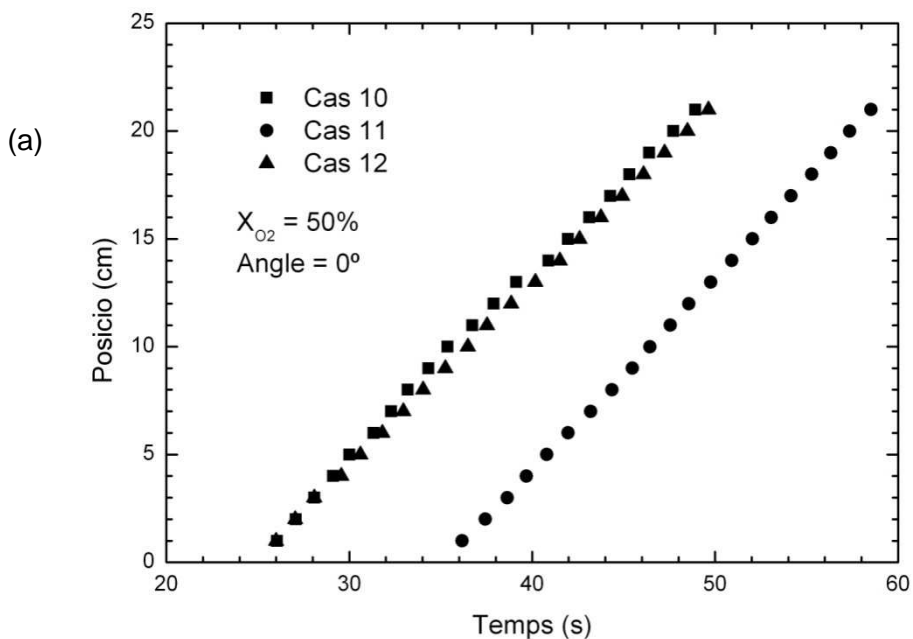


Figura 34 : (a) Representació gràfica angle de combustió de 0° i 30% d'oxigen (objectiu). Cas 1, $X_{O_2}=30,22\%$; Cas 2, $X_{O_2}=29,75\%$, Cas 3, $X_{O_2}=30,16\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 1, $v_{propagació}= 0,464\text{cm/s}$; Cas 2, $v_{propagació}=0,463\text{cm/s}$; Cas 3, $v_{propagació}= 0,484\text{cm/s}$

Ara, els tres casos son bastant semblants i amb un comportament força lineal. La concentració d'oxigen a l'inici i al final de cada experiment es imperceptible.

El cas 3 però, la flama es propaga lleugerament més ràpid que en els altres dos casos. Tal i com es pot observar a la taula de velocitats (b) de la Figura 34, la velocitat de propagació del cas 3 és de 0,484cm/s.

Finalment, la Figura 35 mostra les dades de posició del front de flama en funció del temps per als casos amb una concentració de 50% en oxigen.



(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
10	0,860
11	0,900
12	0,839

Figura 35: Representació gràfica angle de combustió de 0° i 50% d'oxigen (objectiu). Cas 10, $X_{O_2}=49,9\%$; Cas 11, $49,9\%$; Cas 12, $X_{O_2}=49,63\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascún dels casos; Cas 10, $v_{\text{propagació}}= 0,860\text{cm/s}$; Cas 11, $v_{\text{propagació}}=0,900\text{cm/s}$; Cas 3, $v_{\text{propagació}}= 0,839\text{cm/s}$

Els casos 10 i 12 tenen una velocitat de propagació relativament semblant, mentre que el cas 11 es distancia amb una $v_{\text{propagació}}$ de 0,9cm/s.

Tal i com es pot veure a la Figura 35, els casos 10 i 12 comencen amb una velocitat de propagació molt idèntica, mentre que a mesura que passa el temps els pendents es van separant.

La concentració d'oxigen final en el cas 10 és de 49,9% mentre que la del cas 12 de 49,63%. Aquesta petita diferència en el percentatge podria ser el causant de la diferència de velocitats.

La concentració d'oxigen és molt alta en aquests tres experiments, això provoca una alta velocitat de propagació. La velocitat a una concentració molar del 50% augmenta 0,40cm/s respecte la del 30%.

En comparació amb la Figura 34, observem que el temps per cremar la totalitat del paper és 50 segons menor.

En aquesta gràfica es pot observar com varien les velocitats de propagació de la flama en funció de la concentració per un angle de 0° de la mostra.

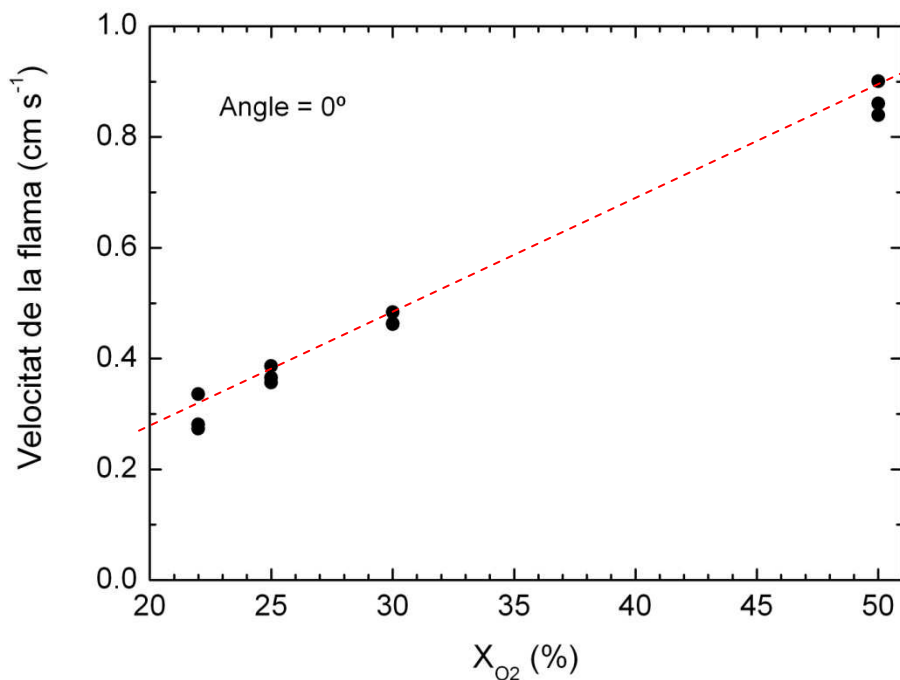


Figura 36: Velocitats de la flama per angle de combustió de 0° .

A la Figura 36 es pot observar la diferència entre les velocitats de la flama obtingudes en diferents concentracions per a un mateix angle de combustió, 0° , és a dir amb la cambra de combustió és perpendicular al terra.

La finalitat de la línia discontinua és mostrar la tendència del comportament de la velocitat de propagació de la flama en funció de la concentració d'oxigen. Si bé sembla un comportament lineal, si reduïm més la concentració d'oxigen s'arribarà a un punt on la flama ja no es propagarà ja que s'haurà arribat al límit d'extinció. Aquest comportament serveix per

contrastar les prediccions obtingudes amb les expressions teòriques per a la velocitat del front de flama.

Els punts de la gràfica indiquen els 12 experiments que s'han realitzat en un angle de 0° . Els tres casos per concentració d'oxigen del 22%, hi ha un experiment que presenta una velocitat de propagació més alta. Això pot ser degut a una manca de precisió a l'hora manipular les vàlvules d'entrada de les proporcions oxigen-nitrogen i/o l'estanqueïtat de la cambra de combustió.

Els casos per 25 i 30% d'oxigen són bastant semblants, mentre que per una concentració del 50% d'oxigen els tres punts es troben lleugerament més distanciats. La velocitat en què es propaga la flama a una alta concentració d'oxigen augmenta i l'aparició d'inestabilitats és més probable. Això fa que no es pugui veure amb claredat el moment que passa per la marca de cada centímetre.

6.2.2 CAS ANGLE 22,5°:

La Figura 37 mostra les dades de posició i temps per a la flama en els casos 13, 14 i 15 en una concentració molar d'oxigen objectiu del 22%.

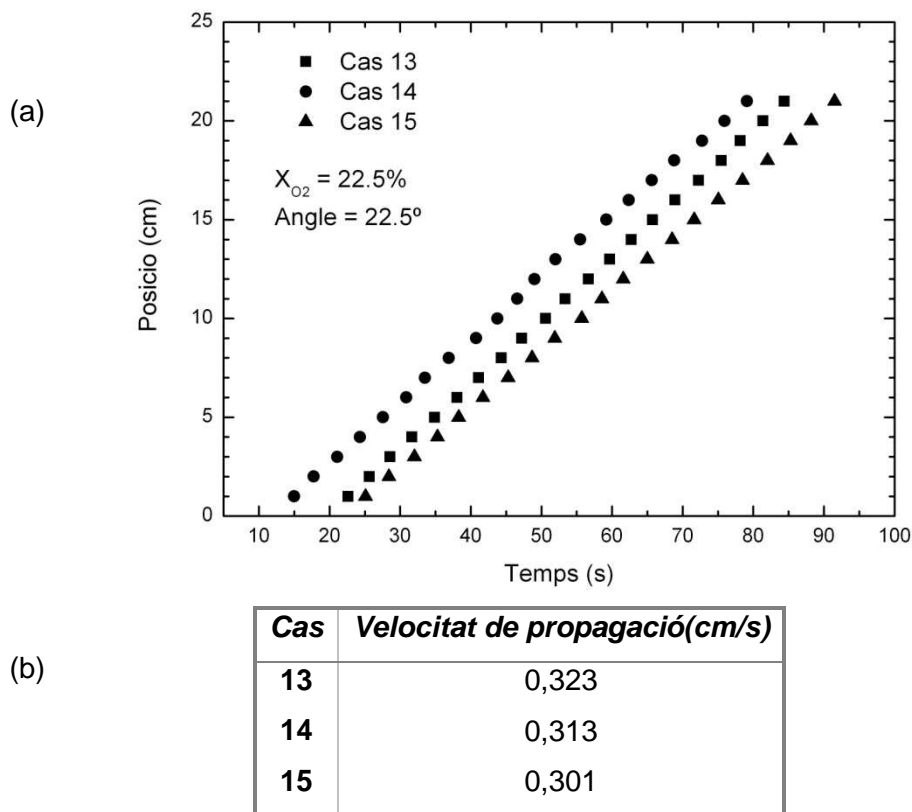
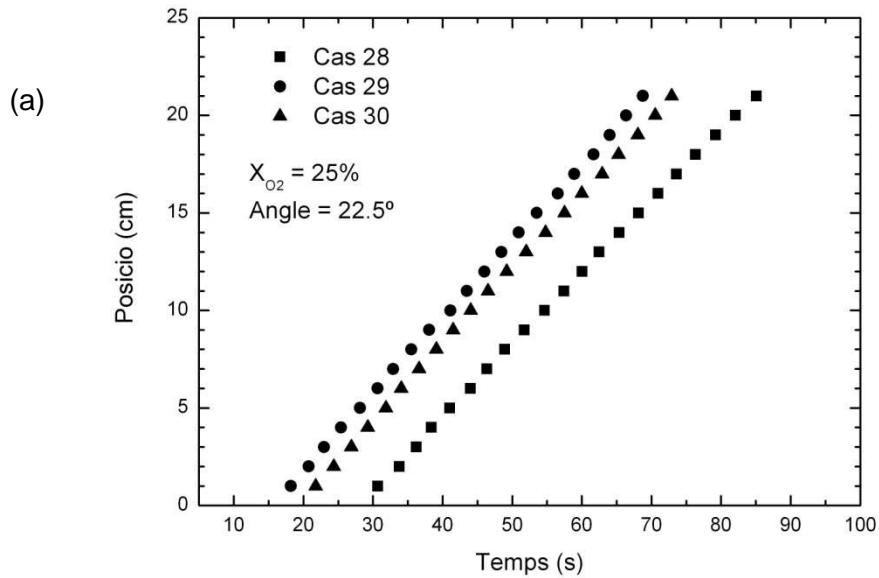


Figura 37: (a) Representació gràfica angle de combustió de 22,5° i 22% d'oxigen (objectiu). Cas 13, $X_{O_2}=21,94\%$; Cas 14, 21,97%; Cas 15, $X_{O_2}=21,9\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 13, $v_{\text{propagació}}= 0,323\text{cm/s}$; Cas 14, $v_{\text{propagació}}=0,313\text{cm/s}$; Cas 3, $v_{\text{propagació}}= 0,301\text{cm/s}$.

Per una concentració d'oxigen del 22% amb un angle d'inclinació de 22,5°, els tres casos presenten una velocitat de propagació molt semblant.

En el cas 13 la mostra es crema 5segons més ràpid que en el cas 15. Les pressions obtingudes d'oxigen en els dos casos és exactament la mateixa, de manera que aquesta diferència pot ser provocada per la diferència de la pressió final que hi ha a dins la cambra en cada un dels experiments. En el cas 13 la pressió final és de -4,4mbars, mentre que la que hi ha en el cas 15 és de -3,9mbars. Tenint en compte que la pressió final objectiva dels dos casos és de -6,4mbars, la proporció oxigen-nitrogen en el cas 15 és més desfavorable alhora d'obtenir uns rendiments alts de la combustió. Això provocarà una disminució de la velocitat de propagació.

A la Figura 38, l'augment de la concentració d'oxigen fins al 25% fa que els tres experiments segueixin un comportament lineal però a la vegada amb un pendent més pronunciat.



(b)

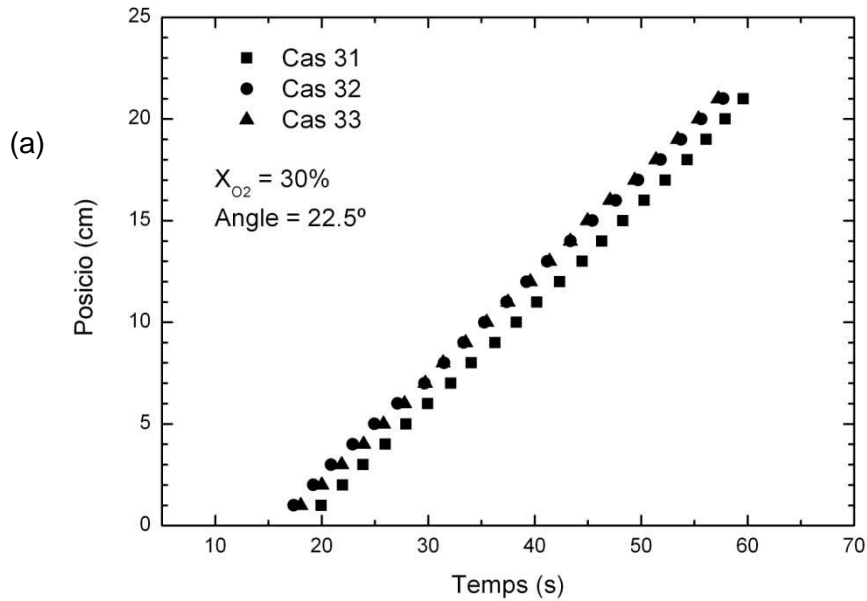
Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
28	0,370
29	0,391
30	0,388

Figura 38: Representació gràfica angle de combustió de $22,5^\circ$ i 25% d'oxigen (objectiu). Cas 28, $X_{O_2}=25,02\%$; Cas 29, $X_{O_2}=25,01\%$; Cas 30, $X_{O_2}=25,01\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 28, $v_{\text{propagació}}= 0,370\text{cm/s}$; Cas 29, $v_{\text{propagació}}=0,391\text{cm/s}$; Cas 30, $v_{\text{propagació}}= 0,388\text{cm/s}$

En la Figura 38 s'observa que els tres casos són molt lineals. La diferència entre les velocitats de propagació en els tres casos és molt petita, per tant, en relació a aquesta no hi ha diferències significatives entre els experiments.

L'increment de la concentració respecte la figura anterior fa que la mostra es combusti 10segons més ràpid i augmenti la velocitat $0,05\text{cm/s}$ aproximadament.

A continuació la Figura 39 mostra el cas quan la concentració és, del 30%. En aquesta segona figura tots tres experiments tenen un comportament molt similar.



(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
31	0,498
32	0,491
33	0,510

Figura 39: Representació gràfica angle de combustió de $22,5^\circ$ i 30% d'oxigen (objectiu). Cas 31, $X_{O_2}=30,15\%$; Cas 32, $X_{O_2}=30,08\%$; Cas 33, $X_{O_2}=30,08\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 31, $v_{\text{propagació}}= 0,498\text{cm/s}$; Cas 32, $v_{\text{propagació}}=0,491\text{cm/s}$; Cas 3, $v_{\text{propagació}}= 0,510\text{cm/s}$

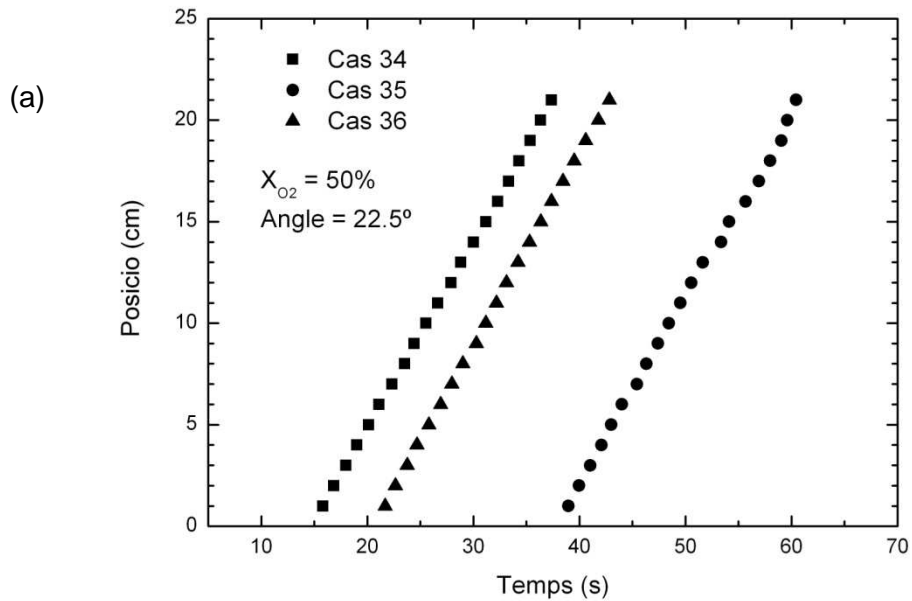
Els tres casos que mostra la Figura 39 presenten una velocitat de propagació pràcticament igual, sense diferències significatives entre ells.

