



ESTUDI DEL PROCÉS D'ADSORCIÓ EN CARBÓ ACTIU GRANULAR PER ELIMINAR COLORANTS TÈXTILS

Projecte Fi de Carrera de Ciències Ambientals

Presentat per: Pilar Ruiz de Lira Jiménez

Dirigit per: Montserrat Sarrà Adroguer

Bellaterra, 18 de setembre de 2006

En primer lloc dir que aquest projecte no l'hagués dut a terme sense l'ajuda i paciència de la directora, la Montse, gràcies per tot.

També vull agrair a tot el Departament d'Enginyeria Química de la UAB per la seva amabilitat en aquests mesos de treball al laboratori.

Als amics, per les seves visites al laboratori, pel seu suport, els seus ànims i per tota l'ajuda rebuda fins l'últim moment.

Als meus pares per suportar-me en els moments d'estrès, a la meva "tita" per creure en mi, al meu germà pel seu suport informàtic i a la resta de la família per recolzar-me des de el primer dia que vaig decidir fer Ciències Ambientals.

Gràcies a tots!

ÍNDIX

1. Introducció	1
1.1. La indústria tèxtil i les aigües residuals	2
1.2. Legislació sobre aigües residuals	6
1.2.1. Legislació europea	6
1.2.2. Legislació espanyola	8
1.2.3. Legislació catalana	8
1.3. Procés d'adsorció	10
1.3.1. Definició	11
1.3.2. Factors que influeixen en l'adsorció	11
1.3.3. Isotermes d'adsorció	13
1.3.3.1. Llei de Henry	13
1.3.3.2. Isoterma de Langmuir	13
1.3.3.3. Isoterma de Freundlich	14
1.3.3.4. Isoterma d'adsorció BET	15
1.4. Eliminació del color en les aigües residuals	16
1.4.1. Coagulació-floculació	19
1.4.2. Tractament amb ozó	19
1.4.3. Tecnologia de membranes	20
1.4.4. Adsorbents industrials	20
1.4.4.1. Carbó actiu	20
1.4.4.2. Reïnes sintètiques	21
1.4.4.3. Tamisos moleculars: zeolites	21
1.5. Adsorció carbó actiu	22
1.5.1. Preparació del carbó actiu	22
1.5.2. Formes del carbó actiu	23
1.5.3. Reactivació del carbó actiu	24
1.5.4. Altres característiques	26
2. Objectius	27
3. Materials i mètodes	29
3.1. Materials	30
3.1.1. Carbó actiu	30
3.1.2. Colorants	30
3.2. Mètodes analítics	31
3.3. Muntatge i metodologia experimental	31
3.3.1. Experiments en discontinu	31

3.3.2. Experiments en continu	32
4. Resultats i discussió	36
4.1. Experiments en discontinu	37
4.1.1. Colorant Gris Lanaset G	37
4.1.2. Colorant Orange G	51
4.2. Experiments en continu	59
4.3. Avaluació econòmica	72
4.3.1. Desglossament de costos	72
4.3.2. Comparació de l'avaluació econòmica dels dos adsorbents	79
5. Conclusions	81
6. Bibliografia	84
7. Annex	87

1. INTRODUCCIÓ

1.1. La indústria tèxtil i les aigües residuals

La gran diversitat d'activitats que inclou sector tèxtil (rentatge i pentinada de la llana i el pèl, preparació i filada de fibres, fabricació de teixits tèxtils, ...), juntament amb la diversitat i combinacions de fibres existents, amb els requisits de manipulació que cadascuna exigeix i la constant variació de la demanda exercida pels mercats, sotmesos als dictàmens de la moda, fan que el sector tèxtil sigui un sector dinàmic i de gran interès, però també de gran complexitat i que evoluciona constantment.

En les dues últimes dècades la indústria tèxtil espanyola ha experimentat una situació de permanent transformació i reestructuració. Un procés de transformació que ha significat una notable pèrdua de pes del sector i un important canvi en els seus sistemes operatius.

Fins a finals dels anys setanta la indústria tèxtil espanyola era una indústria altament protegida, orientada prioritàriament cap el sector interior, encara que mantenia una certa capacitat exportadora alimentada per les polítiques de recolzament a la exportació. Les nombroses ajudes a la inversió, l'elevat nivell de proteccionisme i els baixos salaris van generar un creixement sectorial que es va traduir en un sector amb baixa productivitat i elevat excés de capacitat productiva instal·lada.

La crisi de finals dels setanta i el canvi a les orientacions de política econòmica, iniciat en aquest mateix període, van constituir el detonant d'una forta crisi del sector i de la seva posterior transformació. A una primera fase es va tractar d'una política de reestructuració, àmpliament tutelada pel sector públic a través de diversos plans de reestructuració que van contar amb substancioses ajudes, encara que les mateixes es varen orientar tant a l'amortització d'equips en excedència com a la finança de noves inversions en modernització.

El resultat d'aquests plans no només va donar lloc a un important ajust de la capacitat productiva i de plantilles, si no que va possibilitar a l'hora una important injecció de recursos financers a les empreses que varen aconseguir acollir-se a les polítiques d'ajudes, fet que unit a la persistència d'importants mesures proteccionistes, permet explicar que la indústria tèxtil espanyola va mantenir un saldo exportador positiu a la primera meitat de la dècada dels vuitanta.

L'ingrés a la Comunitat Europea va suposar un nou canvi radical al produir-se una considerable desregulació aranzelària i al eliminar-se la política de foment a la exportació. Aquest shock va estar amés reforçat per una política monetària restrictiva que va provocar, al mateix temps, alts tipus d'interès—que varen afectar negativament als costos empresarials— i una revalorització de la pesseta que augmentà les dificultats en el sector exterior. La creixent competència internacional, tant dels països

comunitaris com dels extracomunitaris, es va traduir en una forta pressió cap a la indústria local que va tenir enormes dificultats per a sobreviure, tant en el segment més baix del mercat, a on la pèrdua de mesures protectores va afavorir l'entrada de productes barats que provenien de països amb mà d'obra més barata, com de productes de major qualitat en que les marques, el disseny i les xarxes de comercialització juguen un paper fonamental. Els efectes més visibles d'aquesta competència creixent es troben en la caiguda de la producció interior, el desequilibri del comerç exterior— que reflexa la pèrdua d'una part del mercat interior per les empreses locals i les seves dificultats d'expansió internacional— i la forta pèrdua de llocs de treball.

A partir de 1992 el sector es veuria afectat de nou per una crisi econòmica general, que es va traduir en una important caiguda de la demanda de béns de consum. Encara que va haver certa recuperació a partir de 1994, aquesta no ha sigut ni excessivament forta ni s'ha traduït en una forta expansió del consum, efecte aquest últim que s'explica per les polítiques de moderació salarial i retall dels subsidis d'atur, així com per la generalització de l'ocupació temporal, que augmenta la desconfiança dels consumidors i provoca aquesta restricció del consum. L'alternativa a la dèbil demanda interna la constitueix l'exportació, segment que després del període 1986-88, ha mantingut un perfil deficitari.

Per a destacar unes dades, a Espanya l'any 1999 es van utilitzar un total de 1,2 milions de metres cúbics d'aigua en la indústria tèxtil i del cuir, generant 1,16 milions de metres cúbics d'aigües residuals. D'aquests 1,2 milions, 1,12 s'utilitzen a Catalunya, dels quals només es reutilitza a la indústria un 0,9%. A la taula 1.1 es recullen dades de volum d'aigua utilitzada per pes de fibres processades a l'àrea tèxtil de Como, al nord d'Itàlia, on es fabriquen productes de gran qualitat. Aquesta àrea tèxtil, en la majoria dels processos de tenyit són reticents a reduir les quantitats d'aigua utilitzada, argumentant que la gran qualitat dels productes només s'aconsegueix utilitzant grans volums d'aigua.

Pel que fa a la gestió mediambiental de les empreses dels subsectors de tintura, acabats i estampació, val a dir que la pressió exercida des de la societat i l'Administració i la incorporació de criteris ambientals en la gestió empresarial han estat creixent durant els últims anys i això ha comportat importants inversions, ja sigui en sistemes per prevenir o per controlar la contaminació. Pel que fa als costos relacionats amb la gestió ambiental, i a excepció dels costos de tractar les aigües residuals en origen, que poden variar de forma significativa segons el tipus de tractament, es pot considerar que els més importants són els corresponents a taxes sobre consum i abocament d'aigua i els corresponents a la gestió de residus.

Taula 1.1. Consum d'aigua per unitat de pes de fibra processada a l'àrea tèxtil de Como (Itàlia).

TIPUS DE FIBRA	CONSUM D'AIGUA (m ³ /Kg)
<i>Tenyit de fils</i>	
Poliester	0,051
Seda	0,082
Viscosa	0,082
<i>Tenyit de teixits</i>	
Poliester	0,090
<i>Impressió i acabat</i>	
Poliester	0,32
Seda	0,183
Cotó-viscosa	0,458
Llana	0,275

Les aigües residuals són el corrent residual més gran de la indústria tèxtil. Inclou: aigua de rentat, aigua de procés, aigua de refrigeració i aigua de pluja. La quantitat d'aigua utilitzada varia molt en funció del procés específic, de l'equipament utilitzat i de l'enfocament predominant respecte l'ús de l'aigua en la direcció de l'empresa.

Generalment, en el procés tèxtil es consumeixen 160 Kg d'aigua per Kg de producte acabat i el procés d'acabat genera efluents que contenen quantitats significatives d'un ampli ventall de residus. Quasi tot el volum d'aigua utilitzat és abocat perquè les pèrdues són mínimes. En percentatge, el volum d'efluents representa un 90-95% de l'aigua utilitzada.

Els contaminants de les aigües residuals s'originen en gairebé totes les etapes de fabricació. Existeixen, però, grans diferències en relació a qualitat i cabal segons els productes tèxtils processats i les fases de fabricació d'on provenguin les aigües.

A continuació es descriuen les característiques generals de la càrrega contaminant present a les aigües residuals:

- Temperatura: pot sobrepassar els 30°C a causa dels banys de tintura. La temperatura elevada fa disminuir la concentració d'oxigen dissolt i afavoreix el desenvolupament d'espècies resistents a l'aigua calenta que desequilibren la cadena alimentària.
- pH: encara que hi hagi certs processos i tints àcids, l'alcalinitat del merceritzatge (sosa càustica) fa que predomini finalment un pH alcalí. Un pH moderadament alcalí no afecta la depuració per fangs activats, ja

que l'oxidació biològica produeix diòxid de carboni creant-se una solució també.

- Sòlids en suspensió: no són gaire importants excepte en la tintura de cotó i en l'estampació. Els sòlids en suspensió poden arribar a impedir l'activitat fotosintètica ja que limiten el pas de la llum. Se sedimenten al fons de les lleres i destrueixen la flora i la fauna dipositades.
- Matèria oxidable: aquestes substàncies tenen la propietat d'oxidar-se, sostraient una part de l'oxigen de l'aigua, la qual cosa afectarà de forma negativa la vida de la flora i fauna dels rius. La matèria oxidable es mesura mitjançant la demanda química d'oxigen (DQO) i la demanda bioquímica d'oxigen al cap de cinc dies (DBO_5). Les aigües de l'ennobliment del tèxtil tenen, en general, una relació DBO_5/DQO entre 0,2 i 0,35, la qual cosa fa que puguin ser tractades mitjançant tractaments de tipus biològics. Cal tenir en compte que aquesta relació empírica que es pot considerar tan sols indicativa de la tendència de la biodegradabilitat dels efluent.
- Color: és produït per compostos orgànics i ions metàl·lics que provenen dels colorants i productes químics emprats en el procés. Produeixen un fort impacte visual en els rius i poden limitar la transferència de la llum a través de l'aigua.
- Detergent: són molt emprats en els processos tèxtils. Produeixen escumes que limiten la transferència de la llum i l'oxigen a través de l'aigua.
- Toxicitat: encara que en baixa quantitat, determinants processos poden generar productes tòxics per als organismes vius dels rius. En aquest sector, els més coneguts són els metalls pesants, especialment els acabats de la llana i sintètics, i els compostos organoclorats, en els efluent de tractaments antifongs o d'ignifugació no reutilitzats, alguns tints, o bé els transportadors utilitzats en tintura.

Un impacte també important és el gran consum d'energia principalment degut a l'escalfament dels banys i a l'assecatge de les fibres i teixit, que pot ser substancialment reduït si es fa un reciclatge eficient de l'aigua.

1.2. Legislació sobre aigües residuals

Destacar la importància de la legislació en el control i prevenció de la contaminació de les aigües residuals per part de les diferents administracions: europea, estatal, autonòmica i local.

1.2.1. Legislació europea

La UE disposa d'un instrument de planificació que li permet fixar el marc de la seva intervenció en l'àmbit del medi ambient: els *programes d'acció plurianuals*.

Des de 1972 s'han adoptat sis programes comunitaris en matèria de medi ambient. Aquests programes no tenen força vinculant; el seu objectiu és exposar una estratègia i un calendari d'actuació de la Unió Europea i els seus estats membres durant el seu període de vigència. Així mateix, fixen una sèrie d'objectius mediambientals a mitjà i llarg termini i els instruments necessaris per assolir-los. L'adopció d'aquests programes d'acció mediambiental respon als objectius següents:

- Preocupació global pel problema creixent de la degradació mediambiental.
- La naturalesa transfronterera de la major part dels problemes mediambientals.
- Reconeixement que l'augment del creixement econòmic en el mercat interior pot provocar un empitjorament dels problemes mediambientals.
- Reconeixement que una política mediambiental de la UE és necessària per assegurar que els estàndards nacionals no provoquen una barrera en el comerç.
- Creixement de la confiança en l'efectivitat d'una acció conjunta dels estats membres de la UE, juntament amb la UE, en moltes de les convencions internacionals en matèria de medi ambient (com ara la Cimera de Rio de 1992 i el Protocol de Kioto de 1997).
- Reconeixement que el medi ambient forma part dels recursos econòmics de base de la UE.

- Reconeixement que la protecció del medi ambient és una part important del camí pel qual la UE pot assolir el seu compromís per millorar les condicions de vida de tots els ciutadans de tots els estats membres.

El Vè Programa d'acció en l'àmbit del medi ambient (1993-2000) posava de manifest, per primer cop, el compromís de la Comunitat amb el desenvolupament sostenible. Val a dir que aquest Programa va coincidir amb la Cimera de Rio (1992) i amb l'Agenda 21, i per aquest motiu va adoptar un enfocament global dels problemes des d'una perspectiva internacional. Sobre la base dels progressos assolits sota aquest Programa d'acció, el 22 de juliol de 2002 es va aprovar el VIè Programa d'acció a favor del medi ambient: Medi ambient 2010: el nostre futur, la nostra elecció.

El VIè Programa d'acció és la base mediambiental de l'estratègia comunitària per al desenvolupament sostenible per mitjà del qual es pretén integrar les preocupacions mediambientals en totes les polítiques comunitàries. El Programa defineix els problemes existents i estableix una estratègia i una sèrie d'objectius generals articulats al voltant de quatre àrees d'acció prioritàries: canvi climàtic, naturalesa i biodiversitat, salut i medi ambient i gestió dels recursos naturals i dels residus.

L'aplicació del VIè Programa d'acció es caracteritza per un diàleg i una participació més àmplia de les parts implicades, des de la fase de discussió de les mesures fins a la seva posada en marxa. D'altra banda, l'elaboració, la posada en marxa i l'avaluació del programa es basen en la realització d'avaluacions científiques i econòmiques rigoroses i en estadístiques i indicadors d'àmbit estatal i comunitari, amb el suport de l'Agència europea del medi ambient.

Entre la legislació més important desenvolupada per la Unió Europea relativa a les aigües es troben les directives del Consell sobre:

- la qualitat de les aigües superficials per aigua potable (75/440/CEE) Directiva del Consell (DC), de 16 de juny de 1975;
- la contaminació causada per l'abocament de substàncies perilloses (76/464/CEE) DC, de 4 de maig de 1976;
- la protecció de les aigües subterrànies per contaminació de substàncies perilloses (80/68/CEE) DC, de 17 de desembre de 1979;

- la qualitat de l'aigua destinada al consum humà (80/778/CEE) DC, de 15 de juliol de 1980;
- la recollida, tractament i abocament de les aigües urbanes, i el tractament i abocament de les aigües residuals de diferents sectors industrials, (91/271/CEE) DC, de 21 de maig de 1991. aquesta Directiva ha donat un fort impuls a la depuració de les aigües arreu de la Unió Europea; i
- a més a més, diverses directives relatives a valors límit i objectius de qualitat per a substàncies perilloses (Cd, Hg, hexiclorociclohexà, DDT, ...).

A la Unió Europea la normativa de la descàrrega d'efluents industrials s'està actualitzant contínuament, s'ha prohibit la fabricació i aplicació de detergents no biodegradables i també de colorants tòxics, com els que es deriven de la benzidina. També s'ha reduït progressivament el contingut metàl·lic (Cu, Fe, Co, ...) dels colorants organometàl·lics. En alguns països ja s'aplica la directiva EU 91/271, que obliga a eliminar el color de les aigües residuals abans d'abocar-les.

1.2.2. Legislació espanyola

La legislació sobre aigües residuals espanyola té el seu origen a principis de segle, i es va anar complementant durant els anys 60 i 70. Ara bé, es va fer un gran avanç amb l'aparició de la nova Llei d'aigües 29/1985 de 2 d'agost de l'Estat espanyol, que qualifica l'aigua com un recurs escàs i unitari. Sota aquesta perspectiva es declaren públiques totes les aigües (amb regulació específica per a les aigües minerals i termals), englobant les aigües subterrànies i superficials. Es declara la necessitat de preservar la seva qualitat sobre la base, imprescindible, d'un planificació hidrològica i el reconeixement d'aquest recurs com a bé públic estatal. Segueix aquesta llei el Reial Decret 89/1986 de 11 d'abril que és completat en el Reial Decret 927/1988 de 20 de juliol.

1.2.3. Legislació catalana

La Generalitat de Catalunya va aprovar la Llei 5/1981 del 4 de juny sobre el desenvolupament legislatiu en matèria d'evacuació i tractament d'aigües residuals. S'estableixen en aquesta llei una sèrie de principis (equitat, solidaritat, millora progressiva i rendibilitat), l'organització administrativa (Junta de Sanejament i administracions actuants com la de l'estat o les locals), el finançament de les actuacions (cànon de sanejament) i el Pla de Sanejament. Aquesta llei es complementarà amb el Decret 305/1982, que desenvolupa parcialment la llei.

La Llei 5/1990 de 9 de març d'Infraestructures Hidràuliques de Catalunya estableix el Cànon d'Infraestructura Hidràulica per al finançament de les infraestructures hidràuliques. El Decret 320/1990 de 21 de desembre, defineix les normes específiques del Cànon de Sanejament, l'Increment de la Tarifa de Sanejament (ITS) i sobre el Cànon d'Infraestructures Hidràuliques.

Posteriorment, la Generalitat de Catalunya va crear per Llei 4/1991 de 22 de març el Departament de Medi Ambient i li assignà competències i funcions pel Decret 67/1991 de 8 d'abril.

En el món de la indústria és de molta importància el Decret 286/1992 de 24 de novembre, que modifica el procediment de determinació de l'increment de tarifa de sanejament i el cànon de sanejament per a la mesura directe de càrrega contaminant. En aquest decret s'estableix l'obligatorietat de l'usuari industrial de l'aigua de declarar la seva contaminació davant la Junta de Sanejament.

Actualment està en vigor el Decret 83/1996 de 5 de març sobre les mesures de regularització d'abocaments d'aigües residuals. Es tracta de donar a les empreses una autorització d'abocament provisional per regularitzar els seus abocaments. Prèviament s'ha de presentar un Pla de Descontaminació Gradual (PDG), que consisteix en un projecte subscrit per un tècnic competent en què s'indiquen les mesures i els tractaments per a aquesta descontaminació amb els costos, les fases d'execució i els terminis.

Degut a la regulació dels abocaments, a Catalunya les empreses estan obligades a realitzar la declaració de residus. El Catàleg de Residus de Catalunya classifica i especifica els tractaments idonis per als residus generats, i potencia la minimització i el reciclatge abans d'arribar al tractament i a la disposició final.

Existeixen dues opcions de què disposa a Catalunya per al tractament d'aigües industrials: una primera opció que consisteix en tractar les aigües a la planta depuradora de la indústria per eliminar contaminants específics i després abocar a la xarxa de sanejament. Aquesta alternativa està indicada per efluentes generats en grans cabals i amb contaminants com nutrients, salinitat, color,... El Decret 130/2003 estableix que el color és un paràmetre contaminant difícilment tractable a les EDAR i que la concentració de color límit per a poder ser admès, ha de ser inapreciable en una dilució 1/30 la segona opció s'aplica davant residus difícils de tractar o efluentes molt concentrats i generats en baixes quantitats. En aquest cas els residus són enviats a plantes de tractament de residus centralitzades.

1.3. Procés d'adsorció

1.3.1. Definició

El procés consisteix en l'acumulació de molècules o ions en la superfície que separa dos substàncies (interfase). Les molècules o ions que queden acumulades (adsorbat o solut) són líquids, gasos o vapors, mentre que la substància que adsorbeix (adsorbent) és un sòlid o líquid. La capacitat d'adsorció és funció de la superfície total de l'adsorbent, ja que quant major sigui aquesta superfície es disposa de major número de forces residuals no equilibrades per l'adsorció.

Segons el tipus d'interacció entre l'adsorbat i l'adsorbent, es distingeixen dos tipus d'adsorció:

- **Adsorció física o fisisorció** → és la forma més simple d'adsorció que es produeix exclusivament degut a dèbils forces atractives físiques, generalment forces de Van der Waals. No apareix cap reacció química que acumuli les molècules o àtoms de l'adsorbat sobre la superfície de l'adsorbent. Les calors d'adsorció física són inferiors a 15-30 Kcal/mol.
- **Adsorció química o quimisorció** → quan es forma un enllaç químic, definit en aquest cas com un intercanvi d'electrons. El grau d'intercanvi i la simetria depèn dels materials involucrats. Intervenien forces físiques i reaccions químiques irreversibles entre la superfície de l'adsorbent i l'adsorbat. Les calors solen superar els 20-30 Kcal/mol. La quimisorció és particularment important en la catàlisi heterogènia, la forma més comú a la indústria, on un catalitzador sòlid interacciona amb una flux gasós. L'adsorció a la superfície del catalitzador crea un enllaç químic, alterant la densitat electrònica al voltant de la molècula i permetent reaccions que normalment no es produiran en altres circumstàncies.

1.3.2. Factors que influeixen en l'adsorció

Els factors que influeixen sobre el tipus i la magnitud de l'adsorció d'un determinada espècie sobre la superfície d'un adsorbent són molt diversos. Entre d'ells es pot destacar per la seva importància els següents:

- **Superfície específica** → l'adsorció és un fenomen superficial, per tant, quant major sigui la superfície de l'adsorbent major serà el grau d'adsorció. És per això, per el que els adsorbents utilitzats (carbó actiu, reïnes sintètiques, zeolites, etc.) són sòlids molt porosos amb un gran desenvolupament superficial, que arriben a sobrepassar els 1000 m²/g (alguns carbons activats). Degut a la relació entre la superfície i el grau d'adsorció, la superfície específica dels adsorbents es calcula a partir de mesures d'adsorció, bé en fase gasosa o líquida.
- **Naturalesa de l'adsorbat** → dins de la naturalesa de l'adsorbat es poden distingir varis aspectes importants. El primer d'ells és la solubilitat, quant major sigui aquesta el grau d'adsorció serà menor. La solubilitat està relacionada amb l'estructura del solut: així, s'observa que en series homologues de compostos orgànics el grau d'adsorció augmenta amb la longitud de la cadena. No obstant cal destacar que en el cas d'adsorbents molt microporosos la major part de la superfície específica es troba en porus de petit diàmetre que només es accessible a molècules de petita mida, i per lo tant només aquestes podran adsorbir-se sobre la mateixa.

A més de l'estructura de la molècula també és de gran importància la presència de grups funcionals que poden interaccionar amb altres grups polars de l'adsorbent donant lloc a l'adsorció específica.

Així mateix, s'ha de tenir en compte la naturalesa iònica de l'adsorbat. La major part dels compostos presents a les aigües residuals són fàcilment ionitzables. Aquest factor és de gran importància ja que el carbó porta associat habitualment una càrrega superficial neta negativa.
- **pH** → l'efecte del pH en el grau d'adsorció és important degut a que una part dels ions hidroxil s'adsorbeix bastant fortament, i per altre banda afecta al grau de dissociació de l'adsorbat, sent aquest fet d'especial importància en el cas dels contaminants fenols.

No obstant s'ha de tenir en compte que aquest factor no influeix per igual en tots els adsorbats i adsorbents pel que cal determinar-se sempre experimentalment.

- **Naturalesa de l'adsorbent** → aquest és un dels factors més importants al ser causa principal del fenomen de l'adsorció. Els factors més determinants són per un costat la naturalesa química de la superfície, que influeix en els enllaços que es formen entre l'adsorbat i l'adsorbent, i per altre banda les característiques estructurals del mateix, en especial: superfície específica distribució de volum de porus i mida de les partícules d'adsorbent (aquest últim influeix en la velocitat del procés global d'adsorció).

- **Naturalesa del dissolvent** → el dissolvent és altre dels factors a tenir en compte en l'adsorció sòlid-líquid, encara que es poden distingir dos aspectes diferents:

Naturalesa química del dissolvent: influeix en les interaccions amb l'adsorbent i amb el solut, tant en la dissolució (solubilitat) com la fase adsorbida. El grau d'adsorció d'un adsorbat variarà segons el dissolvent en el que es trobi dissolt. Degut a la importància del dissolvent en el fenomen de la adsorció, s'ha fet inclòs una classificació dels dissolvents depenent de la seva capacitat per a formar ponts d'hidrogen.

Tensió superficial del dissolvent: dins de la influència de la tensió superficial es poden distingir dos factors. Per una banda, s'observa que segons l'isoterma de Gibbs els adsorbats que disminueixen la tensió superficial tendeixen a acumular-se a la interfase, amb el que l'adsorció es veurà afavorida; mentre que per altre banda, la tensió superficial influeix en el contacte entre el sòlid i el líquid, i per lo tant determinarà la superfície eficaç per a l'adsorció.

- **Temperatura** → l'adsorció normalment és un fenomen exotèrmic amb el que en augmentar la temperatura es veurà desfavorida, si bé com les entalpies d'adsorció solen ser petites, les variacions amb la temperatura no són molt grans. Per això millor mantenir la temperatura constant, per evitar variacions del procés d'adsorció.

- **Competència entre adsorbats** → la competència entre adsorbats és de gran importància, ja que suposa una alteració en les capacitats d'adsorció i, fins i tot, en la velocitat del procés global d'adsorció. Normalment quant més similars són els adsorbats els efectes competitius són lògicament menors.

1.3.3. Isotermes d'adsorció

L'isoterma d'adsorció és la representació gràfica dels valors relatius a l'adsorció a una temperatura constant. Les relacions d'equilibri entre adsorbent i adsorbat es descriuen mitjançant les isotermes d'adsorció. S'estableix l'equilibri d'adsorció quan la concentració de contaminant remanent es troba a l'equilibri dinàmic amb la que hi ha present a la superfície del sòlid. Les dades es poden obtenir en assaigs discontinus de laboratori com els realitzats en el present projecte explicats a l'apartat 4.

A continuació es descriuen alguns models, a partir dels quals s'obtenen relacions entre el recobriment i la concentració a la dissolució:

1.3.3.1. Llei de Henry

Aquesta llei es basa en la suposició que la quantitat de solut adsorbida és directament proporcional a la seva concentració en el fluid. Aquesta situació vindria descrita per la llei de Henry, de forma anàloga a la isoterma de solubilitat de gasos en líquids, i representaria una isoterma lineal. Aquest model només és aplicable per sistemes molt diluïts, en els quals la interacció entre les diferents molècules de solut a adsorbir és nul·la, i no és gaire utilitzat, ja que pocs sistemes resulten ser tan simples.

1.3.3.2. Isoterma de Langmuir

A l'isoterma de Langmuir es suposa que el solut s'adsorbeix com una pel·lícula monomolecular a la superfície de l'adsorbent. És un model senzill que s'ajusta bé als resultats experimentals obtinguts en un bon nombre de sistemes reals, per això és l'isoterma més freqüentment utilitzada. Aquest model es basa en algunes suposicions:

- La superfície del sòlid conté un nombre fix de llocs d'adsorció.
- Cada lloc està ocupat per una molècula de solut.
- L'entalpia d'adsorció, és a dir, el calor que es desprèn durant l'adsorció, i que reflexa la força de les interaccions sòlid-solut, no depèn de la fracció de superfície recoberta.
- No existeix interacció entre molècules adsorbides en llocs diferents. Per consegüent, la probabilitat d'ocupació d'una molècula en un lloc no depèn de si els llocs veïns estan o no ocupats.

L'isoterma ve donada per l'equació 1.1:

$$X/M = KbC_e/(1 + KC_e)$$

Equació 1.1

- $X \rightarrow$ pes del solut adsorbit (adsorbat) (mg)
- $M \rightarrow$ pes d'adsorbent (g)
- $K \rightarrow$ constant d'equilibri (cm^3 d'adsorbent/mg d'adsorbat)
- $C_e \rightarrow$ concentració d'equilibri del solut (mg/l)
- $b \rightarrow$ constant que representa el recobriment en monocapa per unitat de pes d'adsorbent (mg d'adsorbat/g d'adsorbent)

L'equació 1.1 es pot escriure també en forma lineal agafant els inversos d'ambdós membres:

$$M/X = (1/Kb) (1/C_e) + (1/b)$$

Equació 1.2

La representació de M/X en funció de $1/C_e$ segons l'equació 1.2 porta a una línia recta, que permet la determinació dels paràmetres K i b a partir de la pendent i de l'ordenada a l'origen, respectivament.

1.3.3.3. Isotherma de Freundlich

L'isoterma de Freundlich s'expressa per l'equació:

$$X/M = k C_e^{1/n}$$

Equació 1.3

A l'equació 1.3, X/M i C_e tenen el mateix significat que a l'isoterma de Langmuir, i k i n són constants. La constant k dóna una mesura de la capacitat d'adsorció de l'adsorbent i n , que sempre és major que 1, reflexa la intensitat d'adsorció. L'equació es pot escriure en forma lineal agafant logaritmes d'ambdós membres:

$$\log (X/M) = (1/n) \log C_e + \log k$$

Equació 1.4

Aquesta equació indica que una representació logarítmica de X/M en funció de C_e condueix a una línia recta que permet la determinació dels paràmetres n i k a partir de la pendent i de l'ordenada per $C_e = 1$.

Un defecte d'aquesta isoterma en relació a la de Langmuir, és que no prediu que el sòlid pugui arribar a un estat de saturació.

1.3.3.4. Isoterma d'adsorció BET

El model BET¹ suposa que les capes de molècules s'adsorbeixen a la part superior de molècules prèviament adsorbides, Cada capa s'adsorbeix d'acord amb el model de Langmuir. L'isoterma BET s'expressa mitjançant l'equació:

$$\frac{X}{M} = \frac{bkC_e}{(C_s - C_e)[1 + (k - 1)C_e / C_s]} \quad \text{Equació 1.5}$$

La constant b té el mateix significat que a l'isoterma de Langmuir i k és una constant que es relaciona amb l'energia d'adsorció. C_s és la concentració de solut a saturació en totes les capes. La representació de les dades isotèrmics, seguint el model BET, condueix a una corba en forma de S.

A partir de la representació pot estimar-se el valor de C_s . L'equació 1.5 es pot reagrupar en forma lineal com:

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)(X / M)} = \frac{1}{kb} + \left(\frac{k - 1}{kb} \right) \left(\frac{C_e}{C_s} \right) \quad \text{Equació 1.6}$$

Aquesta equació indica que la representació de $C_e/[(C_s - C_e)(X/M)]$ en funció de C_e/C_s portaria a una línia recta. Poden estimar-se les constants k i b a partir de la pendent i de l'ordenada a l'origen d'aquesta línia.

¹ BET correspon a les inicials de Brunauer, Emmet i Teller que van desenvolupar aquest model.

1.4. Eliminació del color en les aigües residuals

Els colorants tenen un grau d'esgotament limitat; això vol dir que una part va a parar a les aigües residuals i els aporta coloració. Els tractaments de depuració convencionals eliminen una part dels colorants. La decantació primària elimina elevades proporcions de colorants dispersos insolubles i de tina, mentre que el tractament per fangs activats s'ocupa d'eliminar, principalment per adsorció, bona part dels productes de tinció bàsics solubles i dels colorants directes. Tanmateix, cap d'aquests tractaments gaudeix d'una alta efectivitat per eliminar colorants reactius i àcids i, a més a més, tampoc intervé sobre alguns colorants quan es troben en combinació amb d'altres. Destacar que els tractaments de depuració convencionals no són suficients per eliminar els colorants i s'ha de recórrer a altres tipus de solucions.

Per solucionar el problema del color i minimitzar els impactes ambientals es proposa reduir la contaminació i reutilitzar les aigües residuals. Les accions que es realitzen es classifiquen segons el seu cost i efectivitat i es detallen a continuació:

- a) **Tècniques de prevenció de la generació de contaminació** → han demostrat ser un mètode efectiu per millorar l'eficiència del procés, per incrementar els beneficis de l'empresa i per minimitzar l'impacte ambiental del procés. En cada cas on s'implementen aquestes tècniques, s'han de tenir en compte les condicions específiques, cada opció i cada canvi s'ha d'examinar i s'ha de saber com afectarien aquests canvis al medi ambient. A continuació es descriuen breument algunes tècniques:

Control de qualitat de les matèries primeres: les empreses tèxtils poden reduir les emissions d'aigua contaminada treballant per trobar substituïts de les matèries primeres que siguin menys contaminants. Analitzar les possibles matèries primeres és una pràctica molt important per determinar les interaccions amb el procés, substrats, i altres productes químics i possiblement reduir els residus.

Substitució de productes químics: el tractament final dels productes tèxtils és químicament intensiu, per aquesta raó s'ha de dedicar una atenció especial a la secció dels productes químics utilitzats en el procés tèxtil. Les accions possibles a realitzar són: substitució de productes químics i colorants per altres menys contaminants i substitució dels tractaments químics per processos mecànics o altres tractaments no químics.

Modificació del procés: l'optimització del procés es pot obtenir modificant algunes operacions. Una possible modificació seria la substitució de les màquines de tenyit per d'altres que utilitzin menor relació de colorant en el bany de tenyit, que permetin estalviar energia, aigua, colorants i productes químics. També l'optimització de les condicions del procés, com temperatura i temps. I per últim la combinació d'operacions com per exemple estovat i blanquejat de les fibres, per estalviar energia i aigua.

Modificació dels equips: una manera efectiva de reduir els residus és modificar o reemplaçar equipament i introduir automatitzacions, per exemple un sistema de dosificació del colorant automatitzat, controladors de paràmetres com pH, temperatura o color en la màquina de tenyit, etc.

Bones pràctiques d'operació: la introducció dels procediments de prevenció de la contaminació, que inclouen la investigació en la prevenció de la contaminació, nou disseny de les instal·lacions, i programes de formació per als treballadors, és una bona opció per prevenir la contaminació sense canviar el procés industrial.

- b) **Reutilització i reciclatge d'aigua i productes químics en efluentes provinents d'operacions específiques dins del procés general** → el reciclatge (amb el significat de reutilització de l'aigua i productes químics en el mateix procés on s'han generat els efluentes que es reutilitzen), quan es pot aplicar, pot suposar un estalvi no només d'aigua i productes químics, sinó també un estalvi energètic. Un exemple és la reutilització dels banys calents esgotats de tinció per més lots de tinció. Com a conseqüència, per respectar les característiques requerides pel següent cicle de tinció, el bany s'ha de reconstruir afegint aigua, productes químics auxiliars, i colorants.

La majoria d'exemples de reutilització d'aigua sense tractament previ estan basats en la recuperació de l'aigua utilitzada en l'operació d'esbandit. L'implementació del rentat en contracorrent pot reduir significativament el total d'aigua consumida. Aquest procés s'utilitza molt en els sistemes en continu. Per tal d'optimitzar l'ús total d'aigua s'ha de realitzar un anàlisi de les xarxes d'aigua i avaluar noves opcions de tractament i reutilització d'aigües. El tractament que es requereix pels efluentes provinents d'operacions específiques dins del procés general tèxtil està basat en la possibilitat d'aplicar tractaments eficients, segurs, econòmicament viables i de fàcil implementació a aquests corrents residuals individualitzats. Utilitzant operacions adequades de tecnologia de membranes es poden obtenir bons resultats.

Per últim, però no menys important, s'ha d'avaluar si els contaminants són transferits de l'aigua a l'aire o de l'aigua al sòl, això es pot realitzar mitjançant un anàlisi de cicle de vida (ACV). Aquesta metodologia integrada de multicriteri, conjuntament amb una regulació efectiva, s'espera que contribueixi a la competitivitat de les indústries tèxtils i a atenuar els efectes negatius de la globalització en la indústria tèxtil a Europa.

- c) **Reutilització i reciclatge d'aigua al final del procés** → el tractament dels efluents finals per a la reutilització i reciclatge de l'aigua també poden ser efectius i viables econòmicament en alguns casos. A Europa hi ha àrees que es poden definir com districtes tèxtils, on moltes indústries tèxtils, principalment petites i mitjanes empreses utilitzen les mateixes instal·lacions de subministrament i tractament d'aigües.

Actualment la descontaminació d'aquests efluents generalment implica una planta de tractament centralitzada per a aigües industrials i municipals utilitzant una etapa biològica aeròbia. Alguns compostos són totalment biodegradats, mentre que altres com colorants, surfactants i altres metabòlits, o bé són adsorbits sobre la biomassa, o bé surten amb l'efluent final. Les aigües residuals tèxtils contenen pocs compostos orgànics biodegradables, almenys sota condicions aeròbies, i poden contenir compostos tòxics, sovint poc biodegradables. Això fa que un tractament aerobi tradicional presenti serioses limitacions per a la depuració de les aigües residuals de la indústria tèxtil.

S'han proposat diferents processos combinats per millorar les actuals plantes de tractament d'aigües residuals de la indústria tèxtil. Un d'ells consisteix en realitzar un pretractament: un mòdul per la precipitació química de metalls pesats i adsorció de colorants sobre fangs anaerobis. Un altre és la millora del tractament biològic per eliminar productes orgànics biodegradables, per oxidar compostos de nitrogen i per monitoritzar la toxicitat potencial. En aquest procés s'afegeix biomassa aclimatada i nutrients per augmentar l'activitat biològica. Per últim s'ha proposat l'optimització del tractament terciari, per portar l'aigua cap a als estàndards requerits per la seva reutilització industrial. El post-tractament dels efluents mixtes i domèstics s'han provat amb èxit en els següents processos unitaris: ozonització, floculació/clarificació, filtració, adsorció sobre carbó actiu, microfiltració i osmosis inversa.

A més de la minimització dels impactes ambientals cal aplicar tècniques de tractament terciari a les aigües residuals per aconseguir reduir la coloració final dels efluents. Aquestes tècniques s'utilitzen individualment o una combinació d'aquestes, com és un tractament important per eliminar el color de les aigües, a continuació s'expliquen les diferents tècniques amb detall:

1.4.1. Coagulació-floculació

S'empra com a tractament terciari per eliminar el color dels efluents tèxtils un cop tractats en la depuradora. Els resultats poden ser bons, però depenen dels colorants emprats i dels reactius de coagulació-floculació i les dosificacions d'aquests reactius. Cal afegir polielectròlit en excés per adquirir el major rendiment de la reacció i possibilitar la reacció de les molècules menys reactives.

1.4.2. Tractament amb ozó

L'ozó (O_3) és un gas molt inestable que té un gran poder d'oxidació a través dels radicals hidroxils que origina, per la qual cosa té un important efecte d'eliminació de microorganismes i la capacitat d'oxidació de la matèria orgànica. L'ozó s'obté mitjançant l'acció ionitzant d'un camp elèctric sobre un corrent d'aire sec o oxigen. El camp elèctric és creat per dos elèctrodes que originen una diferència de potencial alterna d'entre 10.00 i 20.000 volts.

El tractament per ozó consta d'un sistema de dessecació de l'aire per tal d'evitar el deteriorament dels elèctrodes i un elevat consum elèctric. Consta també d'un generador d'ozó que ha d'estar proveït d'un sistema de refrigeració que dissipï la calor provocada per efecte Joule en els elèctrodes. Finalment, el sistema ha de preveure una cambra de contacte entre l'aigua i l'ozó. La dosi d'ozó és molt variable i depèn de la càrrega contaminant de l'aigua. El consum energètic s'avalua entre els 20 i 30 W/g O_3 generats. Elimina el color de l'efluent a base de trencar enllaços de les molècules de tint i forma espècies no colorades. És un sistema adient per a grans volums d'efluent i força ràpid i té l'avantatge de reduir al mateix temps la DQO (Demanda Química d'Oxigen). Tanmateix, té l'inconvenient de formar espècies tòxiques, la qual cosa fa que, junt amb la falta d'informació existent, s'hagi d'estudiar amb detall la seva aplicació.

1.4.3. Tecnologia de membranes

S'inclouen la microfiltració per membranes, la ultrafiltració, la nanofiltració, l'electrodialisi i l'osmosi inversa. Es descarten la microfiltració i la ultrafiltració, ja que la mida de la molècula de colorant és inferior al porus de la membrana i, per tant, no hi queden retingudes. Quant a la resta de tecnologies, sí que són eficaces en la retenció dels colorants i d'altres productes. Tenen l'inconvenient que el colorant, tot i estar concentrat en el rebuig, suposa un volum considerable que s'ha de tractar de forma especial mitjançant tractaments tèrmics molt costosos, un altre inconvenient és l'embrutament de les membranes que pot conduir a la seva colmatació i per tant fer-les inservibles. En aquests casos cal prendre les mesures preventives com pretractaments i cicles de rentatges.

1.4.4. Adsorbents industrials

Els adsorbents industrials es poden classificar en tres grans grups: carbons activats, adsorbents polimèrics sintètics (reïnes) i tamisos moleculars (zeolites). Els adsorbents més utilitzats a la pràctica són els carbons activats, però l'elecció del tipus d'adsorbent es deu fer en funció de les característiques particulars de cada sistema. De totes maneres, hi ha generalitats per l'ús del tipus d'adsorbent. Per exemple, els tamisos moleculars es solen utilitzar en la separació de dissolucions o mescles no aquoses, generalment hidrocarburs, mentre que en el tractament de dissolucions aquoses s'utilitza tant els adsorbents polimèrics com els carbons activats. En el tractament d'aigües es sol utilitzar amb preferència els carbons activats degut a que posseeixen majors capacitats d'adsorció i menor cost.

1.4.4.1. Carbó actiu

El carbó activat és el millor adsorbent d'ús general per a la reducció de molts compostos orgànics i alguns inorgànics de l'aigua i d'aigües residuals.

Per la seva gran importància i per ser l'utilitzat en el present projecte es desenvolupa amb més detall a l'apartat 1.5.

1.4.4.2. Reïnes sintètiques

Són adsorbents sintètics preparats per polimeració en suspensió d'un monòmer i un agent reticulant, en presència d'un dissolvent capaç de solubilitzar els monòmers i altres compostos que catalitzen la reacció. Aquests adsorbents tenen un camp d'aplicacions més restringit que el carbó actiu. Es solen denominar com reïnes macroreticulars per ser altament poroses i amb una elevada superfície específica.

Les característiques més importants de les reïnes des del punt de vista de la seva utilització com adsorbents són:

- Són fàcils de regenerar per desorció amb un dissolvent apropiat, el que permet recuperar l'adsorbat quan sigui útil.
- No es produeixen adsorcions irreversibles.
- Es pot modificar la distribució de mida de porus durant el procés de fabricació variant la proporció d'agent reticulant.
- Presenta una major varietat de polaritats, segons el tipus, el que es tradueix en una major selectivitat.
- Presenten en general menor àrea superficial que els carbons activats, entre 100 i 750 m²/g.

Les reïnes presenten una menor capacitat d'adsorció que els carbons activats, en especial a baixes concentracions. Això motiva, juntament amb el seu preu, que s'utilitzin principalment quan interessa recuperar l'adsorbat, al ser més fàcilment regenerables que els carbons.

1.4.4.3. Tamisos moleculars: zeolites

Les zeolites són sòlids cristal·lins microporosos, químicament es tracten d'aluminosilicats, però existeixen altres varietats. Així per exemple, existeixen zeolites que només estan constituïdes per sílice.

Es caracteritzen per tenir una distribució de mida de porus molt estreta, el que li dóna una elevada selectivitat com adsorbents. Això fa que s'utilitzin en separacions, com tamisos moleculars. Cal destacar que la polaritat de les zeolites depèn de la relació sílice-alúmina, augmentant el caràcter hidròfob a mesura que augmenta la proporció del sílice.

Normalment les zeolites s'utilitzen en l'adsorció en fase gasosa, principalment a l'adsorció de gasos de petita mida molecular. Destacar que normalment aquests adsorbents presenten capacitats d'adsorció menors que el carbó i les reïnes.

1.5. Adsorció en carbó actiu

El carbó actiu és una forma amorfa del carbó amb una estructura microcristal·lina de tipus grafitic. Aquesta estructura està formada per una sèrie de plans paral·lels de carbons, que es troben agrupats formant hexàgons regulars. L'elevat grau de porositat que posseeix es desenvolupa durant el procés de fabricació, sent aquesta porositat, junt amb l'elevada àrea superficial, la que confereix les seves excel·lents propietats com adsorbent.

1.5.1. Preparació del carbó actiu

Les matèries primes per a la fabricació de carbó activat són molt diverses. Les més habituals són substàncies d'origen biològic, encara que també es poden utilitzar carbó o residus de la indústria petrolífera. Normalment es procura utilitzar matèries de poc valor com residus agrícoles (pellofa de nou, coco, etc.). Per a la fabricació de carbons activats amb propietats de tamisos moleculars s'utilitzen normalment polímers com PVC, alcohol, cel·lulosa, etc. Les propietats dels carbons activats dependran en gran mesura de les matèries primes utilitzades, d'aquí la gran importància d'escollir una matèria prima adequada dependent de l'aplicació futura del carbó.

En el procés de fabricació de carbó actiu es distingeixen dues etapes:

- **Carbonització** → es produeix la descomposició per piròlisi del material de partida. Es sol portar a terme en absència d'aire i es produeix l'eliminació de la major part dels compostos no carbonosos. Els àtoms de carbó elemental s'agrupen en formacions cristal·lines anomenades cristalls grafitics elementals o microristalls.
- **Activació** → en aquesta etapa es formen els forats que constitueixen els porus i que són els que proporcionen al carbó les seves propietats. Una bona activació condueix a una elevada àrea superficial, i per lo tant a una capacitat d'adsorció elevada. Dins d'aquesta etapa es distingeixen dos processos depenent de la forma en que es porti a terme.
 - o Activació física: també anomenada tèrmica. En aquest cas es produeix una oxidació a elevada temperatura (del ordre de 1000°C) en presència de vapor d'aigua, aire o CO₂. Durant l'oxidació es crema el carbó desorganitzat que no ha format microcristalls, obrint-se els porus tancats o bloquejats. La porositat dels carbons preparats mitjançant activació física és el resultat de la gasificació

del material carbonitzat a temperatures elevades. Normalment es porta a terme en dues etapes, la carbonització del precursor i la gasificació controlada del precursor del carbonitzat. A la carbonització s'eliminen elements com l'hidrogen i l'oxigen del precursor, per a donar lloc a un esquelet carbonós amb una estructura porosa rudimentària. Durant la gasificació el carbonitzat s'exposa a una atmosfera oxidant (vapor d'aigua, diòxid de carboni, o una barreja d'ambdós) que elimina els productes volàtils i àtoms de carboni, augmentant el volum de porus i la superfície específica.

- o Activació química: en aquest cas és necessari un sol forn. El precursor, normalment un material lignocel·lulòsic com fusta, s'impregna amb un agent químic, preferentment àcid fosfòric (encara que també es pot utilitzar clorur de cinc), i el material impregnat s'escalfa en un forn a 500-700°C. Els agents químics utilitzats redueixen la formació de material volàtil i quitrans, augmentant el rendiment en carboni. El carbó resultant es neteja profundament per a eliminar les restes de l'agent químic usat en la impregnació. Addicionalment, aquests carbons activats poden ser activats tèrmicament per gasificació parcial amb diòxid de carboni o vapor d'aigua. D'aquesta forma ha estat possible aconseguir carbons activats amb molt elevades àrees superficials.

1.5.2. Formes del carbó actiu

Després del procés d'activació, el carbó es pot separar o dividir en diferents mides amb distintes capacitats d'adsorció. Els tres tipus de classificació són:

- **Carbó actiu en pèl·lets** → forma cilíndrica i distorsionada amb un diàmetre entre 0,8 i 5 mm. S'utilitza especialment per aplicacions en fase gas per la seva poca caiguda de pressió, per la seva elevada força mecànica i pel seu baix contingut en pols.
- **Carbó actiu granular (GAC)** → partícules de forma irregular i amb una mida que pot oscil·lar entre els 0,2 i els 5 mm. S'utilitza principalment en aplicacions de fase líquida o gasosa. S'utilitza en petites instal·lacions de llit fix (en contenidors en forma de columna, a través dels quals es fa circular l'aigua que es vol tractar), sent relativament fàcil la seva regeneració, sobre tot tèrmicament, fent-se

necessari de disposar de dos columnes (una en servei i altre en reserva per a la seva regeneració).

- **Carbó actiu en pols (PAC)** → carbó polvoritzat amb una mida predominantment inferior a 0,18 mm. S'utilitza en aplicacions de fase líquida i per tractament de gasos humits. S'utilitza en grans instal·lacions i es treballa barrejant-se íntimament en un reactor agitat i es separat posteriorment per floculació o filtració, sent en aquest cas molt més difícil la seva manipulació.

No hi ha un sol tipus de carbó activat que resulti ser el millor per a totes les aplicacions. El de base fusta és molt macroporós i és excel·lent per la reducció de color (molècules grans), però usualment s'aplica PAC, ja que el carbó activat granular GAC base fusta és massa suau per a resistir a una operació de columna. D'igual manera, el GAC de closca de coco és molt dura i resistent a la cremada, però degut a la seva microporositat tindria una funció pobre en una aplicació de decoloració.

1.5.3. Reactivació del carbó actiu

El gran avantatge del carbó actiu com adsorbent és la possibilitat de reactivació (fins a 30 vegades o més) sense pèrdua apreciable de poder d'adsorció. Usualment la reactivació es porta a terme escalfant el carbó esgotat fins 930°C aproximadament en una atmosfera aire-vapor (reactivació tèrmica). Aquesta operació pot realitzar-se en forns de llar múltiples o en forns rotatius. Els productes orgànics adsorbits es cremen i el carbó actiu es restaura bàsicament fins la seva capacitat inicial d'adsorció.

La viabilitat econòmica de l'aplicació del carbó activat depèn de l'existència d'un procediment eficaç de regeneració i recuperació, una vegada esgotada la seva capacitat d'adsorció. El carbó activat granular es regenera fàcilment per oxidació de la matèria orgànica i posteriorment l'eliminació de la superfície del carbó en un forn. En aquest procés es destrueix part del carbó, entre un 5 i un 10%, i es necessari substituir-lo per carbó nou o verge. Cal destacar que la capacitat d'adsorció del carbó regenerat és lleugerament inferior a la del carbó verge. El carbó actiu es pot regenerar de diferents maneres:

Una vegada que el carbó activat ha estat saturat amb els components que ha d'adsorbir en una aplicació industrial, pot ser regenerat mitjançant una sèrie de processos, recuperant el seu estat original. Els avantatges de la regeneració són, principalment, la reducció del cost per a l'usuari i la minimització considerable del problema d'eliminació o emmagatzematge del material gastat. La regeneració pot

realitzar-se “in situ”, en la pròpia instal·lació de l'usuari o, més freqüentment, en els sistemes de regeneració dels propis fabricadors. El mètode més simple de regeneració és la desorció de les substàncies adsorbides per tractament tèrmic o per desgasificació. El procediment més comú consisteix en fer passar un corrent de vapor d'aigua sobreescalfat o de gas inert a alta temperatura a través del llit de carbó, sent la base del procés de recuperació de dissolvents i del sistema PSA (pressure swing adsorption) utilitzat en la separació de barreges de gasos. En alguns casos la regeneració s'ha de portar a terme en condicions d'activació per a descomposar i desorbir les substàncies adsorbides i és a la pràctica una reactivació. Encara que és cert que avui en dia és possible regenerar qualsevol tipus de carbó activat, la regeneració està en aquest moment gairebé restringida al carbó granular, pel seu menor cost, perquè en el cas del carbó en pols les pèrdues de material poden ser massa elevades. A la taula 1.2 es recullen els principals processos de reactivació del carbó.

Taula 1.2. Principals processos de reactivació del carbó actiu

PROCÉS	DESCRIPCIÓ	AVANTATGES	DESAVANTATGES
TÈRMIC	S'escalfa amb una corrent de gas a un forn múltiple xemeneia típic a una T entre 850-1000° C.	- Per a fases gas o líquida. - Espècies fortament adsorbides. - Recuperació de substàncies en alta concentració.	- Elevat cost. - Altes temperatures: no pot ser in situ. - No és útil en cicles ràpids. - Pèrdua de capacitat.
BIOLÒGIC	El carbó activat conté bacteries en els seus macroporus.	- Major temps de vida del carbó activat. - Major eficàcia en la reducció de matèria orgànica.	- L'activitat biològica sense control dona lloc a una superpoblació de biomassa, i es necessita una forta desinfecció posterior.
EXTRACCIÓ AMB DISSOLVENT	Desplaçament de la substància adsorbida mitjançant una corrent líquida o gasosa.	- Cicles ràpids. - Només hi ha pèrdua de capacitat en els primers cicles.	- No hi ha destrucció del contaminant. - Elecció difícil del dissolvent - Dissolvents: són cars i solen ser nocius.

1.5.4. Altres característiques

Els carbons activats es poden classificar en funció de la distribució de la mida de porus en: carbons activats adsorbents de gasos, i adsorbents de líquids. La diferència entre aquests dos, és que el primer grup està format principalment per microporus (radi inferior a 1 nm) i macroporus (superior a 25 nm), mentre que el segon posseeix una elevada proporció de mesoporus (entre 1 i 25 nm).

L'àrea superficial del carbó activat depèn de les matèries primes utilitzades i el procés seguit en la seva fabricació. En general aquesta varia entre 450 i 1500 m²/g. El grau típic de carbó per a tractament d'aigua té una àrea de superfície de 900 a 1100 m²/g.

El tractament de l'aigua residual amb carbó actiu sol estar considerada com un procés per refinar aigües que ja han rebut un tractament biològic normal. En aquest cas el carbó s'utilitza per eliminar part de la matèria orgànica dissolta. Així mateix, és possible eliminar part de la matèria particulada també present, depenent de la forma en que entren en contacte el carbó i l'aigua.

És una tècnica aplicada extensament per a l'adsorció de compostos, s'adsorbeixen bastant bé i poden tenir rendiments de decoloració del 95%. Però té l'inconvenient que les molècules són massa grans i inertes per ser desadsorbides amb facilitat. Això implica que la regeneració del carbó actiu només es pot fer per incineració, la qual cosa resulta molt costós, atès els grans cabals d'aigua que s'ha de tractar, i per tant el volum de carbó actiu necessari.

El tractament d'aigües mitjançant l'adsorció amb carbó actiu també s'aplica per a la potabilització d'aigües.

2. OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest projecte és estudiar la capacitat d'adsorció del colorant comercial Gris Lanaset G en carbó actiu granular (GAC) amb ref. CAL FE03204C de Chemviron Carbon.

Per assolir aquest objectiu general, es defineixen uns objectius més específics:

- Estudiar l'adsorció en discontinu
 - o Determinar l'equilibri per a diferents proporcions de colorant/adsorbent i ajustar les dades experimentals a una isoterma adsorció
 - o Comparar l'eficàcia d'adsorció d'aquest carbó respecte altres adsorbents
 - o Comparar l'eficàcia d'eliminació d'un altre colorant més simple sobre aquest carbó
- Estudiar l'adsorció en columna operant en continu
 - o Determinar la corba de ruptura i el temps de ruptura corresponent al 70 % d'eliminació d'una solució de 150 mg/l de colorant Gris Lanaset G en diferents columnes de carbó.
 - o Analitzar els resultats i valorar les dificultats de l'operació en continu
- Avaluació econòmica
 - o Avaluar el cost del funcionament del procés d'adsorció en carbó actiu granular per volum d'aigua tractada per aquelles condicions de treball sota les quals assoleix el 90% d'eliminació de colorant tèxtil d'una solució inicial de 150 mg/l de Gris Lanaset G.
 - o Comparar el cost econòmic d'aquest carbó amb un altre tipus d'adsorbent.

3. MATERIALS I MÈTODES

3.1. Materials

3.1.1. Carbó actiu

El carbó actiu utilitzat és Carbó Actiu Granular (GAC) amb ref. CAL FE03204C de Chemviron Carbon, cedit generosament per Aguas de Levante, S.A. El full adjunt amb les característiques es troba a l'Annex I.

3.1.2. Colorants

Els colorants utilitzats són el Gris Lanaset G i l'Orange G. El Gris Lanaset G és una mescla comercial de colorants, alguns d'ells són complexos organometàl·lics amb presència de crom i cobalt. També es sap que està format per 4 colorants diferents, però no es coneix ni la proporció de cadascun d'ells ni les seves estructures. Es distribueix per CIBA i la seva composició no està disponible. La fitxa de seguretat es troba a l'Annex III.

L'Orange G és un colorant azo de naturalesa àcida i la seva estructura sí que es coneix i es pot veure a la figura 3.1. Les seves característiques bàsiques es mostren a la taula 3.1.

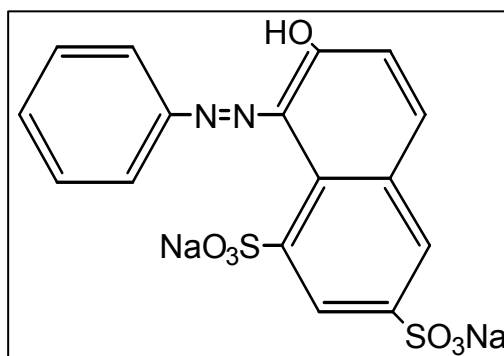


Figura 3.1. Estructura del colorant Orange G

Taula 3.1. Característiques bàsiques del colorant Orange G.

Nom comú	Orange G
I.C número	16230
I.C nom	Àcid Orange 10
Classificació	"Azo"
Ionització	Àcid
Solubilitat en aigua	10,86%
Longitud màxima absorció (nm)	478
Fórmula empírica	C ₁₆ H ₁₀ N ₂ O ₇ S ₂ Na ₂
Pes molecular (g/mol)	452,386
Casa comercial	SIGMA (O-3756)

3.2. Mètodes analítics

La concentració de colorant es determina mitjançant la mesura d'absorbància a una longitud d'ona determinada, que correspon amb aquella dominant de cada colorant, en la qual es troba un pic, és a dir, longitud d'ona d'absorció màxima. La mesura es fa amb un espectrofotòmetre, Philips model PU 8620 UV/VIS/NIR. Es fan servir cubetes de vidre d'1 ml de volum.

La longitud d'ona màxima del colorant Gris Lanaset G és de 590 nm, que s'utilitza com a mesura del color. Un calibratge d'absorbància a 590 nm versus la concentració permet determinar la concentració de colorant en cada mostra a partir de la mesura d'absorbància. La recta de calibratge d'aquest colorant es troba a l'Annex IV.

En canvi, el colorant Orange G té la seva longitud d'ona d'absorció màxima a 478 nm, es pot veure la recta de calibratge a l'Annex V.

3.3. Muntatge i metodologia experimental

3.3.1. Experiments en discontinu

Per determinar la capacitat adsorbent del carbó actiu granular es realitzen diferents experiments en discontinu. En aquest tipus d'experiments el carbó actiu està en contacte amb l'aigua residual en un tanc agitat. En un vas de precipitat de 600 ml es posen 260 ml de solució de colorant Gris Lanaset G entre 100 i 200 mg/l amb una concentració determinada de carbó, aquesta oscil·la entre 0,823 i 7 mg/l. La solució de colorant es prepara en un matràs aforat de 250 ml, els altres 10 ml de la solució corresponen als 10 ml que es posen en contacte amb el carbó actiu durant 10 minuts per tal d'obrir els porus i facilitar l'adsorció del colorant. La solució s'agita amb un agitador magnètic, els experiments es realitzen a una cambra termostatitzada a 25°C.

S'agafa mostra a la solució sense carbó actiu, a l'instant que entra en contacte el colorant amb el carbó i després cada 10 minuts. Es mesura l'absorbància de les mostres i una vegada aquesta s'estabilitza, la presa de mostra es realitza més espaiadament.

Es realitza el mateix procediment pels experiments amb el colorant Orange G, la concentració del colorant oscil·la entre 30 i 170 mg/l i la de carbó actiu entre 1 i mg/l.

3.3.2. Experiments en continu

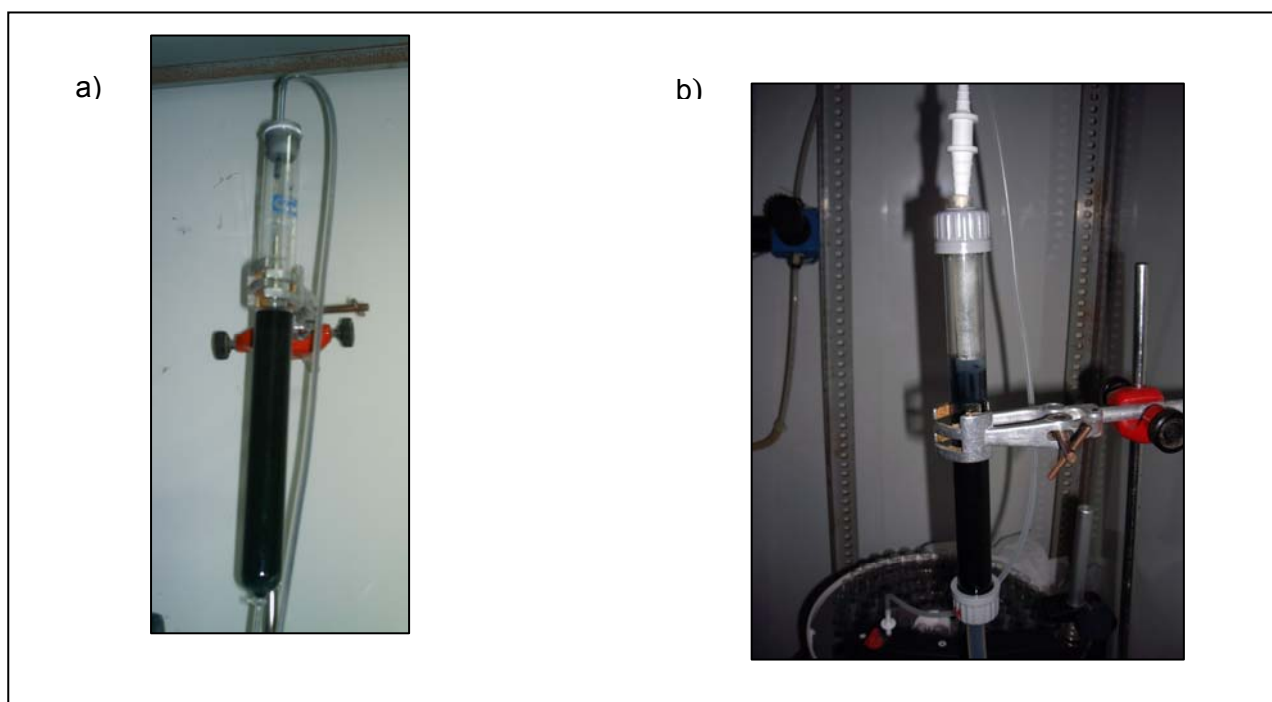
Es realitzen experiments en continu de dues maneres diferents, o sentit descendent de l'influent pel pas de la columna o bé sentit ascendent.

Pels experiments en sentit descendent l'operació continua es dur a terme mitjançant una columna de 30 cm d'alçada i de 2,1 cm de diàmetre (imatge 3.2 a)) que conté una determinada quantitat de carbó granulat (11,02 o 22,63 g), aquest ocupa una alçada determinada en funció del temps de residència desitjat. El sistema en continu més utilitzat és el llit fix, on la dissolució de 150 mg/l de colorant Gris Lanaset G es fa passar contínuament a través d'un llit de GAC que roman immòbil en una columna. Al carbó actiu se li ha d'eliminar l'aire per evitar la presència de bombolles en la columna que afavoreixen la formació de camins preferents, i redueixen la superfície disponible per la transferència de matèria entre el carbó actiu i la solució. Per evitar aquests problemes s'introdueix la quantitat desitjada de carbó actiu humit (es deixa amb aigua durant un quants minuts per omplir els porus) a la columna i es fa circular un corrent d'aigua en sentit ascendent, mitjançant una xeringa. Destacar que una vegada es posa en marxa el sistema cal deixar 2 o 3 mm d'aigua per sobre del carbó per a que quan caiguin les gotes de solució aquestes no provoquin un camí preferent per la columna. Una bomba peristàltica bombeja la solució amb colorant tèxtil cap a la columna. L'efluent de la columna es recollit per un col·lector automàtic de fraccions amb una capacitat de 95 tub d'assaig (imatge 3.3), es mesura l'absorbància d'aquestes fraccions recollides i es relaciona amb la concentració de colorant. A la imatge 3.1 es mostra el muntatge d'aquest experiment.

Degut als resultats obtinguts en els experiments en descendent, s'opta per realitzar experiments en continu en sentit ascendent, s'explica el perquè d'aquest canvi de sentit de flux a l'apartat 4.2 de resultats. Per poder dur a terme aquests experiments cal canviar la columna, per una que té la boca d'entrada de l'influent més ample. Les mides d'aquesta són 21 cm d'alçada i de 1,8 cm de diàmetre, es pot veure a la imatge 3.2. b).



Imatge 3.1. Muntatge experimental utilitzat en els experiments d'adsorció en continu.



Imatge 3.2. Detall de les columnes amb carbó actiu. a) Experiments en sentit descendent.
b) Experiments en sentit ascendent



Imatge 3.3. Detall del col·lector de fraccions

El quocient entre el volum que ocupa el carbó actiu dins de la columna i el cabal de circulació del colorant és el temps de contacte.

L'alçada de carbó actiu en la columna i el cabal de circulació de colorant s'escullen en funció del temps de contacte a columna buida, EBCT (Empty Bed Contact Time). El full adjunt amb les característiques del carbó actiu, Annex I, mostra l'EBCT òptim.

$$EBCT = \frac{Secció(cm^2) \cdot Z_{Cactiu}(cm)}{Cabal(cm^3 / min)}$$

Equació 3.1

L'EBCT recomanat a la fitxa tècnica del carbó actiu utilitzat és de 60-240 min i la velocitat lineal de 1-5 m/h.

Donades les característiques del colorant es decideix fer passar la solució de colorant per la columna a una velocitat més lenta que la que recomana el fabricant. Així la velocitat lineal seleccionada té una relació de 1/15 la velocitat més lenta especificada a la fitxa tècnica. La velocitat lineal dels primers experiments en continu és de 0,05 m/h i els altres es realitzen amb una velocitat de 0,104 m/h, el doble. Per tant, el cabal utilitzat és de 0,3 ml/min i 0,6 ml/min, respectivament. A més per aconseguir el cabal recomanat caldria una columna de grans dimensions, com la utilitzada a escala industrial.

Es recull l'efluent de la columna en fraccions fins arribar a un 70% d'eliminació del colorant. El percentatge d'eliminació del colorant es calcula a partir de l'equació 3.2.

$$\% \text{ d'eliminació} = \frac{C_{\text{colorant influent}} - C_{\text{colorant efluent}}}{C_{\text{colorant influent}}} \times 100$$

Equació 3.2

El valor de 70% d'eliminació s'escull perquè correspon a l'eliminació requerida per a que l'efluent pugui ser admès en una EDAR en cas de requerir tractament addicional.

4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A continuació es presenten els resultats donats en els experiments realitzats tant en continu com en discontinu.

4.1. Experiments en discontinu

4.1.1. Colorant Gris Lanaset G

Aquest colorant és una mescla comercial de colorants complexes organometàl·lics amb crom i cobalt, de composició i estructura desconeguda. Ha estat escollit com a model de colorant tèxtil comercial per un grup de recerca del Departament d'Enginyeria Química perquè una empresa de Sabadell (Artexil, S.A.) l'utilitza habitualment en la formulació dels seus banys de tinció i per tant es troba en els seus banys esgotats o aigües residuals junt amb altres components.

Per determinar el poder adsorbent del carbó actiu, es realitzen diversos experiments en discontinu. S'analitza la quantitat de colorant eliminat amb el temps en suspensions de carbó actiu de concentració variable, dins una cambra termostatitzada a 25°C.

La concentració de carbó actiu varia entre 0,823 i 7,019 g/l i la de colorant, entre 101,081 i 195,502 mg/l.

De la figura 4.1 fins a la 4.11 es presenten els gràfics dels diferents experiments realitzats, es representa la variació de l'absorbància de la solució de colorant i la corresponent eliminació de colorant per adsorció al llarg del temps. A l'Annex VI es troben els resultats de cada experiment de forma detallada.

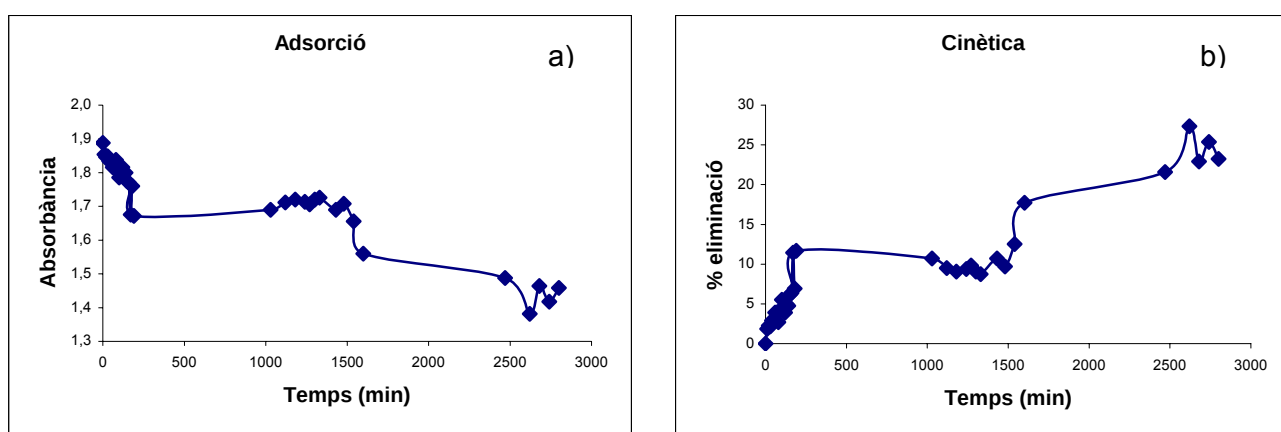


Figura 4.1. Concentració de carbó actiu de 0,823g/l i de colorant de 147,179 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

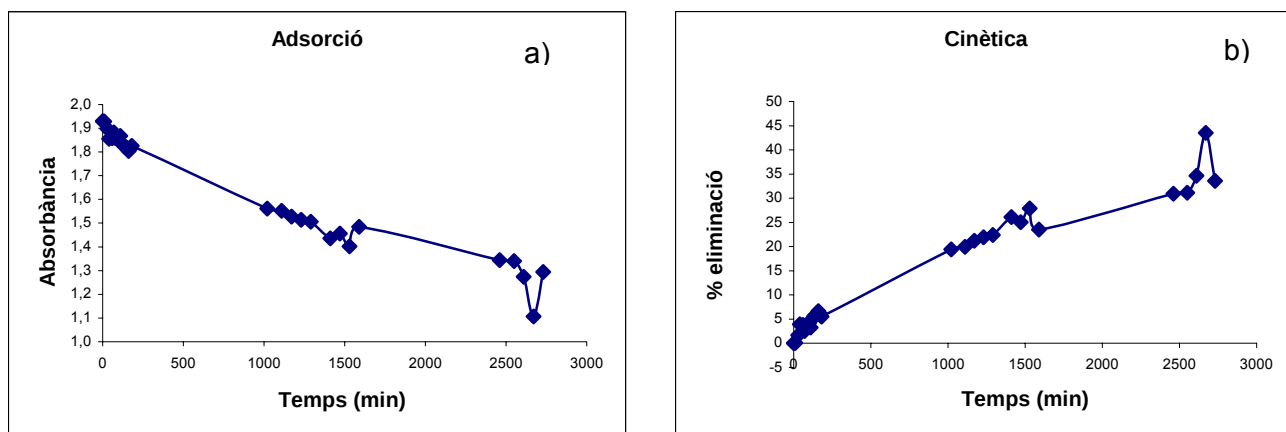


Figura 4.2. Concentració de carbó actiu de 1,010 g/l i de colorant de 150,517 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

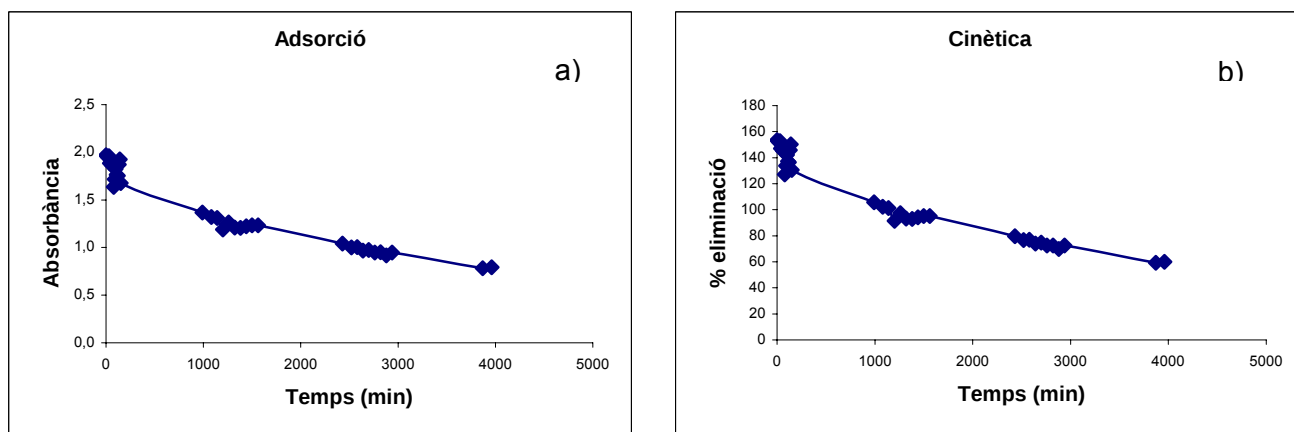


Figura 4.3. Concentració de carbó actiu de 1,516 g/l i de colorant de 153,537 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

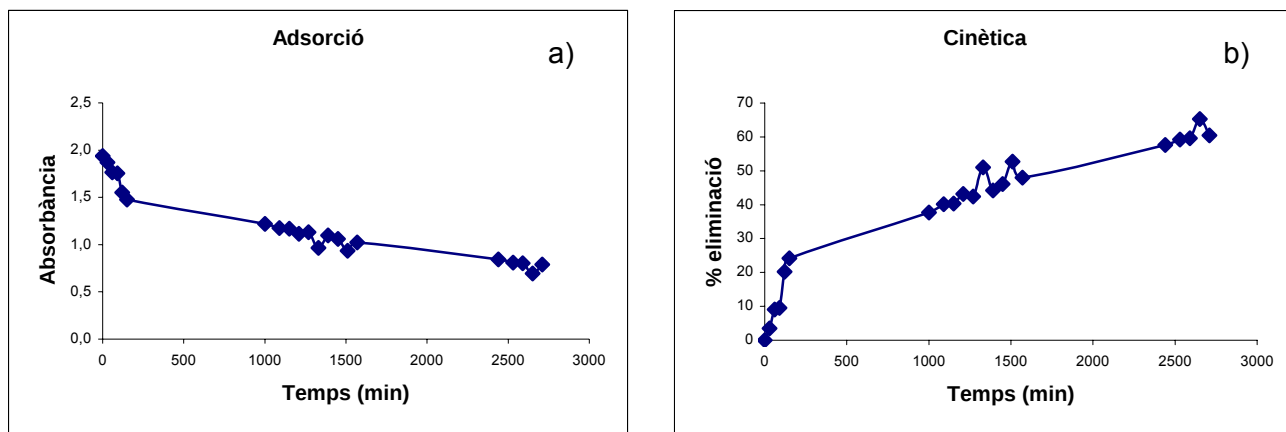


Figura 4.4. Concentració de carbó actiu de 2,006 g/l i de colorant de 150,993 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació del colorant Gris Lanaset G.