El fet d'augmentar un 5% la concentració d'oxigen respecte la Figura 38 fa que les mostres es cremin aproximadament $0,10\text{cm/s}$ més ràpid.

I finalment, la Figura 40 per a un angle de $22,5^\circ$ correspon al cas d'una concentració d'oxigen del 50%.

En comparació amb els altres casos i per a un mateix angle de $22,5^\circ$, en efecte, la propagació de la flama es fa més de pressa a mesura que augmenta la concentració d'oxigen.

La inestabilitat és un factor que influeix i molt en altes concentracions d'oxigen, i a mesura que es va augmentant l'angle encara es veu més. (Veure apartat 6.3 Velocitat en funció de l'angle).



(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
34	0,918
35	0,899
36	0,947

Figura 40: Representació gràfica angle de combustió de $22,5^\circ$ i 50% d'oxigen (objectiu). Cas 34, $X_{O_2}=50,12\%$; Cas 35, $X_{O_2}=49,92\%$; Cas 36, $X_{O_2}=50,03\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascún dels casos; Cas 34, $v_{\text{propagació}}= 0,918\text{cm/s}$; Cas 35, $v_{\text{propagació}}=0,899\text{cm/s}$; Cas 36, $v_{\text{propagació}}= 0,947\text{cm/s}$

La gràfica que es mostra a continuació es pot observar com varien les velocitats de propagació de la flama en funció de la concentració per un angle de $22,5^\circ$ de la mostra.

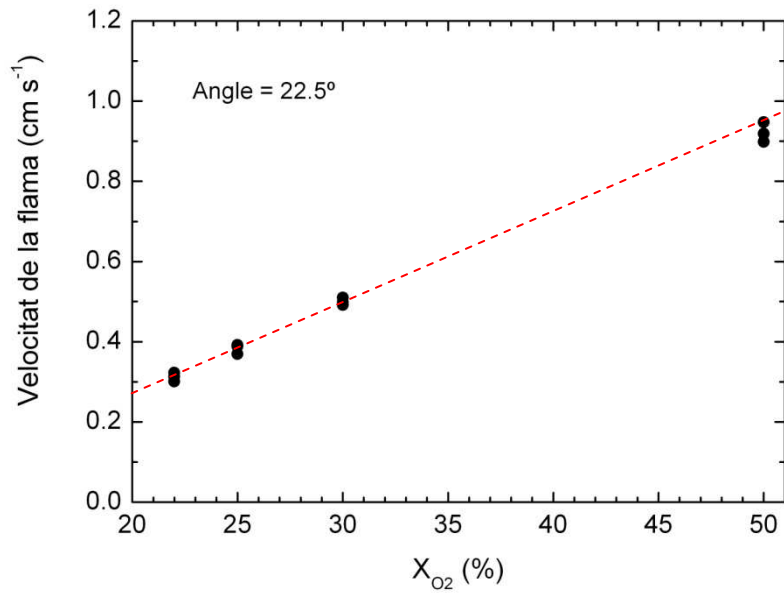


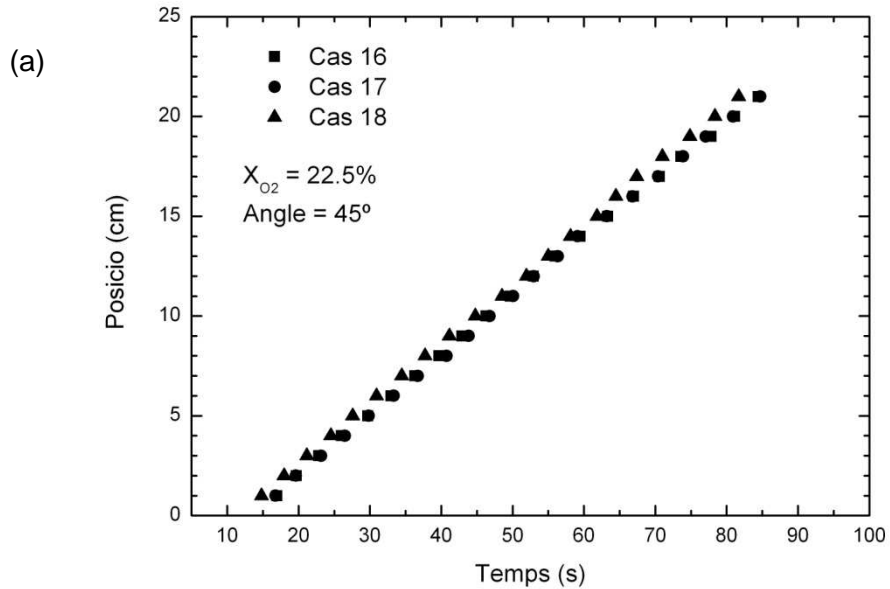
Figura 41: Velocitats de la flama per angle de combustió de 22,5°.

A la Figura 41 es pot observar la diferència entre les velocitats de la flama obtingudes en diferents concentracions per a un mateix angle de combustió, 22,5°.

S'observa que la velocitat de propagació de la flama augmenta linealment amb l'augment de la concentració d'oxigen.

6.2.3 CAS ANGLE 45°:

La Figura 42 mostra les dades de posició i temps per a la flama en els casos 16, 17 i 18 en una concentració molar d'oxigen objectiu del 22%.



(b)

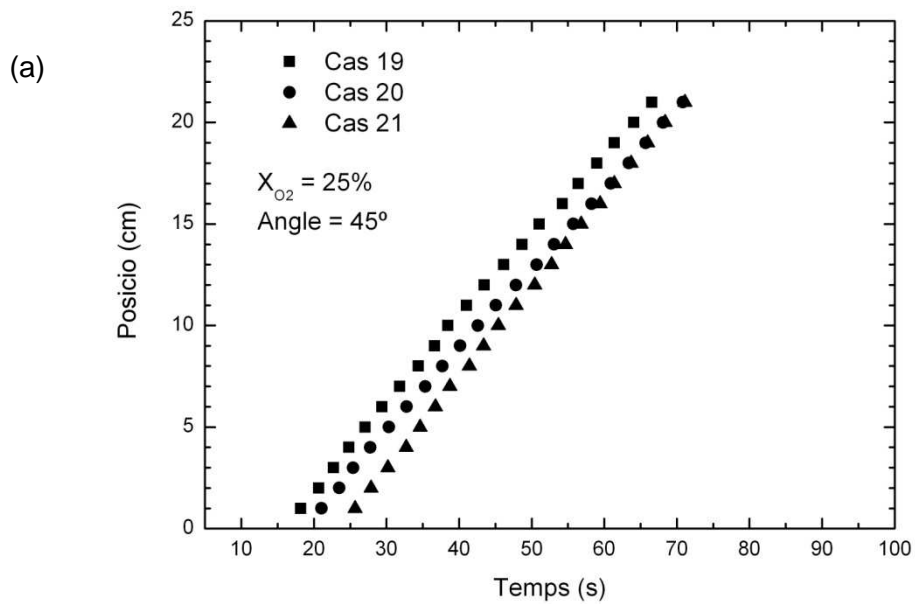
Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
16	0,294
17	0,296
18	0,298

Figura 42: Representació gràfica angle de combustió de 45° i 22% d'oxigen (objectiu)

Cas 16, $X_{O_2}=21,8\%$; Cas 17, $X_{O_2}=21,91\%$; Cas 18, $X_{O_2}=22,02\%$.(b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 16, $v_{\text{propagació}}= 0,294\text{cm/s}$; Cas 17, $v_{\text{propagació}}=0,296\text{cm/s}$; Cas 18, $v_{\text{propagació}}= 0,298\text{cm/s}$

La velocitat de propagació dels tres casos és pràcticament la mateixa. Els experiments s'han realitzat amb una bona manipulació de les vàlvules.

Augmentant la concentració molar d'oxigen fins a un 25%, s'observa el següent comportament:



(b)

Cas	Velocitat de propagació
19	0,412
20	0,397
21	0,444

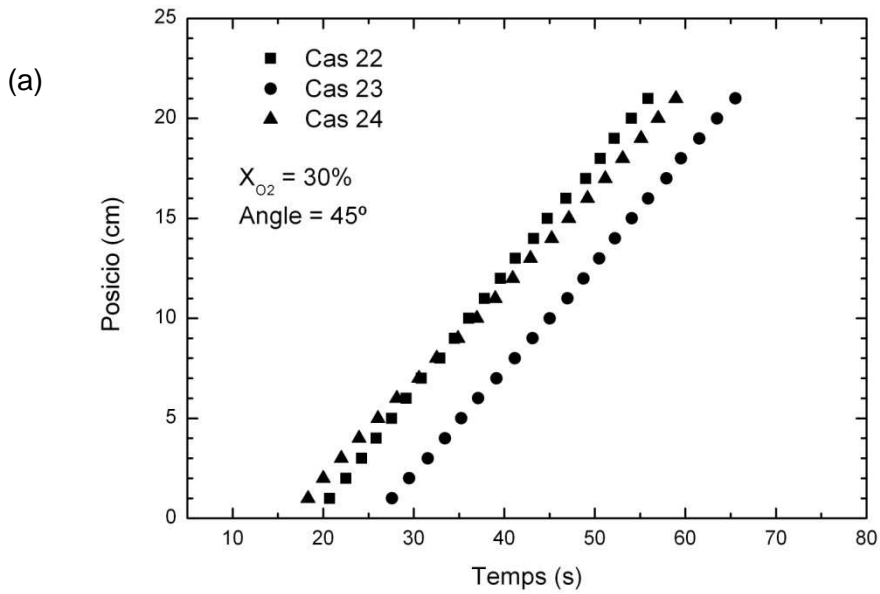
Figura 43: Representació gràfica angle de combustió de 45° i 25% d'oxigen (objectiu)

Cas 19, $X_{O_2}=24,97\%$; Cas 20, $X_{O_2}=24,99\%$; Cas 21, $X_{O_2}=25,48\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 19, $v_{\text{propagació}}= 0,412\text{cm/s}$; Cas 20, $v_{\text{propagació}}=0,397\text{cm/s}$; Cas 21, $v_{\text{propagació}}= 0,444\text{cm/s}$

El cas 21 destaca per una no linealitat al final de la combustió. Això pot ser degut a les inestabilitats de la flama provocades per l'angle d'inclinació que presenta la mostra. Aquestes inestabilitats s'explicaran a l'apartat 7. Discussió dels resultats.

Això vol dir que no totes les variacions en la velocitat es poden explicar amb els canvis en la concentració d'oxigen. Durant la realització del cas 21, el paper es va corbar cap endavant i va millorar l'aportació de calor cap endavant, ja que la temperatura de tot el sistema era una mica més alta.

A la Figura 44 s'observa l'evolució de la flama per una concentració molar d'oxigen del 30% i un angle de 45° .



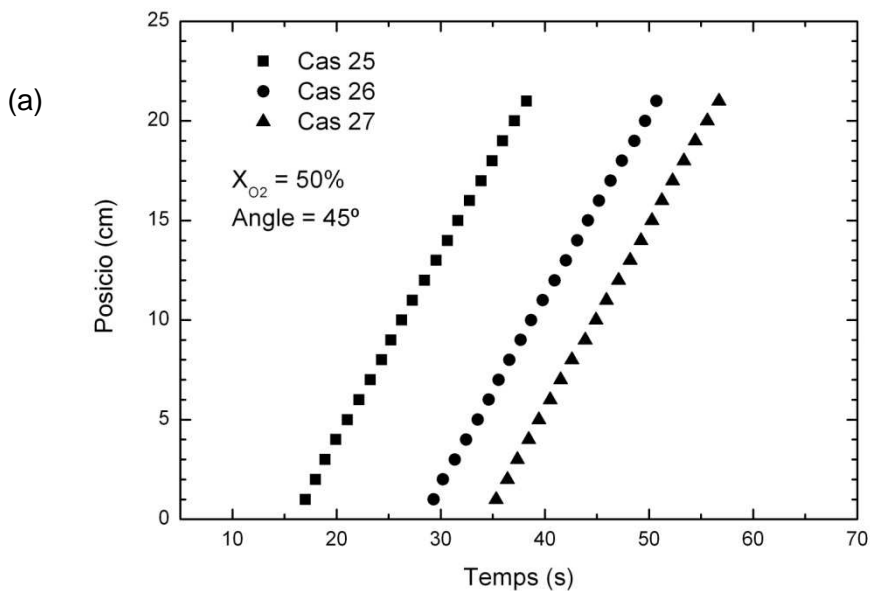
(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
22	0,569
23	0,531
24	0,485

Figura 44: Representació gràfica angle de combustió de 45° i 30% d'oxigen (objectiu) Cas 22, $X_{O_2}=29,97\%$; Cas 23, $X_{O_2}=30,08\%$; Cas 24, $X_{O_2}=29,91\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 22, $v_{\text{propagació}}= 0,569\text{cm/s}$; Cas 23, $v_{\text{propagació}}=0,531\text{cm/s}$; Cas 24, $v_{\text{propagació}}= 0,485\text{cm/s}$

S'observa en la Figura 44 com el cas 24 presenta una velocitat de propagació inferior que els altres dos casos realitzats sota les mateixes condicions. Doncs la concentració d'oxigen final de la cambra és lleugerament inferior a la objectiva.

En canvi, la Figura 45 mostra tres casos molt lineals per una concentració d'oxigen del 50%.



(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
25	0,939
26	0,932
27	0,934

Figura 45: Representació gràfica angle de combustió de 45° i 50% d'oxigen (objectiu)

Cas 25, $X_{O_2}=49,97\%$; Cas 26, $X_{O_2}=49,97\%$; Cas 27, $X_{O_2}=50,17\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascún dels casos; Cas 25, $v_{\text{propagació}}= 0,939\text{cm/s}$; Cas 26, $v_{\text{propagació}}=0,932\text{cm/s}$; Cas 27, $v_{\text{propagació}}= 0,934\text{cm/s}$

Finalment, la Figura 46 mostra com per un angle de 45°, les velocitats de propagació de la flama per a concentracions baixes no presenten diferències notables.

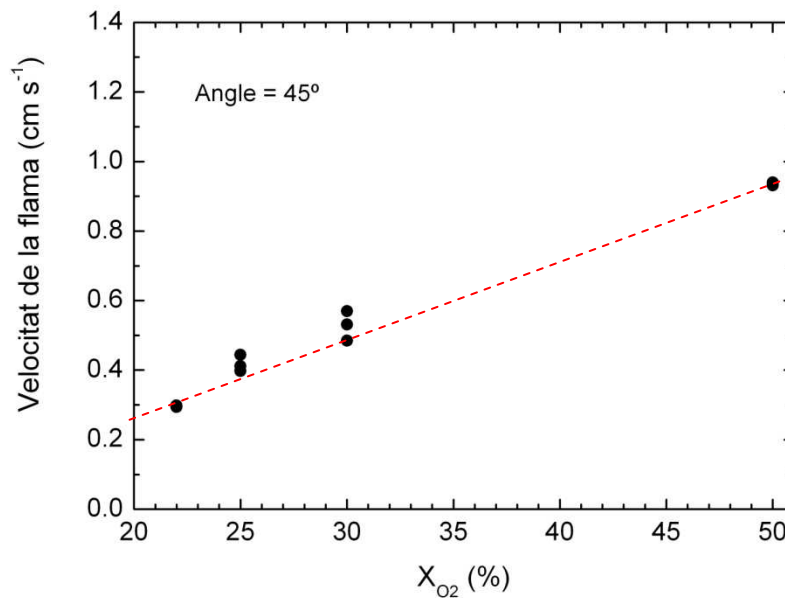


Figura 46: Velocitats de la flama per angle de combustió de 45°.

Per a un angle d'inclinació de la mostra de 45° la velocitat de la flama augmenta en augmentar la concentració.

Els tres casos de concentració d'oxigen del 30% presenten una velocitat de propagació força diferent entre ells. Per altra banda, quan tenim una concentració del 50% la velocitat de propagació obtinguda en els experiments és pràcticament la mateixa.

6.2.4 CAS ANGLE 67,5°:

La Figura 47 mostra les dades de posició i temps per a la flama en els casos 37, 38 i 39 en una concentració molar d'oxigen objectiu del 22% i angle 67,5°.

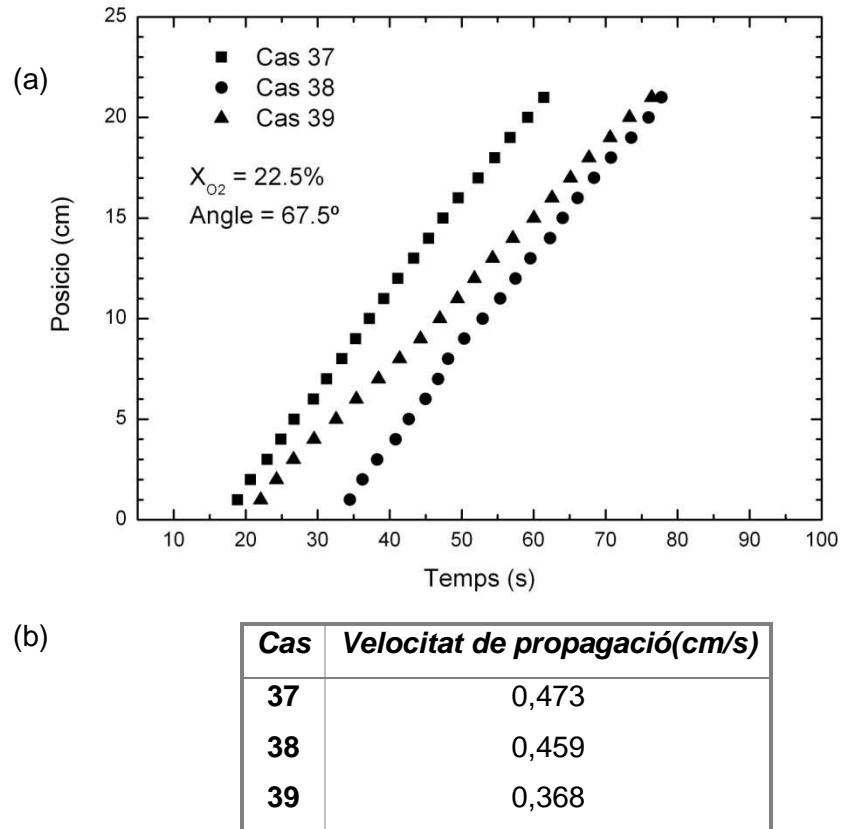


Figura 47: Representació gràfica angle de combustió de 67,5° i 22% d'oxigen (objectiu). Cas 37, $X_{O_2}=21,93\%$; Cas 38, $X_{O_2}=22,08\%$; Cas 39, $X_{O_2}=21,76\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 37, $v_{\text{propagació}}= 0,473\text{cm/s}$; Cas 38, $v_{\text{propagació}}=0,459\text{cm/s}$; Cas 39, $v_{\text{propagació}}= 0,368\text{cm/s}$

El cas 39 de la Figura 47 es veu clarament que presenta una velocitat de propagació inferior respecte els altres dos casos. Això podria ser degut a la concentració final d'oxigen obtingut, ja que és bastant inferior a l'objectiu o bé a que la mostra hagués absorbit més humitat del compte durant el procés de muntatge del sistema.