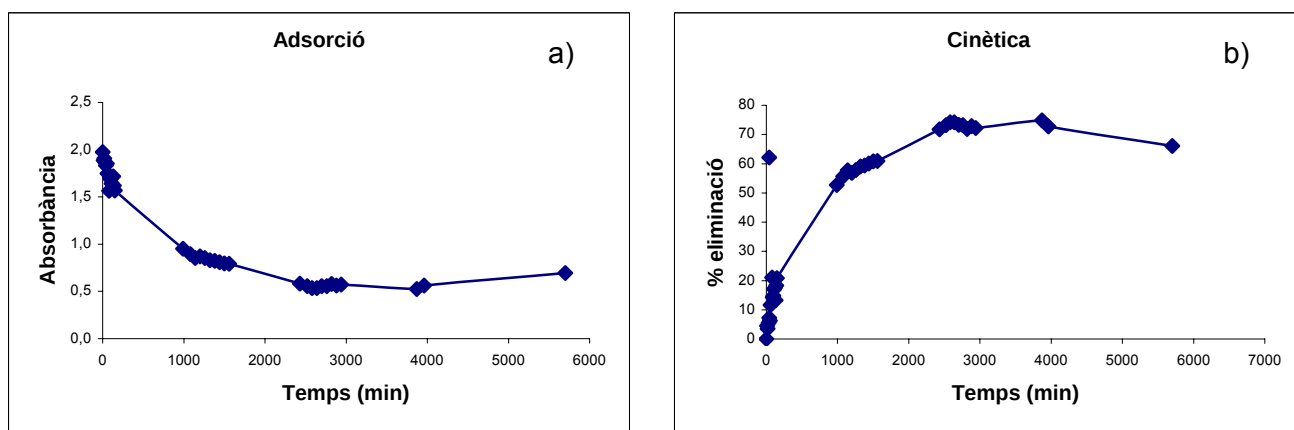


Figura 4.5. Concentració de carbó actiu de 3,060 g/l i de colorant de 154,014 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

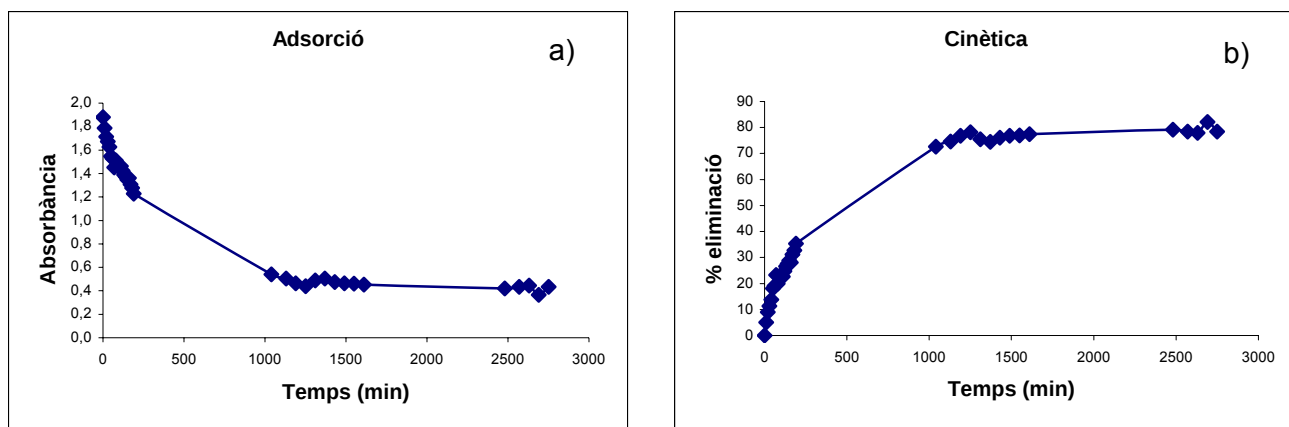


Figura 4.6. Concentració de carbó actiu de 4,010 g/l i de colorant de 146,543 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

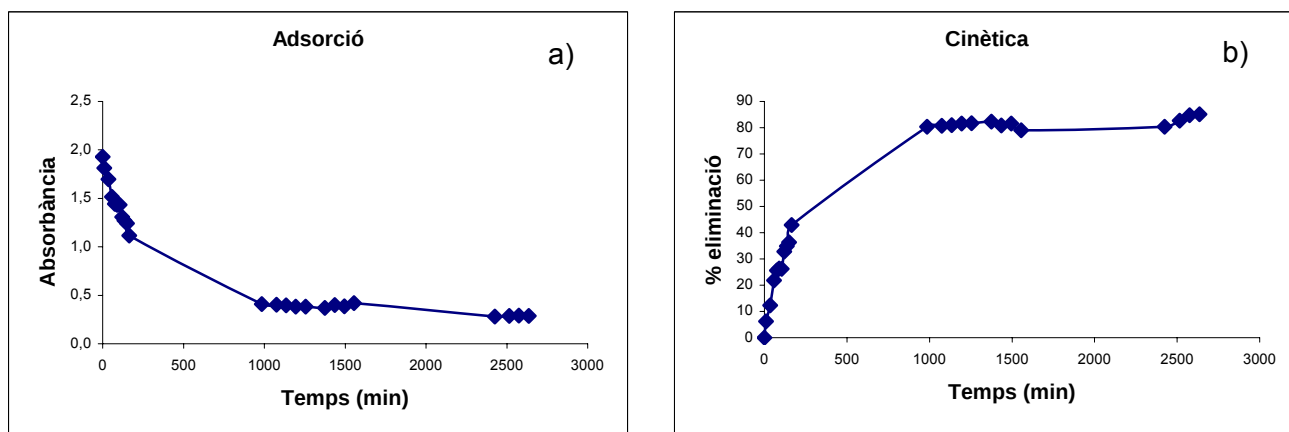


Figura 4.7. Concentració de carbó actiu de 4,990 g/l i de colorant de 150,517 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació del colorant Gris Lanaset G.

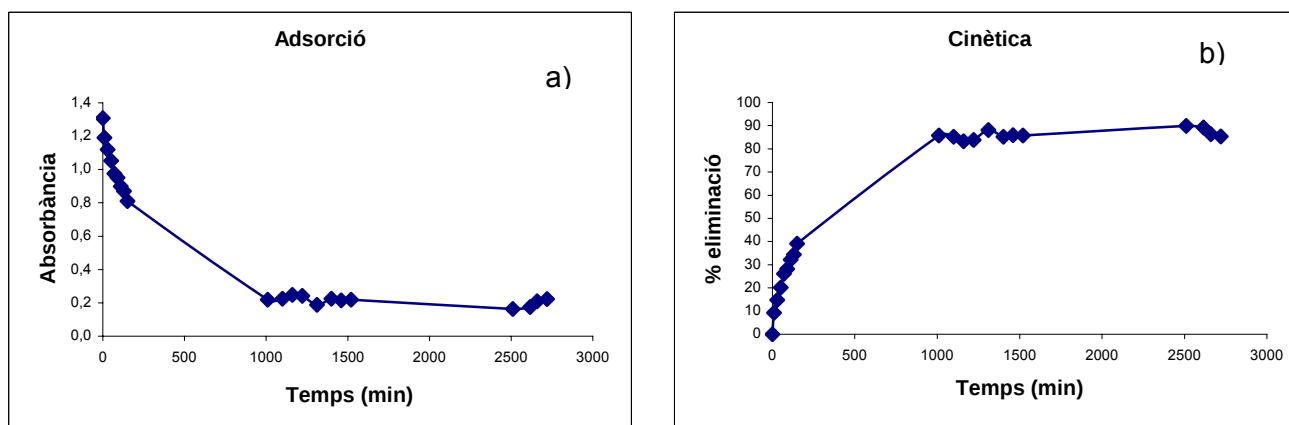


Figura 4.8. Concentració de carbó actiu de 4,020 g/l i de colorant de 101,081 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

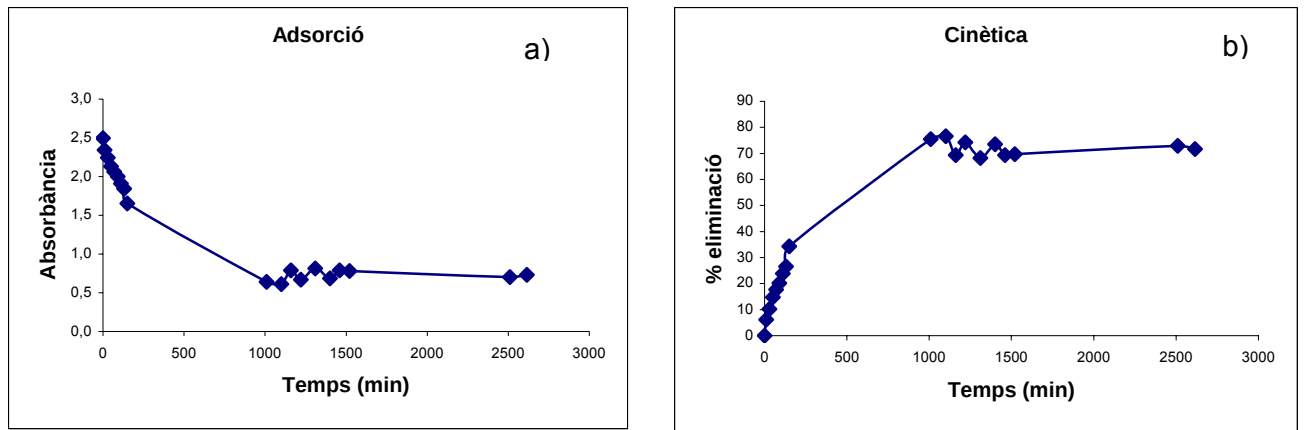


Figura 4.9. Concentració de carbó actiu de 4,000 g/l i de colorant de 195,502 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

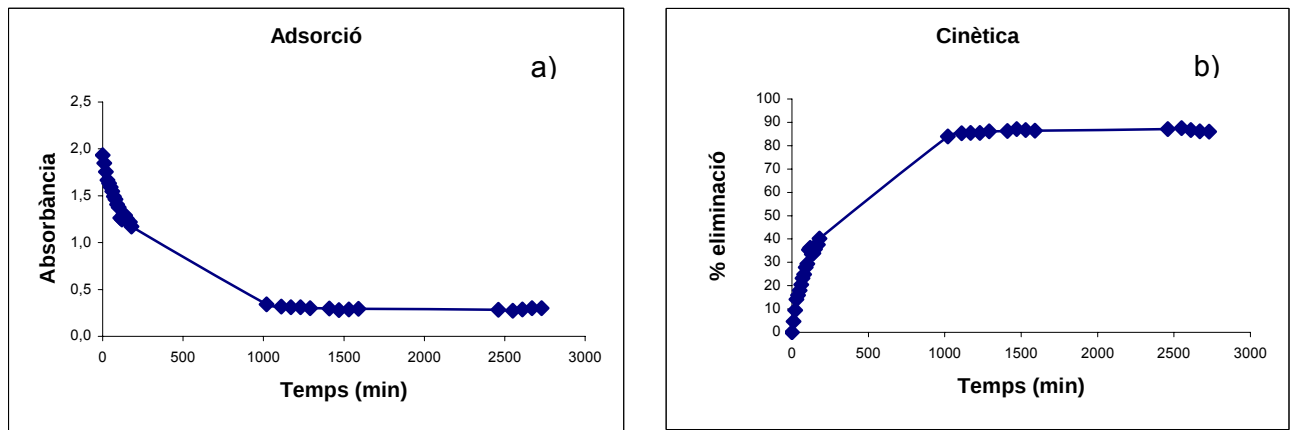


Figura 4.10. Concentració de carbó actiu de 6,051 g/l i de colorant de 150,835 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

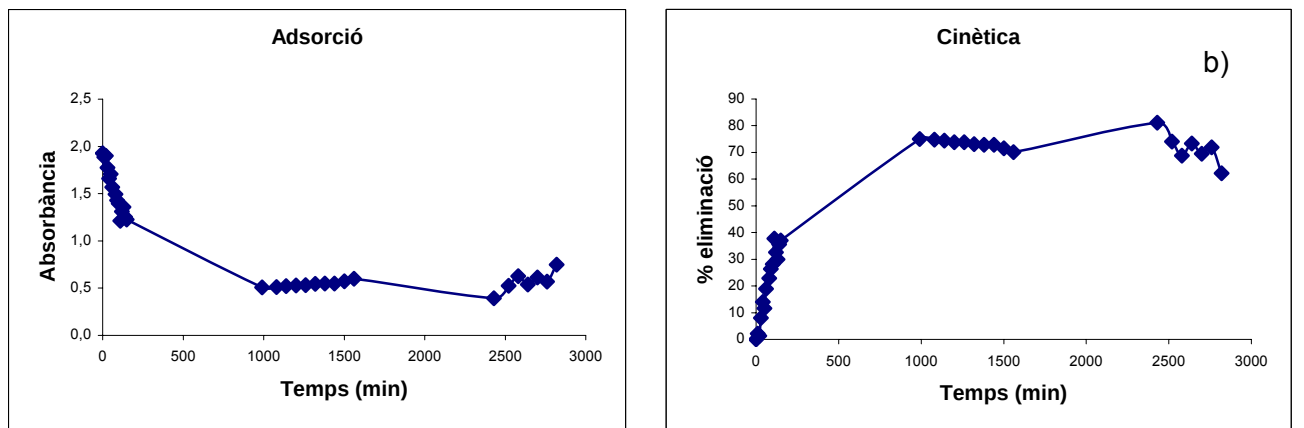


Figura 4.11. Concentració de carbó actiu de 7,019 g/l i de colorant de 150,199 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Gris Lanaset G.

Aquests gràfics permeten veure l'evolució de l'adsorció del colorant tèxtil Gris Lanaset G al llarg del temps per a cada experiment que es va posar en marxa. Es pot observar que l'adsorció és més ràpida durant els primers minuts de contacte entre la solució i el carbó actiu. A mesura que passa el temps la velocitat d'adsorció decau. És a dir, l'absorbància disminueix de forma exponencial negativa a mesura que el colorant es va eliminant de la solució.

Amb el temps, l'absorbància i, per tant, la concentració de colorant a la dissolució, tendeix a estabilitzar-se, per tant, es pot mesurar la concentració en equilibri.

Destacar que a la figura 4.1 la concentració d'equilibri va ser més difícil assolir-la, ja que la solució conté poc carbó actiu, 0,823 g/l, i costa estabilitzar-se. Els altres experiments assoleixen l'equilibri de forma més clara.

La taula 4.1 mostra un resum dels diferents experiments en discontinu realitzats, gràcies als resultats obtinguts es determina la concentració en equilibri (C_e) de colorant en la solució, el temps que es triga a arribar a aquest punt i el % d'eliminació al qual s'assoleix. Com major és la concentració de carbó actiu, el temps per assolir un % d'eliminació determinat és menor ja que hi ha més superfície de carbó per adsorbir el colorant. També es calcula el temps necessari per assolir el 25% d'eliminació del colorant. Com es pot observar quan major concentració de carbó actiu té la solució més ràpidament s'assoleix aquest 25%. La concentració més petita de carbó actiu utilitzada és de 0,823 mg/l i triga 2620 minuts en assolir el 25% d'eliminació. En canvi, la quantitat més gran és de 4,990 g/l i només triga 70 minuts, una diferència enorme, tenint en compte, que tenen la mateixa concentració de colorant.

A la figura 4.12 es presenta l'evolució del percentatge d'eliminació del colorant tèxtil Gris Lanaset amb el temps per els experiment que contenen una concentració aproximada de 150 mg/l i diferents quantitats de carbó actiu. Com ja s'ha dit anteriorment, però en aquesta figura s'observa millor, el % d'eliminació és major si s'augmenta la concentració de carbó actiu a la dissolució, i també és més ràpida.

Taula 4.1. Dades resumides dels diferents experiments realitzats en discontinu amb colorant Gris Lanaset G.

	Concentració de carbó actiu (g/l)	Concentració de colorant Gris Lanaset G (mg/l)	Ce (mg/l)	Temps per assolir Ce (min)	% eliminació	Temps per assolir el 25% d'eliminació de colorant (min)
Experiment 1	0,823	147,179	110,817	2800	25,38	2620
Experiment 2	1,010	150,517	101,478	2730	43,51	1410
Experiment 3	1,516	153,537	60,070	3960	60,88	990
Experiment 4	2,006	150,993	65,980	2710	65,27	150
Experiment 5	3,060	154,014	40,359	2430	74,83	150
Experiment 6	4,010	146,543	31,617	1250	82,11	120
Experiment 7	4,990	150,517	22,314	985	85,18	70
Experiment 8	4,020	101,081	14,767	1010	89,95	75
Experiment 9	4,000	195,502	55,301	1010	72,85	130
Experiment 10	6,051	150,835	21,125	1020	85,99	90
Experiment 11	7,019	150,199	28,366	990	62,23	80

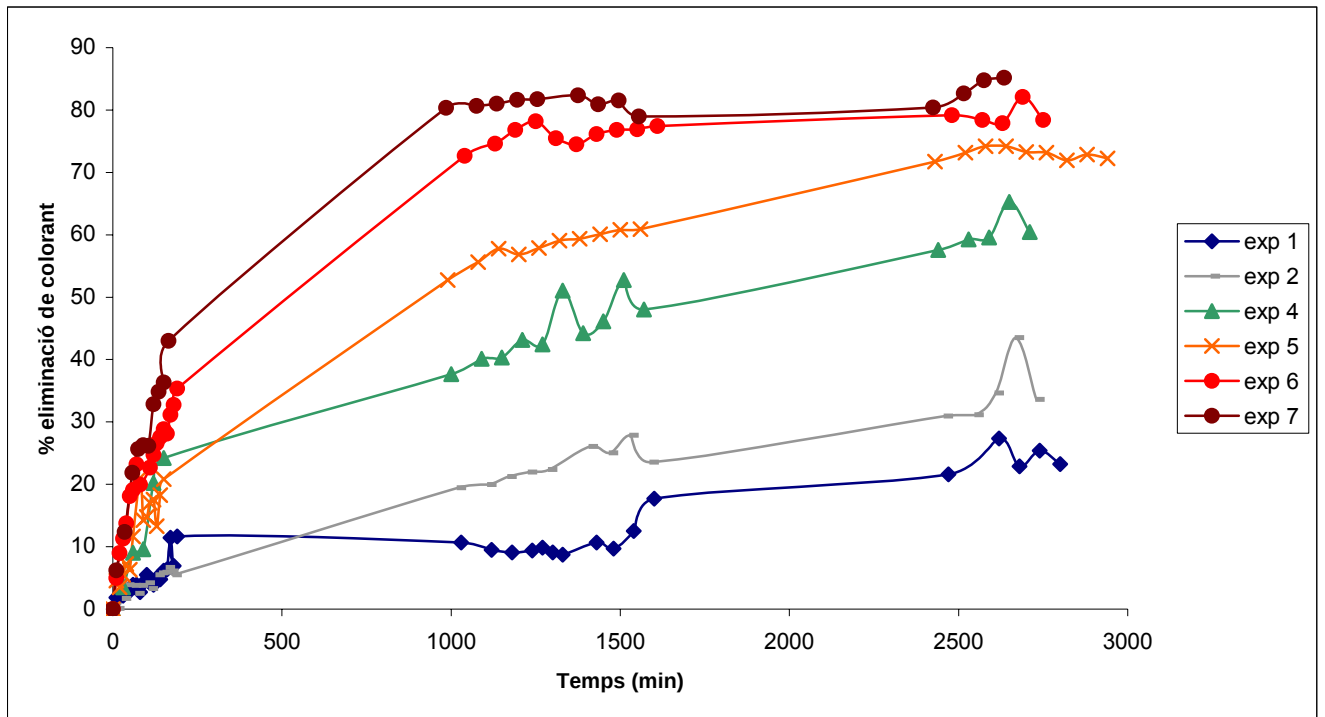


Figura 4.12. Evolució del percentatge d'eliminació de colorant per una concentració aproximada de 150 mg/l i diferents quantitats de carbó.

A la imatge 4.1 es pot observar l'eliminació del color del Gris Lanaset G amb 4 g/l de carbó actiu. A l'instant zero, primer tub, la solució té 146,543 ppm de colorant, el segon tub 94,723 ppm i correspon als 190 minuts de la posada en marxa de l'experiment i ja s'ha assolit el 65,36% d'eliminació. I l'últim tub conté 37,339 ppm, als 1370 minuts, i s'aconsegueix un 75,50% d'eliminació. En aquest punt es troba la concentració en equilibri.



Imatge 4.1. Eliminació del color per a una solució de 146,543 ppm de colorant Gris Lanaset G i 4 g/l de carbó actiu.

1r tub. Instant zero, 146,543 ppm.

2n tub. Als 190 minuts, 94,723 ppm.

3r tub. Als 1370 minuts, 37,339 ppm.

Els experiments es deixen en marxa durant un temps llarg per a determinar la concentració en equilibri i així poder ajustar les isoterms d'adsorció. Els experiments s'aturen quan s'observa que el nivell d'eliminació es manté estable o constant. A la figura 4.13 es mostra l'isoterma d'adsorció en carbó actiu, es representa la concentració en equilibri del solut (C_e) en mg/l en front la relació entre la massa de solut adsorbit en mg (X) i la massa d'adsorbent en g (M).

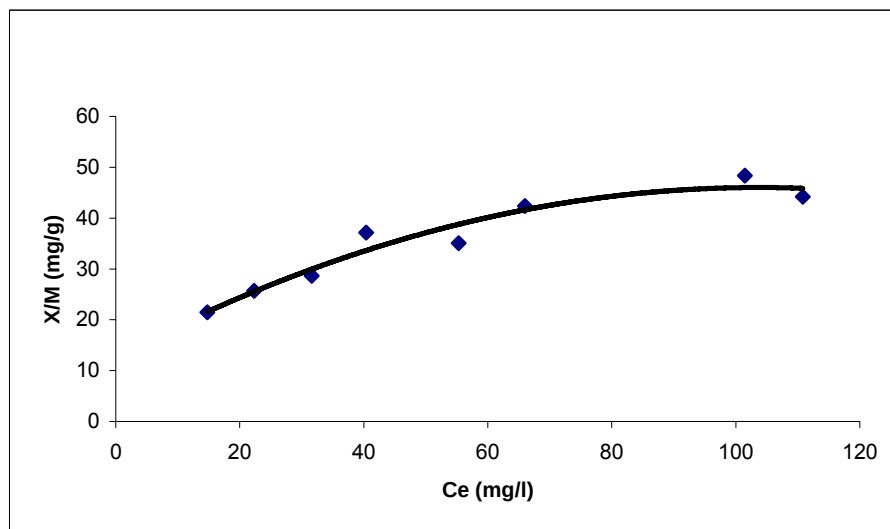


Fig. 4.13. Isoterma d'adsorció en carbó actiu amb colorant Gris Lanaset G.

Les figures 4.14 i 4.15 representen les regressions lineals de les isoterms més utilitzades, les de Langmuir i Freundlich, respectivament. Destacar que l'adsorció d'aquests experiments s'aproxima més a la isoterma de Langmuir que a la de Freundlich, com es pot observar al coeficient de correlació, aquest és de 0,9536 i 0,9372, respectivament.

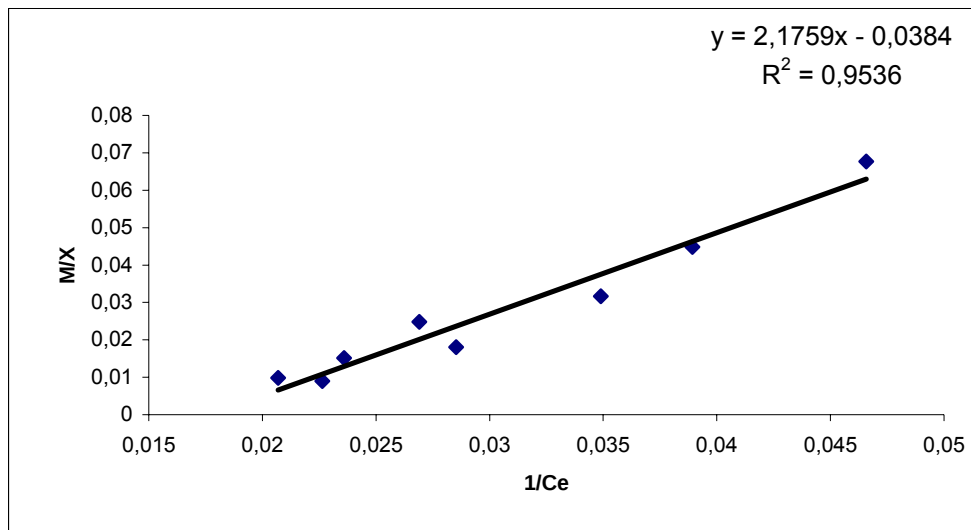


Figura 4.14. Isoterma de Langmuir

La representació de M/X en funció de $1/C_e$ segons l'equació 1.2 porta a una línia recta, que permet la determinació dels paràmetres K i b a partir de la pendent i de l'ordenada a l'origen, respectivament.

Si $y = 2,159x - 0,0384$, les constants prenen els valors següents:

- $b = 26,0417$ mg adsorbat/g adsorbent
- $k = 0,0176$ cm³ adsorbent/mg adsorbat

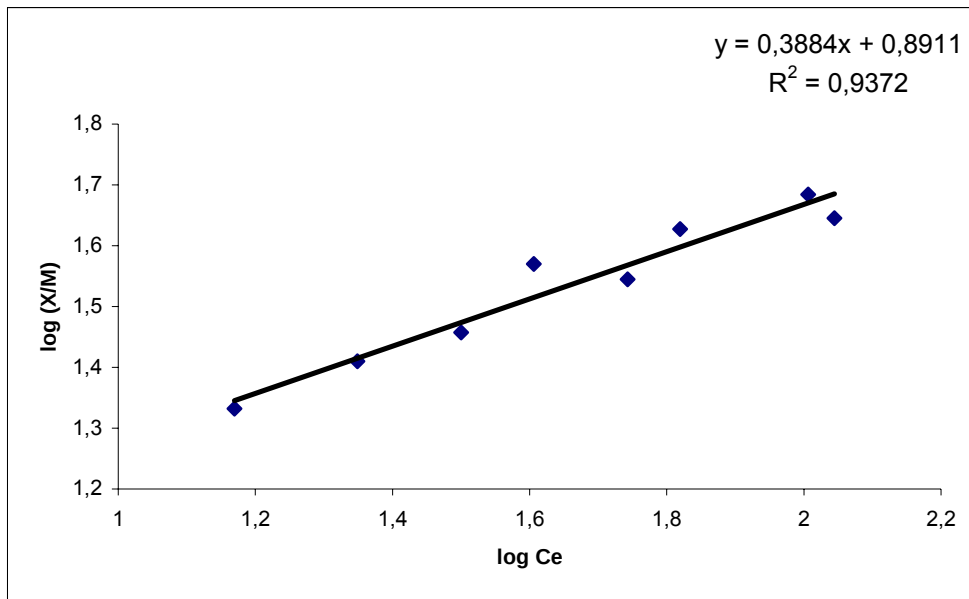


Figura 4.15. Isoterma de Freundlich

A partir de la representació logarítmica de X/M en funció de C_e s'obté l'isoterma de Freundlich, representada a la figura 4.15. Aquesta condueix a una línia recta que permet la determinació dels paràmetres n i k a partir de la pendent i de l'ordenada per $C_e = 1$.

Si $y=0,3884x + 0,8911$ representa l'equació 1.4, les constants obtenen els valors següents:

- $n= 2,5746$ (adimensional)
- $k= 7,7822 \text{ cm}^3 \text{ adsorbent/mg adsorbat}$

En altres estudis d'adsorció realitzats d'aquest colorant sobre altres adsorbents es van obtenir els següents resultats:

- **Biomassa inactivada en forma de pèl·lets del fang *Trametes versicolor*** (Aretxaga, 1998).

L'objectiu d'aquest projecte realitzat per l'Aitor era estudiar la capacitat d'adsorció de colorant Gris Lanaset G en els microorganismes *Trametes versicolor* en forma de pèl·lets.

Taula 4.2 Coeficients dels ajustos a les isoterms de Langmuir i Freundlich dels experiments realitzats amb carbó actiu i amb els pèl·lets.

	LANGMUIR		FREUNDLICH	
	Carbó actiu	Pèl·lets	Carbó actiu	Pèl·lets
R²	0,9536	0,9961	0,9372	0,9499
k (cm³)	0,0176	0,0268	0,7822	0,2326
b (mg adsorbat/g adsorbent)	26,0417	6,1425		
n			2,5746	1,6260

La taula 4.2 consta dels coeficients dels ajustos a les isoterms de Langmuir i Freundlich pels experiments realitzats en carbó actiu del present projecte i l'adsorció deguda als pèl·lets. Els coeficients de correlació de les dues isoterms calculades als experiments amb pèl·lets s'ajusten més a una recta que els de carbó actiu. A tots dos tipus d'adsorbent el model de Langmuir és el que millor descriu el comportament del sistema, però tots 4 coeficients s'ajusten prou bé a les dades experimentals, amb coeficients de correlació superiors a 0,9.

El paràmetre empíric k, es contradiu segons l'isoterma que es segueixi, és a dir, a Langmuir els valors de k són molt similars, però és una mica més elevat als pèl·lets. En canvi, al de Freundlich, els valors són molt dispars i a més, la capacitat d'adsorció de l'adsorbent és més elevada al carbó actiu.

Gràcies a l'isoterma de Langmuir es pot observar que el carbó actiu té més capacitat de monocapa o capacitat màxima (coeficient b) , és a dir, adsorbeix 4,2 vegades més mg d'adsorbat per unitat de g d'adsorbent presents a la solució.

L'altre paràmetre empíric, n, reflexa que el carbó actiu té la intensitat d'adsorció una mica més elevada.

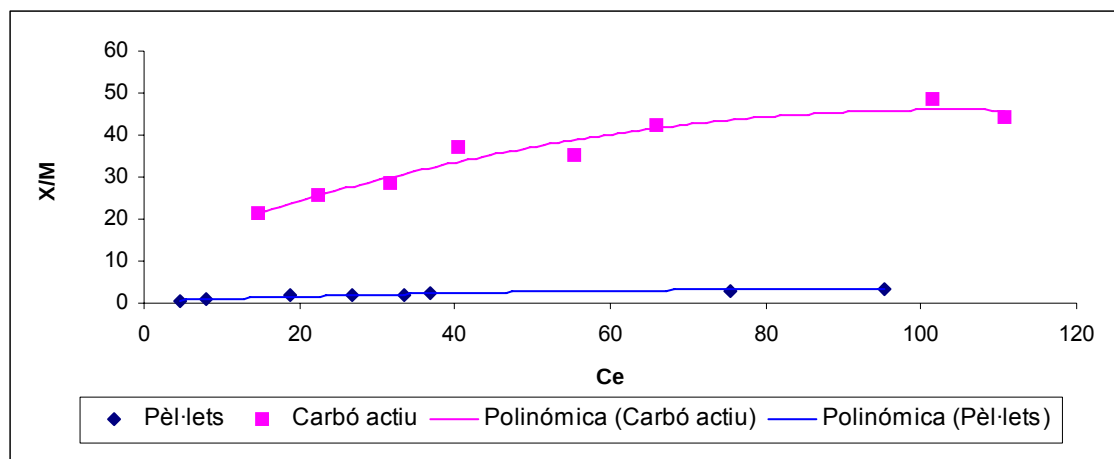


Figura. 4.16. Isoterma d'adsorció comparatives dels dos sistemes d'adsorció.

A la figura 4.16 es presenten les isoterms d'adsorció dels dos sistemes; el de carbó actiu granular i el dels pèl·lets de *Trametes versicolor* respecte al colorant estudiat, Gris Lanaset G. A aquesta figura es pot observar com el nivell d'adsorció (en mg solut adsorbit/g adsorbent) és molt més alt en el cas de carbó actiu, que no pas els valors que aconsegueix la biomassa utilitzada. La concentració en equilibri però, arriba a nivells semblants de concentració de colorant.

- **Carbó Actiu Granular amb referència, FE 02131 C de Chemviron Carbon** (Font, 2003).

L'objectiu d'aquest projecte era comparar la viabilitat econòmica i ambiental de dos processos que tenen per objectiu l'eliminació del colorant tèxtil Gris Lanaset G de les aigües residuals. Els dos processos són mitjançant carbó actiu i l'altre mitjançant pèl·lets.

La taula 4.3 mostra un resum dels diferents experiments en discontinu realitzats al projecte de l'Anna Font. El temps per assolir el 25% d'eliminació del colorant de la solució original varia en funció de la concentració de carbó actiu. Els seus resultats són els esperats, com major és la concentració de carbó actiu, el temps per assolir aquest nivell d'eliminació és menor ja que hi ha més superfície a la qual el colorant es pot adsorbir.

Taula 4.3. Resum dels diferents experiments en discontinu (Font, 2003).

	Concentració de carbó actiu (g/l)	Concentració de colorant Gris Lanaset G (mg/l)	Temps per assolir el 25% d'eliminació de colorant (min)	Resultats a temps llarg	
				Temps (min)	% eliminació
Experiment 1	0,816	135,370	100	3033	52,40
Experiment 2	2,000	138,930	200	1260	90,00
Experiment 3	19,947	140,790	30	240	97,77

També deixà els experiments en marxa durant temps llarg per esbrinar la concentració en equilibri. Havia d'esperar que amb el temps, l'absorbància i, per tant, la concentració de colorant, tendís a estabilitzar-se. Però el que observà és que la concentració de colorant en la solució no acabava d'estabilitzar-se, sempre hi havia una petita adsorció del colorant. Això es va atribuir al fet de que degut a l'agitació el carbó actiu es trenca, augmentant la superfície d'adsorció. Sembla que a qualsevol concentració de carbó actiu, a temps molt llarg es podria assolir una eliminació quasi total del colorant. Amb els resultats que va obtenir com que la cinètica d'adsorció era molt lenta i li fa ser pràcticament impossible determinar la concentració en equilibri de colorant en solució, va desestimar determinar les isoterms d'adsorció.

Si es compara els resultats de la taula 4.1 i 4.3 es poden veure les diferències entre els dos carbons utilitzats. Primer de tot destacar que als experiments del present projecte si que s'ha trobat la concentració d'equilibri, ja que el nivell d'eliminació si que s'estabilitza. El seu experiment 1 i el del present projecte, tenen una concentració de carbó actiu i colorant força semblant, per tant, són comparables. El temps per assolir el 25% d'eliminació és força diferent, el de l'Anna Font triga només 100 minuts, en canvi, els realitzats ara, es triga 2620 minuts. El % d'eliminació assolit també és diferent, en el seu assoleix un 52,40% i en aquest tan sols un 25%.

En els seus experiments la disminució del color té lloc de forma més acusada al començament dels experiments. El segon experiment de l'Anna Font es pot comparar amb el 4rt de la taula 4.1, en aquests passa el contrari, es triga menys en assolir el 25% d'eliminació en els nous experiments que no pas en els de l'Anna Font, però tan sols una diferència de 50 minuts. En canvi, els resultats a temps llarg afavoreixen al seu experiment, arriba fins a un 90% d'eliminació, en canvi, en aquest un 65%, però això es degut al trencament del carbó actiu, per tant, la superfície d'adsorció augmenta.

L'últim experiment de l'Anna Font no es comparatiu amb cap, ja que la concentració de carbó actiu és de 19,947 g/l i en els realitzats en aquest projecte com a màxim contenen 7g/l. Destacar que el % d'eliminació que s'aconsegueix és de 89,95% amb una concentració de carbó de 4,050 g/l però conté 101,081 mg/l de colorant.

Tant els gràfics seus com els meus es pot deduir que l'adsorció del colorant és més elevada durant els primers minuts de contacte entre la solució i el carbó actiu. A mesura que el temps va passant, la velocitat d'adsorció decau. Però en els seus dona la sensació que a qualsevol concentració de carbó actiu, a temps molt llarg es podria assolir una eliminació quasi total del colorant.

El carbó actiu FE 02131 C de Chemviron Carbon té una elevada superfície específica, de 1050 m²/g per això es capaç d'eliminar tant color a la solució, però el problema que no s'estabilitzés va ser degut a que els grànuls de carbó s'anaven trencant amb el temps, per això la superfície específica cada vegada era més gran, per tant, podia continuar adsorbint. Altre conclusió a la qual arribà fou que la quantitat de microporus és més abundant que la de macroporus i la molècula del colorant Gris Lanaset G és molt gran, per tant no entra pels porus, només és adsorbida per la superfície del carbó, però es veu beneficiada pel fet que el carbó es va trencant.

En canvi, el carbó actiu amb ref. CAL FE03204C de Chemviron Carbon té la mateixa superfície específica però conté més macroporus que microporus, millor per adsorbir aquesta molècula de colorant tan gran. Pot ser adsorbida entre els porus i per la superfície.

La fitxa tècnica del carbó actiu utilitzat per l'Anna Font indica que aquest es recomanat per adsorbir microcontaminants. En canvi, el carbó utilitzat en el present projecte està indicat especialment per eliminar el color de les aigües.

4.1.2. Colorant Orange G

Altre objectiu del present projecte és comparar l'eficàcia d'adsorció del carbó actiu amb altre colorant a més del Gris Lanaset, com és l'Orange G d'estructura coneguda, més simple i pur. Per aquest motiu es realitzen diversos experiments en discontinu amb aquest colorant.

La concentració de carbó actiu varia entre 1,004 i 3,007 g/l i la de colorant, entre 30,720 i 166,400 mg/l.

De la figura 4.17 fins a la 4.25 es presenten els gràfics dels diferents experiments realitzats, es representa la variació de l'absorbància de la solució de colorant i la corresponent eliminació de colorant per adsorció al llarg del temps. A l'Annex VIII es troben els resultats de cada experiment de forma detallada.

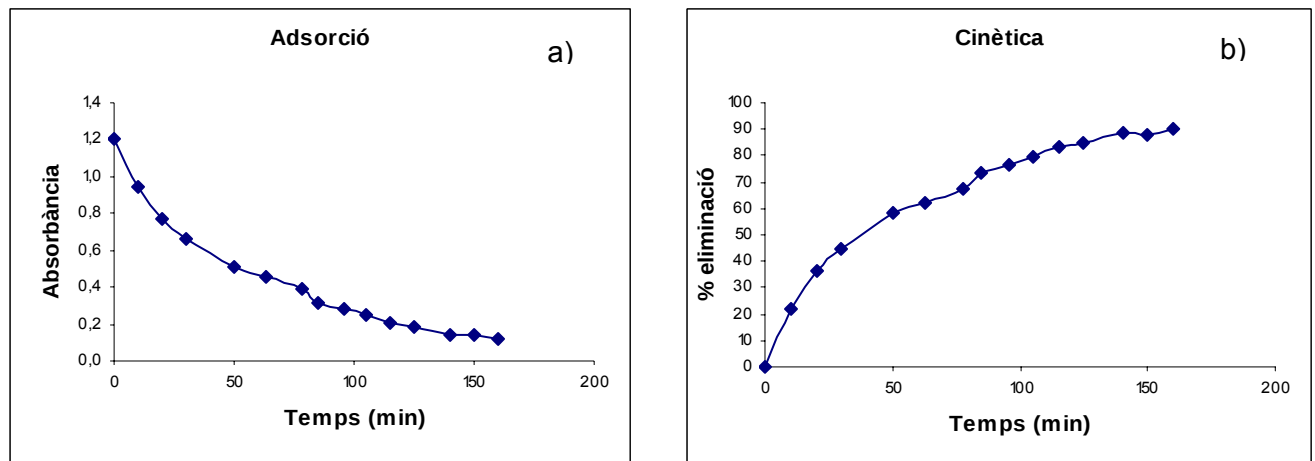


Figura 4.17. Concentració de carbó actiu de 1,004 g/l i de colorant de 32,267 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

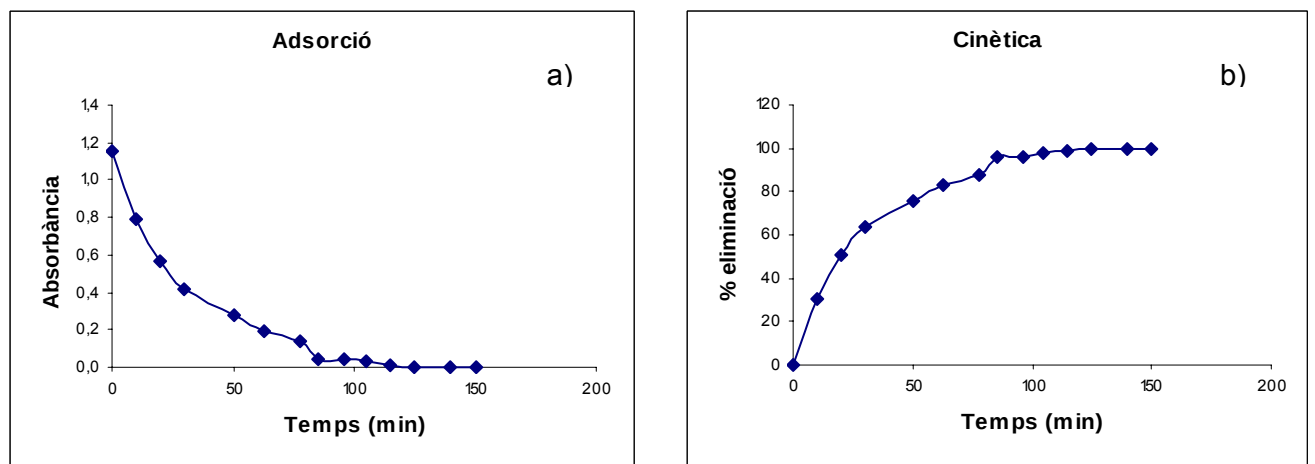


Figura 4.18. Concentració de carbó actiu de 2,004 g/l i de colorant de 30,720 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

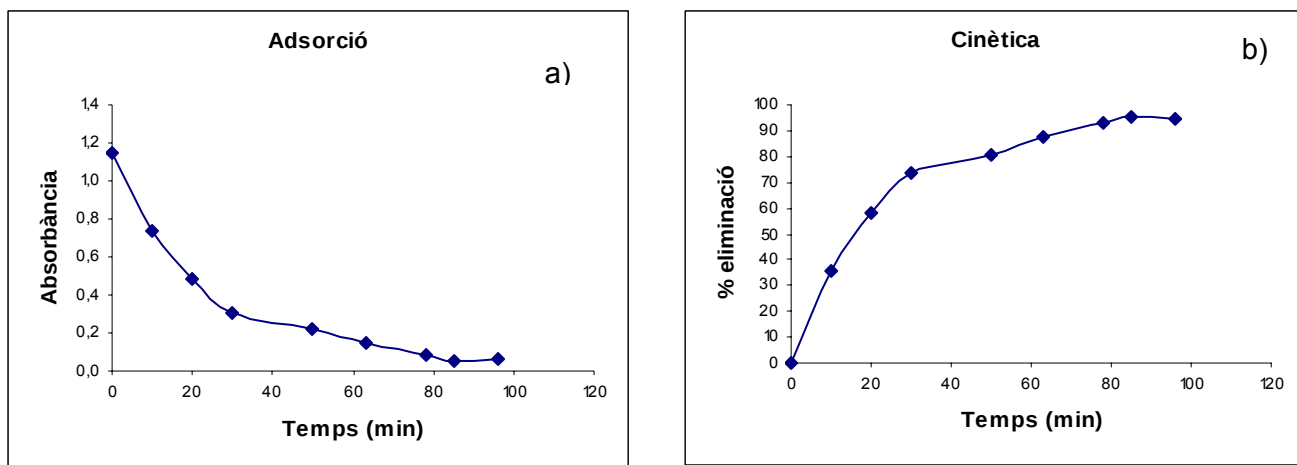


Figura 4.19. Concentració de carbó actiu de 3,007 g/l i de colorant de 30,720 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

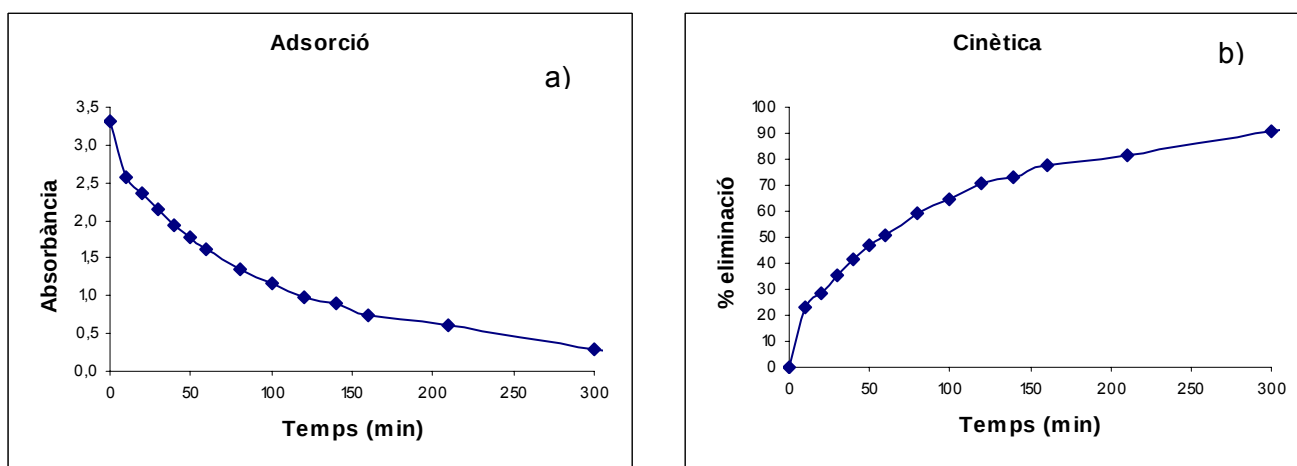


Figura 4.20. Concentració de carbó actiu de 2,002 g/l i de colorant de 88,720 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

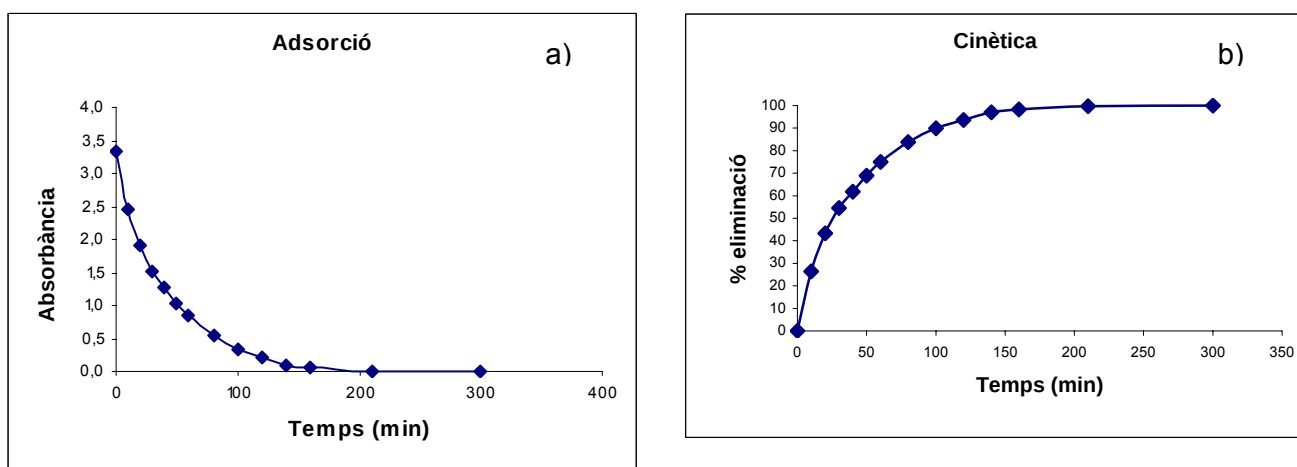


Figura 4.21. Concentració de carbó actiu de 3,002 g/l i de colorant de 89,200 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

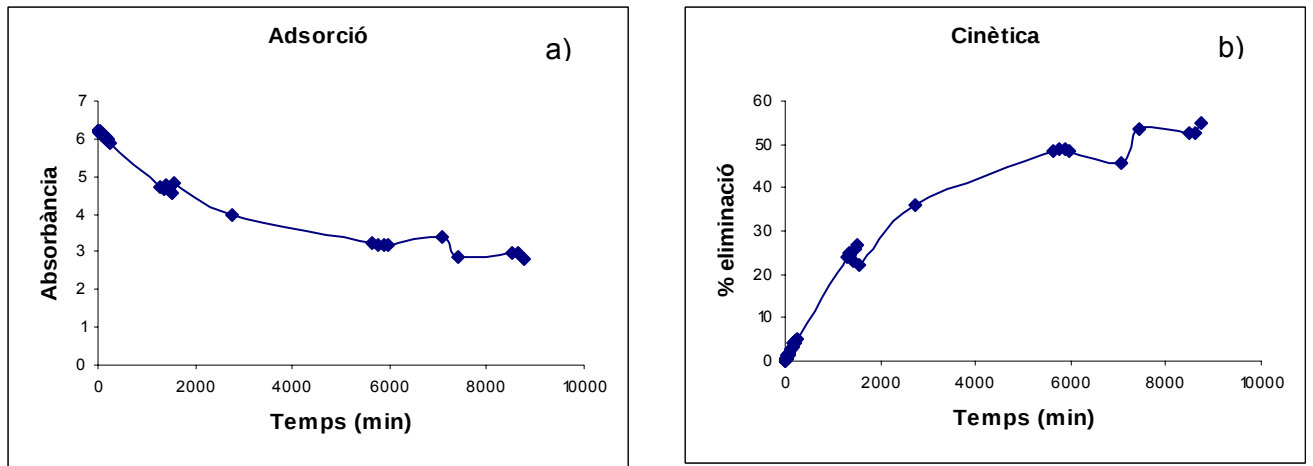


Figura 4.22. Concentració de carbó actiu de 1,008 g/l i de colorant de 166,160 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

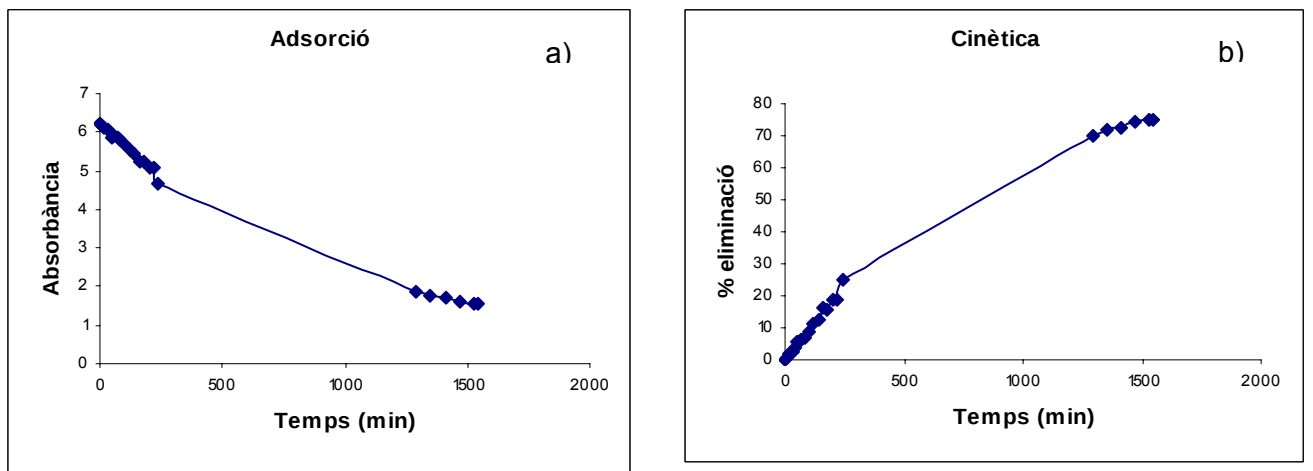


Figura 4.23. Concentració de carbó actiu de 2,004 g/l i de colorant de 166,400 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

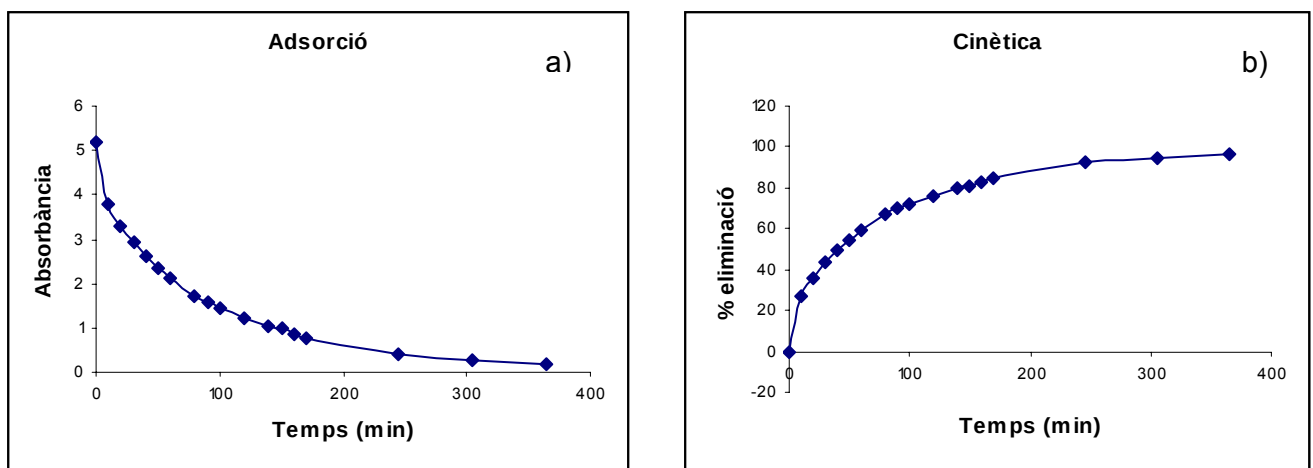


Figura 4.24. Concentració de carbó actiu de 3,005 g/l i de colorant de 137,840 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

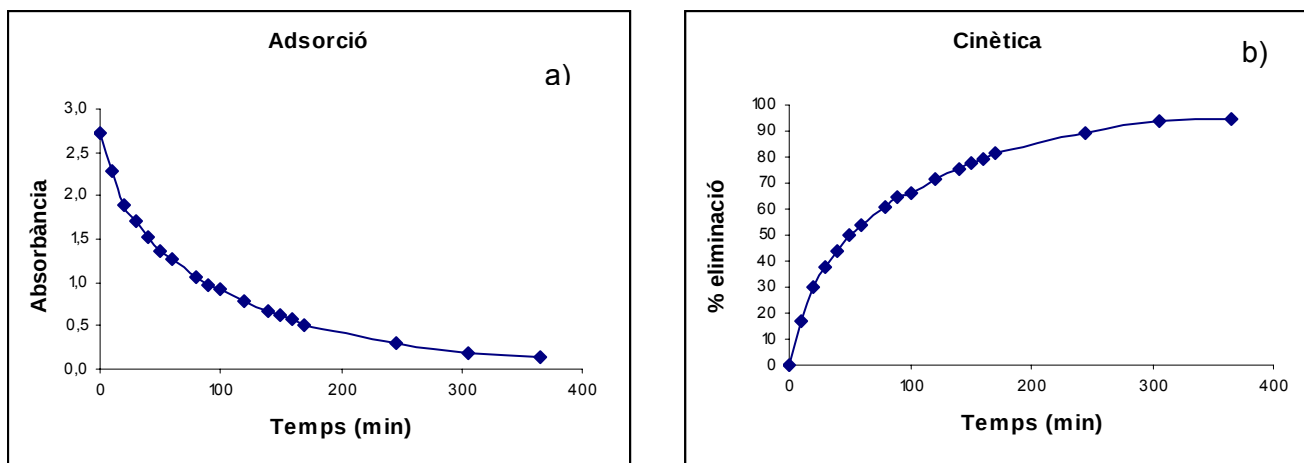


Figura 4.25. Concentració de carbó actiu de 2,003 g/l i de colorant de 72,800 mg/l. a) Variació de l'absorbància al llarg del temps. b) Evolució del percentatge d'eliminació de colorant Orange G.

Aquestes figures mostren el poder d'adsorció d'aquest carbó actiu granular davant el colorant Orange G, pràcticament tots els experiments realitzats arriben al 100% d'eliminació del colorant. I a més assoleixen aquesta eliminació en un temps molt curt, com és el cas dels experiments de la figura 4.24, conté 3,005 mg/l de carbó i 137,840 ppm de colorant, i en tan sols 300 minuts arriba al 100% d'eliminació.

Els primers minuts de contacte entre adsorbat i solut l'adsorció és molt ràpida, igual que en els experiments amb el colorant Gris Lanaset G.

Els gràfics comparables entre aquests dos colorants, corresponen a les figures 4.2 i 4.22, totes dues solucions contenen 1 g/l de carbó i 150 ppm de colorant, aproximadament. A la solució d'Orange G s'aconsegueix un 55% d'eliminació del color però es necessiten 8755 minuts, en canvi, amb el Gris de Lanaset l'eliminació és inferior, un 43% però s'assoleix als 2670 minuts. Si observem el valor d'eliminació que correspon a aquest temps en el de l'Orange G aquest és de 36%, valor més baix. El temps per assolir la concentració en equilibri a l'Orange G és el doble que al Gris Lanaset G, però tan sols varia un 14% l'eliminació del color l'un de l'altre.

Taula 4.4. Dades resumides dels diferents experiments realitzats en discontinu amb colorant Orange G.

	Concentració de carbó actiu (g/l)	Concentració de colorant Orange G (mg/l)	Ce (mg/l)	Temps per assolir Ce (min)	% eliminació	Temps per assolir el 25% d'eliminació de colorant (min)
Experiment 1	1,004	32,267	3,253	160	89,92	15
Experiment 2	2,004	30,720	0,000	125	100,00	6
Experiment 3	3,007	30,720	1,653	96	94,62	5
Experiment 4	2,002	88,720	7,920	300	98,47	12
Experiment 5	3,002	89,200	0,000	300	100,00	9
Experiment 6	1,008	166,160	74,720	8755	74,72	1350
Experiment 7	2,004	166,400	41,760	1545	74,90	240
Experiment 8	3,005	137,840	4,320	365	96,87	10
Experiment 9	2,003	72,800	3,680	365	94,95	17

La taula 4.4 mostra un resum dels diferents experiments en discontinu realitzats amb l'Orange G, mostra les mateixes dades que amb l'altre colorant. Com major és la concentració de carbó actiu, el temps per assolir un % d'eliminació determinat és menor ja que hi ha més superfície de carbó per adsorbir el colorant. També es calcula el temps necessari per assolir el 25% d'eliminació del colorant. Com es pot observar quan major concentració de carbó actiu té la solució més ràpidament s'assoleix aquest 25%. L'exemple més clar és troba als experiments 6 i 7, tots dos contenen una concentració 166 ppm aproximadament de colorant, i un conté 1 g/l i l'altre 2g/l de carbó actiu, només 1g/l de diferència i necessita 5 vegades més de temps per assolir el mateix % d'eliminació. Com s'ha dit anteriorment, pràcticament tots arriben al 100% d'eliminació, excepte els dos experiments que estan més concentrats, 166 ppm de colorant, però que de totes maneres arriben a un 75%, una eliminació força elevada.

A la imatge 4.2 es pot observar l'eliminació del color de l'Orange G amb 2,004 g/l de carbó actiu i 166,400 ppm de colorant, que correspon al primer tub. Després de 140 minuts d'agitació la solució conté 145,440 ppm, segon tub, i només s'ha eliminat el 16,60% del color. El tercer conté 49,440 ppm i correspon als 1290 minuts i s'aconsegueix un 79,20% d'eliminació. I l'últim tub conté 41,760 ppm, als 1545 minuts, i hi ha una eliminació del 74,90%. En aquest punt es troba la concentració en equilibri.



Imatge 4.2. Eliminació del color per a una solució de 166,400 ppm de colorant Orange G i 2,004 g/l de carbó actiu.

1r tub. Instant zero, 166,400 ppm.

2n tub. Als 140 minuts, 145,440 ppm.

3r tub. Als 1290 minuts, 49,440 ppm.

4rt tub. Als 1545 minuts, 41,760 ppm.

Els experiments es deixen en marxa durant un temps llarg per a determinar la concentració en equilibri i així poder ajustar les isoterms d'adsorció. Els experiments s'aturen quan s'observa que el nivell d'eliminació es manté estable o constant. A la figura 4.26 es mostra l'isoterma d'adsorció en carbó actiu, es representa la concentració en equilibri (C_e) del solut en mg/l en front la relació entre la massa de solut adsorbit (X) en mg i la massa d'adsorbent (M) en g.

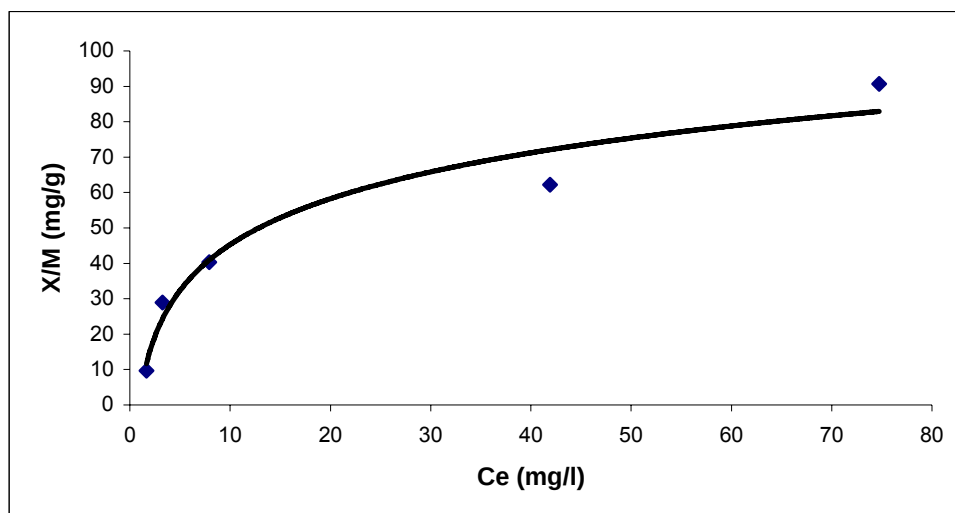


Figura 4.26. Isotherma d'adsorció en carbó actiu amb colorant Orange G.

A les figures 4.27 i 4.28 es representen les regressions lineals de les isoterms més utilitzades, les de Freundlich i Langmuir, respectivament. Destacar que l'adsorció d'aquests experiments s'aproxima més a la isoterma de Langmuir que a la de Freundlich, com es pot observar al coeficient de correlació, aquest és de 0,9296 i 0,8725 respectivament.

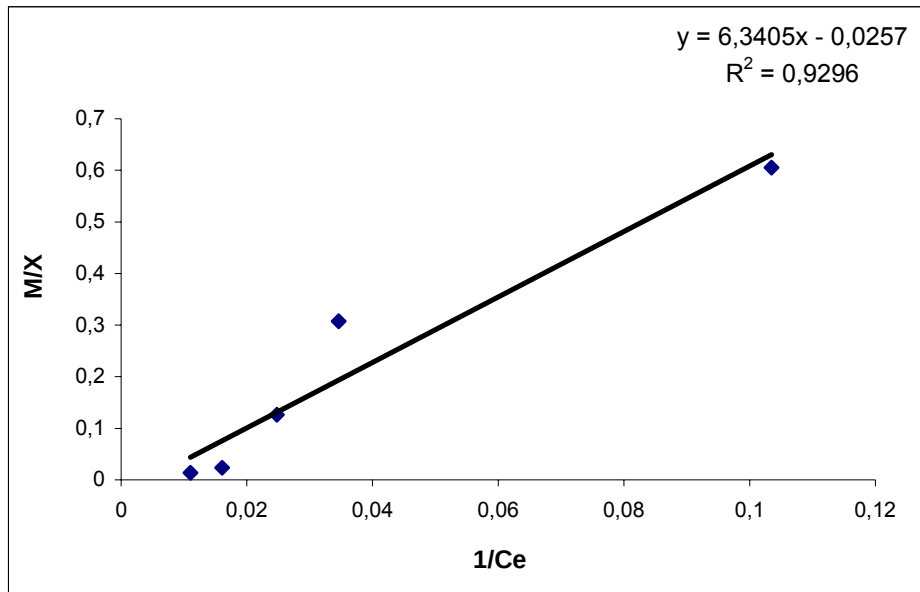


Figura 4.27. Isoterma de Langmuir

La representació de M/X en funció de $1/C_e$ segons l'equació 1.2 porta a una línia recta, que permet la determinació dels paràmetres K i b a partir de la pendent i de l'ordenada a l'origen, respectivament.

Si $y = 6,3405x - 0,0257$, les constants prenen els següents valors:

- $b = 38,9105$ mg adsorbat/g adsorbent
- $k = 4,0533 \cdot 10^{-3}$ cm³ adsorbent/mg adsorbat

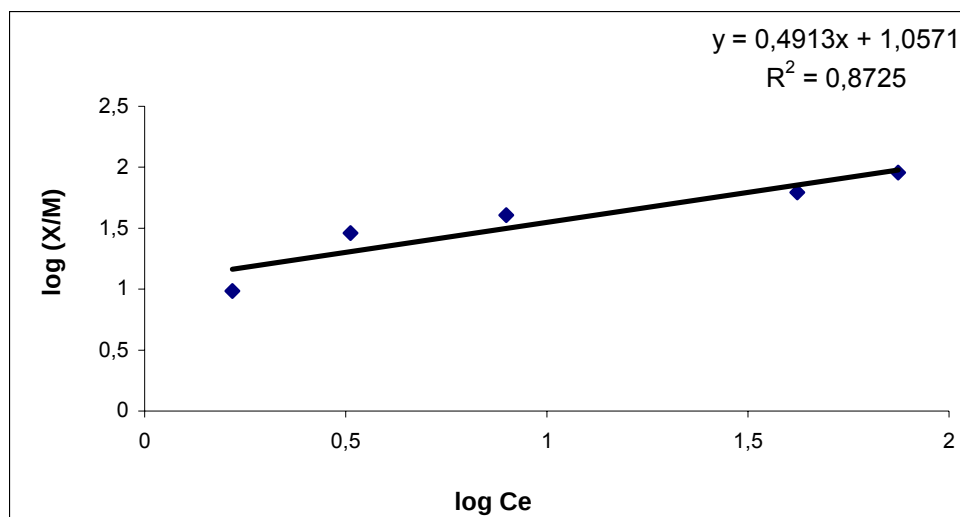


Figura 4.28. Isoterma de Freundlich

A partir de la representació logarítmica de X/M en funció de C_e s'obté l'isoterma de Freundlich, representada a la figura 4.28.

Si $y=0,4913x + 1,0571$ representa l'equació 1.4, els paràmetres obtenen els valors següents:

- $n= 2,0354$ (adimensional)
- $k= 11,4051 \text{ cm}^3 \text{ adsorbent/mg adsorbat}$

La taula 4.5 consta dels coeficients dels ajustos a les isoterms de Langmuir i Freundlich pels experiments realitzats en carbó actiu amb els dos colorants estudiats, el Gris Lanaset G i l'Orange G.

Taula 4.5 Coeficients dels ajustos a les isoterms de Langmuir i Freundlich dels experiments realitzats amb dos colorants, Gris Lanaset G i Orange G.

	LANGMUIR		FREUNDLICH	
	Gris Lanaset G	Orange G	Gris Lanaset G	Orange G
R^2	0,9536	0,9296	0,9372	0,8725
$k \text{ (cm}^3\text{)}$	0,0176	$4,0533 \cdot 10^{-3}$	0,7822	11,4051
$b \text{ (mg adsorbat/g adsorbent)}$	26,0417	38,9105		
n			2,5746	2,0354

Les isoterms d'adsorció del carbó actiu en tots dos colorants s'aproximen millor a la de Langmuir, que suposa que el màxim nivell d'adsorció es dona en una monocapa saturada de molècules d'adsorbat sobre la superfície de l'adsorbent.

Gràcies a l'isoterma de Langmuir es pot observar que l'adsorció amb carbó actiu sobre el colorant Orange G és més potent, ja que adsorbeix més mg d'adsorbat per unitat de g d'adsorbent presents a la solució que no pas amb el colorant tèxtil Gris Lanaset G. Però igualment aquesta pren un valor força elevat, 26,0417 mg adsorbat/g adsorbent.

4.2. Experiments en continu

L'eliminació de contaminants en les columnes de carbó actiu es dur a terme mitjançant tres mecanismes: adsorció, fixació de partícules grans i deposició parcial de matèria coloidal. Els percentatges d'eliminació depenen fonamentalment del temps de contacte entre l'aigua residual i el carbó actiu. Quan l'aigua residual flueix a través de la columna de carbó actiu, els contaminants es separen gradualment, i l'aigua residual es va purificant progressivament conforme descendeix a través de la columna. No hi ha demarcació neta entre l'aigua purificada i l'alimentació. En lloc d'això, es forma una zona de transició en la qual la concentració de contaminant varia des d'un màxim, al final de la zona, fins pràcticament zero en la part inicial de la mateixa. Aquesta zona és la porció activa de la columna, i es denomina zona d'adsorció. El moviment progressiu d'aquesta zona d'adsorció pot veure's mitjançant la representació de les anomenades corbes de ruptura. Les ordenades d'una corba de ruptura corresponen a la concentració de l'efluent, per exemple en mg/l de colorant, i les abscisses corresponen a la durada del flux a través de la columna, per exemple dies de flux.

Normalment, l'operació d'una columna d'adsorció no es duu a terme fins al seu esgotament. En el cas dels experiments duts a terme en el present projecte es decideix parar l'operació quan la concentració de colorant a la sortida de la columna és de 45 mg/l, ja que la concentració inicial és de 150 mg/l i es vol eliminar un 70% del colorant de la solució inicial. Aquest % correspon a l'eliminació requerida per a que l'efluent poder ser admès en una EDAR en cas de requerir tractament addicional. És a dir, ha d'estar 30 vegades diluït, per això es realitza el 70% de 150 mg/l de l'influent del colorant tèxtil Gris Lanaset G.

A l'hora d'escollir el temps de contacte (EBCT) de cadascuna de les columnes es segueixen les recomanacions de la casa comercial que subministra el carbó actiu.