Aquest fet és el que provoca una disminució en la velocitat de propagació de la flama.

Per una concentració molar d'oxigen del 25% i un angle de $67,5^\circ$ s'obté la figura que hi ha a continuació:

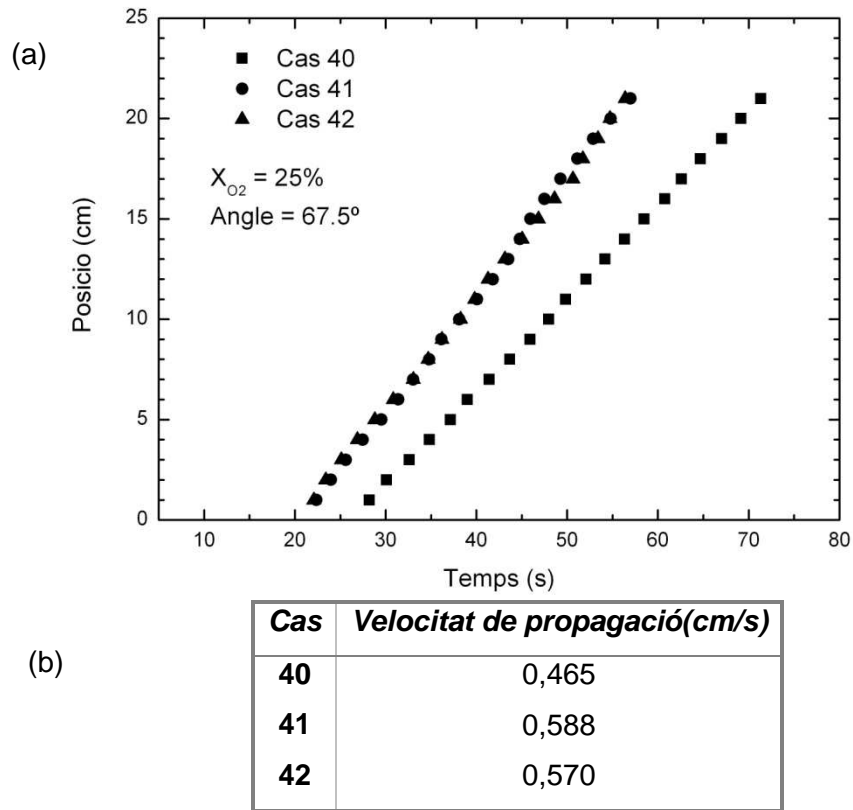
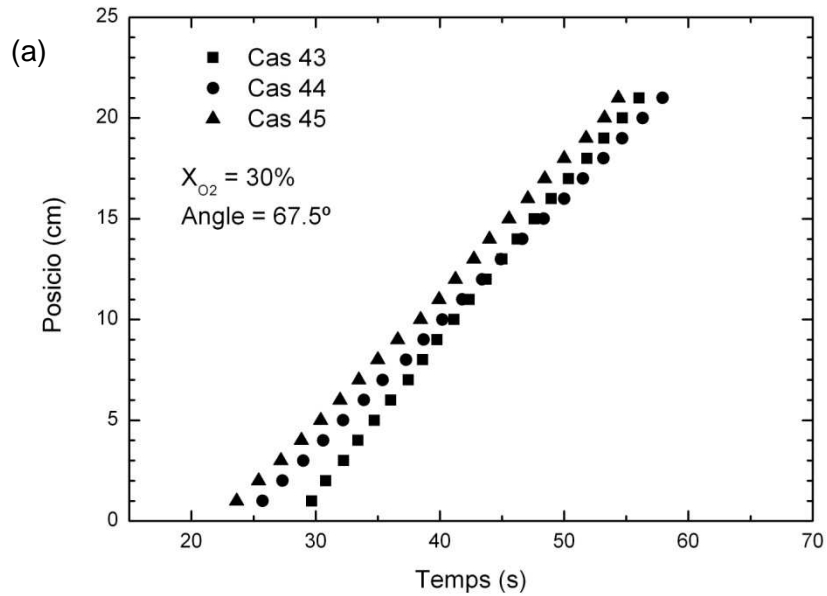


Figura 48: Representació gràfica angle de combustió de $67,5^\circ$ i 25% d'oxigen (objectiu). Cas 40, $X_{O_2}=25,23\%$; Cas 41, $X_{O_2}=25,07\%$; Cas 42, $X_{O_2}=24,98\%$ (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 40, $v_{\text{propagació}}= 0,465\text{cm/s}$; Cas 41, $v_{\text{propagació}}=0,558\text{cm/s}$; Cas 42, $v_{\text{propagació}}= 0,570\text{cm/s}$

En aquest cas, tots 3 casos segueixen una linealitat però un es significativament inferior als altres dos, el cas 40. En la Figura 49 en canvi, el cas 43 destaca per sobre dels altres dos casos per una velocitat de propagació més alta.

Doncs el pendent que formen la recta de punts és lleugerament més inclinat que els altres dos.



(b)

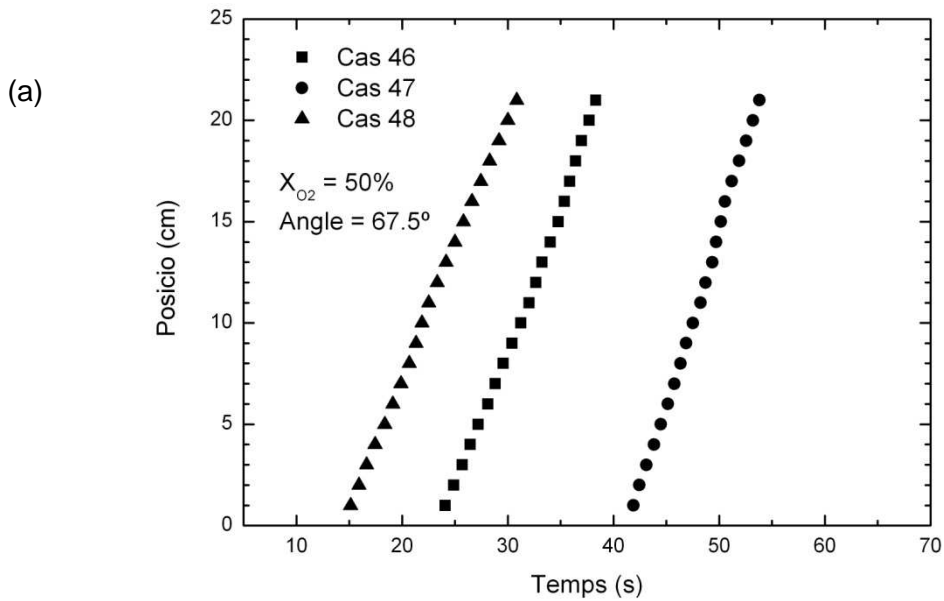
Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
43	0,762
44	0,622
45	0,654

Figura 49: Representació gràfica angle de combustió de $67,5^\circ$ i 30% d'oxigen (objectiu). Cas 43, $X_{O_2}=29,79\%$; Cas 44, $X_{O_2}=29,68\%$; Cas 45, $X_{O_2}=29,87\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascún dels casos; Cas 43, $v_{\text{propagació}}= 0,762\text{cm/s}$; Cas 44, $v_{\text{propagació}}=0,662\text{cm/s}$; Cas 45, $v_{\text{propagació}}= 0,654\text{cm/s}$

La Figura 49 representa els resultats dels 3 casos realitzats amb un 30% de concentració molar d'oxigen i un angle de $67,5^\circ$.

El cas 43 té una velocitat de propagació de 0.762cm/s , $0,10\text{cm/s}$ més ràpid que els altres dos casos.

En la Figura 50, per a una concentració molar d'oxigen de 50% i un angle de $67,5^\circ$, s'observa quelcom semblant. El cas 47 presenta una velocitat de propagació de $1,711\text{cm/s}$, bastant més alta que els altres dos casos.



(b)

Cas	Velocitat de propagació (cm/s)
46	1,395
47	1,711
48	1,291

Figura 50: Representació gràfica angle de combustió de $67,5^\circ$ i 50% d'oxigen (objectiu). Cas 46, $X_{O_2}=49,82\%$; Cas 47, $X_{O_2}=49,83\%$; Cas 48, $X_{O_2}=49,72\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 46, $v_{\text{propagació}}= 1,395\text{cm/s}$; Cas 47, $v_{\text{propagació}}=1,711\text{cm/s}$; Cas 48, $v_{\text{propagació}}= 1,291\text{cm/s}$

Finalment, la Figura 51 és el gràfic de les velocitats de la flama per un angle de $67,5^\circ$.

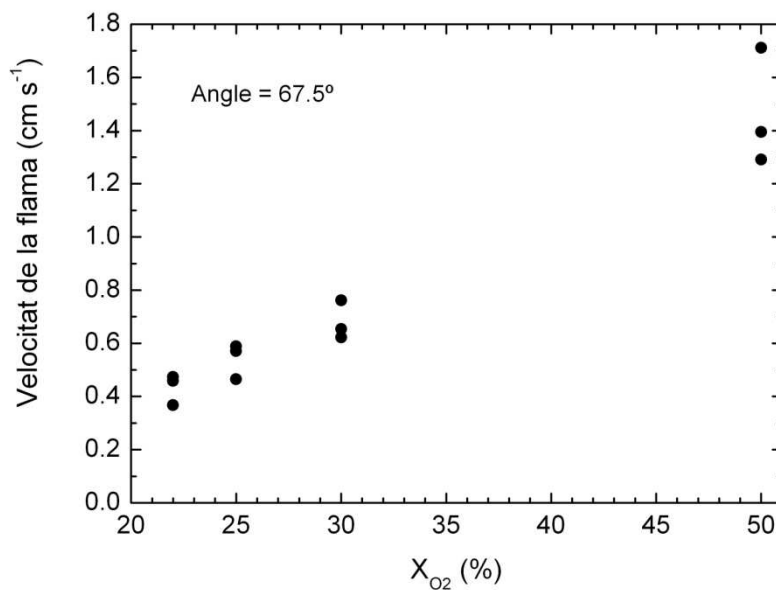


Figura 51: Velocitats de la flama per angle de combustió de $67,5^\circ$.

Quan la mostra es troba inclinada $67,5^{\circ}$, és evident que la velocitat de la flama augmenta en augmentar la concentració. El que es pot observar en aquesta Figura 51 és que els punts per cada concentració es troben més dispersats. Això provoca que quan es vulgui buscar una linealitat en els resultats per aquest angle, serà pràcticament impossible.

La concentració on la dispersió dels valors experimentals de la velocitat de propagació de la flama és més gran correspon a un 50% d'oxigen. Això és degut a les inestabilitats dinàmiques del sistema ja que el flux convectiu no actua principalment en direcció oposada a la propagació de la flama..

6.2.5. CAS ANGLE 90°

La Figura 52 representa els resultats de tres casos on l'angle d'inclinació de la mostra és completament paral·lel al terra.

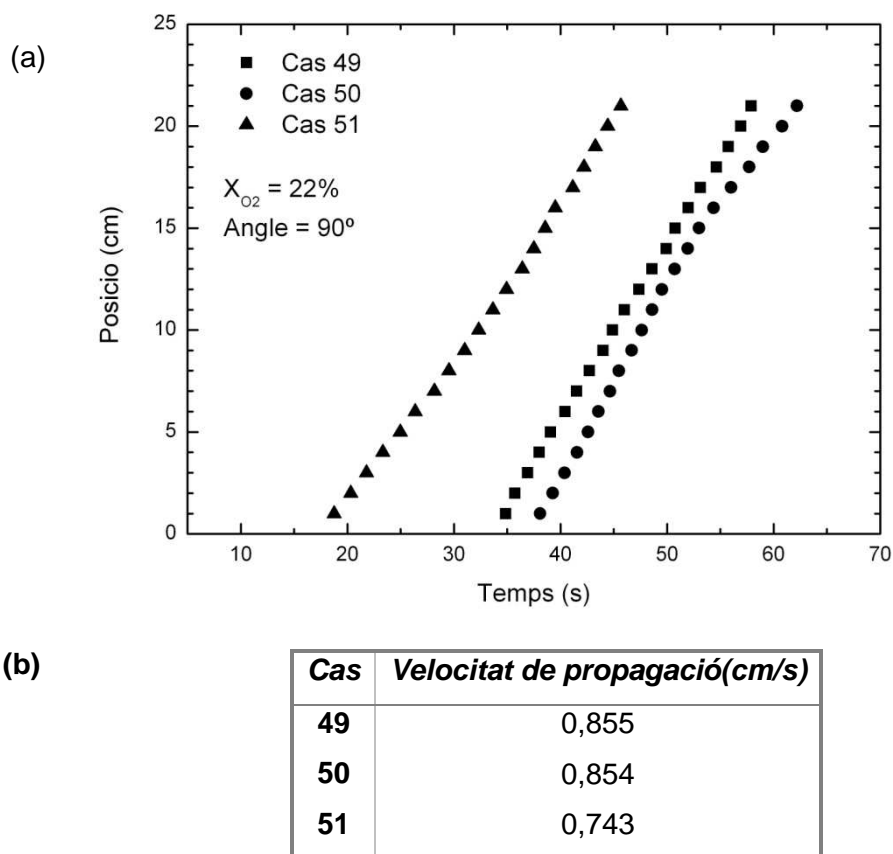
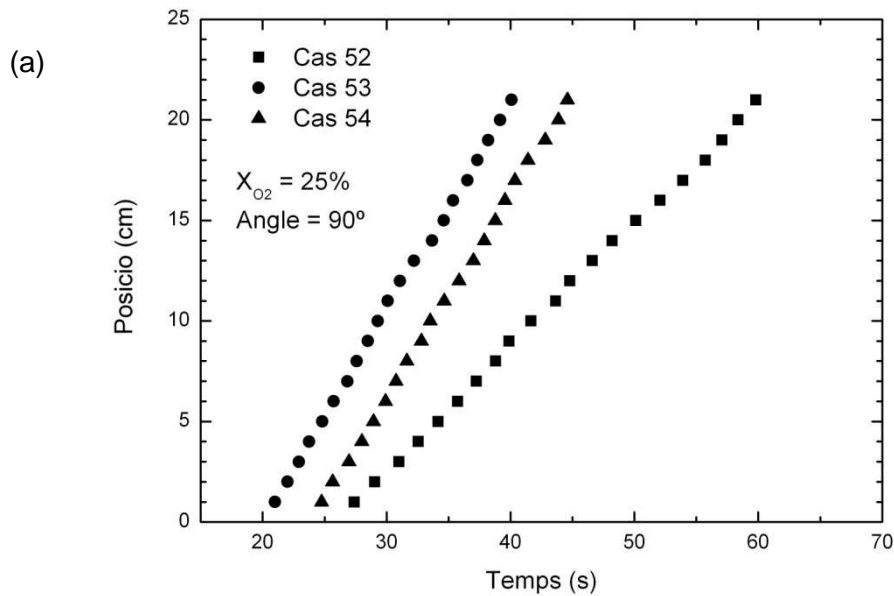


Figura 52: Representació gràfica angle de combustió de 90° i 22% d'oxigen (objectiu). Cas 49, $X_{O_2}=21,95\%$; Cas 50, $X_{O_2}=21,99\%$; Cas 50, $X_{O_2}=21,96\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 49, $v_{\text{propagació}}=0,855\text{cm/s}$; Cas 50, $v_{\text{propagació}}=0,854\text{cm/s}$; Cas 51, $v_{\text{propagació}}=0,743\text{cm/s}$

Per a una concentració del 22% molar d'oxigen i una inclinació de 90°, la velocitat de propagació mitja dels tres casos és de 0,817cm/s. Tot i ser una alta velocitat de propagació, els tres casos presenten un comportament força lineal amb unes velocitats de propagació força semblants. És probable que ens acostem als valors teòrics.

No es pot dir el mateix de la Figura 53, el comportament del cas 52 s'allunya dels altres dos. Doncs aquest presenta una velocitat de propagació significativament inferior.

La Figura 53 és la representació gràfica dels tres experiments realitzats a una concentració de 25% d'oxigen amb un angle de 90°, és a dir, la mostra completament inclinada.



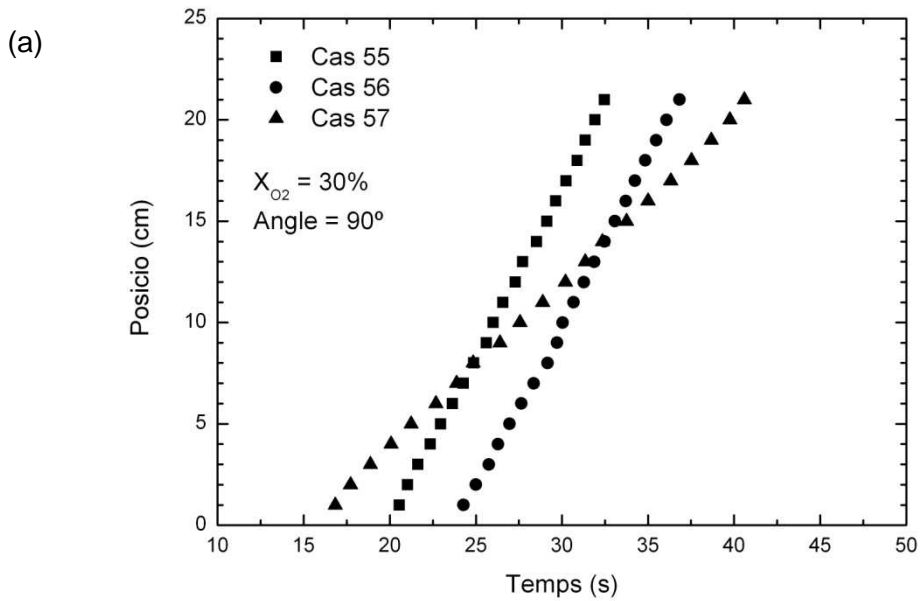
(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
52	0,613
53	1,040
54	1,010

Figura 53: Representació gràfica angle de combustió de 90° i 25% d'oxigen (objectiu). Cas 52, $X_{O_2}=24,95\%$; Cas 53, $X_{O_2}=24,99\%$; Cas 54, $X_{O_2}=24,88\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 52, $v_{\text{propagació}}= 0,613\text{cm/s}$; Cas 53, $v_{\text{propagació}}=1,040\text{cm/s}$; Cas 54, $v_{\text{propagació}}= 1,011\text{cm/s}$

Aquest experiment presenta importants inestabilitats al llarg de tot el procés de combustió de la mostra. Això explicaria aquest canvi en la velocitat de propagació de la flama.