Aquestes indiquen que el temps de contacte habitual entre la solució a tractar i el carbó actiu oscil·la entre els 60 i els 240 minuts.

Es realitzen 5 experiments en continu en sentit descendent del flux influent pel pas de la columna amb 11,02 g i 22,06 g de carbó actiu, es repeteixen varies vegades per diferents incidències durant el seu procés en marxa, explicades a continuació.

L'operació en continu, a diferència de l'operació en discontinu, permet una major automatització i per tant, requereix menys presència física de la persona que supervisa el procés.

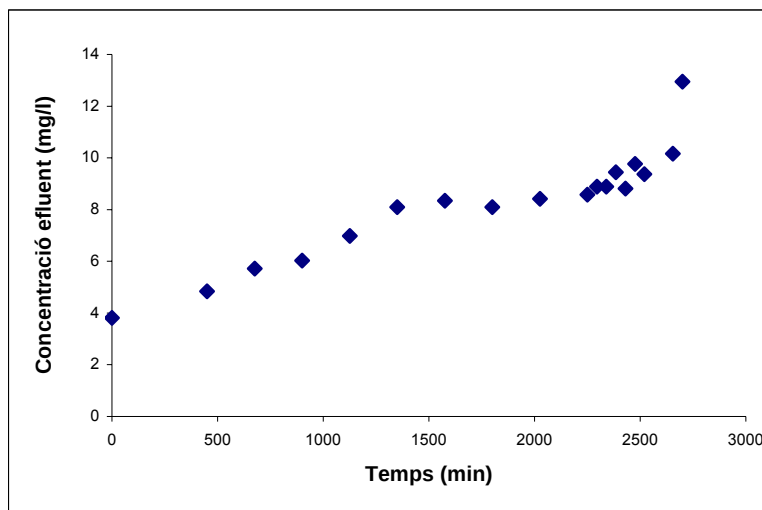
Tan mateix, com més temps es manté en marxa el procés, la probabilitat de que tingui lloc algun incident augmenta. La durada dels experiments en continu realitzats en aquest projecte és molt llarga, per tant, les incidències a les que es va fer front varen ser varies que es destaquen a continuació:

- Un error en el càlcul de la solució influent va provocar que durant un cap de setmana s'esgotés. Com a conseqüència els porus entre els grànuls de carbó varen quedar plens d'aire i per tant va ser irrecuperable.
- El flux descendent de la solució afavoreix la compactació del carbó actiu granular, junt amb l'efecte de la microfiltració que es comenta posteriorment, provoca un augment de la pressió al capsal de la columna i com a conseqüència salta el tap. Es proposa vigilar periòdicament l'augment de la pressió, especialment vigilant l'acumulació de solució a la part superior del carbó actiu.
- Aparició de bombolles d'aire en algun tram de la columna que distorsiona el flux i disminueix molt la capacitat d'adsorció del carbó. Es proposa mantenir el carbó amb aigua destil·lada durant un temps, tant abans de carregar la columna com després, i eliminar les bombolles en la fase de la posada en marxa.
- Aturada de la bomba degut a una sobreescalfament ja que la durada dels experiments en continu és molt llarga, es canvia per una altra, totes dues tipus peristàltica, aquestes donen un cabal petit i reproducible, són les que s'utilitzen als laboratoris, a escala industrial la bomba centrífuga és la més freqüent. El problema és que el carbó actiu utilitzat necessita un cabal petit per millorar el temps de contacte amb la solució, això provoca que la bomba treballi molt lentament, el que ocasiona un escalfament d'aquesta, per això es canvia de bomba. Com s'ha dit, la segona bomba també és peristàltica, però té un sistema que estreny molt el tub per on passa la solució i deixa treballar a cabals més petits sense sobreescalfar-se. El

problema d'aquesta que com estreny molt el tub, fa saltar els topes d'aquest, però es soluciona posant varies brides en els topes per a fer més força.

- Trencament del tub que estreny la bomba degut a la fricció, aquesta és tan elevada que després d'un cert temps el tub no resisteix més i es trenca. Els tubs es canvien cada cert temps, el material de tots és el tygon. És un material de llarga durada, però en aquest cas després de més d'un mes treballant amb el mateix no resisteix més. No s'oxida, l'interior de les parets és suau que evita l'adhesió de partícules i colors. Suau i flexible com cap altre material i transparent.

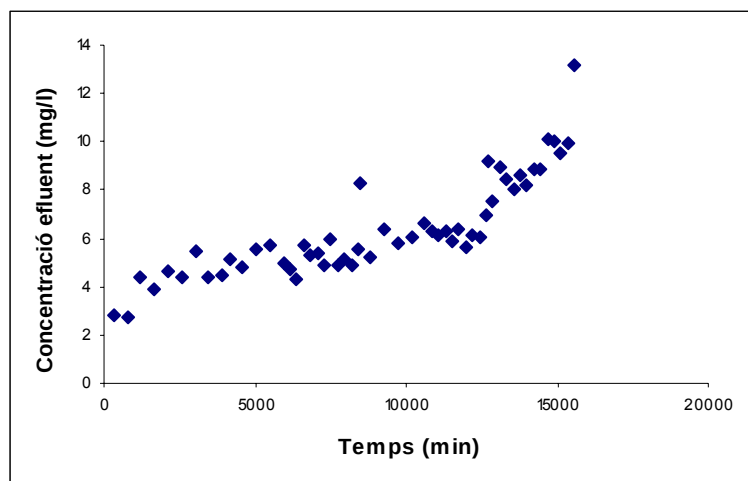
A continuació es presenten els resultats dels experiments en continu:



Taula 4.6. Condicions de treball de la columna amb EBCT 75,04 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	6,5
Diàmetre de la columna (cm)	2,1
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	22,51
Pes de carbó actiu (g)	11
Cabal bomba (ml/min)	0,3
EBCT (min)	75,04
Concentració de colorant (mg/l)	151,788

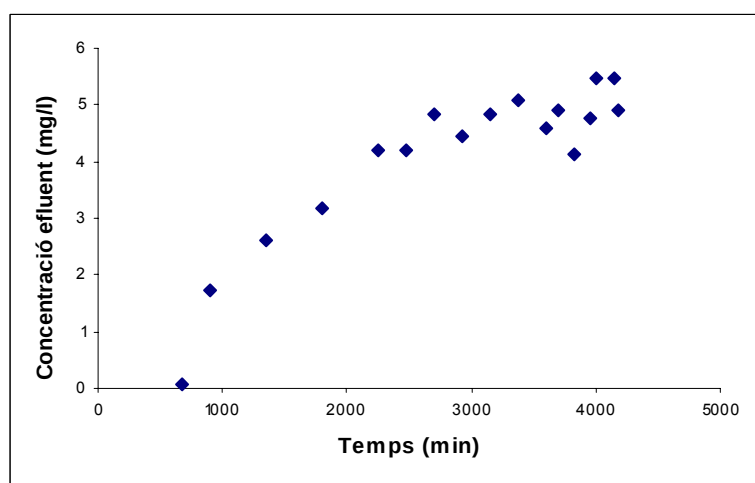
Figura. 4.29. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 75,04 minuts.



Taula 4.7. Condicions de treball de la columna amb EBCT 167,41 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	14,5
Diàmetre de la columna (cm)	2,1
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	50,22
Pes de carbó actiu (g)	22,6
Cabal bomba (ml/min)	0,3
EBCT (min)	167,41
Concentració de colorant (mg/l)	154,550

Figura. 4.30. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 167,41 minuts.



Taula 4.8. Condicions de treball de la columna amb EBCT 86,59 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	7,5
Diàmetre de la columna (cm)	2,1
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	25,98
Pes de carbó actiu (g)	22,6
Cabal bomba (ml/min)	0,3
EBCT (min)	86,59
Concentració de colorant (mg/l)	156,478

Figura. 4.31. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 86,59 minuts.

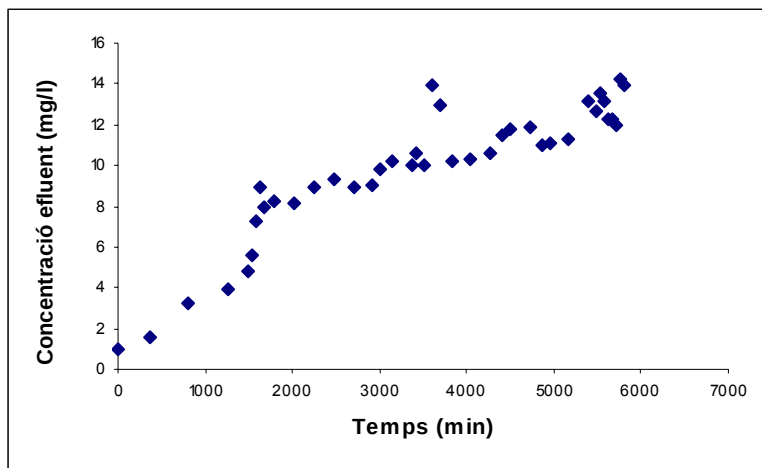


Figura. 4.32. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 87,74 minuts.

Taula 4.9. Condicions de treball de la columna amb EBCT 87,74 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	7,6
Diàmetre de la columna (cm)	2,1
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	26,32
Pes de carbó actiu (g)	22,6
Cabal bomba (ml/min)	0,3
EBCT (min)	87,74
Concentració de colorant (mg/l)	159,418

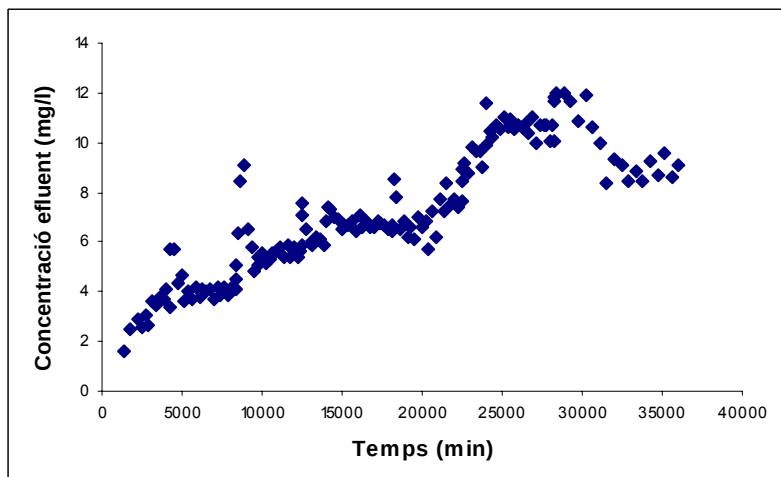
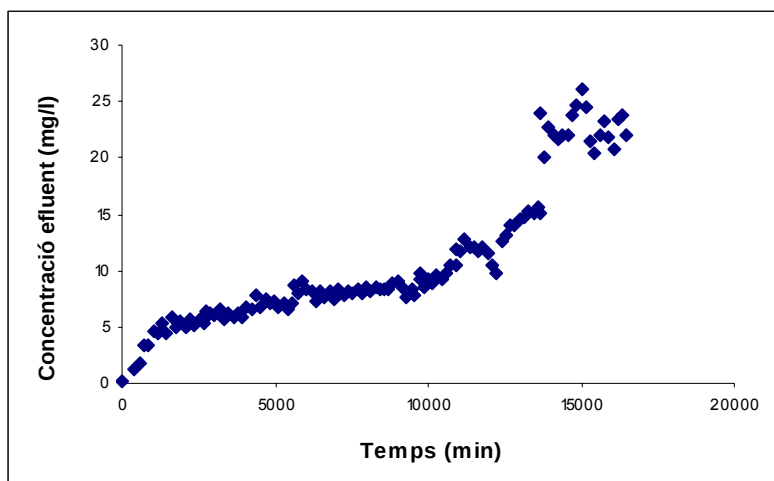


Figura. 4.33. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 161,63 minuts.

Taula 4.10. Condicions de treball de la columna amb EBCT 161,63 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	14
Diàmetre de la columna (cm)	2,1
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	48,49
Pes de carbó actiu (g)	22,6
Cabal bomba (ml/min)	0,3
EBCT (min)	161,63
Concentració de colorant (mg/l)	160,968



Taula 4.11. Condicions de treball de la columna amb EBCT 81,97 minuts.

Alçada de carbó actiu (cm)	14,2
Diàmetre de la columna (cm)	2,1
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	49,18
Pes de carbó actiu (g)	22,6
Cabal bomba (ml/min)	0,6
EBCT (min)	81,97
Concentració de colorant (mg/l)	160,968

Figura. 4.34. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 81,97 minuts.

De la figura 4.29 fins la 4.34 es mostra les corbes de ruptura per a cada columna amb EBCT diferents. Per la columna es fa passar una solució de colorant de 150 mg/l aproximadament. Les condicions de treball de la columna queden recollides a les taules 4.6 fins a la 4.11.

Les fraccions recollides en el col·lector de fraccions són analitzades la seva absorbància i es calcula la seva concentració, mitjançant la recta de calibratge. Representat la concentració de cada fracció en funció del temps s'obté l'anomenada corba de ruptura. A l'annex X es troben els valors d'absorbància per a cada fracció recollida.

Els experiments en deixen en marxa durant un temps llarg, fins i tot un mes, per a construir la corba de ruptura. El problema és que en cap experiment s'arriba al punt de ruptura, el carbó actiu encara té poder d'adsorció després d'un mes en marxa.

En general la concentració de l'efluent augmenta més ràpidament als primers minuts.

La figura 4.35 representa la raó entre la concentració de l'efluent respecte la concentració de la solució de colorant inicial (C_e/C_o) enfront del volum d'aigua tractada partit pel pes de carbó actiu empaquetat en la columna (ml aigua tractada/ g carbó actiu) de cada experiment realitzat en sentit descendent amb diferent EBCT. Destacar que aquest gràfic és equivalent a la forma que pren la corba de ruptura de cada columna com es mostra a les figures 4.29 fins la 4.34. El nivell $C_e/C_o=0,3$ indica el temps de ruptura corresponent al 70% d'eliminació del colorant de la solució original (150 mg/l de colorant tèxtil Gris Lanaset G). Al la figura 4.35 no es pot traçar la línia

corresponent a aquest nivell ja que cap experiment arriba aquest punt, el màxim al qual s'arriba és a una relació de 0,16, correspon a una concentració de l'efluent de 24 ppm, un 84% d'eliminació de l'efluent, la columna encara podria treballar fins assolir el 70%. Com no es pot marcar la línia de 0,3 que correspon al 70% d'eliminació es complica comparar aquests experiments. El resultat esperat és que a menor temps de residència (EBCT) la columna assoleixi la saturació molt més ràpida. Això es traduiria en què la columna assoleix el 70% d'eliminació del colorant en menys temps, i per tant, el volum tractat per gram de carbó actiu és menor. En canvi, com més gran sigui el EBCT, el percentatge de la corba de ruptura és molt més lenta d'assolir, i per tant, el temps perquè assoleixi el 70% d'eliminació de colorant és més llarg.

Degut a que cap experiment assoleix una concentració a l'efluent de 45 mg/l que correspon al 70% d'eliminació s'opta per augmentar el cabal per disminuir el temps de contacte i així poder assolir l'objectiu. La figura 4.34 (EBCT=81,97 minuts) correspon a aquest experiment amb cabal major, el doble (0,6 ml/min) dels primers experiments realitzats (0,3 ml/min). Aquest experiment, amb el doble de cabal, aconsegueix arribar a una concentració de sortida de la columna de 23 ppm, la concentració més elevada de tots els experiments. I es tracten 9.900 ml d'aigua residual tèxtil. Als altres experiments la concentració més elevada correspon a un EBCT de 87,74 minuts (Figura 4.32) i pren un valor de 14 ppm i es tracta 1.741 ml. Tots dos contenen la mateixa quantitat de carbó actiu, 22,6 g.

Igualment a l'experiment amb el doble de cabal no s'arriba al 70% d'eliminació del color, però és el que més s'aproxima amb un 85%, el més positiu és que s'arriben a tractar molts litres de solució per a una columna que només conté 22,6 g.

Concloure doncs, que doblant el cabal amb les mateixes condicions de treball s'aconsegueix tractar 6 vegades més de solució de colorant tèxtil.

A l'annex X es troben els valors de la relació ml aigua tractada/g de carbó actiu i C_e/C_0 .

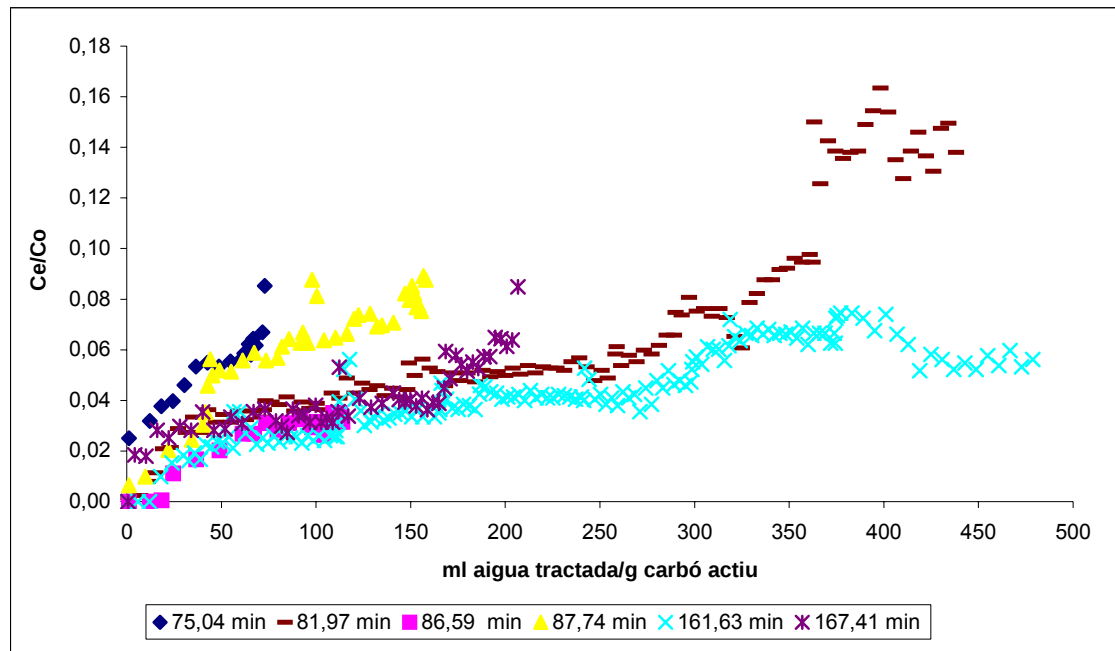


Figura 4.35. Recull dels diferents experiments en columna realitzats en sentit descendent a diferent EBCT.

Com s'observa a la figura 4.35 el comportament no és pas lineal sinó que la relació entre la concentració de l'efluent i la concentració inicial augmenta ràpidament en les primeres fraccions recollides, per estabilitzar-se posteriorment. El fet que el comportament de les corbes no sigui lineal permet establir unes condicions que són un compromís entre el temps de contacte i la capacitat de tractament. Això es tradueix en un cost mínim per volum d'aigua tractada (€/m^3). Aquest cost es calcula a l'apartat 4.3 i es compara amb el cost realitzat al projecte de l'Anna Font.

Al disseny de columnes empacades d'adsorció hi ha moltes variables que poden influir en el seu disseny com són alçada de la columna, cabal a tractar, diàmetre de columna,... Es per això que es aconsellable escollir les condicions més econòmiques.

Per optimitzar un sistema d'adsorció existeixen dos tipus de variables importants. En primer lloc aquelles característiques primàries que determinen la velocitat d'esgotament de l'adsorció com són la capacitat d'adsorció i la velocitat d'adsorció. En segon lloc, aquelles variables del procés que afecten els costos d'operació, per exemple el percentatge d'eliminació, concentració requerida a la sortida, mida de les partícules d'adsorbent, etc.

Per un sistema on la mida de partícula està fixada i també el percentatge de reducció del contaminant, el cost depèn de dues variables:

- a) Percentatge d'esgotament de l'adsorbent que generalment s'expressa com massa d'adsorbent per volum d'aigua tractada.
- b) Temps de residència a columna buida (EBCT) que és una relació directa entre el cabal i el volum d'adsorbent.

Els costos d'operació es determinen a partir de la velocitat d'esgotament de l'adsorbent, això determina el temps de regeneració i per tant la vida útil de l'adsorbent. Fixades unes condicions d'operació, en aquest cas són assolir el 70% d'eliminació, es pot determinar la línia operativa, però com no s'aconsegueix no es pot determinar. Aquesta relaciona la massa de carbó actiu per volum d'aigua tractada amb l'EBCT. Hagués estat interessant determinar-la ja que es pot utilitzar per optimitzar el disseny que permet assolir el cost mínim.

Els resultats obtinguts fins ara en els experiments en continu, que no s'arriba a un 70% d'eliminació i és l'objectiu establert, obliga a buscar un perquè d'aquesta situació. Els experiments estan en marxa durant un període força llarg i ja es tindria que haver assolit aquest 70%. Després de realitzar diversos experiments i observar que sempre es troba amb el mateix, es planteja fer un pensament del que pot estar passant. La resposta que es troba és que a més del procés d'adsorció, també es doni lloc a un fenomen de microfiltració, és a dir, que el carbó també funcioni com un filtre i el colorant es quedi retingut a la columna.

Aquest procés de microfiltració pot passar en els experiments en continu ja que el carbó està empaquetat a la columna i no es mou, en canvi, als discontinus no pot passar ja que el carbó està en moviment.

Per afirmar aquesta suposició s'opta per realitzar uns càlculs a partir de l'experiment d'EBCT 81,97 minuts. Si es dóna la microfiltració l'equació 4.1 s'ha de complir.

$(1) \text{ mg colorant retinuts} = (2) \text{ mg colorant retinuts} + (3) \text{ mg colorant retinuts}$ per adsorció per microfiltració
--

Equació 4.1

Per verificar que hi ha un procés de microfiltració hauria de donar que:

$$(1) - (2) < (3) < (1)$$

(1) El temps s'estableix al 90% d'eliminació de colorant, ja que no arriba al 70%.

$$\begin{aligned} \text{mg colorant retinuts} &= 0,9 \times \text{cabal} \times \text{temps} \times \text{concentració de colorant} = \\ &= 0,9 \times 0,6 \text{ ml/min} \times 13.680 \text{ min} \times 160,968 \text{ mg/l} = \\ &= \mathbf{1321.22 \text{ mg}}. \end{aligned}$$

(2) A partir de l'equació d'equilibri 1.2 es calcula els mg de colorant retinuts per adsorció, és a dir, amb l'isoterma de Langmuir, ja que és a la que més s'aproxima.

Les constants són calculades a l'apartat 4.1.1, la C_e és de 16,09 mg/l (90% de 160,968) i la M és 22,6 g, per tant, s'obté que X és igual a **132,16 mg**.

(3) Per a calcular els mg de colorant retinuts per microfiltració només cal mesclar el carbó actiu de la columna saturat amb un volum d'aigua destil·lada conegut i agitar durant un temps i mirar l'absorbància d'aquesta solució. Es barreja amb 135 ml d'aigua i el resultat de l'absorbància és de 0,604 (dilució 1:3), per tant, aquesta dissolució té una concentració de 144,468 mg/l, i **19,50 mg** de colorant.

Amb aquest experiment es pot observar que els mg adsorbits per microfiltració són mínims.

$$\begin{aligned} (1) \text{ } 1434,225 \text{ mg} \quad (2) \text{ } 172,30 \text{ mg} \quad (3) \text{ } 19,50 \text{ mg} \\ 1434,225 \neq 172,30 + 19,503 \end{aligned}$$

Aquesta igualtat no és certa, el que fa suposar que no es dóna cap procés de microfiltració, però només amb aquesta comprovació no es pot afirmar que no es dóna. Es planteja la possibilitat de que si ha microfiltració, però que el colorant queda

retingut a la superfície del carbó actiu. Per comprovar aquest fet cal estudiar la reversibilitat del procés d'adsorció.

En l'estudi del procés d'adsorció, és important conèixer si aquest es tracta d'un fenomen reversible, i estudiar per tant la desorció de colorant de la superfície del carbó. Per dur a terme aquest estudi, cal posar el carbó actiu d'un experiment d'adsorció en continu que ha arribat a l'equilibri a un vas de precipitats amb 260 ml d'aigua destil·lada, i es realitza una mesura periòdica de l'absorbància de la solució a 590 nm. Un augment d'aquesta absorbància significa que una part del colorant adsorbit torna a la fase aquosa, cosa que significaria que l'adsorció d'aquest sistema és parcialment reversible. S'escull la solució de 4 g/l de carbó i 150 ppm de colorant.

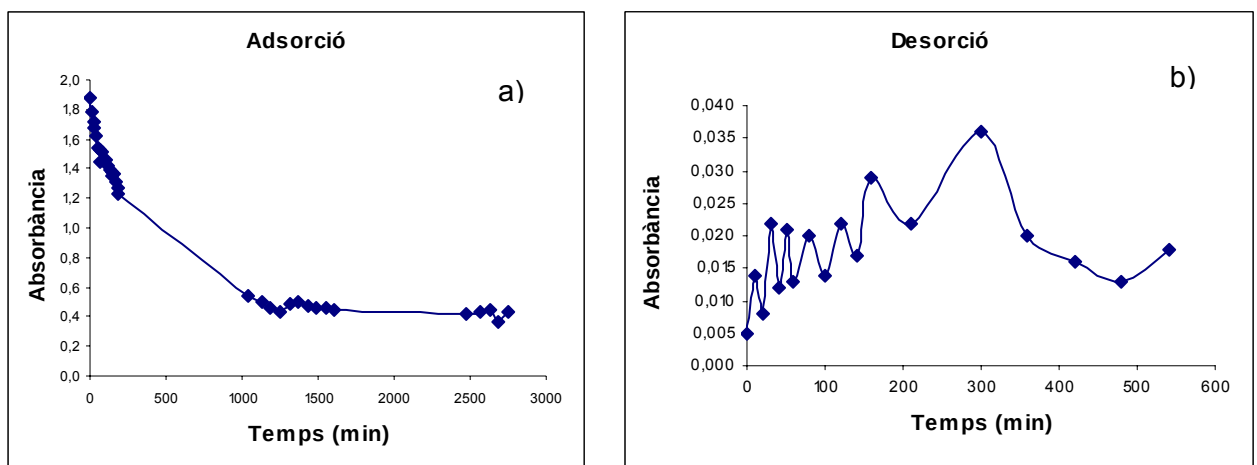


Figura 4.36. Concentració de carbó actiu de 4,010 g/l i de colorant Gris Lanaset de 146,543 mg/l.
a) Adsorció b) Desorció

A la figura 4.36 es pot comprovar que existeix una mínima reversibilitat del procés d'adsorció, insignificant, ja que la màxima absorbància correspon a una concentració de la solució de 1,423 mg/l, és a dir, el 99,03% del colorant es troba retingut sobre la superfície del carbó. El procés de desorció arriba al seu equilibri en un temps molt més reduït del que necessita l'adsorció, i s'assoleixen nivells d'absorbància molt inferiors als valors que s'assolirien si tot el colorant adsorbit al carbó es desorbís.

Els experiments en continu en sentit descendent tenen el problema de que també es dona un procés de microfiltració a més de l'adsorció, per una part és positiu ja que s'elimina més colorant, però a l'hora el carbó pateix colmatació, per tant, l'obstrucció del procés. Aquest fet dins d'una planta de tractament d'aigües industrial pot ocasionar una avaria del sistema i per tant, l'aturada de tota la planta. La solució seria regenerar el carbó més sovint, però això incrementaria el pressupost, per una

banda s'estalvia perquè elimina més colorant, però si s'ha de regenerar més sovint, no compensaria.

Concloure que es comprova que a més del procés d'adsorció hi ha un procés de microfiltració i que el carbó és irreversible.

Per evitar la microfiltració cal realitzar els experiments en sentit ascendent, i així també s'aconsegueix que el carbó actiu no es colmati, aquests es presenten a les figures 4.37 i 4.38 i les condicions de treball de la columna a les taules 4.12 i 4.13.

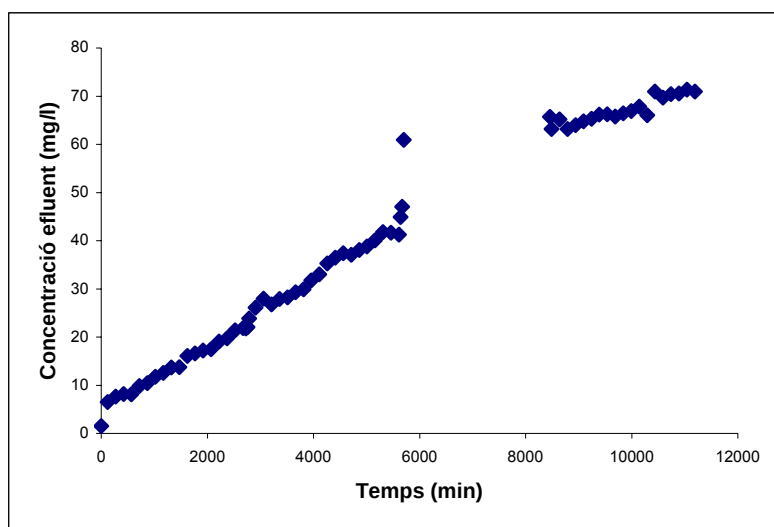


Figura. 4.37. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 38,17 minuts.

Taula 4.12. Condicions de treball de la columna amb EBCT 38,17 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	9
Diàmetre de la columna (cm)	1,8
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	22,90
Pes de carbó actiu (g)	11,0
Cabal bomba (ml/min)	0,6
EBCT (min)	38,17
Concentració de colorant (mg/l)	153,259

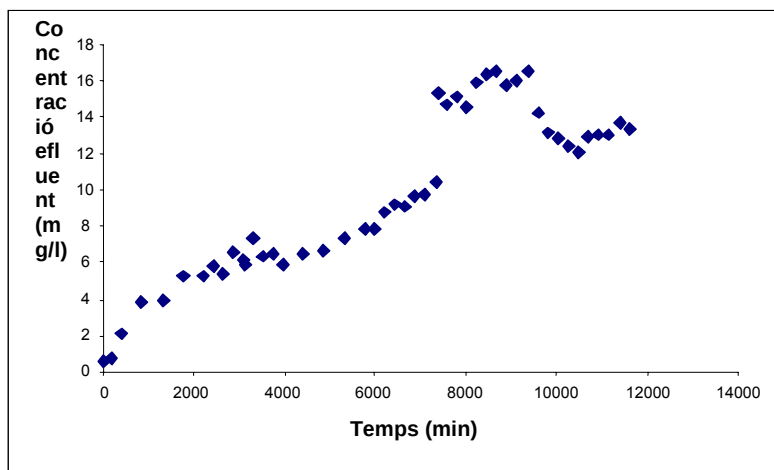


Figura. 4.38. Corba de ruptura per a la columna amb EBCT de 76,34 minuts.

Taula 4.13. Condicions de treball de la columna amb EBCT 76,34 minuts.

Paràmetres	
Alçada de carbó actiu (cm)	9
Diàmetre de la columna (cm)	1,8
Volum ocupat pel carbó actiu (cm ³)	22,90
Pes de carbó actiu (g)	11,0
Cabal bomba (ml/min)	0,3
EBCT (min)	76,34
Concentració de colorant (mg/l)	150,861

A la figura 4.37 es pot observar que la concentració de colorant a la sortida de la columna si arriba a 45 mg/l, s'aconsegueix eliminar un 70% del colorant de la solució inicial, aquest instant correspon als 5640 minuts de la posada en marxa. Si la solució de colorant entra en el sistema de forma ascendent es pot solucionar el problema de la microfiltració. Fins i tot, la concentració a la sortida arriba a 70 mg/l després d'una setmana en marxa, un 50% d'eliminació del colorant, aquest efluent ja no seria admès en una EDAR, ja que no compleix el requisit.

Després d'haver assolit l'objectiu es planteja fer altre experiment en sentit ascendent però disminuint el cabal a la meitat, 0,3 ml/min, cabal pensat inicialment per a tots els experiments. Aquest experiment queda recollit a la figura 4.38 i les condicions de treball a la taula 4.13. Al disminuir el cabal, el temps de contacte entre solut i adsorbent augmenta, això comporta una major capacitat d'adsorció del carbó actiu. Com és d'imaginar, el temps per assolir un % d'eliminació determinar és major. En aquest no s'assoleix el 70% d'eliminació, com a molt arriba al 90% i es tracten 3.483 ml de solució de colorant.

Si es comparen els dos experiments es pot observar que el resultat és l'esperat, ja que el que té menor temps de residència, 38,17 minuts, assoleix la saturació molt més ràpida. Això es tradueix en què la columna assoleix el 70% d'eliminació del colorant en menys temps, i per tant, el volum tractat per gram de carbó actiu és menor. Per a una eliminació del 90%, el de menor EBCT tracta 972 ml, en canvi, el de major ha arribat a tractar 2.214 ml, el doble de solució.

La imatge 4.3 mostra l'evolució del color de l'efluent, es veu com el carbó es satura i ja no adsorbeix més. El primer tub correspon a l'efluent als 120 minuts de la posada en marxa i s'aconsegueix un 95,72% d'eliminació, solució pràcticament neta. Al segon i tercer ja s'observa una mica de color, però només conté 23 ppm aproximadament. En canvi el quart i cinquè tub ja contenen 41 ppm, és on s'assoleix el 70% d'eliminació, als 5610 minuts, en aquest instant l'experiment ja es pot parar, l'efluent que surt a partir d'aquest moment ja no compleix els requisits si aquest es tingués que portar a una EDAR. El carbó ja està saturat i no pot adsorbir més, s'ha de dur a una planta de regeneració. Fins aquest instant s'han pogut tractar 8.366 ml d'aigua residual tèxtil. Al sisè tub, moment on s'atura l'experiment, l'efluent ja conté 70,97 ppm, 50,06% d'eliminació de color, per tant, no es pot dur a una EDAR.



Imatge 4.3. Eliminació del color per a una solució de 153,537 ppm de colorant Gris Lanaset G i amb 11 g de carbó actiu.

1r tub. Als 120 minuts, 6,509 ppm.

2n tub. Als 12670 minuts, 21,849 ppm.

3r tub. Als 2790 minuts, 23,836 ppm.

4rt tub. Als 5610 minuts, 41,241 ppm.

5è tub. Als 5640 minuts, 44,897 ppm.

6è tub. Als 11190 minuts, 70,97 ppm.

4.3. Avaluació econòmica

L'avaluació econòmica del procés d'adsorció es fa en base als resultats obtinguts en els experiments realitzats amb columnes de carbó actiu. Es treballa amb diferents columnes que operen en continu, però l'avaluació econòmica es fa per als dos experiments en sentit ascendent de l'influent pel pas de la columna. L'avaluació econòmica que es porta a terme es compara amb els resultats obtinguts en el projecte de l'Anna Font, per aquest motiu s'escullen aquests dos experiments en sentit ascendent ja que assolixen un 90% d'eliminació de colorant a l'efluent de sortida, i és la condició a partir de la qual fa l'avaluació econòmica l'Anna Font, la qual estava comparada amb un tractament biològic, on s'utilitza el fong *Trametes versicolor*, en fase experimental en el laboratori d'Enginyeria Química de la Universitat Autònoma de Barcelona.

A l'avaluació s'ha tingut en compte el cost del carbó actiu, el cost de l'energia necessària pel funcionament del procés i la disposició final del carbó actiu.

4.3.1. Desglossament de costos:

1. Carbó actiu

El preu ha vingut donat per la casa comercial Chemviron Carbon. El seu preu és de 3,32 €/Kg.

El temps de residència ve marcat pel cabal amb el qual es treballa i pel volum del flux pistó. El cabal ve donat per la bomba peristàltica, prèviament calibrada. El

volum del flux pistó ve determinat per la quantitat de carbó actiu el qual estava empaquetat dins de la columna.

La taula 4.14 recull el cost del carbó actiu per aquestes dues columnes amb les qual s'ha treballat.

Taula 4.14. Característiques de les columnes utilitzades per realitzar l'avaluació econòmica.

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Volum d'aigua tractada (ml)	Relació volum/massa al 90% d'eliminació (ml/g)	Cost de carbó actiu (€)	Cost per volum d'aigua tractada (€/m ³)
38,17	11,0	972	88,36	0,0365	37,57
76,34	11,0	2214	201,27	0,0365	16,50

Recordar que l'única diferència entre aquests dos experiments és el cabal, si es disminueix el cabal a la meitat, EBCT 76,34 minuts, es pot tractar el doble de volum d'aigua i es cost del carbó actiu es redueix a la meitat.