Si s'incrementa la concentració fins al 30% d'oxigen i per aquest mateix angle, s'obté la figura següent:



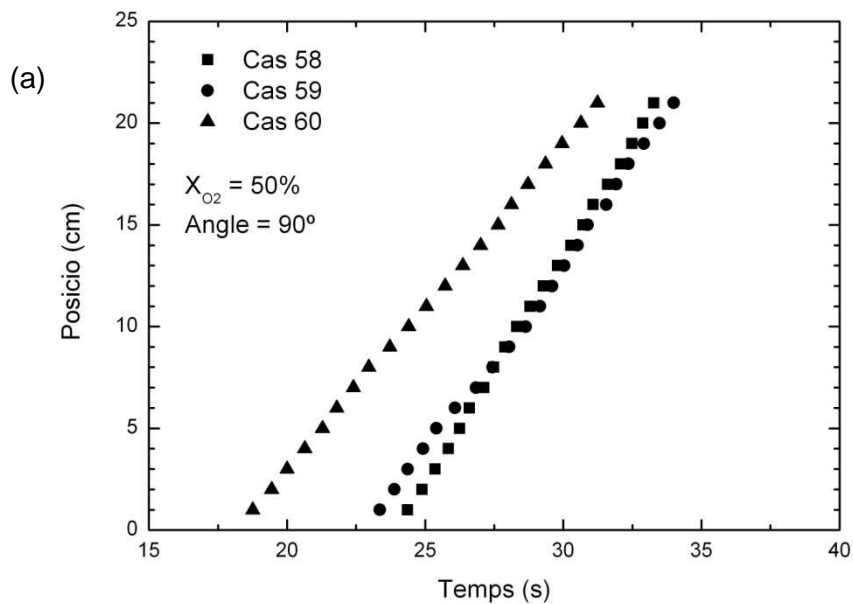
(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
55	1,658
56	1,631
57	0,816

Figura 54: Representació gràfica angle de combustió de 90° i 30% d'oxigen (objectiu). Cas 55, $X_{O_2}=29,8\%$; Cas 56, $X_{O_2}=29,77\%$; Cas 57, $X_{O_2}=29,81\%$. (b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 55, $v_{\text{propagació}}= 1,658\text{cm/s}$; Cas 56, $v_{\text{propagació}}=1,631\text{cm/s}$; Cas 57, $v_{\text{propagació}}= 0,816\text{cm/s}$

Els casos 55 i 56 presenten un pendent molt semblant i pràcticament la mateixa velocitat de propagació. El cas 57 és completament diferent dels altres dos. La seva velocitat de propagació és la meitat que la que presenten els altres dos casos. Això és degut, una vegada més, a les inestabilitats de la flama, factor del que es parlarà més endavant a l'apartat 7. Discussió dels resultats.

A la Figura 55 es pot observar la diferencia entre les velocitats de la flama obtingudes a una concentració del 50% d'oxigen per a un mateix angle de combustió, 90° .



(b)

Cas	Velocitat de propagació(cm/s)
58	2,237
59	1,870
60	1,596

Figura 55: Representació gràfica angle de combustió de 90° i 50% d'oxigen (objectiu). Cas 58, $X_{O_2}=49,53\%$; Cas 59, $X_{O_2}=49,89\%$; Cas 60, $X_{O_2}=49,65\%$.(b) Taula de velocitats de propagació en cadascun dels casos; Cas 58, $v_{\text{propagació}}= 2,237\text{cm/s}$; Cas 59, $v_{\text{propagació}}=1,870\text{cm/s}$; Cas 60, $v_{\text{propagació}}= 1,596\text{cm/s}$

En aquest cas, per a una concentració del 50% d'oxigen i la cambra de combustió completament inclinada, les velocitats de propagació estan força dispersades entre elles.

La velocitat de propagació del cas 58 és de $2,237\text{cm/s}$, mentre que la dels altres dos casos és bastant inferior. Una concentració alta d'oxigen afavoreix a la velocitat de la flama provocant la rapida combustió de la mostra.

A la Figura 56 es pot observar la diferencia entre les velocitats de la flama obtingudes en diferents concentracions per a un mateix angle de combustió, 90° , és a dir amb la cambra de combustió paral·lela al terra.

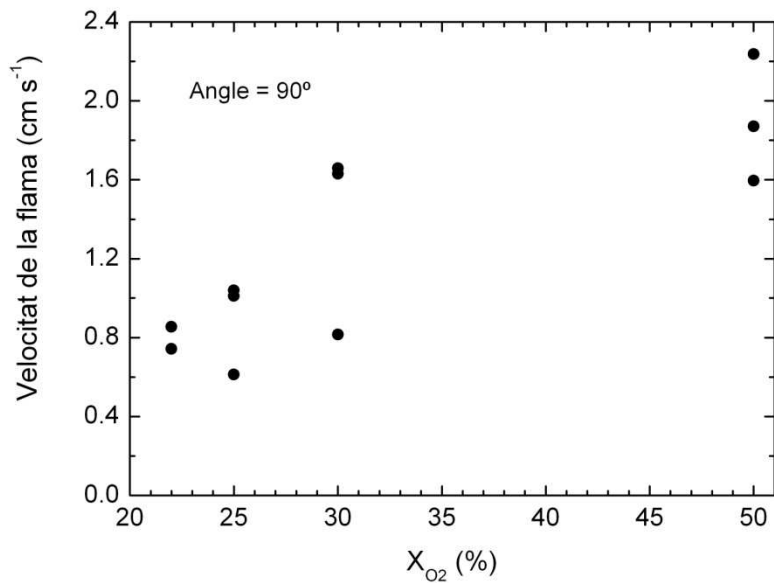


Figura 56: Velocitats de la flama per angle de combustió de 90°.

Els punts de la gràfica indiquen els 12 experiments que s'han realitzat en un angle de 90°.

Els tres casos per concentració d'oxigen del 22% representen dos punts força propers, amb una velocitat de propagació semblant.

Els casos per 25 i 30% d'oxigen un dels tres punts es troba bastant més distanciat, en canvi quan la concentració és del 50% els tres punts no es distancien tant, però tenen velocitats de propagació bastant diferents.

Conclusió:

Per concloure aquest apartat, a la Figura 57, s'han sintetitzat les quatre gràfiques de velocitat de propagació per les quatre concentracions per així poder comparar-ne els resultats.

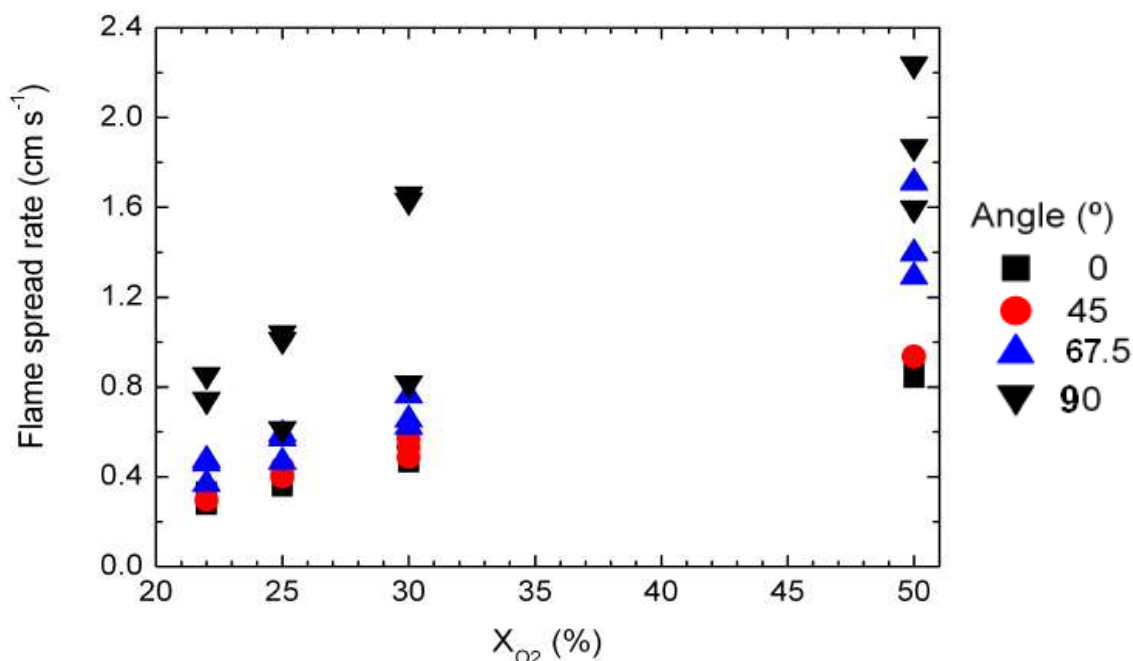


Figura 57: Velocitats de propagació per les diferents concentracions d'oxigen.

Per angles entre 0° i 45°, és a dir, quan la mostra es troba vertical i lleugerament inclinada, l'augment de la concentració d'oxigen presenta una relació lineal amb la velocitat de propagació.

A mesura que augmenta l'angle d'inclinació, als 67,5°, augmenta la variabilitat dels resultats en les mateixes condicions.

Quan els assajos es realitzen a 90° per diferents concentracions d'oxigen, la variabilitat dels resultats és tan alta que es fa molt difícil buscar una linealitat en els resultats.

Aquesta variabilitat dels resultats és causada per les inestabilitats del flux convectiu generat per la diferència de densitats entre la regió de la flama i l'ambient. Aquest flux convectiu té una direcció bàsicament vertical. Per això, quan el paper es va inclinant, va disminuint la intensitat del flux oposat a la direcció de la flama i, per tant, és més fàcil que les inestabilitats inherents al flux provoquin canvis importants en la velocitat de la flama.

6.3 Velocitat en funció de l'angle d'inclinació de la mostra

6.3.1 Concentració molar d'oxigen 22%

Per una concentració molar d'oxigen del 22% el comportament de la velocitat de propagació d'una flama vindrà influït per l'angle d'inclinació, tal i com mostra la Figura 58:

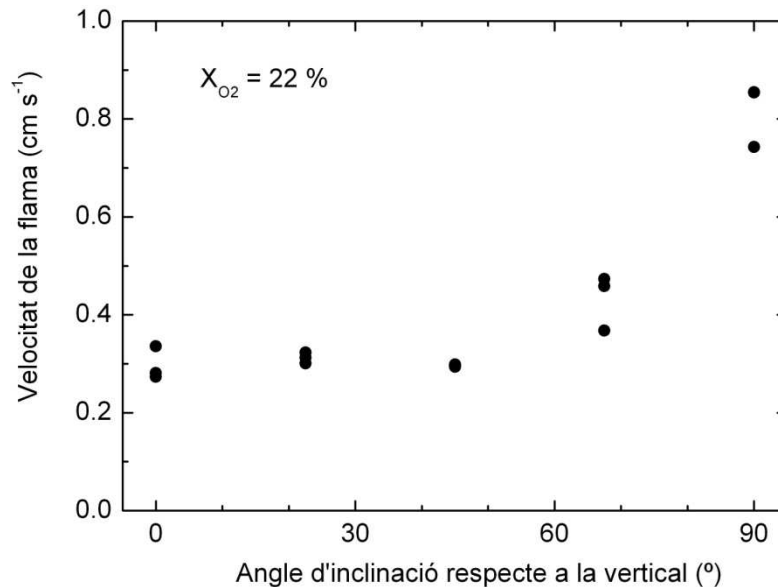


Figura 58: Velocitat de propagació de la flama en funció de l'angle per una concentració del 22% molar d'oxigen

Dels tres experiments que es van realitzar per un angle de 0°, n'hi ha un que presenta una velocitat de propagació més alta que els altres dos. És probable que aquest error sigui per culpa de la manipulació de les vàlvules per donar les concentracions d'oxigen i nitrogen.

La velocitat de propagació de les mostres presenten un rang d'inclinació entre els 0° i els 45° és aproximadament la mateixa. Això vol dir que per a la concentració del 22% d'oxigen l'angle no afecta a un canvi de la velocitat de propagació de la flama.

Quan la mostra s'inclina 67,5°, la velocitat de propagació augmenta sensiblement per una concentració del 22% d'oxigen, i quan la mostra és completament horitzontal o perpendicular al terra, la velocitat de propagació augmenta exponencialment. Tot i la variabilitat dels resultats d'aquests dos angles es pot afirmar que la inclinació de la mostra influeix directament en la velocitat de propagació, augmentat significativament aquesta.

6.3.2 Concentració molar d'oxigen 25%

A la següent figura, es pot veure els experiments realitzats per diferents angles d'inclinació de la mostra per a una mateixa concentració d'oxigen, 25%.

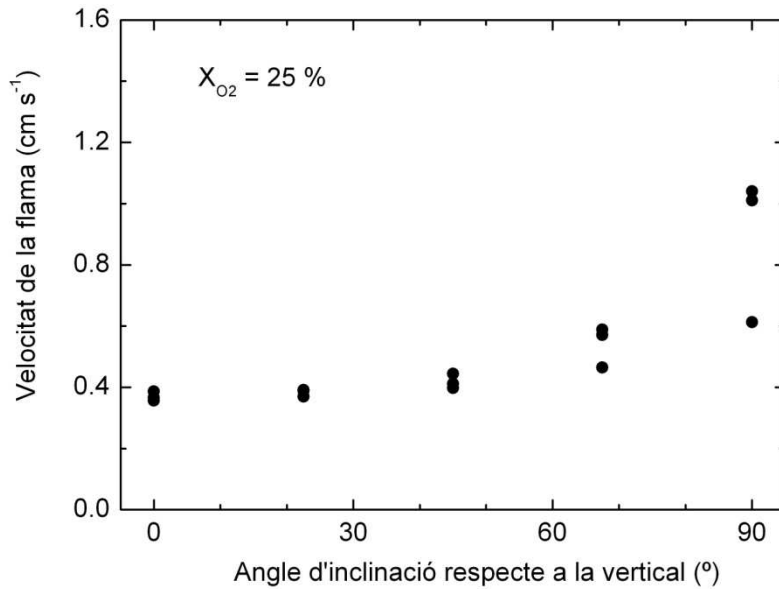


Figura 59: Velocitat de propagació de la flama en funció de l'angle per una concentració del 25% molar d'oxigen

Quan la mostra es troba inclinada en el rang d'angles que va dels 0° als 45°, la velocitat de propagació és pràcticament la mateixa. Doncs per aquests casos, l'angle d'inclinació de la mostra no influeix en la velocitat de propagació d'aquestes.

A mesura que s'incrementa l'angle d'inclinació la velocitat de propagació augmenta i s'afegeix una vegada més la variabilitat dels resultats provocada per les inestabilitats de la flama, terme que s'explicarà en l'apartat 7. Discussió dels resultats.

6.3.3 Concentració molar d'oxigen 30%

A continuació la Figura 60 representa la velocitat de propagació pels diferents angles d'inclinació per la concentració d'oxigen del 30%.

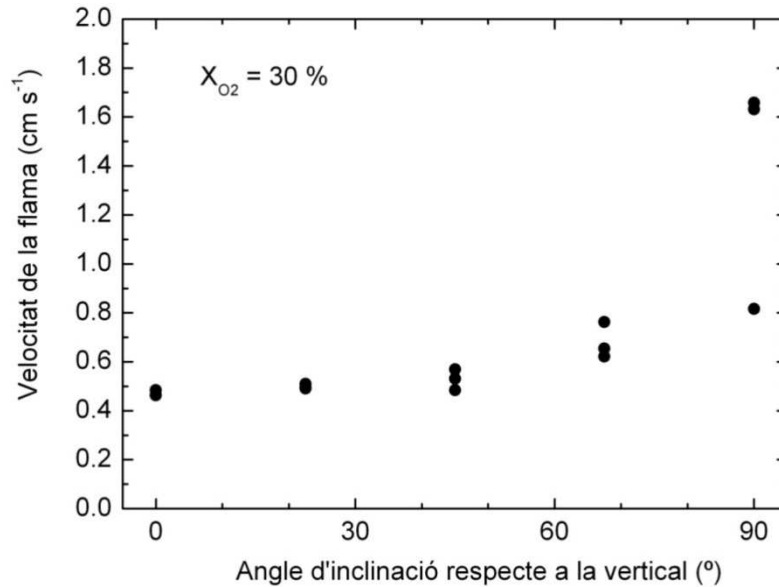


Figura 60: Velocitat de propagació de la flama en funció de l'angle per una concentració del 30% molar d'oxigen

En aquest cas, la concentració molar d'oxigen del 30% fa que pels angles de 0° i 22,5° la velocitat de propagació sigui aproximadament la mateixa.

En el cas de 45° i a una concentració del 30% d'oxigen, ja es comença a notar una certa variabilitat en els resultats. A mesura que s'incrementa la concentració, aquesta variabilitat augmenta.

La influència de l'angle d'inclinació es comença a notar notablement per les mostres que es troben inclinades 90°. La flama es troba més propera al paper verge no cremat que hi ha a davant del front de combustió, n'augmenta la temperatura i n'accelera la cinètica.

6.3.4 Concentració molar d'oxigen 50%

A la següent Figura 61, s'observa la influència de l'angle d'inclinació de la mostra per a una mateixa concentració d'oxigen, 50%.