2. Demanda energètica

El muntatge experimental consisteix en una bomba peristàltica que condueix la solució amb colorant tèxtil fins a la columna i un col·lector de fraccions per recollir en fraccions l'efluent de la columna. Per tal d'avaluar l'energia necessària pel seu funcionament, es té en compte el voltatge, la intensitat i el temps de funcionament (temps necessari per assolir el 90% d'eliminació del colorant de la solució a tractar) tan sols de la bomba. A escala industrial només s'hauria de tenir en compte el sistema de bombeig ja que l'efluent de les columnes de carbó actiu no es recolliria en un col·lector de fraccions. El preu de l'electricitat ha estat calculat segons el detallat de la taula 4.15. La taula 4.16 mostra la potència consumida per la bomba utilitzada en els experiments.

Taula 4.15. Detalls del còmput del cost de l'electricitat consumida. Tarifa segons l'empresa FECSA-ENDESA, aprovada BOE 1/7/2006.

Concepte	
Preu potència contractada (kW)	1,526588 €
Preu kWh	0,086726 €
Impost sobre electricitat (sobre el cost de la potència contractada i el cost del consum)	1,05113 x 4,864%
Lloguer d'equips	0,56 €
IVA (sobre base imposable: consum+impostos+lloguer equips)	16%
Total de la factura: suma del cost de la potència, del consum, de l'impost de l'electricitat, el lloguer d'equips i l'IVA.	

Taula 4.16 . Característiques elèctriques del sistema de bombeig utilitzat.

Aparell	Voltatge (V)	Intensitat (mA)	Potència (W)
Bomba peristàltica	240	250	60

A la taula 4.17 es presenta el consum de l'electricitat de les columnes estudiades, la columna amb un EBCT major està més temps en marxa per assolir el 90% d'eliminació, per tant, l'energia consumida és major.

Taula 4.17. Consum de l'electricitat contractada pel funcionament de les columnes.

EBCT (min)	Temps de ruptura (min)	Energia consumida (kWh)
38,17	1620	1,62
76,34	7380	7,38

Tenint en compte com es factura l'electricitat, el cost de l'energia consumida es resumeix a la taula 4.18.

Taula 4.18 . Cost de l'electricitat consumida en les columnes.

EBCT (min)	Cost potència (€)	Cost KWh consumits (€)	Impost electricitat (€)	Lloguer equips (€)	Base imposable (€)	IVA (€)	Total (€)
38,17	0,09	0,140	0,012	0,56	0,80	0,13	0,93
76,34	0,09	0,640	0,037	0,56	1,33	0,21	1,54

Tenint en compte el volum d'aigua amb colorant tèxtil tractat a les columnes fins assolir el nivell del 90% d'eliminació, s'obté el cost de l'electricitat per volum d'aigua tractada en aquests processos, queda recollit a la taula 4.19.

Taula 4.19 . Cost de l'electricitat per volum d'aigua tractada per a cada columna de carbó actiu.

EBCT (min)	Total (€)	Volum d'aigua tractada (ml)	Cost energia per volum aigua tractada (€/m ³)
38,17	0,93	972	956,79
76,34	1,54	2214	695,57

El cost de l'electricitat consumida és major a la columna amb un EBCT de 76,34 minuts, però si es té en compte el volum d'aigua tractada el cost d'energia per volum d'aigua és inferior, ja que tracta el doble d'aigua.

3. Disposició final

El carbó actiu, un cop saturat, es pot regenerar per tal que aquest pugui ser de nou utilitzat en les columnes d'adsorció. La regeneració té lloc a la planta de Sant Joan Despí que té l'empresa Aguas de Levante S.A. El cost de regeneració del carbó actiu és de 2,97 €/Kg, força elevat, però no superior al preu del carbó actiu nou que és de 3,32 €/Kg, punt molt positiu per a la avaluació econòmica i per incentivar a la regeneració d'aquest carbó un cop saturat en comptes de comprar de nou. L'empresa recull el carbó actiu utilitzat sense cap cost, i el regeneren per tornar-lo a vendre, per tant en aquest cas el cost de la disposició final del carbó actiu és positiu. Així s'eviten els problemes d'abocaments de carbons saturats i el menor preu de l'adquisició de carbó nou, representa un gran estalvi. A la taula 4.20 queda recollit el cost de la regeneració de carbó utilitzat per a cada columna.

Taula 4.20. Cost de la regeneració de carbó actiu utilitzat.

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Cost regeneració (€)	Volum d'aigua tractada (ml)	Cost per volum aigua tractada (€/m³)
38,17	11,0	0,033	972	33,95
76,34	11,0	0,033	2214	14,91

El carbó actiu és un adsorbent industrial amb un elevat poder calorífic i com a tal, el seu tractament final pot ser el de la valorització energètica. La planta incineradora es troba a Constantí (Tarragona). El carbó actiu és recollit per Centres de Transferència, els quals acumulen el carbó actiu i el porten a la planta incineradora. El cost d'incineració és de 1,09 €/Kg de carbó actiu. El transport costa 22,5 €/tn. Així, el cost total d'incineració és de 1,11 €/Kg. El cost de la disposició final per a les columnes estudiades si es du a incinerar queda recollit a la taula 4.21.

Taula 4.21. Cost d'incineració per volum d'aigua tractada

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Cost valorització (€)	Volum d'aigua tractada (ml)	Cost per volum aigua tractada (€/m³)
38,17	11,0	0,012	972	12,55
76,34	11,0	0,012	2214	5,51

Una altra possibilitat de disposició final és la gestió en dipòsit controlat. Prèviament, però, cal fer una analítica de perillositat. Si l'analítica dona que el carbó actiu residual és admissible, aquest, sense rebre cap tipus de tractament, pot ser admès en un abocador de Classe II (abocador de Residus No Especials).

El colorant Gris Lanaset G conté crom i cobalt en la seva estructura química. El crom és un metall pesant perillós pel medi ambient i com a tal, els dipòsits controlats de residus estableixen uns límits. Així, en un abocador de Classe II, els residus no han de sobrepassar el 5% en pes de crom. El colorant tèxtil estudiat té una concentració de crom de 2,5% en pes. Sabent el volum d'aigua tractada fins el temps de ruptura del 90% d'eliminació i el pes de carbó actiu empaquetat en la columna, la quantitat de crom adsorbit en el carbó actiu queda recollit en la taula 4.22.

Com es pot veure a la taula 4.22 el carbó actiu utilitzat per eliminar el colorant Gris Lanaset G de les aigües residuals es pot dur a dipòsit controlat de Classe II. El

cost de gestió en abocador és de 51,10 €/tn (cànon de l'abocador) i el cost del transport és de 22,5 €/tn. A la taula 4.22 queda recollit el cost de gestió en abocador del carbó actiu.

Taula 4.22. Contingut de crom adsorbit en el carbó actiu i cost d'abocament.

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Volum aigua tractada (ml)	Massa crom adsorbit en carbó actiu (%)	Gestió abocador?	Cost per volum d'aigua tractada (€/m ³)
38,17	11,0	972	0,034	Sí	0,83
76,34	11,0	2214	0,076	Sí	0,37

Com es pot observar a les taules anteriors, la regeneració de carbó actiu és el procés més car, seguit de la incineració, i la disposició final més econòmica és dur el carbó saturat a un abocador. La disposició final dels experiments amb un EBCT menor és més cara, ja que amb la mateixa quantitat de carbó actiu es tracta menys volum d'aigua.

Cal tenir en compte que encara que la regeneració sigui la disposició final més cara, aquest procés surt a compte ja que surt més econòmic regenerar el carbó que no pas comprar de nou. En el cas d'un EBCT de 38,17 minuts comprar carbó nou costa 37,57 € per a tractar 1 m³ d'aigua residual, en canvi, regenerar-lo és més econòmic, 33,95 €, un estalvi de 3,62 €. Si es decideix com a disposició final un abocador, a aquest cost cal sumar el cost del carbó nou per a omplir la columna, 38,40 € en total, si es regenerés hi hauria un estalvi de 4,45 €. És més econòmic regenerar el carbó que no pas donar-li altre disposició final, ja que a escala industrial es compra carbó contínuament per dur a terme els processos.

A més, la incineració de residus origina nous problemes ambientals i sanitaris, desincentiva la minimització de la generació de residus, i és incompatible amb programes de recuperació, reciclatge i compostatge que valoritzin els materials utilitzats. La incineració de residus allibera al medi ambient contaminants altament tòxics. Les emissions es donen en forma gasosa (a través dels gasos de la xemeneia i d'emissions fugitives), líquida (efluents dels dispositius de rentat de gasos) i sòlida (cendres i filtres). Entre els contaminants tòxics emesos es troben dioxines i furans, metalls pesats com plom, cadmi i mercuri, gasos d'efecte hivernacle, gasos àcids i partícules ultra fines.

La indústria incineradora recupera l'energia durant la combustió dels residus, sent-ne un mètode de valorització.

Si s'opta per un abocador controlat també sorgeixen problemes ambientals, ja que en el procés de descomposició de la matèria, es formen lixiviats que arrossegueu els productes tòxics presents a les escombraries, i contaminen les aigües subterrànies. S'alliberen a l'aire importants quantitats de gasos com metà, CO₂ o gasos tòxics com el benzè, tricloretilè. Durant els incendis accidentals o provocats, s'alliberen a l'atmosfera productes tòxics com les dioxines. La reducció dels impactes ambientals es pot aconseguir dissenyant abocadors que evitin la contaminació de l'entorn en el qual s'ubiquen. Es deuen prendre mesures per a la impermeabilització dels abocadors i la instal·lació de sistemes de recollida de lixiviats, de manera que s'evitin la contaminació de l'aigua i del sòl. També es poden prevenir alguns impactes mitjançant sistemes de recuperació de biogas produït a la descomposició de la matèria orgànica.

L'opció més sostenible sempre és aquella que aprofita els materials a través de la reparació, la reutilització, el reciclatge, el compostatge, per tant, en aquest cas la millor opció seria la regeneració del carbó actiu que comporta un estalvi econòmic i un benestar pel medi ambient.

Si s'adjunta el cost del carbó actiu, el cost de l'electricitat consumida i el cost de la disposició final (regeneració carbó, valorització i dipòsit controlat) s'obté el cost total per volum d'aigua del procés d'eliminació del colorant tèxtil de les aigües residuals per aquestes columnes. Aquest cost queda recollit a la taula 4.23.

Taula 4.23. Cost total del procés fisicoquímic per volum d'aigua tractada.

EBCT (min)	Cost per volum d'aigua tractada (€/m ³)		
	Regeneració	Valorització	Abocador
38,17	1028,31	1006,91	995,19
76,34	726,98	717,58	712,44

El que es pot observar és que a major temps de residència, el cost per volum d'aigua tractada disminueix. Com menor sigui el temps de residència, la columna més ràpidament arriba al punt de ruptura i, per tant, més sovint s'ha de fer la seva regeneració.

La disposició final del carbó no difereix massa en el cost total del procés, encara que l'abocador sigui el tractament més barat. Això es deu a que la disposició final del carbó actiu té molt poc pes en el còmput total del cost del procés.

La figura 3.39 mostra el pes de cada factor en el conjunt del procés prenent el cas més desfavorable (tractament final del carbó actiu: valorització). Com es pot observar, el que més encareix el procés en les columnes amb les quals es treballa és el cost de l'energia, més del 90% del cost total.

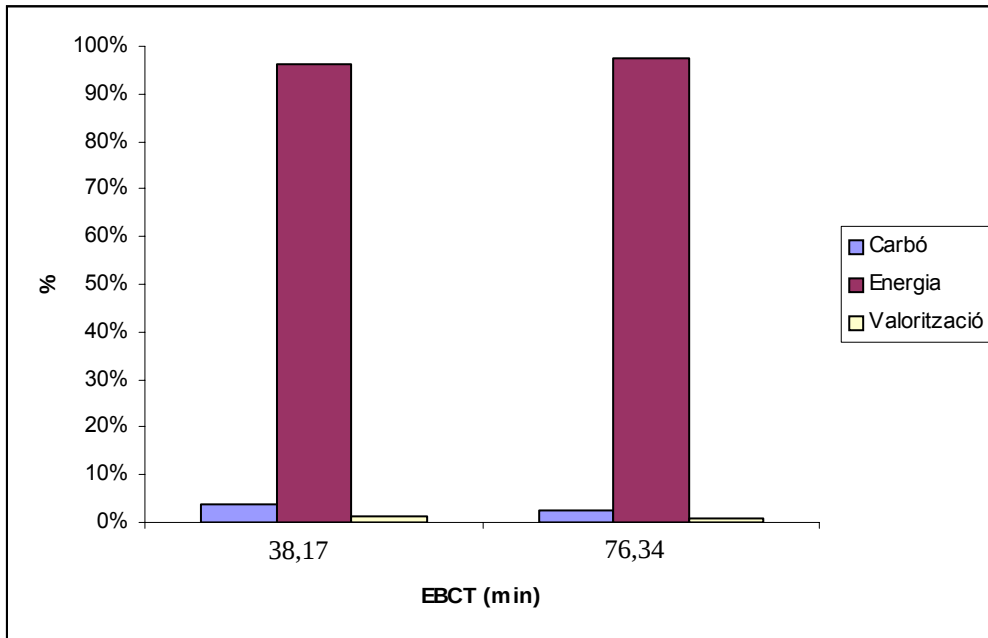


Figura 4.39. Pes de cada factor en el cost total del funcionament de les columnes, si es dur a terme una valorització com a disposició final.

4.3.2. Comparació de l'avaluació econòmica dels dos adsorbents

Per tal de comparar els dos adsorbents s'ha escollit la columna de carbó actiu amb un EBCT de 38,17 minuts, ja que és la més semblant a la columna òptima econòmicament escollida per l'Anna Font (EBCT de 21,53 minuts), a l'Annex XI es mostren els costos desglossats duts per l'Anna Font. La taula 4.24 mostra un resum de les característiques dels dos adsorbents i el cost del carbó actiu, de l'energia consumida i de la disposició final, s'escull la valorització ja que és el cas més desfavorable econòmicament.

Taula. 4.24. Resum de les característiques dels dos adsorbents i el cost total.

	Carbó actiu utilitzat al present projecte	Carbó actiu utilitzat per l'Anna Font
Temps de residència (min)	38,17	21,53
Concentració de colorant (mg/l)	150	150
Temps de ruptura (h)	27	14,10
Cost del carbó actiu (€/m³)	37,57	29,99
Cost de l'energia consumida (€/m³)	956,79	745,59(*)
Cost de la disposició final (valorització) (€/m³)	12,55	11,21
Cost total (€/m³)	1006,91	786,79

(*)Dades actualitzades, ja que el preu de la potència contractada, el preu kWh i el lloguer d'equips ha augmentat en aquests 3 anys.

Per aconseguir una mateixa eliminació de colorant Gris Lanaset G (el 90% d'una solució inicial de 150 mg/l) el cost per volum d'aigua tractada amb el carbó actiu utilitzat en el present projecte és de 1006,91 €/m³, mentre que amb l'altre tipus de carbó pren un valor inferior, 786,79 €/m³.

Inicialment es pensa que el carbó utilitzat en aquest projecte té un cost total del procés d'adsorció inferior a d'altres adsorbents, degut a la seva elevada capacitat d'adsorció. Però, l'avaluació econòmica contradiu la idea inicial. El factor determinant d'aquest increment en el cost total es deu a la diferència en el cost d'energia, 211 €/m³, provocat per l'elevat temps que està en marxa l'experiment per assolir el temps de ruptura.

Aquestes dues columnes tenen les mateixes característiques, excepte el cabal, el de l'Anna Font és el doble, 1,30 ml/min, això suposa que tracta més volum d'aigua però que assoleix el % d'eliminació més ràpid. Això comporta que el temps de ruptura sigui inferior, per tant, el cost de l'energia consumida és menor.

El cost d'energia consumida encareix el procés total d'adsorció, per aconseguir-ne una reducció cal estudiar alternatives principalment pel sistema de bombeig.

També cal tenir en compte que el carbó actiu utilitzat és més car, l'utilitzat per l'Anna Font val 2,97 €/Kg, una diferència de 0,35 €/Kg, però no és el factor determinant d'aquest major cost total.

L'avantatge principal del carbó utilitzat en aquest projecte és la disposició final, ja que surt a compte regenerar-ho, en comptes de comprar nou, o donar-li altre disposició, com és un abocador o una valorització. Així s'eviten els problemes d'abocaments de carbons saturats.

5. CONCLUSIONS

El color és el paràmetre ambiental més característic dels efluents tèxtils i l'adsorció dels colorants en carbó actiu és el mètode tradicional de reducció d'aquest color. Aquest tractament pot ser únic o bé complementari d'altres sistemes de tractament com ara la degradació biològica. En aquest projecte es realitza una valoració econòmica del procés d'adsorció en carbó actiu en funció del grau de reducció de color que cal assolir.

Malgrat aquesta gran capacitat d'adsorció del carbó actiu, la seva disposició final (regeneració, valorització o dipòsit controlat de residus) fa que sigui un tractament amb un gran impacte ambiental. Tot això ha portat al desenvolupament d'una línia d'investigació per tractar aigües residuals colorades amb fongs.

Els experiments en discontinu realitzats durant aquests mesos d'investigació constaten que a concentracions molt baixes de carbó actiu granular es poden assolir elevades eliminacions de colorant tèxtil Gris Lanaset G. Com major és la concentració de carbó actiu, el temps per assolir un % d'eliminació determinat és menor ja que hi ha més superfície de carbó per adsorbir el colorant. L'adsorció és més ràpida durant els primers minuts de contacte entre la solució i el carbó actiu. Amb el temps, l'absorbància i, per tant, la concentració de colorant a la dissolució, tendeix a estabilitzar-se, en aquest punt es troba la concentració en equilibri. A partir d'aquesta concentració s'ajusten les isoterms d'adsorció de Langmuir i Freundlich per aquest procés d'adsorció i així poder comparar-les amb altres adsorbent.

El sistema d'adsorció amb pèl·lets de *Trametes versicolor* té un nivell d'adsorció inferior, adsorbeix menys mg de solut per g d'adsorbent. En canvi, el carbó actiu utilitzat per l'Anna Font assoleix més ràpidament un % d'eliminació si la concentració de carbó actiu és petita, però si aquesta és major el temps per assolir un % d'eliminació del color és inferior en el carbó actiu utilitzat en el present projecte. La comparació resulta difícil ja que el nombre d'experiments realitzats per l'Anna Font són menys ja que es va trobar amb el problema de no poder determinar la concentració en equilibri.

A tots els adsorbents estudiats la isoterma d'adsorció de Langmuir s'ajusta més a una recta, suposa que el màxim nivell d'adsorció es dona en una monocapa saturada de molècules d'adsorbat sobre la superfície de l'adsorbent.

El fet d'assolir l'equilibri en un temps raonable fa viable l'aplicació del procés en continu.

La realització d'experiments en continu amb l'altre colorant tèxtil, Orange G, verifica l'eficàcia d'adsorció d'aquest carbó. Amb una petita quantitat de carbó s'assoleix pràcticament el 100% d'eliminació de color. Les isoterms corroboren aquest fet, s'adsorbeixen més mg d'adsorbat, ja que és un colorant més simple.

Es realitzen diferents experiments en columnes de carbó actiu operant a diferents temps de contacte (EBCT). Davant de l'operació en continu es troben varies dificultats que varien els objectius establerts i fan plantejar solucions i respostes ràpides per a poder continuar amb els anàlisis. Els experiments en sentit descendent del flux d'entrada a la columna tenen l'inconvenient de la microfiltració. Aquest problema es resolt canviant el sentit del flux, no es dona la microfiltració si aquest és ascendent, així es pot assolir el 70% d'eliminació de colorant a la sortida de l'efluent, objectiu marcat inicialment. Davant d'aquest problema sorgeix la incògnita de saber si aquest carbó és reversible, els experiments constaten que aquest és irreversible. Les condicions de les columnes determinen el cost per volum d'aigua tractada (€/m³).

L'últim objectiu és comparar l'avaluació econòmica del procés d'adsorció amb el carbó actiu utilitzat i el cost del carbó utilitzat per l'Anna Font. Aquesta avaluació es realitza en base al cost del carbó actiu, la demanda energètica i la disposició final (regeneració, valorització, abocador controlat). Els experiments realitzats en el present projecte aposten per una major capacitat d'adsorció per volum d'aigua tractada. Però els càlculs realitzats afirmen que el cost total per aconseguir una mateixa eliminació de colorant Gris Lanaset G (el 90% d'una solució inicial de 150 mg/l) per volum d'aigua tractada és major amb el carbó actiu utilitzat en el aquest projecte que no pas el de l'Anna Font. El que més encareix el procés en totes dues avaluacions és la demanda energètica. La recerca de solucions al gran consum energètic que suposa el funcionament del procés afavoreix a l'abaratiment del procés, si el tipus d'energia consumida provingués de fonts renovables contribuiria positivament al desenvolupament sostenible.

L'avantatge principal d'aquest carbó és el balanç positiu econòmicament en la seva regeneració com a disposició final, i així s'eviten els problemes d'abocaments de carbons saturats amb la conseqüència d'un increment de residus en el medi ambient.

6. BIBLIOGRAFIA

- Aretxaga A. 1998. Estudi del procés d'adsorció amb microorganismes per eliminar color en aigües residuals. Bellaterra, Projecte Fi de Carrera de Ciències Ambientals.
- Blánquez P. 2005. Desenvolupament d'un procés a escala pilot per al tractament del colorant tèxtil Gris Lanaset G amb *Trametes versicolor*. Bellaterra, Memòria de Tesi Doctoral.
- Doménech X. 1995. Química del suelo. El impacto de los contaminantes. Madrid, Miraguano Ediciones.
- Font A. 2003. Avaluació econòmica i ambiental del tractament fisicoquímic i biològic d'efluents tèxtils. Bellaterra, Projecte Fi de Carrera de Ciències Ambientals.
- Generalitat de Catalunya. Departament d'Indústria, Comerç i Turisme. Institut Català d'Energia. 1998. Tecnologies avançades en estalvi i eficiència energètica. Ús racional de l'aigua al sector d'ennobliment del tèxtil. Barcelona, Biblioteca de Catalunya.
- Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient. 2002. Prevenció de la contaminació en la tintura, estampació i acabats tèxtils. Manuals d'ecogestió; 10. Barcelona, Biblioteca de Catalunya.
- Marijuan de Santiago L. 1998. Cinética de adsorción de compuestos fenólicos en disolución acuosa sobre carbón activo: determinación de los coeficientes de difusión interna. Madrid, Tesis doctoral.
- Mallevialle J, Odendaal P, Wiesner M. 1998. Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. Madrid, Editorial McGraw- Hill.
- Masía E, Capó J. 2003. Evolución del sector textil en España. El caso del textil hogar. Valencia, Escuela Superior de Alcoy. Universidad Politécnica de Valencia.

- Metcalf & Eddy. 1998. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento , vertido y reutilización. Madrid, Editorial McGraw-Hill.
- Ramalho, R. S. 1993. Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona, Reverté, S. A.
- Serna Molinera J. 1991. Cinética de adsorción de compuestos fenólicos en disolución acuosa en carbón activado. Madrid, Tesis doctoral.

RECUROS WEB

- es.wikipedia.org/wiki/Portada
- www.acte.net/sectortextil.htm
- www.ambientum.com/revista/2003_03/carbon.htm
- www.carbotecnica.info
- www.chemvironcarbon.com
- www.cityc.es
- www.gencat.es/mediamb
- www.icp.csic.es/cyted/Monografias/Monografias1998/B2-253.pdf
- www.infoeuropea.org/catala/ABC/polmediambient.htm#punt4
- www.lenntech.com/espanol/adsorcion.htm

7. ANNEX

ÍNDEX

ANNEX I: FULL D'ESPECIFICACIÓ DEL CARBÓ ACTIU GRANULAR REF. CAL FE03204C

ANNEX II: FULL D'ESPECIFICACIÓ DEL CARBÓ ACTIU GRANULAR CHEMVIRON CARBON F400

ANNEX III: FITXA DE SEGURETAT DEL COLORANT GRIS LANASET G

ANNEX IV: RECTA DE CALIBRATGE PER LA DETERMINACIÓ ESPECTROFOTOMÈTRICA DEL COLORANT GRIS LANASET G

ANNEX V: RECTA DE CALIBRATGE PER LA DETERMINACIÓ ESPECTROFOTOMÈTRICA DEL COLORANT ORANGE G

ANNEX VI: EXPERIMENTS EN DISCONTINU DEL COLORANT GRIS LANASET G

ANNEX VII: DADES ADSORCIÓ EN CARBÓ ACTIU AMB COLORANT GRIS LANASET G

ANNEX VIII: EXPERIMENTS EN DISCONTINU DEL COLORANT ORANGE G

ANNEX IX: DADES ADSORCIÓ EN CARBÓ ACTIU AMB ORANGE G

ANNEX X: EXPERIMENT EN CONTINU DEL COLORANT GRIS LANASET G

ANNEX XI: AVALUACIÓ ECONÒMICA DUTA A TERME AL PROJECTE FI DE CARRERA DE L'ANNA FONT

ANNEX I: FULL D'ESPECIFICACIÓ DEL CARBÓ ACTIU GRANULAR REF. CAL FE03204C



Technologies for Purification,
Separation, Recovery and Synthesis

CAL[®] AND CAL[®] I Agglomerated Coal Based Granular Activated Carbon

DESCRIPTION

CAL[®] and CAL[®] I carbons are granular activated carbons specially designed for the purification and decolourisation of aqueous and organic liquids in fixed or moving beds.

These carbons are produced from selected grades of bituminous coal by a highly developed and strictly controlled manufacturing process to a reliable and consistent product standard. This ensures a high quality product with an ideal porosity offering the optimum kinetics for adsorption of a wide range of coloured organic impurities.

FEATURES

Agglomerated coal based granular activated carbons have several properties, which explain their superior performance in a wide range of applications: in the food and chemical industry.

- Produced from a pulverised blend, results in a **consistent high quality product**.
- The activated carbon granules are uniformly activated throughout the whole granule, not just the outside. This results in **excellent adsorption properties and constant adsorption kinetics** in a wide range of applications.
- A high pore volume means a more efficient use of the carbon. This results in a low carbon dosage.
- High mechanical strength and uniform transport pore distribution also gives the agglomerated carbon **excellent reactivation performance** and low attrition losses during carbon handling.
- Coal based agglomerated granular activated carbon are suitable for **multiple reactivations** compared to other base materials such as peat and wood.
- The agglomerated structure ensure **rapid wetting**.
- CAL[®] and CAL[®] I carbons are conform to the US codex specifications, «Food Chemicals Codex» 3rd edition, and to the German Codex Specifications; Bundesgesetzblatt Juli 18 1984 Nr.30 Aktivkohle Liste10.

SELECTION

CAL[®] and CAL[®] I are utilised worldwide for the decolourisation and purification of aqueous and organic liquids. Typical applications include:

- Decolourisation of food additives
- Glycerine purification
- Chemical and pharmaceutical intermediates
- Solvent decolourisation
- Inorganic and organic acid purification
- Caustic or basic liquor purification.

CAL[®] I is used in applications where larger colour bodies are expected.

PROPERTIES

SPECIFICATIONS	CAL [®] 12x40	CAL [®] I 12x40
Molasses Number, min.	230	250
Iodine Number, min., mg/g	1050	1050
Abrasion Number, min.	75	75
Moisture Content, as packed, max., %w/w	2	2
Mean Particle Diameter, mm	0.9-1.1	0.9-1.1
Apparent Density, min., g/cc	0.44-0.55	0.44-0.55
Mesh size, US Sieve Series	12x40	12x40
> 12 mesh (1.70mm), max. %	5	5
< 40 mesh (0.425mm), max. %	4	4

(Please refer to the Sales Specification Sheets, which state the Chemviron Carbon test method used to define the above specifications. Copies are available upon request.)

TYPICAL PROPERTIES	CAL [®] 12x40	CAL [®] I 12x40
Bed Density*, kg/m ³	450	450
Hardness Number	95	95
Surface Area, (N ₂ BET method**), m ² /g	1050	1050
Voids in Dense Packed Column, %Vol/Vol	36-40	36-40
Specific Heat at 100°C - kJ/kg.K	1	1

(*) Bed Density is used for adsorbent sizing;

(**) Brunauer, Emmett and Teller, J. Am. Chem. Soc. 60, 309 (1938).

RECYCLING BY THERMAL REACTIVATION

Once granular carbon is saturated or the treatment objective is reached, it can be recycled, by thermal reactivation, for reuse. Reactivation involves treating the spent carbon in a high temperature reactivation furnace to over 800°C. During this treatment process, the undesirable organics on the carbon are thermally destroyed. Recycling by thermal reactivation is a highly skilled process to ensure that spent carbon is returned to a reusable quality. Chemviron Carbon operates Europe's largest reactivation facilities and daily recycles large quantities of spent carbon for a divers range of customers. Recycling activated carbon by thermal reactivation meets the environmental need to minimise waste, reducing CO₂ emissions and limiting the use of the world's resources.

CAL[®] and CAL[®] I high adsorption capacity enable continuous decolourisation cycles to be carried out, after which the carbon can be thermally reactivated for repeated use avoiding waste disposal costs. Sweetening-off of spent granular carbons prior to reactivation leads to valuable product recovery and significant savings in product loss. The combined high mechanical strength of CAL[®] and CAL[®] I with the transport pores give the carbon **excellent reactivation performance and low losses** during reactivation.

Product Bulletin

Visit our website at www.chemvironcarbon.com to learn more about our complete range of products and services, and local contact information.



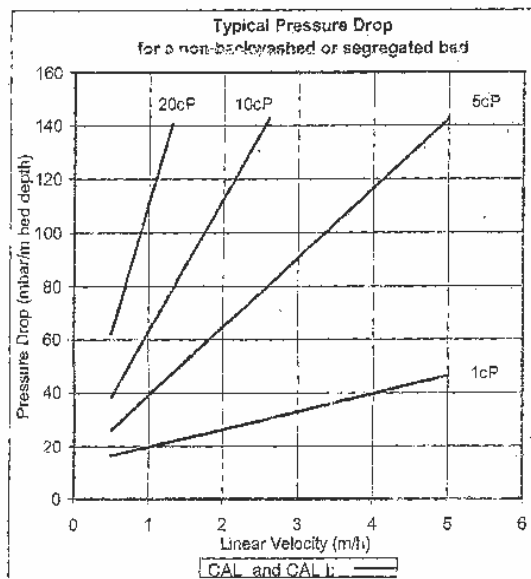
Responsible Care[®]
Good Chemistry for World

DESIGN INFORMATION

Design parameters for **CAL[®]** and **CAL[®] I** depend on the applications it is used in. Following are a range of typical operating conditions:

- Empty bed contact time 60-240min.
- Bed depth 1-10m
- Inlet velocity 1-5m/h

Pressure drop per metre of bed depth for **CAL[®]** and **CAL[®] I** carbons are shown for different liquor viscosities. This data was obtained in down flow columns with a normal packing arrangement in which the carbon was pre-soaked in hot liquid and charged to the column as a slurry. The bed density, g/l of the charged carbon was calculated to be 450kg/m³.



PACKAGING

- 25kg bags (**CAL[®]**)
- Big bags
- Bulk tanker

SAFETY MESSAGE

Wet activated carbon preferentially removes oxygen from air. In closed or partially closed containers and vessels, oxygen depletion may reach hazardous levels. If workers are to enter a vessel containing carbon, appropriate sampling and work procedures for potentially low-oxygen spaces should be followed.

QUALITY

Each of our worldwide operations has achieved ISO9002 certification for their quality management system related to activated carbon. Chemviron Carbon guarantees the quality and consistency of every **CAL[®]** and **CAL[®] I** shipment and all specifications are guaranteed against representative sampling.

CHEMVIRON CARBON

Chemviron Carbon, the European operation of Calgon Carbon Corporation, is a global manufacturer, supplier, and developer of granular activated carbon, innovative treatment systems, value added technologies, and services for optimizing production processes and safely purifying the environment.

With over 60 years of experience, facilities around the world, and a world-class team of over 1,000 employees, Calgon Carbon Corporation can provide the solutions to your most difficult purification challenges.

N.B. Chemviron Carbon reserves the right to change specifications without notice. All rights reserved for reproduction in part or in full without prior permission from Chemviron Carbon.

Visit our website at www.chemvircarbon.com

P-2050 - 30.09.2003



Corporate Headquarters
400 Calgon Carbon Drive
Pittsburgh, PA 15205, USA
Tel.: +1 (0) 412 787-6700
Fax: +1 (0) 412 787-6713

**Chemviron
Carbon**

**European Operations of
Calgon Carbon Corporation**
Zoning Industriel C de Feluy
B - 7181 Feluy, Belgium
Tel.: +32 (0) 64 51 18 11
Fax: +32 (0) 64 54 15 91

Your local office



AGUAS DE LEVANTE, S.A.
C/ Girona, 176
08037 BARCELONA

ANNEX II: FULL D'ESPECIFICACIÓ DEL CARBÓ ACTIU GRANULAR CHEMVIRON CARBON F400

Potable, Process and Waste Water Treatment

Filtrisorb® 300 and 400

Agglomerated Coal Based Granular Activated Carbon



PRODUCT DESCRIPTION

Filtrisorb 300 and 400 are both from the renowned Filtrisorb range of Granular Activated Carbons which are installed in over 500 water treatment plants in Europe, the United States and Asia. Filtrisorb are produced by steam activation of selected grades of bituminous coal that have first been pulverised then agglomerated.

Filtrisorb 300 and 400 have both high adsorption capacity and a high number of transport pores. This gives the carbon a greater selectivity for the removal of micropollutants such as pesticides in the presence of high concentrations of natural organic matter. In addition, these products are best suited to the removal of total organics such as disinfection by-product precursors, the humic substances which react with chlorine to form compounds such as trihalomethanes. Filtrisorb 300 is also particularly suited to the treatment of bank infiltrated water.

FEATURES

- The transport pores between the agglomerated particles within each granule allow the activation gases to penetrate much more within the structure of the activated carbon. The whole granule, not just the outside, is activated. This results in excellent adsorption in a wide range of applications.
- Combined with the high mechanical strength of the coal base, these transport pores also give the carbon excellent reactivation performance.
- The agglomerated structure ensure rapid wetting. There is no remaining floating material.
- By producing from a pulverised blend, the product is more uniform resulting in consistent high quality products.
- The carbon bed will be segregated which is where the larger granules go the bottom and smaller granules to the top of the bed. This stratification is retained after repeated backwashing, ensuring the adsorption profile remains unchanged with time and therefore maximising the bed life before breakthrough.
- Filtrisorb 300 and 400 comply with EN12915, have KIWA ATA Certification and are approved by the United Kingdom Drinking Water Inspectorate.

DESIGN INFORMATION

The following are typical design parameters for Filtrisorb 300 and 400 installed for the treatment of surface water

- Empty bed contact time 10 - 30 minutes
- Bed depth 1 - 3m
- Linear velocity 5 - 20m/h
- Backwash bed expansion 20%

SELECTION

Filtrisorb 300 has a US Standard sieve size range of 8x30 giving an effective size range of 0.80 to 1.00mm. Filtrisorb 400 has a 12x40 US Standard sieve size giving an effective size range of 0.60 to 0.70mm. In general, the smaller the granule size, the better the adsorption performance, therefore Filtrisorb 400 should be selected unless the pressure drop is too high. In this case, Filtrisorb 300 should be selected. Pressure drop graphs in function of linear velocity and temperature are shown on the reverse for both products.

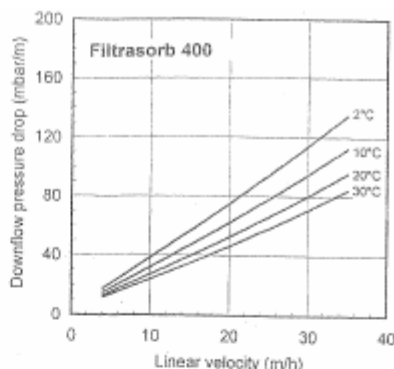
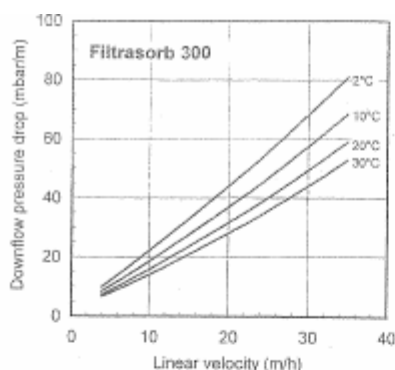
TECHNICAL DESCRIPTION

SPECIFICATIONS	F300 8 x 30	F400 12 x 40
Iodine number, minimum, mg/g	950	1050
Methylene blue number, minimum	230	260
Abrasion number, minimum	75	75
Moisture content, as packed, max. %	2.0	2.0
Effective size, mm	0.80-1.00	0.60-0.70
Mesh size, US Sieve Series		
> 8 mesh (4.75mm), max. %	15	-
> 12 mesh (1.70mm), max. %	-	5
< 30 mesh (0.60mm), max. %	4	-
< 7 mesh (0.425mm), max. %	-	4

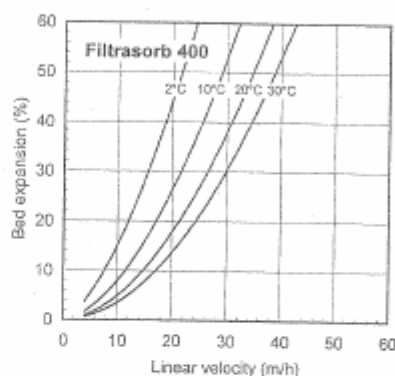
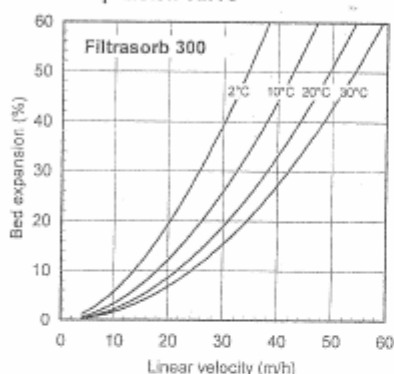
(Please refer to the Sales Specification Sheets which state the Chemviron Carbon test method used to define the above specifications. Copies available upon request.)

TYPICAL PROPERTIES	F300 8 x 30	F400 12 x 40
Bed density, backwashed and drained (for adsorber sizing), kg/m³	460	425
Floating content, TM-40, %w/w	0.1	0.1
Surface area, ISO 9277, m²/g	950	1050
Mean particle diameter, mm	1.6	1.0
Uniformity coefficient	1.9	1.7
Phenol loading at 1mg/l, DIN 19603, %	4.7	5.2
Detergent (TPBS) loading at 1mg/l, mg/g	150*	200*
Atrazine loading at 1µg/l, mg/g	40*	40*
Toluene loading at 1mg/l, mg/g	90*	100*
Trichloroethylene at 50µg/l, mg/g	20*	20*

*Isotherm loading in distilled water. These are reported for comparison and are unlikely to reflect loadings in practice.



Typical bed expansion curve



PACKING

- 25kg paper bags
- F300 - 454 kg big bags, F400 - 450kg big bags
- Bulk

QUALITY

Each of our European Operations has achieved ISO9002 for their quality management system related to activated carbon.

CHEMVIRON CARBON

Chemviron Carbon is the European operation of Calgon Carbon Corporation, a pioneer in carbon adsorption technology for over half a century.

Chemviron Carbon produces a range of pulverised, pelleted and granular carbons, including acid washed and impregnated products for use in a wide range of air, gas, water and process applications.

N.B. Chemviron Carbon reserves the right to change specifications without notice. All rights reserved for reproduction in part or in full without prior permission from Chemviron Carbon.

Chemviron Carbon - European operation of Calgon Carbon Corporation

Sales Offices

Benelux and European Headquarters

CHEMVIRON CARBON

Zoning Industriel C de Feluy

B-7181 Feluy, Belgium

Tel. +32 (0) 64 51 18 11

Fax. +32 (0) 64 51 15 91

e-mail: info@chemvironcarbon.com

Website: www.chemvironcarbon.com

Germany

CHEMVIRON CARBON GmbH

Robert-Koch-Strasse 1-3

D-63263 Neu Isenburg, Germany

Tel. +49 (0) 6102 3094-0

Fax. +49 (0) 6102 3094-33

Corporate Headquarters

Calgon Carbon Corporation

400 Calgon Carbon Drive

Pittsburgh, PA 15205, USA

Tel. +1 (0) 412 787-6700

Fax. +1 (0) 412 787-6713

Mailing address: P.O. Box 717

Pittsburgh, PA 15230-0717, USA

e-mail: ccc-info@calgoncarbon.com

website: www.calgoncarbon.com

France

CHEMVIRON CARBON

Immeuble "Expansion"

9-11 rue Georges Enesco

F-94008 Creteil Cedex, France

Tel. +33 (0) 1 43 77 12 63

Fax. +33 (0) 1 43 99 94 47

United Kingdom

CHEMVIRON CARBON Ltd

Number One Southlink

Oldham OL4 1DE, England

Tel. +44 (0) 161 628 5000

Fax. +44 (0) 161 628 5111



ANNEX III: FITXA DE SEGURETAT DEL COLORANT GRIS LANASET G

Ciba Specialty Chemicals

COLORS Y CONSUMER CARE

HOJA DATOS DE SEGURIDAD (91/155/CE)



1/4
Código del producto 080173.5
Fecha 06.01.1998
Sustituye HDS fecha 28.01.1997

NOMBRE COMERCIAL

GRIS LANASET G

1. IDENTIFICACION DE LA SUSTANCIA/ PREPARADO Y LA EMPRESA

Descripción química	Mixture of metal complex dyes
Fabricante	Ciba Specialty Chemicals, CH-4002 Basel
Departamento responsable	Ecotox TD 2.5 Fax 0041 61 630 7996
Proveedor	Ciba Specialty Chemicals s.a. Balmes, 117 08008 Barcelona
Teléfono de emergencia	(93) 404 03 00 Fax (93) 404 03 03

2. COMPOSICION/ INFORMACION SOBRE LOS COMPONENTES

Información sobre los componentes	%	No. CAS	Símbolo	Frases R
No aplicable				

3. IDENTIFICACION DE LOS PELIGROS

Sin clasificación de riesgo según EC

4. PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación	
Contacto con la piel	Quitar las ropas contaminadas. Lavarse las zonas del cuerpo afectadas con jabón y abundante agua.
Contacto con los ojos	Lávese inmediata y abundantemente con agua durante 10 minutos como mínimo
Ingestión	Enjuáguese la boca con agua. Beber abundante agua.
Información para el médico	Tratamiento sintomático

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

Medios de extinción adecuados	Agua, espuma, polvo seco, anhídrido carbónico.
Medios de extinción que no deben utilizarse	Sin restricciones.
Riesgo de fuego/ explosión	Ninguno.
Gases de combustión	Oxidos de carbono, nitrógeno y azufre
Protección personal	Aparato de respiración autónoma.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Precauciones individuales	
Precauciones para la protección del medio ambiente	No verter en medio acuático
Métodos de limpieza	Colocarlo en envases señalizados para su eliminación como residuo químico
Información adicional	

-- No aplicable

7. MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

Higiene laboral	Evitese su ingestión, inhalación y contacto con los ojos y la piel. Manipularlo de acuerdo con los principios de higiene industrial y estipulaciones legales pertinentes.
Prevención del fuego	
Medios de almacenamiento	Almacenar en lugar fresco y seco con adecuada ventilación
Segregación	No son necesarias precauciones especiales
Condiciones de almacenamiento	No son necesarias precauciones especiales

8. CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

Componentes con límites de exposición	Ninguna
Protección personal	

9. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Aspecto	Estado	Pulvo
	Color	Negro
	Olor	Ninguno

DATOS DE SEGURIDAD IMPORTANTES

Punto de fusión	--	°C			
Punto de ebullición	--	°C			
Punto de destello	--	°C			
Descomposición térmica	> 200	°C			
Temperatura de inflamación	> 450	°C			
Autoinflamabilidad				BAM	
Propiedades oxidantes	Ninguna				
Límites de explosión	Inferior			Superior	--
Presión de vapor	--			mbar	a
Densidad				a	
Solubilidad en agua	100			g/l	a
	100			g/l	a
pH	7.5-8.5				1
Coefficiente de reparto				log Pow	
Viscosidad	--			mPa.s	a

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Condiciones a evitar	Ninguna
Materiales a evitar	Ninguno.
Productos de descomposición peligrosos	Ninguno.
Información adicional	

11. INFORMACION TOXICOLOGICA

Toxicidad aguda	(LD50)	> 5000	mg/kg			Ratas (oral)
Irritación primaria	(Piel)	Non irritante	EC 83	OECD 404		Conejos
	(Ojos)	Non irritante	EC 83			Conejos
Efectos negativos en el hombre		No se conocen efectos negativos				
Información adicional						

12. INFORMACIONES ECOLOGICAS

Bioeliminación	70-80%, Análisis DOC,	OCDE 302B
Resumen	Eliminación por adsorción sobre lodo	

DATOS ECOTOXICOLÓGICOS

Toxicidad para el efluente bacterias	EST C150	> 300	mg/l		
Toxicidad para los peces	CL0 CL50	6 16	mg/l mg/l	48 h trucha arcoiris	OECD 203
Resumen	Nocivo para los organismos acuáticos (Modelo CE)				
Comportamiento en las plantas de tratamiento	No produce inhibición. No se conocen efectos nitrificadores inhibidores				

INFORMACION ECOLOGICA ADICIONAL

DBO5	25	mgO2/g	DQO	1000	mgO2/g	COT	34.4 %
Contenido de nitrógeno	5.7	%					
Contenido de fósforo	0.1	%			as phosphate		
Contenido en halógeno orgánico	-	%					
Contenido de metales	0.78 2.5	% %			Cobalt as organo-metal complex Chromium as Cr(III) organo-metal complex		

Producto ensayado Basado en datos conocidos de los componentes

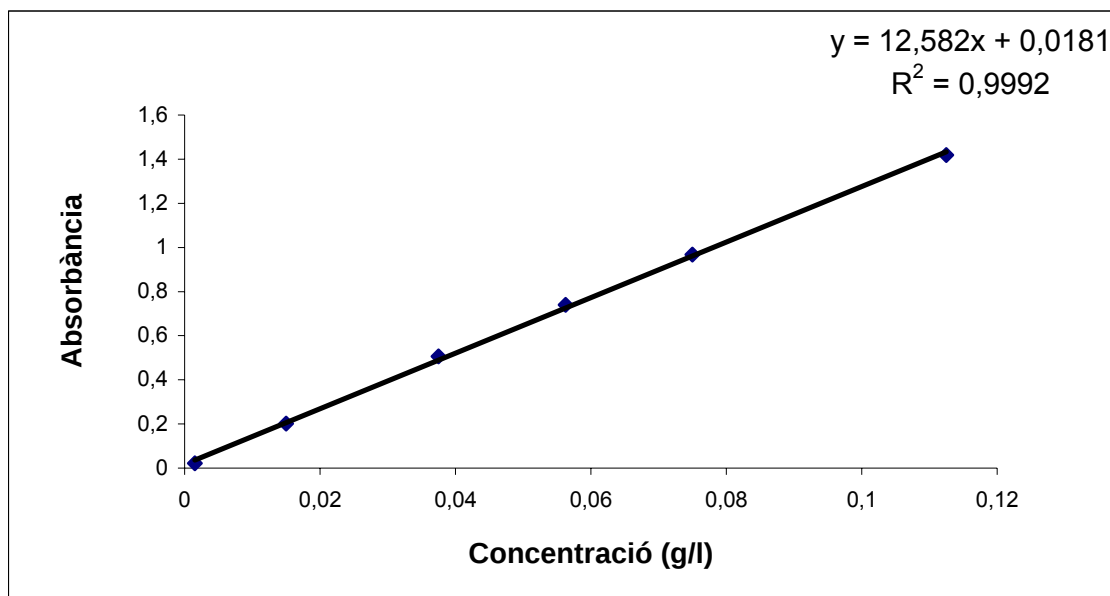
13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACION

Producto	Incinerar, verter. Observar las disposiciones legales.
Clasificación de los residuos (91/689/CE)	
Embalaje contaminado	Tratar como residuos químicos los envases vacíos contaminados

14. INFORMACION RELATIVA AL TRANSPORTE MANTENER LEJOS DE ALIMENTOS				
Número UN ADR/RID	FREE	Clase ADR/RID	FREE	
Nombre para el transporte ADR/RID				
Número UN IMO	FREE	Clase IMDG	FREE	Grupo de embalaje
Nombre para el transporte IMO				
Número UN ICAO	FREE	Clase ICAO		Grupo de embalaje
Nombre para el transporte ICAO				
15. INFORMACION REGLAMENTARIA				
CLASIFICACION Y ETIQUETADO			83/467 CE	
Símbolo y clasificación			-- --	
Frasas R				
Frasas S				
Contiene				
16. OTRAS INFORMACIONES				
17. INFORMACIONES APLICABLE EN SU USO COMO				
Colorante textil				
Los productos de la División de Colorantes y Productos Químicos de Ciba Specialty Chemicals son de calidad técnica y si no se ha especificado lo contrario, están recomendados únicamente para su utilización en aplicaciones industriales de preparación, tintura o acabado de textiles, papel o cuero. Si se desean utilizar para otras aplicaciones, inclusive en productos de consumo sujetos a estándares o legislaciones específicas, deben ser consultado al proveedor. Los datos indicados en las H.D.S. son aplicables únicamente a los productos de Ciba Specialty Chemicals comercializados bajo sus propias designaciones. A petición de las autoridades competentes, Ciba Specialty Chemicals facilitará la información técnica en que se basan dichos datos.				

ANNEX IV: RECTA DE CALIBRATGE PER LA DETERMINACIÓ ESPECTROFOTOMÈTRICA DEL COLORANT GRIS LANASET G

Lectura absorbància: 590 nm



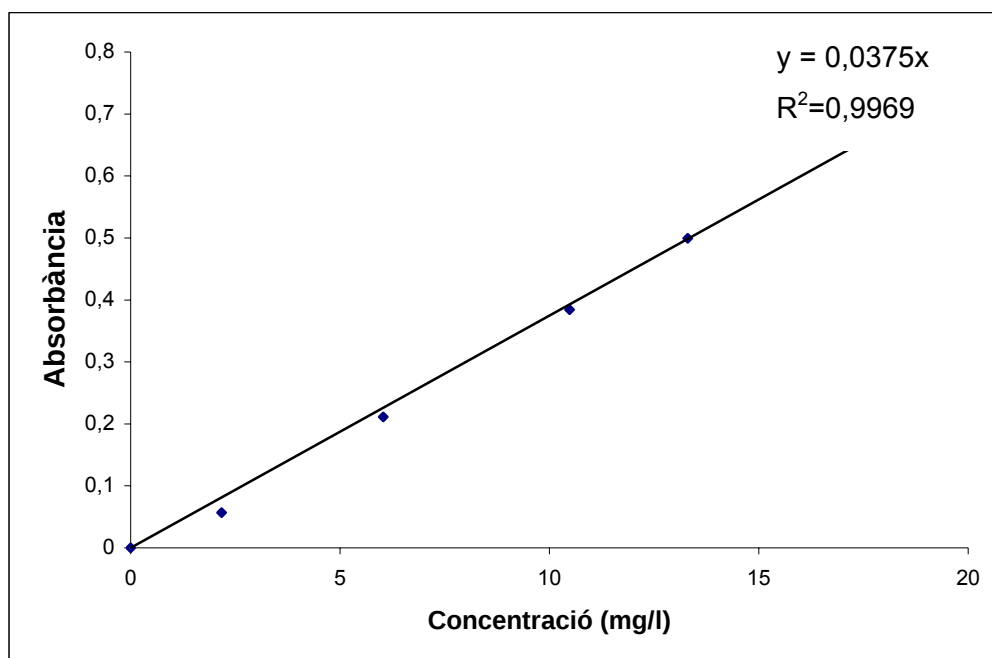
Concentració (g/l)	Absorbància
0,0015	0,022
0,015	0,201
0,0375	0,506
0,05625	0,74
0,075	0,968
0,1125	1,418

A continuació es presenta una imatge de l'envàs del colorant Gris Lanaset G.



ANNEX V: RECTA DE CALIBRATGE PER LA DETERMINACIÓ ESPECTROFOTOMÈTRICA DEL COLORANT ORANGE G

Lectura absorbància: 478 nm



A continuació es presenta una imatge de l'envàs del colorant Orange G.



ANNEX VI: EXPERIMENTS EN DISCONTINU DEL COLORANT GRIS LANASET G

Experiment 1

Concentració de carbó actiu = 0,823 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,002	2,004	156,398	
0	0,944	1,888	147,179	0,000
10	0,927	1,854	144,476	1,836
20	0,923	1,846	143,840	2,268
30	0,924	1,848	143,999	2,160
40	0,917	1,834	142,887	2,916
50	0,917	1,834	142,887	2,916
60	0,908	1,816	141,456	3,888
70	0,908	1,816	141,456	3,888
80	0,919	1,838	143,205	2,700
90	0,905	1,810	140,979	4,212
100	0,893	1,786	139,072	5,508
110	0,905	1,810	140,979	4,212
120	0,908	1,816	141,456	3,888
130	0,898	1,796	139,866	4,968
140	0,900	1,800	140,184	4,752
150	0,887	1,774	138,118	6,156
160	0,885	1,770	137,800	6,372
170	0,838	1,676	130,329	11,449
180	0,880	1,760	137,005	6,913
190	0,836	1,672	130,011	11,665
1030	0,845	1,690	131,442	10,693
1120	0,856	1,712	133,190	9,505
1180	0,860	1,720	133,826	9,073
1240	0,857	1,714	133,349	9,397
1270	0,853	1,706	132,713	9,829
1300	0,860	1,720	133,826	9,073
1330	0,863	1,726	134,303	8,749
1430	0,845	1,690	131,442	10,693
1480	0,854	1,708	132,872	9,721
1540	0,828	1,656	128,739	12,529
1600	0,780	1,560	121,110	17,713
2470	0,744	1,488	115,387	21,601
2620	0,691	1,382	106,962	27,325
2680	0,732	1,464	113,480	22,897
2740	0,709	1,418	109,824	25,381
2800	0,729	1,458	113,003	23,221

Experiment 2

Concentració de carbó actiu = 1,010 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,010	2,020	157,670	
0	0,965	1,930	150,517	0,000
10	0,964	1,928	150,358	0,106
30	0,949	1,898	147,973	1,690
40	0,928	1,856	144,635	3,908
60	0,929	1,858	144,794	3,802
70	0,941	1,882	146,702	2,535
80	0,929	1,858	144,794	3,802
100	0,925	1,850	144,158	4,225
110	0,934	1,868	145,589	3,274
130	0,913	1,826	142,251	5,492
140	0,910	1,820	141,774	5,809
150	0,909	1,818	141,615	5,914
160	0,902	1,804	140,502	6,654
170	0,907	1,814	141,297	6,125
180	0,913	1,826	142,251	5,492
1020	0,781	1,562	121,268	19,432
1110	0,776	1,552	120,474	19,960
1170	0,764	1,528	118,566	21,227
1230	0,757	1,514	117,454	21,967
1290	0,753	1,506	116,818	22,389
1410	0,718	1,436	111,254	26,085
1470	0,728	1,456	112,844	25,029
1530	0,701	1,402	108,552	27,881
1590	0,742	1,484	115,069	23,551
2460	0,672	1,344	103,942	30,943
2550	0,670	1,340	103,624	31,154
2610	0,637	1,274	98,379	34,640
2670	0,553	1,106	85,026	43,511
2730	0,647	1,294	99,968	33,583

Experiment 3

Concentració de carbó actiu = 1,516 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,009	2,018	157,511	
0	0,984	1,968	153,537	0,000
20	0,974	1,948	151,947	1,035
30	0,979	1,958	152,742	0,518
40	0,943	1,886	147,020	4,245
50	0,958	1,916	149,404	2,692
60	0,932	1,864	145,271	5,384
80	0,818	1,636	127,150	17,186
90	0,859	1,718	133,667	12,941
100	0,912	1,824	142,092	7,454
110	0,882	1,764	137,323	10,560
120	0,877	1,754	136,528	11,078
130	0,935	1,870	145,748	5,073
140	0,963	1,926	150,199	2,174
150	0,839	1,678	130,488	15,012
990	0,683	1,366	105,691	31,163
1080	0,661	1,322	102,194	33,440
1140	0,656	1,312	101,399	33,958
1200	0,594	1,188	91,543	40,377
1260	0,631	1,262	97,425	36,546
1320	0,605	1,210	93,292	39,238
1380	0,603	1,206	92,974	39,445
1440	0,611	1,222	94,246	38,617
1500	0,617	1,234	95,199	37,996
1560	0,617	1,234	95,199	37,996
2430	0,520	1,040	79,781	48,038
2520	0,501	1,002	76,760	50,005
2580	0,502	1,004	76,919	49,902
2640	0,484	0,968	74,058	51,765
2700	0,488	0,976	74,694	51,351
2760	0,474	0,948	72,469	52,801
2820	0,475	0,950	72,628	52,697
2880	0,458	0,916	69,925	54,457
2940	0,474	0,948	72,469	52,801
3870	0,391	0,782	59,275	61,394
3960	0,396	0,792	60,070	60,876
5700	0,306	0,612	24,301	84,172

Experiment 4

Concentració de carbó actiu = 2,006 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,011	2,022	157,829	
0	0,968	1,936	150,993	0,000
30	0,935	1,870	145,748	3,474
60	0,882	1,764	137,323	9,053
90	0,877	1,754	136,528	9,580
120	0,776	1,552	120,474	20,212
150	0,738	1,476	114,433	24,213
1000	0,610	1,220	94,087	37,688
1090	0,587	1,174	90,431	40,109
1150	0,585	1,170	90,113	40,320
1210	0,558	1,116	85,821	43,162
1270	0,565	1,130	86,934	42,425
1330	0,483	0,966	73,899	51,058
1390	0,548	1,096	84,231	44,215
1450	0,530	1,060	81,370	46,110
1510	0,467	0,934	71,356	52,742
1570	0,512	1,024	78,509	48,005
2440	0,421	0,842	64,044	57,585
2530	0,405	0,810	61,501	59,269
2590	0,402	0,804	61,024	59,585
2650	0,348	0,696	52,440	65,270
2710	0,394	0,788	59,752	60,427

Experiment 5

Concentració de carbó actiu = 3,060 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,027	2,054	160,372	
0	0,987	1,974	154,014	0,000
10	0,943	1,886	147,020	4,541
20	0,953	1,906	148,609	3,509
30	0,934	1,868	145,589	5,470
40	0,917	1,834	142,887	7,225
50	0,926	1,852	144,317	6,296
60	0,874	1,748	136,052	11,663
80	0,783	1,566	121,586	21,055
90	0,849	1,698	132,078	14,243
100	0,844	1,688	131,283	14,759
110	0,822	1,644	127,786	17,030
120	0,817	1,634	126,991	17,546
130	0,858	1,716	133,508	13,314
140	0,810	1,620	125,878	18,268
150	0,785	1,570	121,904	20,849
990	0,476	0,952	72,787	52,740
1080	0,448	0,896	68,336	55,630
1140	0,427	0,854	64,998	57,798
1200	0,436	0,872	66,428	56,869
1260	0,426	0,852	64,839	57,901
1320	0,415	0,830	63,090	59,036
1380	0,412	0,824	62,613	59,346
1440	0,405	0,810	61,501	60,068
1500	0,398	0,796	60,388	60,791
1560	0,397	0,794	60,229	60,894
2430	0,292	0,584	43,538	71,731
2520	0,278	0,556	41,313	73,176
2580	0,268	0,536	39,723	74,208
2640	0,268	0,536	39,723	74,208
2700	0,277	0,554	41,154	73,279
2760	0,278	0,556	41,313	73,176
2820	0,290	0,580	43,220	71,937
2880	0,281	0,562	41,790	72,866
2940	0,287	0,574	42,744	72,247
3870	0,262	0,524	38,770	74,827
3960	0,282	0,564	41,949	72,763
5700	0,347	0,694	52,281	66,054

Experiment 6

Concentració de carbó actiu = 4,010 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	0,987	1,974	154,014	
0	0,940	1,880	146,543	0,000
10	0,894	1,788	139,231	4,990
20	0,857	1,714	133,349	9,003
30	0,836	1,672	130,011	11,281
40	0,813	1,626	126,355	13,776
50	0,773	1,546	119,997	18,115
60	0,764	1,528	118,566	19,091
70	0,726	1,452	112,526	23,213
80	0,756	1,512	117,295	19,959
110	0,731	1,462	113,321	22,671
120	0,712	1,424	110,300	24,732
130	0,695	1,390	107,598	26,576
140	0,686	1,372	106,168	27,552
150	0,674	1,348	104,260	28,854
160	0,681	1,362	105,373	28,094
170	0,653	1,306	100,922	31,132
180	0,638	1,276	98,538	32,759
190	0,614	1,228	94,723	35,362
1040	0,270	0,540	40,041	72,676
1130	0,252	0,504	37,180	74,629
1190	0,232	0,464	34,001	76,798
1250	0,219	0,438	31,935	78,208
1310	0,244	0,488	35,908	75,496
1370	0,253	0,506	37,339	74,520
1430	0,238	0,476	34,955	76,147
1490	0,232	0,464	34,001	76,798
1550	0,231	0,462	33,842	76,906
1610	0,226	0,452	33,047	77,449
2480	0,210	0,420	30,504	79,184
2570	0,217	0,434	31,617	78,425
2630	0,222	0,444	32,411	77,883
2690	0,183	0,366	26,212	82,113
2750	0,217	0,434	31,617	78,425

Experiment 7

Concentració de carbó actiu = 4,990 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,012	2,024	157,988	
0	0,965	1,930	150,517	0,000
10	0,906	1,812	141,138	6,231
35	0,848	1,696	131,919	12,356
58	0,758	1,516	117,612	21,861
75	0,722	1,444	111,890	25,663
90	0,716	1,432	110,936	26,297
105	0,717	1,434	111,095	26,191
120	0,654	1,308	101,081	32,844
135	0,635	1,270	98,061	34,851
150	0,621	1,242	95,835	36,329
165	0,558	1,116	85,821	42,983
985	0,204	0,408	29,550	80,368
1075	0,201	0,402	29,073	80,684
1135	0,198	0,396	28,596	81,001
1195	0,192	0,384	27,643	81,635
1255	0,191	0,382	27,484	81,740
1375	0,185	0,370	26,530	82,374
1435	0,199	0,398	28,755	80,896
1495	0,193	0,386	27,802	81,529
1555	0,210	0,420	31,658	78,967
2425	0,140	0,280	29,467	80,422
2515	0,144	0,288	26,068	82,681
2575	0,146	0,292	22,918	84,774
2635	0,144	0,288	22,314	85,175

Experiment 8

Concentració de carbó actiu = 4,020 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	0,686	1,372	106,168	
0	0,654	1,308	101,081	0,000
10	0,595	1,190	91,702	9,278
30	0,560	1,120	86,139	14,782
50	0,526	1,052	80,734	20,129
70	0,488	0,976	74,694	26,105
90	0,475	0,950	72,628	28,149
110	0,449	0,898	68,495	32,238
130	0,435	0,870	66,269	34,439
150	0,405	0,810	61,501	39,157
1010	0,109	0,218	14,449	85,705
1100	0,112	0,224	14,926	85,234
1160	0,124	0,248	16,834	83,346
1220	0,121	0,242	16,357	83,818
1310	0,094	0,188	12,065	88,064
1400	0,112	0,224	14,926	85,234
1460	0,108	0,216	14,290	85,863
1520	0,109	0,218	14,449	85,705
2510	0,082	0,164	10,157	89,951
2615	0,087	0,174	10,952	89,165
2660	0,105	0,210	13,813	86,334
2720	0,111	0,222	14,767	85,391

Experiment 9

Concentració de carbó actiu = 4,000 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,311	2,622	205,516	
0	1,248	2,496	195,502	0,000
10	1,172	2,344	183,421	6,180
30	1,122	2,244	175,473	10,245
50	1,066	2,132	166,571	14,798
70	1,031	2,062	161,008	17,644
90	1,000	2,000	156,080	20,164
110	0,955	1,910	148,927	23,823
130	0,921	1,842	143,522	26,588
150	0,826	1,652	128,422	34,312
1010	0,320	0,640	47,989	75,453
1100	0,306	0,612	45,764	76,592
1160	0,395	0,790	59,911	69,355
1220	0,335	0,670	50,374	74,234
1310	0,408	0,816	61,977	68,298
1400	0,344	0,688	51,804	73,502
1460	0,395	0,790	59,911	69,355
1520	0,391	0,782	59,275	69,681
2510	0,352	0,704	53,076	72,852
2615	0,366	0,732	55,301	71,713

Experiment 10

Concentració de carbó actiu = 6,051 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,001	2,002	156,239	
0	0,967	1,934	150,835	0,000
10	0,923	1,846	143,840	4,637
20	0,877	1,754	136,528	9,485
30	0,833	1,666	129,534	14,122
40	0,816	1,632	126,832	15,913
50	0,796	1,592	123,653	18,021
60	0,773	1,546	119,997	20,445
70	0,747	1,494	115,864	23,185
80	0,731	1,462	113,321	24,871
90	0,703	1,406	108,870	27,822
100	0,689	1,378	106,644	29,297
110	0,631	1,262	97,425	35,410
120	0,624	1,248	96,312	36,147
130	0,650	1,300	100,445	33,407
140	0,646	1,292	99,809	33,829
150	0,628	1,256	96,948	35,726
160	0,612	1,224	94,405	37,412
170	0,610	1,220	94,087	37,623
180	0,586	1,172	90,272	40,152
1020	0,171	0,342	24,305	83,887
1110	0,158	0,316	22,238	85,257
1170	0,156	0,312	21,920	85,467
1230	0,156	0,312	21,920	85,467
1290	0,150	0,300	20,966	86,100
1410	0,148	0,296	20,649	86,311
1470	0,140	0,280	19,377	87,154
1530	0,144	0,288	20,013	86,732
1590	0,147	0,294	20,490	86,416
2460	0,141	0,282	19,536	87,048
2550	0,137	0,274	18,900	87,470
2610	0,144	0,288	20,013	86,732
2670	0,150	0,300	20,966	86,100
2730	0,151	0,302	21,125	85,994

Experiment 11

Concentració de carbó actiu = 7,019 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
Colorant	1,017	2,034	158,782	
0	0,963	1,926	150,199	0,000
10	0,943	1,886	147,020	2,117
20	0,951	1,902	148,291	1,270
30	0,887	1,774	138,118	8,043
40	0,830	1,660	129,057	14,076
50	0,853	1,706	132,713	11,642
60	0,784	1,568	121,745	18,944
80	0,747	1,494	115,864	22,860
90	0,714	1,428	110,618	26,352
100	0,697	1,394	107,916	28,151
110	0,606	1,212	93,451	37,782
120	0,655	1,310	101,240	32,596
130	0,680	1,360	105,214	29,950
140	0,627	1,254	96,789	35,559
150	0,613	1,226	94,564	37,041
990	0,254	0,508	37,498	75,034
1080	0,256	0,512	37,816	74,823
1140	0,260	0,520	38,452	74,399
1200	0,265	0,530	39,247	73,870
1260	0,266	0,532	39,405	73,764
1320	0,272	0,544	40,359	73,129
1380	0,274	0,548	40,677	72,918
1440	0,274	0,548	40,677	72,918
1500	0,287	0,574	42,744	71,542
1560	0,300	0,600	44,810	70,166
2430	0,196	0,392	28,278	81,173
2520	0,263	0,526	38,929	74,082
2580	0,313	0,626	46,876	68,790
2640	0,270	0,540	40,041	73,341
2700	0,306	0,612	45,764	69,531
2760	0,284	0,568	42,267	71,860
2820	0,375	0,750	56,732	62,229

**ANNEX VII: DADES ADSORCIÓ EN CARBÓ ACTIU AMB COLORANT GRIS
LANASET G**

	Concentració carbó actiu (g/l)	X (mg de colorant adsorbits)	M (g adsorbent)	Ce (mg/l)	X/M (mg/g)
Experiment 1	0,823	9,454	0,214	110,817	44,188
Experiment 2	1,010	12,750	0,264	101,478	48,341
Experiment 3	1,516	24,405	0,394	59,672	61,893
Experiment 4	2,006	22,103	0,521	65,980	42,384
Experiment 5	3,060	29,550	0,795	40,359	37,170
Experiment 6	4,010	29,881	1,043	31,617	28,654
Experiment 7	4,990	33,330	1,297	22,314	25,692
Experiment 8	4,020	22,442	1,045	14,767	21,473
Experiment 9	4,000	36,452	1,040	55,301	35,048
Experiment 10	6,051	33,724	1,573	21,125	21,435
Experiment 11	7,019	28,641	1,825	42,698	15,694

	ISOTERMA DE LANGMUIR		ISOTERMA DE FREUNDLICH	
	M/X	1/Ce	log Ce	log (X/M)
Experiment 1	0,023	0,009	2,045	1,645
Experiment 2	0,021	0,010	2,006	1,684
Experiment 3	0,016	0,017	1,776	1,792
Experiment 4	0,024	0,015	1,819	1,627
Experiment 5	0,027	0,025	1,606	1,570
Experiment 6	0,035	0,032	1,500	1,457
Experiment 7	0,039	0,045	1,349	1,410
Experiment 8	0,047	0,068	1,169	1,332
Experiment 9	0,029	0,018	1,743	1,545
Experiment 10	0,047	0,047	1,325	1,331
Experiment 11	0,064	0,023	1,630	1,196

ANNEX VIII: EXPERIMENTS EN DISCONTINU DEL COLORANT ORANGE G

Experiment 1

Concentració de carbó actiu: 1,004 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	0,605	1,210	32,267	0,001
10	0,470	0,940	25,067	22,315
20	0,385	0,770	20,533	36,364
30	0,333	0,666	17,760	44,959
50	0,253	0,506	13,493	58,182
63	0,228	0,456	12,160	62,314
78	0,196	0,392	10,453	67,604
85	0,160	0,320	8,533	73,554
96	0,141	0,282	7,520	76,694
105	0,126	0,252	6,720	79,174
115	0,103	0,206	5,493	82,975
125	0,093	0,186	4,960	84,628
140	0,069	0,138	3,680	88,595
150	0,072	0,144	3,840	88,099
160	0,061	0,122	3,253	89,917

Experiment 2

Concentració de carbó actiu: 2,004 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	0,576	1,152	30,720	0,000
10	0,398	0,796	21,227	30,903
20	0,285	0,570	15,200	50,521
30	0,208	0,416	11,093	63,889
50	0,138	0,276	7,360	76,042
63	0,097	0,194	5,173	83,160
78	0,071	0,142	3,787	87,674
85	0,024	0,048	1,280	95,833
96	0,023	0,046	1,227	96,007
105	0,015	0,030	0,800	97,396
115	0,007	0,014	0,373	98,785
125	0,000	0,000	0,000	100,000
140	0,000	0,000	0,000	100,000
150	0,000	0,000	0,000	100,000

Experiment 3

Concentració de carbó actiu: 3,007 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	0,576	1,152	30,720	0,000
10	0,371	0,742	19,787	35,590
20	0,240	0,480	12,800	58,333
30	0,154	0,308	8,213	73,264
50	0,111	0,222	5,920	80,729
63	0,072	0,144	3,840	87,500
78	0,040	0,080	2,133	93,056
85	0,028	0,056	1,493	95,139
96	0,031	0,062	1,653	94,618

Experiment 4

Concentració de carbó actiu: 2,002 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	1,109	3,327	88,720	0,000
10	0,855	2,565	68,400	22,904
20	0,790	2,370	63,200	28,765
30	0,713	2,139	57,040	35,708
40	0,649	1,947	51,920	41,479
50	0,591	1,773	47,280	46,709
60	0,542	1,626	43,360	51,127
80	0,452	1,356	36,160	59,243
100	0,390	1,170	31,200	64,833
120	0,325	0,975	26,000	70,694
140	0,302	0,906	24,160	72,768
160	0,250	0,750	20,000	77,457
210	0,202	0,606	16,160	81,785
300	0,099	0,297	7,920	91,073

Experiment 5

Concentració de carbó actiu: 3,002 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	1,115	3,345	89,200	0,000
10	0,821	2,463	65,680	26,368
20	0,632	1,896	50,560	43,318
30	0,507	1,521	40,560	54,529
40	0,426	1,278	34,080	61,794
50	0,347	1,041	27,760	68,879
60	0,279	0,837	22,320	74,978
80	0,181	0,543	14,480	83,767
100	0,113	0,339	9,040	89,865
120	0,071	0,213	5,680	93,632
140	0,034	0,102	2,720	96,951
160	0,019	0,057	1,520	98,296
210	0,003	0,009	0,240	99,731
300	0,000	0,000	0,000	100,000

Experiment 6

Concentració de carbó actiu: 1,008 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	2,077	6,231	166,160	0,000
10	2,075	6,225	166,000	0,096
20	2,066	6,198	165,280	0,530
30	2,064	6,192	165,120	0,626
40	2,052	6,156	164,160	1,204
50	2,053	6,159	164,240	1,156
60	2,056	6,168	164,480	1,011
70	2,048	6,144	163,840	1,396
80	2,035	6,105	162,800	2,022
100	2,041	6,123	163,280	1,733
120	2,022	6,066	161,760	2,648
140	2,019	6,057	161,520	2,792
160	2,010	6,030	160,800	3,226
180	1,995	5,985	159,600	3,948
200	1,989	5,967	159,120	4,237
220	1,981	5,943	158,480	4,622
240	1,969	5,907	157,520	5,200
1290	1,582	4,746	126,560	23,832
1350	1,562	4,686	124,960	24,795
1410	1,597	4,791	127,760	23,110
1470	1,536	4,608	122,880	26,047
1530	1,522	4,566	121,760	26,721
1545	1,616	4,848	129,280	22,195
2745	1,330	3,990	106,400	35,965
5625	1,072	3,216	85,760	48,387
5745	1,065	3,195	85,200	48,724
5865	1,057	3,171	84,560	49,109
5985	1,069	3,207	85,520	48,532
7065	1,125	3,375	90,000	45,835
7425	0,961	2,883	76,880	53,731
8505	0,982	2,946	78,560	52,720
8625	0,984	2,952	78,720	52,624
8755	0,934	2,802	74,720	55,031