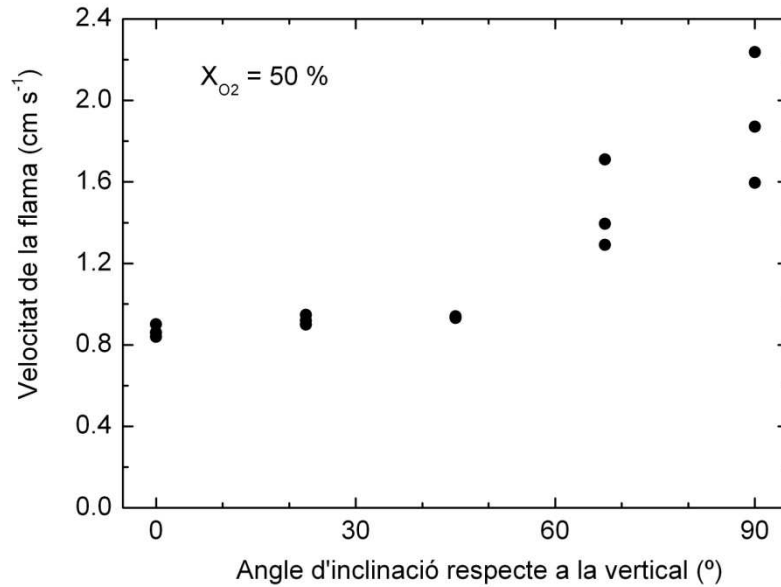


Figura 61: Velocitat de propagació de la flama en funció de l'angle per una concentració del 50% molar d'oxigen

Un augment de la concentració provoca una acceleració de les reaccions de la combustió que provoquen un increment de temperatura de la flama i més productes de la reacció. Quan la inclinació de la mostra és de 67,5° la velocitat de propagació augmenta i la variabilitat dels resultats també.

Per concloure aquest apartat, a la Figura 62, s'han sintetitzat les quatre gràfiques de velocitat de propagació pels quatre angles i així poder comparar-ne els resultats.

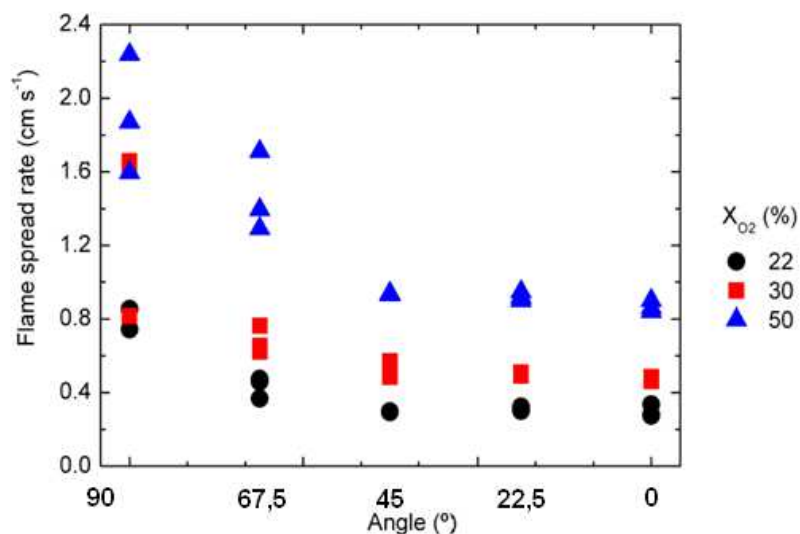


Figura 62: Velocitats de propagació pels diferents angles.

En aquesta Figura 62, s'observa que quan la mostra està inclinada en un rang d'angles que va dels 0° als 45° , la velocitat de propagació no es veu influenciada per l'angle d'inclinació de la mostra.

Mentre que, quan l'angle d'inclinació augmenta dels $67,5^\circ$ als 90° la velocitat del front de la flama augmenta exponencialment.

El mateix passa per la variabilitat dels resultats. Els angles 0° , $22,5^\circ$ i 45° presenten molt poca variabilitat en els resultats. En canvi quan la mostra es troba inclinada $67,5^\circ$ i 90° les velocitats de propagació en cadascun dels angles difereixen entre elles.

7 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

7 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

7.1 Introducció

Després de mostrar en el capítol anterior les dades obtingudes en els experiments, cal obtenir els resultats objecte d'aquest projecte. Aquests corresponen a la velocitat de propagació de la flama que presenta davant de la influència de l'angle d'inclinació i de la concentració d'oxigen.

Per arribar a aquest objectiu, les dades experimentals s'han introduït en un programa informàtic que prèviament havia estat desenvolupat per professors de l'Àrea de Mecànica de Fluids. Aquest programa ajusta una recta de regressió a les dades experimentals i n'extreu informació diversa com el pendent, coeficient de correlació, desviació estàndard del pendent, etc.

D'aquesta manera, s'han pogut extreure resultats de les dades i confeccionar taules amb les corresponents figures amb el programa Origin on és més fàcil la seva interpretació. Per ordenar i poder fer una millor valoració d'aquestes dades s'ha organitzat aquest capítol de la memòria en tres apartats.

7.2. Velocitat de propagació

L'augment de temperatura degut a la combustió provoca un canvi de densitats en l'aire que envolta la flama de manera que apareixen uns corrents de convecció al seu voltant que estaran influenciats per l'angle d'inclinació de la mostra.

Aquests corrents de convecció els podem observar a la Figura 63, on es representa a nivell esquemàtic la convecció pel cas de flama vertical, és a dir, amb una inclinació de 0° :

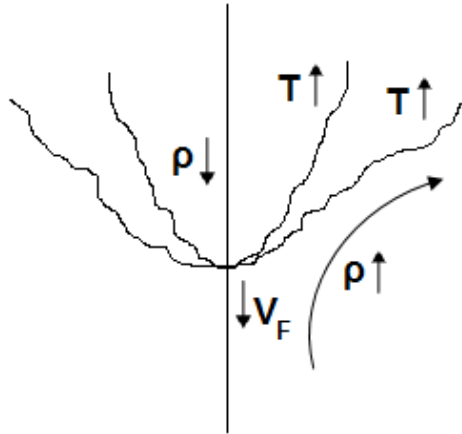


Figura 63: Convecció pel cas de flama vertical

La convecció que es crea al voltant de la flama genera un flux amb un sentit oposat a la propagació de la flama. En una inclinació de 0° (paper vertical) la flama assoleix la seva màxima distància respecte al paper verge no cremat que hi ha al davant del front de combustió. La longitud de la flama es pot mesurar a través dels fotogrames que es mostren a continuació. En la Figura 64, per a un mateix angle d'inclinació de 0° i una concentració d'oxigen del 22% i 50% respectivament, la flama presenta longituds diferents.

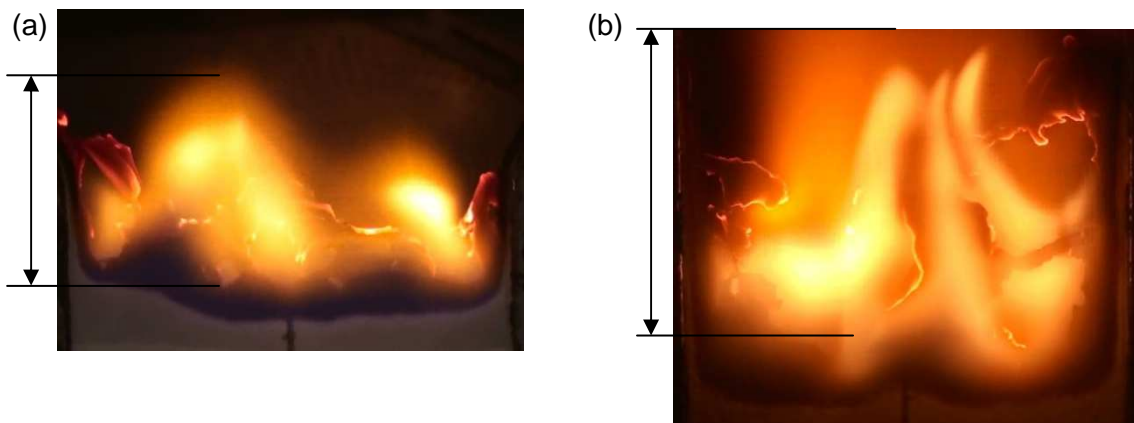


Figura 64: Longitud de la flama per a un angle de 0° a dos concentracions diferents. (a) 22% O_2 (b) 50% O_2

Tal i com mostra la Figura 64, la longitud de la flama augmenta amb la concentració d'oxigen de l'atmosfera. Un augment de la concentració provoca una acceleració de les reaccions de la combustió que provoquen un increment de temperatura de la flama i més productes de la reacció

Per altra banda, si la mostra presenta una inclinació de 90° (mostra horitzontal), el sentit de propagació de la flama continuarà sent el mateix però la convecció de l'aire seguirà principalment la direcció de la gravetat (vertical). La Figura 65 mostra esquemàticament el sentit de la convecció respecte un angle d'inclinació de 90° .

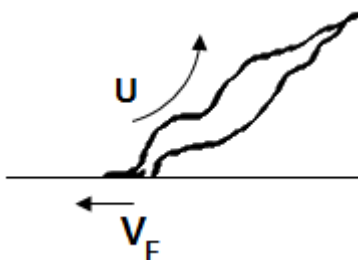


Figura 65: Esquema convecció flama a 90° .

Cal tenir present, però, que els fotogrames obtinguts dels videos no mostren amb claredat el comportament de la flama, ja que la filmació dels videos és frontal en tots els casos i no és possible calcular l'alçada de la flama respecte el paper.

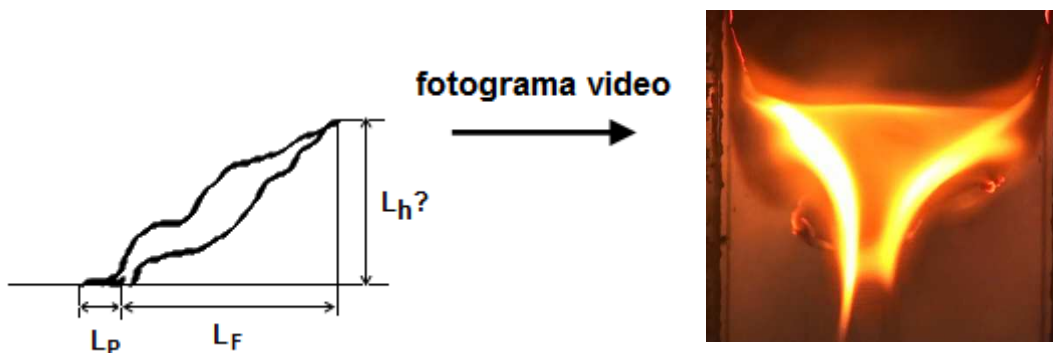


Figura 66: Flama per a un angle d'inclinació de 90°

El fotograma de la Figura 66 s'ha extret d'un video d'una combustió de 90° . Segons la imatge, es podria dir que la flama presenta un angle molt proper als 90° respecte el paper. Per calcular la longitud de la flama L_h , no es disposa de recursos suficients i per tant, no es podrà obtenir una longitud exacte però es podrà explicar a grans trets la influència de l'angle que forma la flama amb el paper.

Quan la inclinació de la mostra és de 90° , la flama es troba més propera al paper verge no cremat que hi ha a davant del front de combustió, n'augmenta la temperatura i n'accelera la cinètica.

Aquest fenomen s'explica a la Figura 67, on es veu clarament que la convecció de la flama es troba molt més propera al paper i provoca un increment de la temperatura.

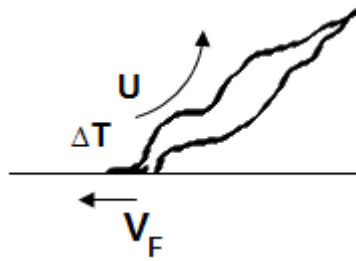


Figura 67: Increment de la temperatura per la convecció de la flama en una mostra que presenta una inclinació de 90°.

Inestabilitats de la flama

En l'evolució de la flama, la combustió de les mostres que presenten un angle d'inclinació superiors al 45° apareix el fenomen de la inestabilitat. El comportament de la flama canvia completament. El resultat és que la flama esdevé més alta i presenta un angle de curvatura superior al que té en la resta de casos de combustió, apropant-se més al paper i augmentant la temperatura del sistema. Això provoca una velocitat de propagació més elevada.

Per poder-ho veure més clarament, la Figura 68 mostra el comportament d'una flama degut a una inestabilitat.

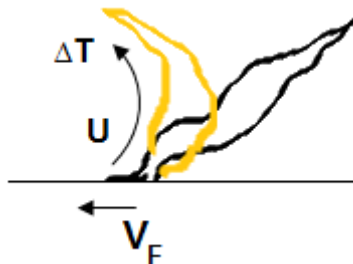


Figura 68: Comportament provocat per una inestabilitat

L'aparició d'aquestes inestabilitats són degudes a la convecció dels productes que es desprenen durant la combustió. L'angle d'inclinació de la mostra, la diferència de densitats i concentracions de gasos del sistema modifiquen la evolució de la flama acostant-la més a la mostra i provocant una inestabilitat.

Aquestes inestabilitats són les causants de les variabilitats en els resultats de la velocitat de propagació de la flama i ja foren trobades experimentalment per Kashiwagi i Newman (1976). Aquests investigadors, però, estudiaren la combustió en funció de l'angle per a una

concentració igual a l'ambient (21% d'oxigen) i varen concloure que les inestabilitats es produïen per angles d'inclinació superiors a 70°. Per sota, la velocitat de propagació de la flama era gairebé independent de l'angle d'inclinació. Aquí, hem estudiat per primera vegada l'efecte de la concentració d'oxigen en l'assoliment d'aquestes inestabilitats. En la realització dels nostres experiments en el laboratori les velocitats de propagació que s'han trobat pels casos de 67,5° i 90°, a una mateixa concentració, presenten diferències molt significatives entre elles.

En el cas de 67,5° i a una concentració del 30% d'oxigen, ja es comença a notar una certa variabilitat en els resultats. A mesura que s'incrementa la concentració, aquesta variabilitat augmenta. Això significa que la concentració també afavoreix a l'aparició d'inestabilitats. Dit d'una altra manera, l'angle d'inclinació a partir del qual apareixen les inestabilitats és més petit a mesura que augmentem la concentració d'oxigen. Això és degut a que les temperatures assolides en el procés de combustió són més elevades i, per tant, s'afavoreix l'existència d'aquestes inestabilitats convectives.

A continuació es mostra la Figura 69, la qual representa l'evolució d'una inestabilitat en un angle de 90° i concentració molar d'oxigen del 30%.



Figura 69: Inestabilitat de una flama a 90° amb concentració d'O₂ del 30%.

Tal i com s'observa en la Figura 69, el comportament de les inestabilitats està completament influenciat per la convecció del sistema.

Així, la variabilitat dels resultats és producte de l'angle d'inclinació de la mostra i també de la concentració d'oxigen. Aquesta variabilitat s'atribueix a la formació d'inestabilitats.

La influència de les cendres:

A una concentració d'oxigen del 22% i per a un angle de 0°, la combustió de la mostra es troba influenciada per la curvatura que presenten les cendres. En la formació d'aquestes, les fibres queden completament deteriorades, és a dir, el conjunt de les escissions dels enllaços glicosídics de la cel·lulosa provoquen l'obtenció de volàtils i carbó en la fase final de la combustió, de



manera que les cendres queden compostades únicament de carbó. Els volàtils que es desprenen durant la combustió afavoreixen al manteniment de la flama i provoquen uns corrents de convecció al seu voltant. Aquest fet, i el gradient de temperatures que presenten les cendres en funció del grau de conversió de la combustió en cada punt provoquen un comportament aleatori incontrolable d'aquestes.



Figura 70: Comportament de les cendres. (a) 0°, 50% O₂ (b) 90°, 22% O₂ (c) 0°, 22% O₂.

Tal i com es mostra a la Figura 70, el comportament de les cendres és imprevisible i impredecible. L'aparició d'aquests efectes es troba en tots els casos, des d'angles d'inclinació de 0° fins als de 90°, independentment de la concentració d'oxigen.

La seva inclinació o enrotllament influeix tèrmicament la zona del paper que es troba en la fase de piròlisi, accelerant-ne la cinètica i provocant una desestabilització de la velocitat de propagació.

7.3. FRANJA DE PIRÒLISI

Un dels factors que caracteritzen una combustió és la franja de piròlisi que presenten les mostres per diferents concentracions i diferents angles.

La franja de piròlisi queda delimitada per les molècules de cel·lulosa que es troben a una temperatura superior als 347°C (620 K), temperatura de piròlisi.

La figura 71 mostra quina influència té la concentració d'oxigen en la franja de piròlisi.

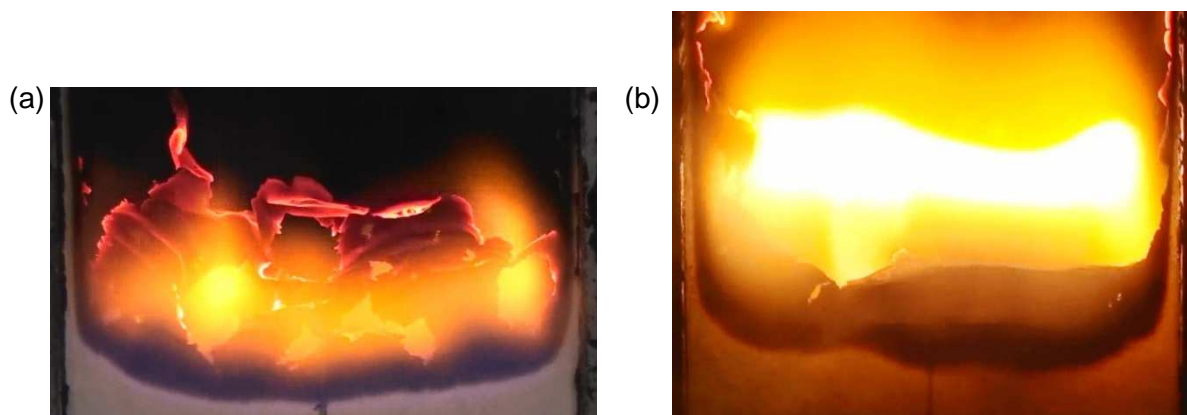


Figura 71: Franja de piròlisi per a diverses concentracions d'oxigen. (a) Concentració d'O₂ 22% (b) concentració d'O₂ 50%. Tots dos casos per a un mateix angle d'inclinació de la mostra de 0°.

En augmentar la concentració d'oxigen, font d'alimentació de la flama, les reaccions de combustió s'acceleren. Augmenta la mida de la flama i per tant s'incrementa el gradient de temperatures en un mateix punt de la mostra, provocant l'inici de la degradació de zones encara verges del paper.

Un increment de la concentració d'oxigen provoca que les reaccions d'oxidació accelerin la taxa de pèrdua de massa de la mostra. S'acceleren exponencialment les reaccions de despolimerització de la cel·lulosa és a dir, la cinètica de la degradació tèrmica.

En conclusió, un increment de la concentració d'oxigen per a un mateix angle d'inclinació de la mostra significa una major franja de piròlisi.

Un altre factor que influeix en les dimensions de la franja de piròlisi és l'angle d'inclinació de la mostra.

Els fotogrames de la Figura 72 mostren com influeix aquest angle en el comportament de la piròlisi.

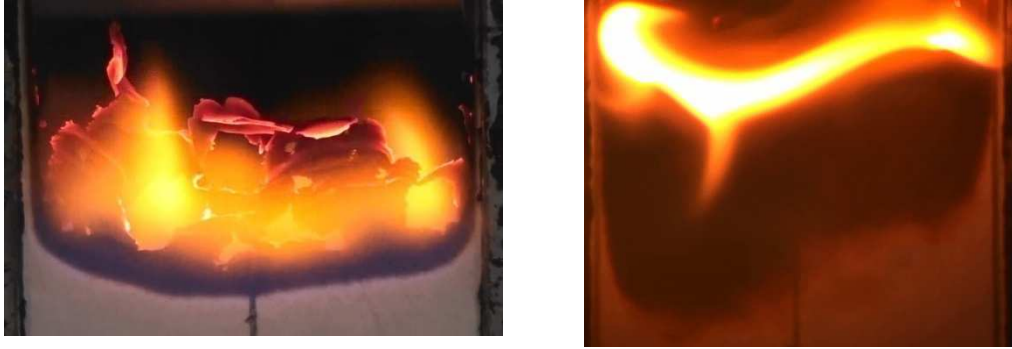


Figura 72: Franja de piròlisi en mostres amb una inclinació de 0°(a) i 90°(b).

Per a un angle d'inclinació de la mostra de 90° (posició horitzontal), la flama es troba molt més propera al paper i per tant, el flux de calor produït per la flama en un mateix punt de la mostra en la zona de piròlisi és superior que en el cas anterior (mostra en posició horitzontal).

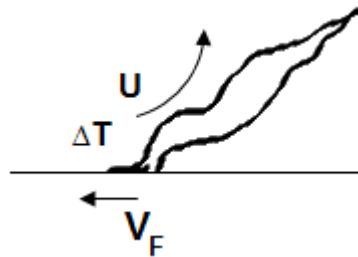


Figura 73: Influència de la flama en la franja de piròlisi a 90°.

Aquesta inclinació de 90° fa que s'acceleri la descomposició tèrmica de les molècules de cel·lulosa i, per tant, augmenta la franja de piròlisi.

Tal i com s'ha comentat, per un angle d'inclinació de 0° de la mostra, la convecció augmenta, la flama es troba més allunyada del paper i per tant, el gradient de temperatures de la mateixa zona disminueix. La franja de piròlisi serà més petita.

A la Figura 74 que es mostra a continuació s'observa el comportament de la piròlisi quan la mostra es troba inclinada 90° i davant d'una alta concentració d'oxigen.



Figura 74: Franja de piròlisi per a un angle màxim d'inclinació 90° i màxima concentració d'oxigen assajada 50%

Els corrents de convecció provocats per l'increment de la concentració i un angle de 90° fan que es pugui apreciar punts de la mostra que es troben en la primera fase de la degradació tèrmica en les fibres de cel·lulosa, és per aquest motiu que la franja de piròlisi presenta un aspecte difuminat.

Per tant, l'increment de l'angle d'inclinació i la concentració d'oxigen fan augmentar les dimensions de la franja de piròlisi.

Un altre dels factors que influeixen directament la franja de piròlisi són les inestabilitats. L'aparició d'aquestes inestabilitats són degudes als efectes convectius ja comentats on també hi intervenen els productes de la combustió i els volàtils que es desprenen quan les mostres presenten un angle d'inclinació superior als 45° .



Figura 75: Influència de les inestabilitats davant la franja de piròlisi.

En aquests casos, el comportament de la flama canvia completament. El resultat és que la flama presenta un angle de curvatura superior al que té en la resta de la zona de combustió, oscil·lant contínuament i apropant-se més al paper, cosa que fa augmentar el flux de calor cap a la zona verge i, en conseqüència, la velocitat de propagació. Així, les inestabilitats afavoreixen l'augment de la franja de piròlisi.

7.4. Comparació amb resultats anteriors.

L'estudi de la propagació de la flama en combustibles sòlids prims és un dels temes clàssics en la combustió.

Hi han hagut molts estudis teòrics i experimentals que han investigat la propagació de la flama cap avall, on la flama s'estén verticalment cap avall en contra de la gravetat (per exemple, Altenkirchet al, 1980; DeRis, 1969; Delichatsios, 1986; Fernández-Pello i Williams, 1977; Greenberg i Ronney, 1993). En la majoria d'aquests estudis experimentals, les mostres són rectangulars i s'estudia l'evolució de la flama pels dos costats verticals llargs i la combustió que va des de la part horitzontal superior cap a la inferior (per exemple, Fernández-Pello et al, 1981; FreyTien, 1976 ; Lastrinaet al, 1971; Zhanget al, 1992). Utilitzant aquesta configuració, la part davantera de piròlisi és gairebé plana i perpendicular a les vores laterals.

La majoria d'aquests estudis però, s'han realitzat a concentració atmosfèrica (21% oxigen). En particular, els estudis previs sobre els efectes de la inclinació de la mostra de paper en la velocitat de propagació de la flama només s'han aplicat en atmosfera ambient (Kashiwagi i Newman, 1976). Els experiments que es porten a terme en aquest projecte, però, es realitzen per a diferents concentracions d'oxigen i angles d'inclinació d'un mateix tipus de mostra. Això ens ha permès comprovar com les inestabilitats es donen per angles més grans quan augmentem la concentració d'oxigen.

En la Figura 76 es pot observar la relació angle-concentració que té lloc en els diferents casos realitzats al laboratori.

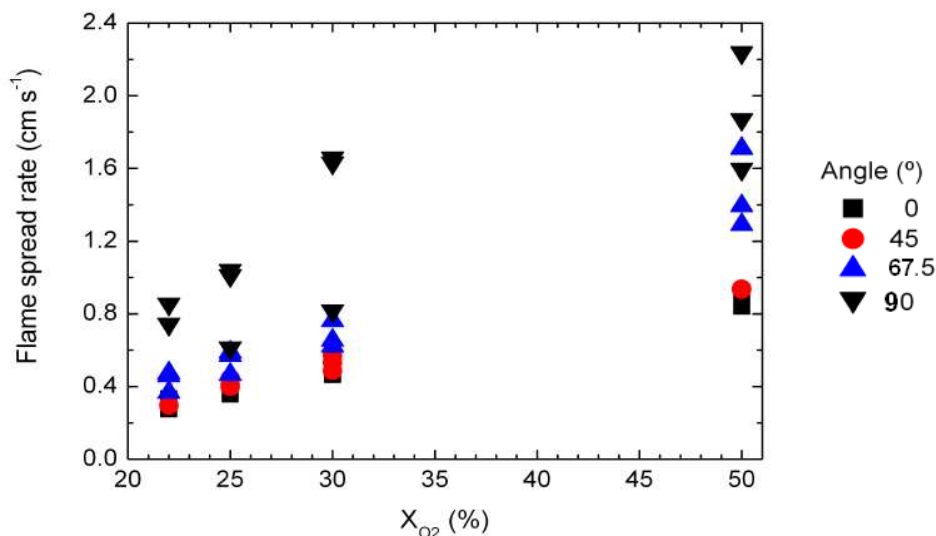


Figura 76: Velocitat de propagació per diferents angles i concentració d'O₂.

A mesura que s'incrementa la concentració, la velocitat de propagació també augmenta.

Per a una mostra que presenta una inclinació superior als 45° , el resultat és que la flama presenta un angle de curvatura superior al que té per al cas d'un angle de 0° , apropant-se més al paper, cosa que fa augmentar el flux de calor cap a la zona verge i, en conseqüència, la velocitat de propagació.

En la gràfica que es mostra en la figura 76 es pot observar que per angles per sobre de 67° augmenta considerablement la variabilitat dels resultats a mesura que s'incrementa la concentració d'oxigen.

D'aquesta forma, aquest estudi ha permès observar el comportament de la propagació de la flama i concloure que l'aparició d'inestabilitats es donen per angles més petits quan augmentem la concentració d'oxigen.

8 RESUM DEL PRESSUPOST

8. RESUM DEL PRESSUPOST

Per poder realitzar aquest estudi s'han hagut d'assumir una sèrie de despeses, ja que s'ha fet servir una instal·lació, components i aparells diferents. Tots aquests només s'han tingut en compte en la valoració del pressupost en el tema d'amortització ja que són propietat de la universitat i no s'han fabricat expressament pel present estudi, sinó per qualsevol estudi o experiment que s'hagi de fer a la mateixa universitat.

A part de tot això, sí que hi ha despeses directes imputables com, per exemple, el cost dels gasos en els experiments, la reposició dels gasos, el cost de realització dels experiments, el cost de redacció de l'estudi, etc. Per altre banda, les despeses per realització dels experiments, confecció i redacció del projecte no s'han tingut en compte en aquesta valoració aproximada. La valoració completa incloent aquestes últimes despeses és detalla en el document adjunt: Pressupost.

VALORACIÓ TOTAL 5221,5 €

9 CONCLUSIONS

9. CONCLUSIONS

Després de realitzar totes les preparacions prèvies de la instal·lació, aparells, etc., de dur a terme tots els experiments, de recollir totes les dades en format vídeo, d'analitzar les dades en programes específics, de confeccionar i elaborar les taules amb les representacions gràfiques corresponents i d'interpretar aquestes amb comparació amb d'altres resultats, s'ha completat l'estudi anomenat: Estudi experimental de la influència de l'angle d'inclinació d'una mostra de combustible sòlids primis en la velocitat de propagació de la flama.

En aquest estudi, s'ha estudiat la velocitat de propagació de la flama en la combustió de fulls de cel·lulosa d'igual amplada (4 cm) però amb un angle d'inclinació que va dels 0° a 90° amb propagació de la flama descendent.

Dels resultats obtinguts en aquest projecte, en podem extreure les següents conclusions:

- 1) La velocitat de propagació davant d'una concentració alta d'oxigen augmenta proporcionalment. S'incrementa el sistema convectiu i per tant, el gradient de temperatures en un mateix punt de la mostra provoca l'inici de la degradació de zones encara verges del paper.

Una alta concentració d'oxigen fa augmentar la franja de piròlisi.

- 2) A mesura que s'augmenta l'angle d'inclinació de la mostra, la flama es troba més propera al paper verge no cremat que hi ha a davant del front de combustió, n'augmenta la temperatura i n'accelera la cinètica. La velocitat de propagació augmenta per una mateixa concentració d'oxigen.

Per tant, un increment de la concentració d'oxigen i de l'angle d'inclinació de la mostra afavoreixen a la velocitat de propagació de la flama.

- 3) La variabilitat dels resultats és producte de l'angle d'inclinació de la mostra. Aquesta variabilitat s'atribueix a la formació d'instabilitats i el comportament de les instabilitats està completament influenciat per la convecció del sistema.
- 4) Les instabilitats es donen per angles més grans quan augmentem la concentració d'oxigen.

- 5) En la formació de les cendres, la seva inclinació o enrotllament influeix tèrmicament la zona del paper que es troba en la fase de piròlisi, accelerant-ne la cinètica i provocant una desestabilització de la velocitat de propagació.

- 6) La reducció en la concentració d'oxigen disponible a la cambra a mesura que es fa l'experiment no afecta als resultats.

10 RELACIÓ DE DOCUMENTS

10 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Conjuntament amb la memòria es troben els següents documents:

1 ANNEXOS

- ANNEX A: DADES TÈCNIQUES DELS GASOS
- ANNEX B: ESPECIFICACIONS DELS APARELLS
- ANNEX C: FULLS DE SEGUIMENT.

2 PRESSUPOST

11 BIBLIOGRAFIA

11 Bibliografia

T Kashiwagi, DL Newman. Flame spread over an inclined thin fuel surface. *Combustion and Flame*, 26, 163-177 (1976)

AGRAWAL, R.K.; "Kinetics of Reactions Involved in Pyrolysis of Cellulose I. The Three Reaction Model", 1988a, *The Can. J. Chem. Eng.*, 66, 403-412.

Sirignano, W.A. 1974. Theory of flame spread above solids. *ActAstronaut.*, 1, 1285–1299.

Zhang, X., and Yu, Y. 2011. Experimental studies on the three-dimensional effects of opposed-flow flame spread over thin solid materials. *Combust. Flame*, 158, 1193-1200.

Zhang, Y., Ronney, P.D., Roegner, E.V., and Greenberg, J.B. 1992. Lewis number effects on flame spreading over thin solid fuels. *Combust. Flame*, 90, 71–83.

Fernandez-Pello, A., and Williams, F.A. 1977. A theory of laminar flame spread over flat surfaces of solid combustibles. *Combust. Flame*, 28, 251–277.

Pujol T i Comas B. Bounds for downward flame spread rate in solid fuels and comparison to experiments. *Combustion Science and Technology*, en premsa (2011).

Vadim Mamleev, Serge Bourbigot, Jacques Yvon, Kinetic analysis of the thermal decomposition of cellulose: The main step of mass loss. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 80 (2007) 151–165.

D. Klemm, B.Philipp, T. Heinze, U. Heinze, W Wagenknecht, *Comprehensive Cellulose Chemistry. Volume I. Fundamentals and Analytical Methods*

Fabricación del papel, Jordi Bayer Trias.

Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Cellulose pyrolysis kinetics: An historical review on the existence and role of intermediate activecellulose.

YonggangChen, VahidMotevalli, Michael A. Delichatsios³ and Patricia A. Tatem.
PREDICTION OF HORIZONTAL FLAME SPREAD USING A THEORETICAL AND
EXPERIMENTAL APPROACH. Twenty-Seventh Symposium (International) on
Combustion/The Combustion Institute, 1998/pp. 2797–2805.

D.K. Shen, S. Gu, The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its
main products, Bioresource Technology 100 (2009) 6496–6504.

***ANNEX A: DADES TÈCNIQUES
DELS GASOS***

A.1. Oxigen



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Producto: OXÍGENO COMPRIMIDO

Version: 13

Fecha: 17/02/2009

Nº FDS: 097A

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA Y DE

LA EMPRESA

Fórmula química:

O₂

Uso de la sustancia o preparado:

* Uso universal.

Identificación de la empresa:

* PRAXAIR ESPAÑA, S. L.

c/Orense, 11-5º

28020 - Madrid

Teléfono de emergencia en instalaciones:

* 91 775 23 14

Teléfono de emergencia en gases especiales:

* 91 786 34 32

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS

COMPONENTES

Sustancia o mezcla:

* Sustancia

Componentes e impurezas:

* No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.

Nº CAS:

7782-44-7

Nº CE (según EINECS):

231-956-9

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Riesgos para las personas:

* Gas comprimido a alta presión.

* Gas oxidante. Mantiene la combustión vigorosamente. Puede reaccionar violentamente con materias combustibles.

Riesgos para el medio ambiente:

* No aplicable.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:

* La inhalación continua de concentraciones superiores al 75 % puede causar náuseas, vértigos, dificultades respiratorias y convulsiones.

Contacto con la piel y los ojos:

* Sin efectos para la piel y los ojos.

Ingestión:

* La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.

Información para el médico:

* No aplicable.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS

Riesgos específicos:

* Gas comburente. Mantiene la combustión.

* La exposición al fuego de los recipientes puede causar su rotura o explosión.

Medios de extinción adecuados:

* Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos.

Medios específicos de actuación:

* Si es posible detener la fuga de producto.

* Sacar los recipientes al exterior y enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro.

Equipo de protección especial para la actuación en incendios:

* No específicos por el producto.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O

VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

* Evacuar el área afectada.

* Asegurar la adecuada ventilación en el área.

* Eliminar las fuentes de ignición.

Medidas a tomar en el área afectada:

* Intentar detener el escape.

* Prevenir la entrada del producto en las alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier otro lugar donde su acumulación pudiera ser peligrosa.

Métodos de limpieza:

* Ventilar el área afectada.

Precauciones para la protección del medio ambiente:

* No aplicable.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación:

* Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.

* No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.

* Debe prevenirse la entrada de agua al interior de los recipientes.

* No usar grasas ni aceites.

* Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no utilice el producto.

* Solicitar al suministrador las instrucciones para la manipulación de los recipientes.

Almacenamiento:

* Separar de los gases inflamables y de otros materiales combustibles.

* Mantener lejos de fuentes de ignición, incluso de descargas de electricidad estática.

* Mantener los recipientes por debajo de 50º C, en un lugar bien ventilado.

Usos específicos:

* Uso universal.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE

PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición:

* No establecidos.

Controles de la exposición profesional:

* No fumar cuando se manipule el producto.

* Asegurar una ventilación adecuada, en especial si trabaja en lugares confinados.

* Evitar el enriquecimiento de oxígeno en la atmósfera por encima del 23,5 %.

* Llevar el equipo de protección individual adecuado.

* Llevar gafas con oculares filtrantes cuando se utilice en soldadura o corte.

Controles de la exposición del medio ambiente:

* No aplicable.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:

* Gas comprimido.

Peso molecular:

32

Temperatura de fusión:

-218,79º C

Temperatura de ebullición:

-182,97º C

Temperatura crítica:

-118,57º C

Presión crítica:

50,43 bar

Densidad relativa del gas (aire=1):

1,1 a 20º C

Densidad relativa del líquido (agua=1):

1,14 a -182,97º C



**Solubilidad en agua:**

31 cm³/l a 20° C.

Apariencia y color:

* Gas incoloro.

Olor:

* Sin olor que advierta de los riesgos de su presencia.

Temperatura de de autoinflamación:

Oxidante.

Rango de inflamabilidad (% de volumen en aire):

Oxidante.