Experiment 7

Concentració de carbó actiu: 2,004 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	2,080	6,240	166,400	0,000
10	2,062	6,186	164,960	0,865
20	2,036	6,108	162,880	2,115
30	2,022	6,066	161,760	2,788
40	2,005	6,015	160,400	3,606
50	1,960	5,880	156,800	5,769
60	1,966	5,898	157,280	5,481
70	1,950	5,850	156,000	6,250
80	1,933	5,799	154,640	7,067
100	1,900	5,700	152,000	8,654
120	1,841	5,523	147,280	11,490
140	1,818	5,454	145,440	12,596
160	1,743	5,229	139,440	16,202
180	1,751	5,253	140,080	15,817
200	1,688	5,064	135,040	18,846
220	1,688	5,064	135,040	18,846
240	1,558	4,674	124,640	25,096
1290	0,618	1,854	49,440	70,288
1350	0,583	1,749	46,640	71,971
1410	0,574	1,722	45,920	72,404
1470	0,536	1,608	42,880	74,231
1530	0,519	1,557	41,520	75,048
1545	0,522	1,566	41,760	74,904

Experiment 8

Concentració de carbó actiu: 3,005 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	1,723	5,169	137,840	0,000
10	1,264	3,792	101,120	26,640
20	1,105	3,315	88,400	35,868
30	0,975	2,925	78,000	43,413
40	0,865	2,595	69,200	49,797
50	0,781	2,343	62,480	54,672
60	0,701	2,103	56,080	59,315
80	0,573	1,719	45,840	66,744
90	0,520	1,560	41,600	69,820
100	0,484	1,452	38,720	71,909
120	0,407	1,221	32,560	76,378
140	0,345	1,035	27,600	79,977
150	0,325	0,975	26,000	81,138
160	0,293	0,879	23,440	82,995
170	0,261	0,783	20,880	84,852
245	0,129	0,387	10,320	92,513
305	0,087	0,261	6,960	94,951
365	0,054	0,162	4,320	96,866

Experiment 9

Concentració de carbó actiu: 2,003 g/l

Mostra temps (min)	Absorbància	Absorbància corregida	Concentració (ppm)	% eliminació
0	0,910	2,730	72,800	0,000
10	0,759	2,277	60,720	16,593
20	0,634	1,902	50,720	30,330
30	0,567	1,701	45,360	37,692
40	0,508	1,524	40,640	44,176
50	0,455	1,365	36,400	50,000
60	0,421	1,263	33,680	53,736
80	0,357	1,071	28,560	60,769
90	0,325	0,975	26,000	64,286
100	0,309	0,927	24,720	66,044
120	0,258	0,774	20,640	71,648
140	0,225	0,675	18,000	75,275
150	0,206	0,618	16,480	77,363
160	0,192	0,576	15,360	78,901
170	0,171	0,513	13,680	81,209
245	0,098	0,294	7,840	89,231
305	0,059	0,177	4,720	93,516
365	0,046	0,138	3,680	94,945

ANNEX IX: DADES ADSORCIÓ EN CARBÓ ACTIU AMB ORANGE G

	Concentració de carbó actiu (g/l)	X (mg de colorant adsorbits)	M (g adsorbent)	Ce (mg/l)	X/M (mg/g)
Experiment 1	1,004	7,543	0,261	3,253	28,900
Experiment 2	2,004	7,987	0,521	0,373	15,327
Experiment 3	3,007	7,557	0,782	1,653	9,665
Experiment 4	2,002	21,008	0,521	7,920	40,360
Experiment 5	3,002	23,192	0,781	0,240	29,714
Experiment 6	1,008	23,774	0,262	74,720	90,713
Experiment 7	2,004	32,406	0,521	41,904	62,195
Experiment 8	3,005	34,715	0,781	4,320	44,431
Experiment 9	2,003	17,971	0,520	3,680	34,548

	ISOTERMA DE LANGMUIR		ISOTERMA DE FREUNDLICH	
	M/X	1/Ce	log Ce	log (X/M)
Experiment 1	0,035	0,307	0,512	1,461
Experiment 2	0,065	2,681	-0,428	1,185
Experiment 3	0,103	0,605	0,218	0,985
Experiment 4	0,025	0,126	0,899	1,606
Experiment 5	0,034	4,167	-0,620	1,473
Experiment 6	0,011	0,013	1,873	1,958
Experiment 7	0,016	0,024	1,622	1,794
Experiment 8	0,023	0,231	0,635	1,648
Experiment 9	0,029	0,272	0,566	1,538

ANNEX X: EXPERIMENT EN CONTINU DEL COLORANT GRIS LANASET G

Experiment 1

EBCT =75,04 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,066	3,807	97,492	0,025	1,216
450	0,079	4,840	96,811	0,032	12,162
675	0,090	5,715	96,235	0,038	18,243
900	0,094	6,032	96,026	0,040	24,324
1125	0,106	6,986	95,397	0,046	30,405
1350	0,120	8,099	94,664	0,053	36,486
1575	0,123	8,337	94,507	0,055	42,568
1800	0,120	8,099	94,664	0,053	48,649
2025	0,124	8,417	94,455	0,055	54,730
2250	0,126	8,576	94,350	0,056	60,811
2295	0,130	8,894	94,141	0,059	62,027
2340	0,130	8,894	94,141	0,059	63,243
2385	0,137	9,450	93,774	0,062	64,459
2430	0,129	8,814	94,193	0,058	65,676
2475	0,141	9,768	93,565	0,064	66,892
2520	0,136	9,371	93,827	0,062	68,108
2655	0,146	10,165	93,303	0,067	71,757
2700	0,181	12,947	91,470	0,085	72,973

Experiment 2

EBCT = 167,41 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,000	0,000	100,000	0	0,597
315	0,054	2,853	98,156	0,018	4,181
765	0,053	2,774	98,207	0,018	10,155
1215	0,073	4,363	97,180	0,028	16,128
1665	0,067	3,887	97,488	0,025	22,102
2115	0,076	4,602	97,026	0,030	28,075
2565	0,073	4,363	97,180	0,028	34,049
3015	0,087	5,476	96,461	0,035	40,022
3465	0,073	4,363	97,180	0,028	45,996
3915	0,074	4,443	97,129	0,029	51,969
4140	0,083	5,158	96,666	0,033	54,956
4590	0,079	4,840	96,908	0,031	60,929
5040	0,088	5,556	96,451	0,035	66,903
5490	0,090	5,715	96,350	0,037	72,876
5940	0,081	4,999	96,807	0,032	78,850
6165	0,077	4,681	97,010	0,030	81,836
6390	0,072	4,284	97,264	0,027	84,823
6615	0,090	5,715	96,350	0,037	87,810
6840	0,085	5,317	96,604	0,034	90,796
7065	0,086	5,397	96,553	0,034	93,783
7290	0,080	4,920	96,858	0,031	96,770
7515	0,093	5,953	96,198	0,038	99,757
7740	0,080	4,920	96,858	0,031	102,743
7965	0,083	5,158	96,705	0,033	105,730
8190	0,080	4,920	96,858	0,031	108,717
8415	0,088	5,556	96,451	0,035	111,704
8460	0,122	8,258	94,685	0,053	112,301
8820	0,084	5,238	96,629	0,034	117,080
9270	0,098	6,350	95,913	0,041	123,053
9720	0,091	5,794	96,271	0,037	129,027
10170	0,094	6,032	96,117	0,039	135,000
10620	0,102	6,668	95,708	0,043	140,973
10845	0,097	6,271	95,964	0,040	143,960
11070	0,095	6,112	96,066	0,039	146,947
11295	0,097	6,271	95,964	0,040	149,934
11520	0,092	5,873	96,220	0,038	152,920
11745	0,098	6,350	95,913	0,041	155,907
11970	0,089	5,635	96,373	0,036	158,894
12195	0,095	6,112	96,066	0,039	161,881
12420	0,094	6,032	96,117	0,039	164,867
12645	0,106	6,986	95,503	0,045	167,854
12690	0,134	9,212	94,071	0,059	168,451
12870	0,113	7,543	95,145	0,049	170,841
13095	0,131	8,973	94,224	0,058	173,827
13320	0,124	8,417	94,583	0,054	176,814
13545	0,119	8,019	94,838	0,052	179,801

13770	0,126	8,576	94,480	0,055	182,788
13995	0,121	8,178	94,736	0,053	185,774
14220	0,130	8,894	94,276	0,057	188,761
14445	0,130	8,894	94,276	0,057	191,748
14670	0,145	10,086	93,508	0,065	194,735
14895	0,144	10,006	93,559	0,064	197,721
15120	0,138	9,529	93,866	0,061	200,708
15345	0,143	9,927	93,611	0,064	203,695
15570	0,184	13,186	91,513	0,085	206,681

Experiment 3

EBCT= 86,59 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,000	0,000	100,000	0	1,225
450	0,002	0,000	100,000	0	12,250
675	0,019	0,072	99,954	0,000	18,376
900	0,040	1,741	98,888	0,011	24,501
1350	0,051	2,615	98,329	0,017	36,751
1800	0,058	3,171	97,973	0,020	49,002
2250	0,071	4,204	97,313	0,027	61,252
2475	0,071	4,204	97,313	0,027	67,377
2700	0,079	4,840	96,907	0,031	73,503
2925	0,074	4,443	97,161	0,028	79,628
3150	0,079	4,840	96,907	0,031	85,753
3375	0,082	5,079	96,754	0,032	91,878
3600	0,076	4,602	97,059	0,029	98,004
3690	0,080	4,920	96,856	0,031	100,454
3825	0,070	4,125	97,364	0,026	104,129
3960	0,078	4,761	96,958	0,030	107,804
4005	0,087	5,476	96,500	0,035	109,029
4140	0,087	5,476	96,500	0,035	112,704
4185	0,080	4,920	96,856	0,031	113,929

Experiment 4

EBCT= 87,74 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració ppm	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,031	1,025	99,357	0,006	1,225
360	0,038	1,582	99,008	0,010	9,800
810	0,059	3,251	97,961	0,020	22,051
1260	0,067	3,887	97,562	0,024	34,301
1485	0,079	4,840	96,964	0,030	40,426
1530	0,089	5,635	96,465	0,035	41,652
1575	0,110	7,304	95,418	0,046	42,877
1620	0,131	8,973	94,371	0,056	44,102
1665	0,118	7,940	95,019	0,050	45,327
1800	0,122	8,258	94,820	0,052	49,002
2025	0,121	8,178	94,870	0,051	55,127
2250	0,130	8,894	94,421	0,056	61,252
2475	0,136	9,371	94,122	0,059	67,377
2700	0,130	8,894	94,421	0,056	73,503
2925	0,132	9,053	94,321	0,057	79,628
3015	0,141	9,768	93,873	0,061	82,078
3150	0,147	10,245	93,574	0,064	85,753
3375	0,144	10,006	93,723	0,063	91,878
3420	0,152	10,642	93,324	0,067	93,103
3510	0,144	10,006	93,723	0,063	95,554
3600	0,194	13,980	91,230	0,088	98,004
3690	0,181	12,947	91,879	0,081	100,454
3825	0,146	10,165	93,623	0,064	104,129
4050	0,148	10,324	93,524	0,065	110,254
4275	0,151	10,563	93,374	0,066	116,379
4410	0,163	11,516	92,776	0,072	120,054
4500	0,166	11,755	92,626	0,074	122,505
4725	0,167	11,834	92,577	0,074	128,630
4860	0,157	11,040	93,075	0,069	132,305
4950	0,158	11,119	93,025	0,070	134,755
5175	0,160	11,278	92,926	0,071	140,880
5400	0,183	13,106	91,779	0,082	147,005
5490	0,178	12,709	92,028	0,080	149,456
5535	0,189	13,583	91,480	0,085	150,681
5580	0,183	13,106	91,779	0,082	151,906
5625	0,172	12,232	92,327	0,077	153,131
5670	0,173	12,311	92,277	0,077	154,356
5715	0,169	11,993	92,477	0,075	155,581
5760	0,197	14,219	91,081	0,089	156,806
5805	0,194	13,980	91,230	0,088	158,031

Experiment 5

EBCT = 161,63 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,012	0,000	100,000	0	0,597
450	0,015	0,000	100,000	0	5,973
900	0,016	0,000	100,000	0	11,947
1350	0,038	1,582	99,010	0,010	17,920
1800	0,049	2,456	98,463	0,015	23,894
2250	0,055	2,933	98,165	0,018	29,867
2475	0,051	2,615	98,364	0,016	32,854
2700	0,057	3,092	98,065	0,019	35,841
2925	0,052	2,694	98,314	0,017	38,827
3150	0,064	3,648	97,717	0,023	41,814
3375	0,062	3,489	97,817	0,022	44,801
3600	0,066	3,807	97,618	0,024	47,788
3825	0,065	3,728	97,668	0,023	50,774
4050	0,070	4,125	97,419	0,026	53,761
4230	0,061	3,410	97,867	0,021	56,150
4275	0,090	5,715	96,424	0,035	56,748
4500	0,090	5,715	96,551	0,035	59,735
4725	0,073	4,363	97,367	0,027	62,721
4950	0,077	4,681	97,175	0,029	65,708
5175	0,064	3,648	97,798	0,023	68,695
5400	0,069	4,045	97,559	0,025	71,681
5625	0,065	3,728	97,750	0,023	74,668
5850	0,071	4,204	97,463	0,026	77,655
6075	0,066	3,807	97,702	0,024	80,642
6300	0,070	4,125	97,511	0,026	83,628
6525	0,069	4,045	97,559	0,025	86,615
6750	0,070	4,125	97,511	0,026	89,602
6975	0,065	3,728	97,750	0,023	92,588
7200	0,071	4,204	97,463	0,026	95,575
7425	0,067	3,887	97,654	0,024	98,562
7650	0,071	4,204	97,463	0,026	101,549
7875	0,067	3,887	97,654	0,024	104,535
8100	0,071	4,204	97,463	0,026	107,522
8280	0,070	4,125	97,511	0,026	109,912
8325	0,075	4,522	97,271	0,028	110,509
8370	0,070	4,125	97,511	0,026	111,106
8415	0,082	5,079	96,935	0,032	111,704
8460	0,098	6,350	96,106	0,039	112,301
8640	0,124	8,417	94,839	0,052	114,690
8865	0,132	9,053	94,449	0,056	117,677
9090	0,100	6,509	96,008	0,040	120,664
9315	0,091	5,794	96,447	0,036	123,650
9450	0,079	4,840	97,032	0,030	125,442
9720	0,082	5,079	96,886	0,032	129,027
9810	0,086	5,397	96,691	0,034	130,221

9990	0,088	5,556	96,593	0,035	132,611
10215	0,083	5,158	96,837	0,032	135,597
10440	0,085	5,317	96,739	0,033	138,584
10665	0,088	5,556	96,593	0,035	141,571
10890	0,089	5,635	96,544	0,035	144,558
11115	0,091	5,794	96,447	0,036	147,544
11340	0,086	5,397	96,691	0,034	150,531
11565	0,092	5,873	96,398	0,036	153,518
11790	0,086	5,397	96,691	0,034	156,504
12015	0,091	5,794	96,447	0,036	159,491
12240	0,086	5,397	96,691	0,034	162,478
12420	0,089	5,635	96,544	0,035	164,867
12465	0,092	5,873	96,398	0,036	165,465
12510	0,113	7,543	95,375	0,047	166,062
12555	0,107	7,066	95,637	0,044	166,659
12735	0,100	6,509	95,981	0,040	169,049
12960	0,093	5,953	96,324	0,037	172,035
13185	0,092	5,873	96,374	0,036	175,022
13410	0,096	6,191	96,177	0,038	178,009
13635	0,095	6,112	96,226	0,038	180,996
13860	0,092	5,873	96,374	0,036	183,982
14040	0,104	6,851	95,770	0,043	186,372
14085	0,111	7,384	95,441	0,046	186,969
14265	0,110	7,304	95,490	0,045	189,358
14490	0,106	6,986	95,687	0,043	192,345
14715	0,105	6,907	95,736	0,043	195,332
14940	0,100	6,509	95,981	0,040	198,319
15165	0,102	6,668	95,883	0,041	201,305
15390	0,102	6,668	95,883	0,041	204,292
15615	0,104	6,827	95,785	0,042	207,279
15840	0,099	6,430	96,030	0,040	210,265
16065	0,107	7,066	95,637	0,044	213,252
16290	0,101	6,589	95,932	0,041	216,239
16515	0,104	6,827	95,785	0,042	219,226
16740	0,101	6,589	95,932	0,041	222,212
16965	0,101	6,589	95,932	0,041	225,199
17190	0,104	6,827	95,785	0,042	228,186
17415	0,103	6,748	95,834	0,042	231,173
17640	0,102	6,668	95,883	0,041	234,159
17865	0,100	6,509	95,981	0,040	237,146
18090	0,102	6,668	95,883	0,041	240,133
18180	0,099	6,430	96,030	0,040	241,327
18225	0,125	8,496	94,670	0,053	241,925
18405	0,116	7,781	95,119	0,048	244,314
18630	0,100	6,509	95,917	0,040	247,301
18855	0,104	6,827	95,717	0,042	250,288
19080	0,096	6,191	96,116	0,038	253,274
19305	0,101	6,589	95,867	0,041	256,261
19530	0,095	6,112	96,166	0,038	259,248
19755	0,106	6,986	95,618	0,043	262,235
19980	0,101	6,589	95,867	0,041	265,221
20205	0,104	6,827	95,717	0,042	268,208

20430	0,090	5,715	96,415	0,035	271,195
20655	0,109	7,225	95,468	0,045	274,181
20880	0,096	6,191	96,116	0,038	277,168
21105	0,115	7,701	95,169	0,048	280,155
21330	0,109	7,225	95,468	0,045	283,142
21555	0,123	8,337	94,770	0,052	286,128
21780	0,112	7,463	95,319	0,046	289,115
22005	0,115	7,701	95,169	0,048	292,102
22230	0,111	7,384	95,368	0,046	295,088
22455	0,114	7,622	95,219	0,047	298,075
22485	0,124	8,417	94,720	0,052	298,473
22530	0,130	8,894	94,421	0,055	299,071
22665	0,134	9,212	94,222	0,057	300,863
22890	0,128	8,735	94,521	0,054	303,850
23115	0,142	9,847	93,823	0,061	306,836
23340	0,140	9,688	93,923	0,060	309,823
23565	0,140	9,688	93,923	0,060	312,810
23790	0,131	8,973	94,371	0,056	315,796
23970	0,143	9,927	93,773	0,062	318,186
24015	0,164	11,596	92,559	0,072	318,783
24195	0,150	10,483	93,273	0,065	321,173
24420	0,147	10,245	93,426	0,064	324,159
24645	0,153	10,722	93,120	0,067	327,146
24870	0,151	10,563	93,222	0,066	330,133
25095	0,157	11,040	92,916	0,069	333,119
25320	0,152	10,642	93,171	0,066	336,106
25545	0,156	10,960	92,967	0,068	339,093
25770	0,151	10,563	93,222	0,066	342,080
25995	0,153	10,722	93,120	0,067	345,066
26220	0,152	10,642	93,171	0,066	348,053
26445	0,154	10,801	93,069	0,067	351,040
26670	0,149	10,404	93,324	0,065	354,027
26895	0,157	11,040	92,916	0,069	357,013
27120	0,144	10,006	93,579	0,062	360,000
27345	0,153	10,722	93,120	0,067	362,987
27570	0,153	10,722	93,120	0,067	365,973
27795	0,153	10,722	93,120	0,067	368,960
28020	0,145	10,086	93,528	0,063	371,947
28155	0,153	10,722	93,120	0,067	373,739
28200	0,145	10,086	93,528	0,063	374,336
28230	0,165	11,675	92,508	0,073	374,735
28275	0,167	11,834	92,406	0,074	375,332
28410	0,169	11,993	92,304	0,074	377,124
28860	0,169	11,993	92,304	0,074	383,097
29310	0,165	11,675	92,508	0,073	389,071
29760	0,155	10,881	93,018	0,068	395,044
30210	0,168	11,914	92,355	0,074	401,018
30660	0,152	10,642	93,171	0,066	406,991
31110	0,144	10,006	93,579	0,062	412,965
31560	0,123	8,337	94,650	0,052	418,938
32010	0,136	9,371	93,987	0,058	424,912
32460	0,132	9,053	94,191	0,056	430,885

32910	0,124	8,417	94,599	0,052	436,858
33360	0,129	8,814	94,344	0,055	442,832
33810	0,124	8,417	94,599	0,052	448,805
34260	0,135	9,291	94,038	0,058	454,779
34710	0,127	8,655	94,446	0,054	460,752
35160	0,139	9,609	93,834	0,060	466,726
35610	0,126	8,576	94,497	0,053	472,699
36060	0,132	9,053	94,191	0,056	478,673

Experiment 6

EBCT = 81,97 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,021	0,230	99,856	0,001	0,796
270	0,023	0,389	99,756	0,002	7,168
420	0,034	1,264	99,209	0,008	11,150
570	0,041	1,820	98,861	0,011	15,133
720	0,060	3,330	97,916	0,021	19,115
870	0,061	3,410	97,867	0,021	23,097
1020	0,076	4,602	97,121	0,029	27,080
1170	0,073	4,363	97,270	0,027	31,062
1320	0,085	5,317	96,673	0,033	35,044
1470	0,073	4,363	97,270	0,027	39,027
1620	0,091	5,794	96,375	0,036	43,009
1770	0,081	4,999	96,872	0,031	46,991
1920	0,087	5,476	96,574	0,034	50,973
2070	0,081	4,999	96,872	0,031	54,956
2220	0,090	5,715	96,424	0,036	58,938
2370	0,083	5,158	96,772	0,032	62,920
2520	0,090	5,715	96,551	0,036	66,903
2670	0,085	5,317	96,791	0,033	70,885
2730	0,091	5,794	96,503	0,036	72,478
2760	0,098	6,350	96,167	0,040	73,274
2880	0,097	6,271	96,215	0,039	76,460
3030	0,095	6,112	96,311	0,038	80,442
3180	0,101	6,589	96,024	0,041	84,425
3330	0,090	5,715	96,551	0,036	88,407
3480	0,097	6,271	96,215	0,039	92,389
3630	0,092	5,873	96,455	0,037	96,372
3780	0,096	6,191	96,263	0,039	100,354
3930	0,091	5,794	96,503	0,036	104,336
4080	0,104	6,827	95,880	0,043	108,319
4230	0,100	6,509	96,072	0,041	112,301
4380	0,116	7,781	95,304	0,049	116,283
4530	0,104	6,827	95,880	0,043	120,265
4680	0,112	7,463	95,496	0,047	124,248
4830	0,107	7,066	95,736	0,044	128,230
4980	0,110	7,304	95,592	0,046	132,212
5130	0,102	6,668	95,976	0,042	136,195
5280	0,108	7,145	95,688	0,045	140,177
5430	0,101	6,589	95,960	0,041	144,159
5580	0,107	7,066	95,667	0,044	148,142
5610	0,128	8,735	94,644	0,055	148,938
5730	0,118	7,940	95,131	0,050	152,124
5880	0,131	8,973	94,498	0,056	156,106
6030	0,124	8,417	94,839	0,053	160,088
6180	0,121	8,178	94,985	0,051	164,071

6330	0,110	7,304	95,521	0,046	168,053
6480	0,120	8,099	95,034	0,051	172,035
6630	0,114	7,622	95,326	0,048	176,018
6780	0,120	8,099	95,034	0,051	180,000
6930	0,113	7,543	95,375	0,047	183,982
7080	0,122	8,258	94,936	0,052	187,965
7230	0,117	7,860	95,180	0,049	191,947
7380	0,121	8,178	94,985	0,051	195,929
7530	0,118	7,940	95,131	0,050	199,912
7680	0,124	8,417	94,839	0,053	203,894
7830	0,119	8,019	95,082	0,050	207,876
7980	0,126	8,576	94,741	0,054	211,858
8130	0,120	8,099	95,034	0,051	215,841
8280	0,125	8,496	94,790	0,053	219,823
8430	0,124	8,417	94,839	0,053	223,805
8550	0,124	8,417	94,839	0,053	226,991
8700	0,122	8,258	94,936	0,052	230,973
8850	0,129	8,814	94,595	0,055	234,956
9000	0,132	9,053	94,449	0,057	238,938
9150	0,125	8,496	94,790	0,053	242,920
9300	0,114	7,622	95,326	0,048	246,903
9450	0,122	8,258	94,936	0,052	250,885
9570	0,116	7,781	95,229	0,049	254,071
9720	0,135	9,291	94,303	0,058	258,053
9750	0,141	9,768	94,010	0,061	258,850
9840	0,126	8,576	94,741	0,054	261,239
9990	0,134	9,212	94,351	0,058	265,221
10140	0,129	8,814	94,595	0,055	269,204
10290	0,138	9,529	94,156	0,060	273,186
10440	0,135	9,291	94,303	0,058	277,168
10590	0,142	9,847	93,961	0,062	281,150
10740	0,150	10,483	93,571	0,066	285,133
10890	0,150	10,483	93,571	0,066	289,115
10920	0,168	11,914	92,694	0,075	289,912
11040	0,166	11,755	92,792	0,074	293,097
11190	0,180	12,868	92,109	0,081	297,080
11340	0,169	11,993	92,645	0,075	301,062
11490	0,171	12,152	92,548	0,076	305,044
11640	0,165	11,675	92,840	0,073	309,027
11790	0,171	12,152	92,548	0,076	313,009
11940	0,164	11,596	92,889	0,073	316,991
12090	0,149	10,404	93,620	0,065	320,973
12240	0,140	9,688	94,059	0,061	324,956
12390	0,176	12,550	92,304	0,079	328,938
12540	0,183	13,106	91,963	0,082	332,920
12690	0,194	13,980	91,427	0,088	336,903
12840	0,194	13,980	91,427	0,088	340,885
12990	0,202	14,616	91,037	0,092	344,867
13140	0,203	14,696	90,988	0,092	348,850
13290	0,211	15,331	90,598	0,096	352,832
13440	0,208	15,093	90,745	0,095	356,814
13590	0,214	15,570	90,452	0,098	360,796

13650	0,208	15,093	90,745	0,095	362,389
13680	0,319	23,915	85,335	0,150	363,186
13800	0,270	20,021	87,723	0,126	366,372
13950	0,304	22,723	86,066	0,143	370,354
14100	0,296	22,087	86,456	0,139	374,336
14250	0,290	21,610	86,748	0,136	378,319
14400	0,295	22,008	86,505	0,138	382,301
14550	0,296	22,087	86,456	0,139	386,283
14700	0,317	23,756	85,432	0,149	390,265
14850	0,328	24,630	84,896	0,155	394,248
15000	0,346	26,061	84,019	0,163	398,230
15150	0,327	24,551	84,945	0,154	402,212
15300	0,289	21,531	86,797	0,135	406,195
15450	0,274	20,339	87,528	0,128	410,177
15600	0,296	22,087	86,456	0,139	414,159
15750	0,311	23,279	85,725	0,146	418,142
15900	0,292	21,769	86,651	0,137	422,124
16050	0,280	20,815	87,236	0,131	426,106
16200	0,314	23,518	85,578	0,148	430,088
16350	0,318	23,836	85,384	0,150	434,071
16500	0,295	22,008	86,505	0,138	438,053

Experiment 7

EBCT = 38,17 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,037	1,502	99,012	0,010	1,636
30	0,010	0,045	99,970	0,000	3,273
120	0,100	6,509	95,718	0,042	6,545
270	0,114	7,622	94,986	0,050	14,727
420	0,121	8,178	94,620	0,053	22,909
570	0,120	8,099	94,673	0,053	31,091
720	0,142	9,847	93,523	0,064	39,273
870	0,149	10,404	93,157	0,068	47,455
1020	0,166	11,755	92,268	0,077	55,636
1170	0,176	12,550	91,745	0,082	63,818
1320	0,190	13,662	91,013	0,089	72,000
1470	0,191	13,742	90,961	0,090	80,182
1620	0,220	16,047	89,445	0,105	88,364
1770	0,227	16,603	89,079	0,108	96,545
1920	0,235	17,239	88,661	0,112	104,727
2070	0,238	17,477	88,504	0,114	112,909
2220	0,258	19,067	87,458	0,124	121,091
2370	0,266	19,703	87,040	0,128	129,273
2520	0,287	21,372	85,942	0,139	137,455
2670	0,293	21,849	85,628	0,142	145,636
2730	0,292	21,769	85,681	0,142	148,909
2760	0,296	22,087	85,472	0,144	150,545
2790	0,318	23,836	84,321	0,155	152,182
2910	0,347	26,141	82,805	0,170	158,727
3060	0,370	27,969	81,896	0,182	166,909
3210	0,355	26,776	82,668	0,174	175,091
3360	0,369	27,889	81,948	0,182	183,273
3510	0,373	28,207	81,742	0,184	191,455
3660	0,387	29,320	81,022	0,191	199,636
3810	0,394	29,876	80,662	0,195	207,818
3960	0,418	31,784	79,427	0,207	216,000
4110	0,434	33,055	78,604	0,215	224,182
4260	0,462	35,281	77,163	0,230	232,364
4410	0,477	36,473	76,392	0,238	240,545
4560	0,489	37,426	75,774	0,244	248,727
4710	0,485	37,109	75,980	0,242	256,909
4860	0,497	38,062	75,363	0,248	265,091
5010	0,506	38,778	74,900	0,253	273,273
5160	0,522	40,049	74,076	0,261	281,455
5310	0,544	41,798	72,945	0,272	289,636
5460	0,542	41,639	73,048	0,271	297,818
5610	0,537	41,241	73,305	0,269	306,000
5640	0,583	44,897	70,682	0,292	307,636

5670	0,610	47,043	69,281	0,306	309,273
5700	0,785	60,952	60,198	0,397	310,909
8460	0,845	65,721	57,459	0,428	461,455
8490	0,813	63,178	59,106	0,411	463,091
8640	0,838	65,165	57,820	0,424	471,273
8790	0,813	63,178	59,106	0,411	479,455
8940	0,823	63,972	58,591	0,417	487,636
9090	0,833	64,767	58,077	0,422	495,818
9240	0,840	65,323	57,717	0,425	504,000
9390	0,851	66,198	57,151	0,431	512,182
9540	0,852	66,277	57,099	0,432	520,364
9690	0,846	65,800	57,408	0,429	528,545
9840	0,854	66,436	56,996	0,433	536,727
9990	0,860	66,913	56,688	0,436	544,909
10140	0,872	67,867	56,070	0,442	553,091
10290	0,849	66,039	57,254	0,430	561,273
10440	0,911	70,966	54,064	0,462	569,455
10590	0,895	69,695	54,887	0,454	577,636
10740	0,904	70,410	54,424	0,459	585,818
10890	0,906	70,569	54,321	0,460	594,000
11040	0,916	71,364	53,807	0,465	602,182
11190	0,911	70,966	54,064	0,462	610,364

Experiment 8 EBCT = 76,34 minuts

Mostra temps (min)	Absorbància	Concentració (ppm)	% eliminació	Ce/Co	Volum aigua tractada/massa carbó actiu (ml/g)
0	0,025	0,548	99,635	0,004	1,636
180	0,028	0,787	99,476	0,005	9,818
405	0,044	2,058	98,630	0,014	22,091
855	0,066	3,807	97,467	0,025	46,636
1305	0,068	3,966	97,361	0,026	71,182
1755	0,084	5,238	96,515	0,035	95,727
2205	0,084	5,238	96,515	0,035	120,273
2430	0,091	5,794	96,144	0,039	132,545
2655	0,086	5,397	96,409	0,036	144,818
2880	0,101	6,589	95,616	0,044	157,091
3060	0,096	6,191	95,880	0,041	166,909
3105	0,093	5,953	96,064	0,040	169,364
3285	0,111	7,384	95,118	0,049	179,182
3510	0,098	6,350	95,801	0,042	191,455
3735	0,100	6,509	95,696	0,043	203,727
3960	0,093	5,953	96,064	0,039	216,000
4410	0,100	6,509	95,696	0,043	240,545
4860	0,102	6,668	95,591	0,044	265,091
5310	0,111	7,384	95,118	0,049	289,636
5760	0,117	7,860	94,802	0,052	314,182
5985	0,117	7,860	94,802	0,052	326,455
6210	0,129	8,814	94,172	0,058	338,727
6435	0,134	9,212	93,909	0,061	351,000
6660	0,133	9,132	93,962	0,060	363,273
6885	0,139	9,609	93,646	0,064	375,545
7110	0,141	9,768	93,541	0,065	387,818
7335	0,149	10,404	93,121	0,069	400,091
7380	0,211	15,331	89,862	0,101	402,545
7560	0,203	14,696	90,273	0,097	412,364
7785	0,209	15,172	89,957	0,100	424,636
8010	0,202	14,616	90,325	0,097	436,909
8235	0,218	15,888	89,483	0,105	449,182
8460	0,224	16,365	89,168	0,108	461,455
8685	0,227	16,603	89,010	0,110	473,727
8910	0,217	15,808	89,536	0,105	486,000
9135	0,220	16,047	89,378	0,106	498,273
9360	0,226	16,524	89,063	0,109	510,545
9585	0,198	14,298	90,536	0,095	522,818
9810	0,184	13,186	91,272	0,087	535,091
10035	0,180	12,868	91,483	0,085	547,364
10260	0,174	12,391	91,798	0,082	559,636
10485	0,170	12,073	92,009	0,080	571,909
10710	0,181	12,947	91,430	0,086	584,182
10935	0,183	13,106	91,325	0,087	596,455
11160	0,183	13,106	91,325	0,087	608,727
11385	0,191	13,742	90,904	0,091	621,000
11610	0,187	13,424	91,114	0,089	633,273

ANNEX XI: AVALUACIÓ ECONÒMICA DUTA A TERME AL PROJECTE FI DE CARRERA DE L'ANNA FONT

Taula 1. Cost del carbó actiu per volum d'aigua tractada per cadascuna de les columnes fins al temps de ruptura del 90% d'eliminació del colorant tèxtil.

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Volum d'aigua tractada (ml)	Relació volum/massa al 90% d'eliminació (ml/g)	Cost de carbó actiu (€)	Cost per volum d'aigua tractada (€/m3)
8,4	3,6	33	14,00	0,0107	324,24
13,39	8,2	182	22,14	0,0245	134,15
16,64	7,72	234	30,30	0,0229	98,00
18,79	9,21	468	50,83	0,0273	58,43
21,53	11,1	1100	99,05	0,0329	29,99
30,15	15,17	1957	129,57	0,0451	22,29

Taula 2. Cost de l'electricitat per volum d'aigua tractada per cada columna de carbó actiu

EBCT (min)	Total (€)	Volum d'aigua tractada (ml)	Cost energia per volum aigua tractada (€/m3)
8,4	0,65	33	19.696,97
13,39	0,66	182	3.626,37
16,64	0,67	234	2.863,25
18,79	0,68	468	1.452,99
21,53	0,73	1100	663,64(*)
30,15	0,79	1957	403,68

(*)El cost actual és de 786,79 €/m³ degut a la pujada de preus en l'electricitat en aquest 3 anys.

Taula 3. Cost d'incineració per cada columna per volum d'aigua tractada.

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Cost valorització (€)	Volum d'aigua tractada (ml)	Cost per volum aigua tractada (€/m3)
8,40	3,6	0,0040	33	123,30
13,39	8,2	0,0091	182	50,14
16,64	7,72	0,0086	234	36,63
18,79	9,21	0,0102	468	21,84
21,53	11,1	0,0123	1100	11,21
30,15	15,17	0,0168	1957	8,57

Taula 4. Contingut del crom adsorbit en el carbó actiu i cost de l'abocament del carbó per volum d'aigua tractada.

EBCT (min)	Massa de carbó actiu (g)	Volum aigua tractada (ml)	Massa crom adsorbit en carbó actiu (%)	Gestió abocador?	Cost per volum d'aigua tractada (€/m3)
8,40	3,6	33	0,004	Sí	8,16
13,39	8,2	182	0,008	Sí	3,32
16,64	7,72	234	0,011	Sí	2,43
18,79	9,21	468	0,019	Sí	1,45
21,53	11,1	1100	0,037	Sí	0,74
30,15	15,17	1957	0,049	Sí	0,57

Taula 5. Cost total del procés per volum d'aigua tractada

EBCT (min)	Cost per volum d'aigua tractada (€/m3)	
	Valorització	Abocador
8,40	20142,44	20027,30
13,39	3811,32	3764,50
16,64	2984,89	2950,69
18,79	1539,97	1519,58
21,53	702,10	691,63
30,15	431,71	423,71