Otros datos:

* El producto es más pesado que el aire. Puede acumularse en espacios confinados, particularmente en sótanos y a nivel del suelo.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD**Condiciones que deben evitarse:**

* Estable en condiciones normales.

Materias que deben evitarse:

- * Puede reaccionar violentamente con agentes reductores.
- * Puede reaccionar violentamente con materias combustibles.
- * Oxida violentamente materiales orgánicos.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**Efectos por inhalación:**

* Este producto no tiene efectos toxicológicos.

Efectos por contacto con la piel:

* No aplicable.

Efectos por contacto con los ojos:

* No aplicable.

Efectos por ingestión:

* No aplicable.

Efectos retardados:

* No aplicable.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**Ecotoxicidad:**

* Este producto no tiene efectos ecológicos.

Movilidad:

* No aplicable.

Persistencia y degradabilidad:

* No aplicable.

Potencial de bioacumulación:

* No aplicable.

Otros efectos nocivos:

* No aplicable.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA**ELIMINACIÓN DEL PRODUCTO****Eliminación del producto:**

- * Se puede descargar a la atmósfera.
- * No descargar en lugares donde su acumulación pudiera resultar peligrosa por desplazamiento del aire.
- * Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

Tratamiento de los residuos:

* No aplicable.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE**Nº de identificación del producto (Nº ONU):**

1072

Clase y división (ONU):

2.2, 5.1

Clasificación para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

2.1 O

Nº de identificación del riesgo para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

25

Etiquetas de peligro para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

- * Nº 2.2. Gas no inflamable, no tóxico.
- * Nº 5.1. Materia comburente.

Clasificación para el transporte marítimo, Nº página Código IMCO/IMDG:

2.2, 5.1

Clasificación para transporte aéreo, Código IATA/ICAO:

2.2, 5.1

Otras informaciones para el transporte:

- * Antes de transportar los recipientes asegurarse una ventilación adecuada.
- * Asegurarse que el conductor conoce los riesgos potenciales de la carga y sabe que hacer en caso de accidente o emergencia.
- * Antes de transportar las botellas asegurarse que las válvulas están cerradas y no fugan y que el tapón del acoplamiento de la válvula y la tulipa o caperuza (cuando existan) están adecuadamente apretadas.
- * Transportarlo solamente en vehículos donde el espacio de la carga esté separado del compartimento del conductor.
- * Asegurarse de cumplir la legislación aplicable.

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS**Producto listado en el Anexo I de la normativa de****etiquetado de sustancias (R.D. 363/1995 y siguientes):**

* El producto no está listado en el Anexo I.

Clasificación propuesta por la industria:

O R8A

Etiquetas de los recipientes:

* Nº 2.2. Gas no inflamable, no tóxico.

* Nº 5.1. Materia comburente.

Frases de riesgo:

* Gas comprimido a alta presión.

* R As. Asfixiante en grandes concentraciones.

* R 8A. Acelera la combustión.

Frases de seguridad:

* S 1/2. Consérvese bajo llave y manténgase fuera del alcance de los niños.

* S 9. Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado.

* S 17A. Consérvese alejado del material combustible, no utilizar grasas ni aceites.

16. OTRAS INFORMACIONES**Otras informaciones:**

* El riesgo de asfixia es a menudo despreciado. Debe ser recalcado durante la formación de los operarios.

* Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

Responsabilidades:

* Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones disponibles a la fecha de las mismas y cubren las aplicaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. No se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o daños resultantes de su utilización. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

A.2. Nitrogen



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD Producto: NITROGENO COMPRIMIDO

Version: 7

Fecha: 20/10/2005

Nº FDS: 089A

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA Y DE

LA EMPRESA

Fórmula química:

N₂

Uso de la sustancia o preparado:

* Uso universal.

Identificación de la empresa:

* PRAXAIR ESPAÑA, S. L.

c/Orense, 11-5º

28020 - Madrid

Teléfono de emergencia en transporte de líquido:

* 91 597 44 53

Teléfono de emergencia en instalaciones:

* 91 775 23 14

Teléfono de emergencia en gases especiales:

* 91 786 34 32

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sustancia o mezcla:

* Sustancia

Componentes e impurezas:

* No contiene otros componentes o impurezas que puedan modificar la clasificación del producto.

Nº CAS:

7727-37-9

Nº CE (según EINECS):

231-783-9

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Riesgos para las personas:

* Gas comprimido a alta presión.

* Puede causar asfixia en altas concentraciones por desplazamiento del aire.

Riesgos para el medio ambiente:

* No aplicable.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:

* A elevadas concentraciones puede causar asfixia por desplazamiento del aire. Los síntomas pueden incluir la pérdida de consciencia o movilidad. La víctima puede no haberse dado cuenta de que se asfixia.

* Retirar a la víctima a una zona no contaminada llevando colocado un equipo de respiración autónomo de presión positiva.

* Mantener a la víctima caliente y en reposo.

* Aplicarle la respiración artificial, si es preciso.

* Obtener asistencia médica.

Contacto con la piel y los ojos:

* Sin efectos para la piel y los ojos.

Ingestión:

* La ingestión no está considerada como vía potencial de exposición.

Información para el médico:

* No aplicable.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS

Riesgos específicos:

* Gas no inflamable.

* La exposición al fuego de los recipientes puede causar su rotura o explosión.

Productos peligrosos de la combustión:

* Ninguno.

Medios de extinción adecuados:

* Se pueden utilizar todos los agentes extintores conocidos.

Medios específicos de actuación:

* Si es posible detener la fuga de producto.

* Sacar los recipientes al exterior y enfriarlos con agua pulverizada desde un lugar seguro.

Equipo de protección especial para la actuación en

incendios:

* No específicos por el producto.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE ESCAPE O VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones personales:

* Evacuar el área afectada.

* Asegurar la adecuada ventilación en el área.

* Utilizar equipo autónomo de respiración de presión positiva cuando se entre en una zona contaminada, a menos que se compruebe que la atmósfera es respirable.

Medidas a tomar en el área afectada:

* Intentar detener el escape.

Métodos de limpieza:

* Ventilar el área afectada.

Precauciones para la protección del medio ambiente:

* No aplicable.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación:

* Utilizar únicamente equipo específicamente aprobado para este producto y para la presión y temperatura de utilización. En caso de duda contacte con el suministrador.

* No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del recipiente.

* Debe prevenirse la entrada de agua al interior de los recipientes.

* Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no utilice el producto.

* Solicitar al suministrador las instrucciones para la manipulación de los recipientes.

Almacenamiento:

* Mantener los recipientes por debajo de 50º C, en un lugar bien ventilado.

Usos específicos:

* Uso universal.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Valores límites de exposición:

* No establecidos.

Controles de la exposición profesional:

* Asegurar una ventilación adecuada, en especial si trabaja en lugares confinados.

Controles de la exposición del medio ambiente:

* No aplicable.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:

* Gas comprimido.

Peso molecular:

28

Temperatura de fusión:

-210º C

Temperatura de ebullición:

-195,80º C

Temperatura crítica:

-146,95º C

Densidad relativa del gas (aire=1):

0,96 a 15º C

Densidad relativa del líquido (agua=1):

0,80 a -195,80º C

Solubilidad en agua:

15,5 cm³/l a 20º C.

Apariencia y color:

* Gas incoloro.

Olor:

* Sin olor que advierta de los riesgos de su presencia.

Temperatura de de autoinflamación:

No aplicable.

Rango de inflamabilidad (% de volumen en aire):

No aplicable.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD**Condiciones que deben evitarse:**

* Estable en condiciones normales.

Materias que deben evitarse:

* No aplicable.

Productos de descomposición peligrosa:

* No aplicable.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**Efectos por inhalación:**

* Asfixiante Simple. No tiene efectos toxicológicos.

Efectos por contacto con la piel:

* No aplicable.

Efectos por contacto con los ojos:

* No aplicable.

Efectos por ingestión:

* No aplicable.

Efectos retardados:

* No aplicable.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**Ecotoxicidad:**

* Este producto no tiene efectos ecológicos.

Movilidad:

* No aplicable.

Persistencia y degradabilidad:

* No aplicable.

potencial de bioacumulación:

* No aplicable.

Otros efectos nocivos:

* No aplicable.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN DEL PRODUCTO**Eliminación del producto:**

* Se puede descargar a la atmósfera.
* No descargar en lugares donde su acumulación pudiera resultar peligrosa por desplazamiento del aire.
* Contactar con el suministrador si se necesita orientación.

Tratamiento de los residuos:

* No aplicable.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE**Nº de identificación del producto (Nº ONU):**

1066

Clase y división (ONU):

2.2

Clasificación para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

2.1A

Nº de identificación del riesgo para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

20

Etiquetas de peligro para el transporte por carretera y ferrocarril (ADR/RID):

* Nº 2.2. Gas no inflamable, no tóxico.

Clasificación para el transporte marítimo, Nº página Código IMCO/IMDG:

2.2

Clasificación para transporte aéreo, Código IATA/ICAO:

2.2

Otras informaciones para el transporte:

* Antes de transportar los recipientes asegurarse una ventilación adecuada.

* Asegurarse que el conductor conoce los riesgos potenciales de la carga y sabe que hacer en caso de accidente o emergencia.

* Antes de transportar las botellas asegurarse que las válvulas están cerradas y no fugan y que el tapón del acoplamiento de la válvula y la tulipa o caperuza (cuando existan) están adecuadamente apretadas.

* Transportarlo solamente en vehículos donde el espacio de la carga esté separado del compartimento del conductor.

* Asegurarse de cumplir la legislación aplicable.

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS**Producto listado en el Anexo I de la normativa de etiquetado de sustancias (R.D. 363/1995 y siguientes):**

* El producto no está listado en el Anexo I.

Etiquetas de los recipientes:

* Nº 2.2. Gas no inflamable, no tóxico.

Frases de riesgo:

* Gas comprimido a alta presión.

* R As. Asfixiante en grandes concentraciones.

Frases de seguridad:

* S 9. Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado.

* S 23. No respirar los gases.

16. OTRAS INFORMACIONES**Otras informaciones:**

* El riesgo de asfixia es a menudo despreciado. Debe ser recalorado durante la formación de los operarios.

* Antes de utilizar el producto en un proceso nuevo o experimento debe realizarse un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales utilizados.

Responsabilidades:

* Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. No se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o daños resultantes de su utilización. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

***ANNEX B: ESPECIFICACIONES
DELS APARELLS***

B.1. Manómetro

Manómetro digital de precisión Typ CPG1000

Hoja técnica WIKA CT 10.01

Aplicaciones

- Servicio y mantenimiento
- Talleres de medición y de regulación
- Industria (laboratorio, taller y producción)
- Control de calidad

Características

- Alta precisión de $\pm 0,05$ % del valor de escala (compensación de temperatura)
- Disponibilidad de 17 unidades estándar
- 19 unidades de medida estándar y una unidad especificada por el cliente
- Display de grandes dimensiones y de fácil lectura con iluminación de fondo seleccionable
- Caja robusta de acero inoxidable según NEMA 4/IP 65

Descripción

General

El manómetro digital de precisión CPG1000 emplea el concepto de un manómetro analógico con un nivel de funcionalidad solamente alcanzado por instrumentos digitales. El CPG1000 reúne la precisión de la instrumentación digital y la sencillez de un manómetro analógico. El resultado es un instrumento incomparable en referencia a prestación, sencillez de manejo y características generales.

Precisión

El CPG1000 ofrece una precisión de 0,05 % del valor final de escala en 16 unidades de presión y dispone de una compensación de temperatura desde 0... 50 °C. La indicación se realiza en una de las 19 unidades estándar o en una unidad especificada por el usuario para evitar cálculos suplementarios.

Velocidad de registro

La velocidad de registro es ajustable por el usuario. En aplicaciones estándar se utiliza normalmente tres valores por segundo. Esta frecuencia puede aumentarse hasta a



Manómetro digital de precisión, modelo CPG1000 con protección de goma (opcional)

10 valores por segundo. Una función de ahorro de energía permite la modificación del CPG1000 al modo „sleep“ para incrementar la durabilidad de las pilas hasta a 2.000 horas.

Características

La función MIN/MAX permite el registro inmediato de la presión máx y min, guardados automáticamente por el CPG1000. Para aumentar la durabilidad de la pila se puede activar una función de desactivación automatizada. Las funciones Zero y TARE compensan la desviación del sensor y para aplicaciones in situ se puede activar una protección de contraseña mediante el teclado del CPG1000. La lectura para una análisis offline se realiza mediante un interfaz RS-232. Para aplicaciones de incorporación permanente del CPG1000 en una cadena de proceso se ofrece como opción una entrada de alimentación externa de 24 V. Además se puede ajustar una función de amortiguamiento para compensar fuentes de presión fluctuantes.

Datos técnicos		Modelo CPG1000					
Rangos de medida	mbar	0 ... 70 *					
Límite de sobrecarga		350					
Presión de rotura		3500					
Resolución		0,001					
Rangos de medida	bar	0 ... 1	0 ... 2	-1 ... +1*	-1 ... +2*	0 ... 7	0 ... 20
Límites de sobrecarga		2	4	2	4	14	42
Presión de rotura		35	35	35	35	70	140
Resolución		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,001
Rangos de medida	bar	0 ... 35	0 ... 70	0 ... 140	0 ... 200	0 ... 350	0 ... 700
Límites de sobrecarga		70	140	210	420	700	1100
Presión de rotura		140	700	700	700	700	1100
Resolución		0,001	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01
Rangos de presión	bar abs.	0 ... 1*	0 ... 2*	0 ... 7*	0 ... 20*		
Límite de sobrecarga		2	4	14	42		
Presión de rotura		35	35	70	140		
Resolución		0,0001	0,0001	0,0001	0,001		
Error de medida	% / FS	± 0,05; (± 0,1 bei 0 ... 70 mbar)					
Tipo de presión		Relativdruck (Absolutdruck bis 20 bar und Vakuummessbereich)					
Conexión a proceso		¼" NPT außen; Adapter ¼" NPT innen auf G ½ außen					
Medio		Todos los líquidos y gases compatibles con acero inoxidable 316; salvo las partes marcados con *					
Material		Acero inoxidable 316, salvo las partes marcados con *					
■ Partes en contacto con el medio		Acero inoxidable					
■ Caja		Acero inoxidable					
Estabilidad anual		0,05 % o más del span					
Temperatura admisible							
■ Medio	°C	-10 ... +55 (temperatura min. encima del punto de congelación del medio)					
■ Trabajo	°C	-10 ... +55					
■ Almacenaje	°C	-20 ... +70					
Rango de temperatura compensada	°C	0 ... +50					
Coefficiente de temperatura		0,005 % del span/°C fuera de 0 ... 50 °C					
Indicación		Indicación de 5 1/2 dígitos con una altura de 16,53 mm (0,65") Escala porcentual con 20 segmentos, 0 ... 100 %					
Unidades de presión		psi, bar, mbar, Kg/cm², inH₂O (4 °C, 20 °C oder 60 °F), ft H₂O (4 °C, 20 °C ó 60 °F), cmH₂O (4 °C und 20 °C), mH₂O (4 °C und 20 °C), kPa, MPa, inHg, mmHg, TORR, unidad definido por el usuario					
Opciones de registro		Registro de Min/Máx					
Tasa de medida		0,5/seg. hasta 10/seg. especificado por el usuario					
Conexión al PC		RS-232, USB opcional con adaptador serie					
Energía auxiliar		3 AA batería alcalina					
■ Durabilidad de la batería		1500 h sin iluminación de fondo; 2000 h con una tasa de lectura reducida; la durabilidad de la batería puede consultarse en el display					
■ Nivel de batería		Indicación de nivel bajo con símbolo					
EMC		Comprobación según EN 55 022 clase A y EN 55 024					
Protección		IP 65					
Calibración		Certificado 3.1 (opcional: certificado DKD)					
Dimensiones	mm	111 x 127 x 38					
Peso	g	455					

Suministro

- Manómetro digital de precisión CPG1000
- Manual
- Certificado 3.1 según DIN EN 10 204
- 3 x AA batería alcalina
- Adaptador ¼" NPT hembra y G ½ macho

Opciones

- Certificado DKD
- Conexión externa 24 V DC
- Conexión a proceso dorsal

Accesorios

- Goma de protección para la caja
- Brida de montaje
- Adaptadores variados de conexión a proceso
- Cable de interfaz RS-232
- Adaptador serie USB

Generación de presión recomendada

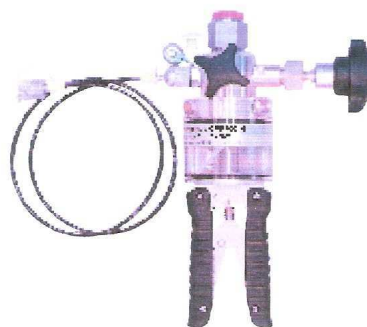
Bomba manual hidráulica CPP700-H

Rango de presión: 0 ... 700 bar
Medio: Aceite hidráulico, agua destilada
Datos técnicos véase hoja técnica CT 91.07

Maletín de comprobación y de calibración

para presión hasta 700 bar incluyendo:

- Maletín de plástico con manómetro digital de precisión modelo CPG1000
- Bomba hidráulica de comprobación, modelo CPP700-H



Bomba de comprobación hidráulica, modelo CPP700-H



Maletín de comprobación y de calibración

Productos y servicios de nuestra gama instrumentación de calibración

- Servicios DKD-para presión
- Reparación de instrumentos de calibración de todos los fabricantes
- Instrumentos portátiles para tareas de test y calibración
- Instrumentos de precisión y controladores de presión
- Instrumentos patrón para presión
- Soluciones integrales para la instrumentación de comprobación
- Calibración DKD para temperatura
- Calibradores de bloque de temperatura
- Baños de calibración y hornos
- Termómetros de precisión
- Instrumentos de medida de temperatura para test y calibración
- Instrumentos patrón para temperatura
- Asesoramiento y formación

Las especificaciones y dimensiones de esa ficha técnica representan el estado del diseño en el momento de la impresión.
Se pueden realizar modificaciones y cambios de materiales sin aviso previo.
Página 4 de 4

Hoja técnica WIKA CT 10.01 - 11/2008

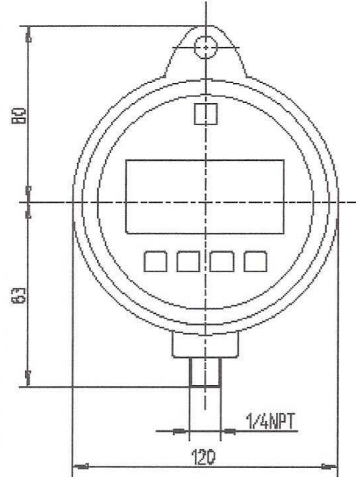


Instrumentos WIKA S.A.
Josep Carner, 11 - 17
08205 Sabadell (Barcelona)
Tel. 902902577
Fax. 933 938 666
info@wika.es

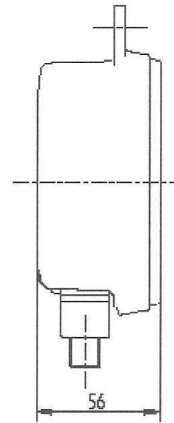
12994166 11/2008 ES

Dimensiones en mm

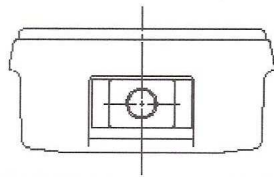
Perspectiva frontal



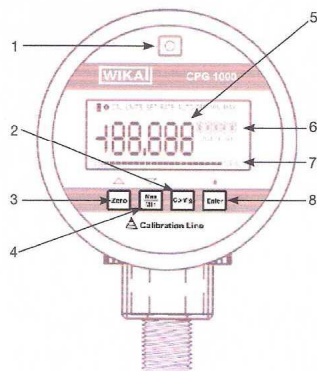
Perspectiva lateral



Perspectiva desde abajo



Folio frontal del manómetro digital de precisión, modeloz CPG1000



- 1) Activar-/desactivar
- 2) Menu SETUP- y de configuración
- 3) Ajuste al punto cero, avanzar en el menu
- 4) Valores min y máx, retroceder en el menu
- 5) Indicación de la presión
- 6) Unidad
- 7) Escala porcentual 0 ... 100 %
- 8) Selección de una opción para el fondo, activar -/ desactivar de la iluminación de fondo

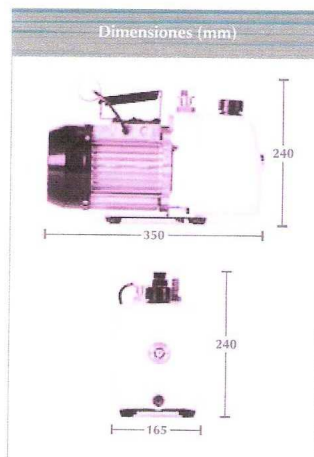
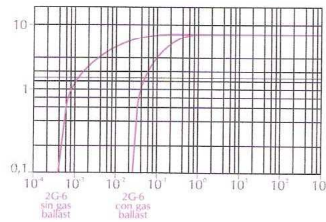
B.2 Bomba

Telstar 2G - 6

Bombas de Vacío de Paletas Rotativas en Baño de Aceite



Gráfica de caudal a 50 Hz



Características Principales:

- Doble efecto.
- Construcción compacta y fácil instalación.
- Muy bajo nivel de ruido: Según ISO 3744.
- Portátil.
- Válvula de gas ballast.
- Mantenimiento muy fácil mediante cambio, en caso necesario, de todo el cuerpo interior (kit de vacío), sin necesidad de herramientas especiales y en muy pocos minutos.
- Brida de conexión opcional: DN 10KF; o boquilla para goma 7 mm int.
- Protección térmica en el bobinado.
- Cable clavija de conexión e interruptor incluido.
- Temperatura de trabajo $\approx \Delta 40^\circ \text{C}$ sobre ambiente.
- Temperatura mínima arranque de 5°C .
- Antirretorno de aceite incorporado y cierre por válvula plana.

Especificaciones Técnicas:

CARACTERÍSTICAS*	UNIDAD	2G-6 50 Hz	2G-6 60 Hz
Caudal nominal	m³/h	6	7,2
	l/m	100	120
Etapas		2	
Vacío límite sin gas ballast	mbar	$4 \cdot 10^{-4}$	
Vacío límite con gas ball	mbar	$3 \cdot 10^{-2}$	
Tolerancia vapor agua	mbar	25	
Capacidad aceite	l	0,7	
Peso	Kg	16	
Motor eléctrico**	1 ph (Kw)	0,25	
Monofásico bifrecuencia	1 ph (V)	220	
	rpm	1450	1740
Nivel de ruido	dBA	55	58

* Según PNEUROMISO 1607/1 Y 1607/2
** Disponible también en versión 3 ph



Josep Tapiolas, 120
08226 Terrassa (España)
T. +34 937 361 800
F. +34 937 859 342

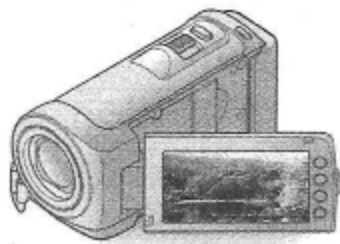


www.telstar-vacuum.com

B.3 Càmera de vídeo

SONY

4-129-507-32(1)



HDR-CX100E/CX105E/CX106E

Digital HD Video Camera Recorder

Manual de instrucciones

ES

Manual de instruções

PT

Οδηγός Χρήσης

GR

Kullanma Kilavuzu

TR

AVCHD HDMI  

HANDYCAM

© 2009 Sony Corporation

Especificaciones

Sistema

Formato de señal: color PAL, televisor HD con estándares CCIR, especificación 1080/50i

Formato de grabación de las películas:

Video: formato compatible con HD:

MPEG4-AVC/H.264 AVCHD

SD: MPEG2-PS

Audio: Dolby Digital de 2 canales

Dolby Digital Stereo Creator

Formato de archivo de fotografía

: compatible con DCF Ver.2.0

: compatible con Exif Ver.2.21

: compatible con MPF Baseline

SopORTE de grabación (película o fotografía)

Memoria interna: 8 GB

"Memory Stick PRO Duo"

En el cálculo de la capacidad de los soportes, 1 GB equivale a 1 000 millones de bytes, una parte de los cuales se utiliza para la gestión de datos.

Dispositivo de imagen: sensor CMOS de 3,6 mm (tipo 1/5)

Píxeles de grabación (fotografía, 4:3):

máx. 4,0 megapíxeles (2 304 × 1 728)*

Bruto: aprox. 2 360 000 píxeles

Efectivos (película, 16:9):

aprox. 1 430 000 píxeles

Efectivos (fotografía, 16:9):

aprox. 1 490 000 píxeles

Efectivos (fotografía, 4:3):

aprox. 1 990 000 píxeles

Objetivo:

Carl Zeiss Vario-Tessar

Óptico: 10×

Digital: 20×

:120× (modelos HDR-CX100E/CX105E)

:150× (modelo HDR-CX106E)

Diámetro del filtro: 30 mm

F1,8 - 2,2

Distancia focal

f=3,2 - 32 mm

Si se convierte a una cámara de imágenes fijas de 35 mm

Para películas**: 42 - 497 mm (16:9)

Para fotografías: 38 - 380 mm (4:3)

Temperatura de color: [AUTO], [UNA PULS.],

[INTERIOR] (3 200 K), [EXTERIOR]

(5 800 K)

Iluminación mínima

5 lx (lux) ([OBLENTO AUTO] está ajustado en [ACTIVADO], velocidad de obturación de 1/25 de segundo)

* La exclusiva matriz de píxeles de ClearVid de Sony y el sistema de procesamiento de imágenes (BIONZ) permiten obtener una resolución para las fotografías equivalente a los tamaños descritos.

** Las cifras de distancia focal son cifras reales derivadas de una lectura de píxeles de gran angular.

Conectores de entrada/salida

Conector remoto de A/V: toma de salida de audio y video/componente

Toma HDMI OUT: conector HDMI mini

Toma USB: mini B

(HDR-CX105E/CX106E: solo salida)

Pantalla de cristal líquido

Imagen: 6,7 cm (tipo 2,7, formato 16:9)

Número total de píxeles: 211 200 (960 × 220)

Generales

Requisitos de alimentación: cc de 6,8 V/7,2 V (batería), cc de 8,4 V (adaptador de ca)

Consumo medio de energía. Durante la grabación con la videocámara con la pantalla de cristal líquido ajustada en un nivel de brillo normal: HD: 3,5 W SD: 2,9 W

Temperatura de funcionamiento: de 0 °C a 40 °C

Temperatura de almacenamiento: de -20 °C a +60 °C

Dimensiones (aprox.): 55 × 60 × 107 mm (an/al/prf) incluidas las partes salientes

55 × 60 × 114 mm (an/al/prf) incluidas las partes salientes y con la batería recargable suministrada instalada

Peso (aprox.): 280 g solo la unidad principal

330 g incluida la batería recargable suministrada

Adaptador de ca AC-L200C/AC-L200D

Requisitos de alimentación: ca de 100 V a 240 V, 50 Hz/60 Hz

Consumo de corriente: de 0,35 A a 0,18 A

Consumo de corriente: 18 W

Voltaje de salida: cc de 8,4 V*

Temperatura de funcionamiento: de 0 °C a 40 °C

Temperatura de almacenamiento: de -20 °C a +60 °C

Dimensiones (aprox.): 48 × 29 × 81 mm (an/al/prf) sin incluir las partes salientes
 Peso (aprox.): 170 g sin incluir el cable de alimentación

- Consulte la etiqueta del adaptador de ca para obtener información acerca de otras especificaciones.

Batería recargable NP-FH50

Voltaje máximo de salida: cc de 8,4 V
 Voltaje de salida: cc de 6,8 V
 Voltaje máximo de carga: cc de 8,4 V
 Corriente máxima de carga: 1,75 A
 Capacidad: 6,1 Wh (900 mAh)
 Tipo: iones de litio

El diseño y las especificaciones de la videocámara y los accesorios están sujetos a cambios sin previo aviso.

- Fabricado bajo licencia de Dolby Laboratories.

Tiempo de carga y funcionamiento estimado de la batería suministrada (minutos)

Calidad de imagen	HD	SD
Tiempo de carga (completa)	135	
Tiempo de grabación continua	90	110
Tiempo de grabación normal	45	55
Tiempo de reproducción	135	155

- El tiempo de grabación y reproducción es el tiempo aproximado disponible cuando se utiliza una batería completamente cargada.
- Calidad de imagen de alta definición (HD)/calidad de imagen de definición estándar (SD)
- Condiciones de grabación: modo de grabación [SP], luz de fondo de la pantalla de cristal líquido ajustada en [ACTIVADO]

- El tiempo de grabación normal muestra el tiempo cuando se repiten las operaciones de inicio y parada de la grabación, conexión y desconexión de la alimentación y utilización del zoom.

Tiempo de grabación previsto para películas en la memoria interna (minutos)

- Para ajustar el modo de grabación, toque **HOME** → **ajustes** (AJUSTES) → [AJUSTES PEL.CÁM] → [MODO GRAB.]. El modo de grabación predeterminado es [HD SP] (pág. 46).

Calidad de imagen de alta definición (HD) en h (horas) min (minutos)

Modo de grabación	Tiempo de grabación
[HD FH]	55 min (55 min)
[HD HQ]	1 h 55 min (1 h 20 min)
[HD SP]	2 h 25 min (1 h 40 min)
[HD LP]	3 h 15 min (2 h 30 min)

Calidad de imagen de definición estándar (SD) en h (horas) min (minutos)

Modo de grabación	Tiempo de grabación
[SD HQ]	2 h (1 h 45 min)
[SD SP]	2 h 50 min (1 h 45 min)
[SD LP]	6 h (3 h 50 min)

- El número entre paréntesis () indica el tiempo mínimo de grabación.

Ejemplo de tiempo de grabación previsto para películas en un "Memory Stick PRO Duo"

Modo de grabación	4 GB de capacidad, en minutos	
	Alta definición (HD)	Definición estándar (SD)
[FH]	25 (25)	—
[HQ]	55 (40)	55 (50)
[SP]	70 (50)	80 (50)
[LP]	95 (70)	170 (110)

- El número entre paréntesis () indica el tiempo mínimo de grabación.
- Se ha utilizado un "Memory Stick PRO Duo" de Sony.
- El tiempo de grabación puede variar en función de las condiciones de grabación y del motivo, [MODO GRAB.], así como el tipo de "Memory Stick".
- Acerca del tiempo de carga/grabación/reproducción
 - Las mediciones se han realizado con la videocámara a una temperatura de 25 °C (se recomienda entre 10 °C y 30 °C).
 - En función de las condiciones en las que utilice la videocámara, es posible que el tiempo de grabación y reproducción se vea reducido.

***ANNEX C: MOSTRA DE FULLS DE
SEGUIMENT***

C.1 Full de càlcul

Abans de realitzar qualsevol experiment s'havia d'engegar l'ordinador i obrir una plantilla d'un full de càlcul, on s'havien d'anotar les dades corresponents de l'estació meteorològica. Llavors, aquest automàticament donava la pressió de buit que s'havia d'assolir, la pressió d'oxigen i la total. Aquest procediment s'ha realitzat per cada experiment. El nom del arxiu del full de càlcul és en el següent format: any_mes_dia_nº experiment del dia. A continuació a la figura A, es pot veure com és el full de càlcul amb un exemple.

EXPERIMENTS a 1 bar					
Pressió experiment:	1 bar				
		BUIT MÍNIM A ASSOLIR			
DADES ESTACIÓ METEOROLÒGICA		Buit mínim:	2,49	mbar absoluta	
Temperatura	15,3 °C	Buit mínim:	-993,51	mbar relativa	
Humitat relativa	60,8 mbar				
Pambient	996 %	PRESSIONS A ASSOLIR			
CONCENTRACIÓ O2 OBJECTIU		Pressió O2:	249,375	mbar absoluta	
Xo2	25 (%)	Pressió O2:	-744,125	mbar relativa	
		Pressió N2:	4	mbar relativa	
PRESSIONS OBTINGUDES					
Buit obtingut	-993,5 mbar relativa	CONCENTRACIÓ FINAL :			
Pressió O2:	-744,4 mbar relativa	Quantitat aire residual:	2,5	mbar	
Pressió N2:	0,7 mbar relativa	Pressió parcial vapor d'aigua:	10,609	mbar	
		Quantitat oxigen aire residual:	0,52	mbar	
		Quantitat total oxigen cambra:	249,62	mbar	
RECORDEU	En blau: dades a entrar				
	En verd: pressions realment assolides (s'han d'entrar)				
	En groc: dades objectiu				
	En vermell: concentració O2 realment assolida:			25,04 %	
		Quantitat vapor d'aigua final:	0,0027 %		
		Fet (S/N) (marcar si (S) o no (N))			
IMPORTANT =====>	Temps de ventilador	2 min			
	Temps en repòs abans d'ignició	3 min			

Figura C1: Full de càlcul

Com s'ha comentat primerament s'havia d'omplir les caselles en blau, dades del'estació meteorològica i concentració d'oxigen desitjada. A continuació, s'obtenen lespressions relatives que s'han d'assolir en les caselles en groc. A mesura que es vancompletant les fases de l'experiment s'han d'anar omplint les caselles verdes. Llavors,depenent del valor obtingut de buit, canvien les pressions de O2 i N2 a assolir. També,en vermell es pot observar la concentració d'oxigen assolida.

C.2. Full de seguiment a mà

Igual que amb el full de càlcul, abans de realitzar qualsevol experiment s'havien d'anotar les dades corresponents de l'estació meteorològica. A continuació i després s'havien d'anotar les dades obtingudes: la pressió de buit que s'havia d'assolir, la pressió d'oxigen i la total. Per últim, la concentració d'oxigen final, i marcar les caselles de temps de ventilador i repòs després de complir-lo. En la següent figura A s'observa el seu format.

<i>EXPERIMENT No:</i>	<i>Nom arxiu:</i>	<i>Data:</i>
<i>Amplada paper (cm):</i>	<i>Nombre de papers:</i>	
<i>Concentració O₂ objectiu X_{O₂} =</i> %	<i>Pressions obtingudes</i>	
<i>Dades estació meteorològica</i>	Buit obtingut =	mbar (relativa)
Temperatura (°C) =	Pressió O ₂ =	mbar (relativa)
Humita relativa (%) =	Pressió final =	mbar (relativa)
P ambient (mbar) =	<i>Concentració O₂ final =</i> %	
<i>Una vegada s'hagi arribat a la pressió final:</i>	Temperatura cambra =	°C
TEMPS VENTILADOR EN FUNCIONAMENT:	2 minuts (marcar una X quan fet aquí =>)	
TEMPS EN REPÒS ABANS IGNICIÓ:	3 minuts (marcar una X quan fet aquí =>)	

<i>EXPERIMENT No:</i>	<i>Nom arxiu:</i>	<i>Data:</i>
<i>Amplada paper (cm):</i>	<i>Nombre de papers:</i>	
<i>Concentració O₂ objectiu X_{O₂} =</i> %	<i>Pressions obtingudes</i>	
<i>Dades estació meteorològica</i>	Buit obtingut =	mbar (relativa)
Temperatura (°C) =	Pressió O ₂ =	mbar (relativa)
Humita relativa (%) =	Pressió final =	mbar (relativa)
P ambient (mbar) =	<i>Concentració O₂ final =</i> %	
<i>Una vegada s'hagi arribat a la pressió final:</i>	Temperatura cambra =	°C
TEMPS VENTILADOR EN FUNCIONAMENT:	2 minuts (marcar una X quan fet aquí =>)	
TEMPS EN REPÒS ABANS IGNICIÓ:	3 minuts (marcar una X quan fet aquí =>)	

<i>EXPERIMENT No:</i>	<i>Nom arxiu:</i>	<i>Data:</i>
<i>Amplada paper (cm):</i>	<i>Nombre de papers:</i>	
<i>Concentració O₂ objectiu X_{O₂} =</i> %	<i>Pressions obtingudes</i>	
<i>Dades estació meteorològica</i>	Buit obtingut =	mbar (relativa)
Temperatura (°C) =	Pressió O ₂ =	mbar (relativa)
Humita relativa (%) =	Pressió final =	mbar (relativa)
P ambient (mbar) =	<i>Concentració O₂ final =</i> %	
<i>Una vegada s'hagi arribat a la pressió final:</i>	Temperatura cambra =	°C
TEMPS VENTILADOR EN FUNCIONAMENT:	2 minuts (marcar una X quan fet aquí =>)	
TEMPS EN REPÒS ABANS IGNICIÓ:	3 minuts (marcar una X quan fet aquí =>)	

Figura C2: Full de seguiment a mà