

# CALCE IDRATA

UN ADDITIVO DI COMPROVATA EFFICACIA  
PER LA DURABILITÀ DELLE PAVIMENTAZIONI  
IN CONGLOMERATO BITUMINOSO

riesame critico della letteratura





# CALCE IDRATA

UN ADDITIVO DI COMPROVATA EFFICACIA  
PER LA DURABILITÀ DELLE PAVIMENTAZIONI  
IN CONGLOMERATO BITUMINOSO

RIESAME CRITICO DELLA LETTERATURA





# Prefazione

È scientificamente provato che la calce idrata migliora le prestazioni delle miscele di conglomerato bituminoso impiegate in ambito stradale. Ciò è stato approfondito negli USA, ove la calce idrata è presente nel 10% delle miscele di conglomerato bituminoso a caldo (HMA) prodotte annualmente. Al contrario, in Europa l'impiego di calce idrata è meno frequente, essendone ancora poco conosciuti gli effetti.

Negli ultimi anni in Europa sono stati riconsiderati il progetto e la gestione delle infrastrutture stradali per soddisfare al meglio le esigenze connesse all'incremento del traffico pesante e agli aspetti ambientali. Inoltre, i vincoli di bilancio costringono all'ottimizzazione delle risorse, siano esse finanziarie o materiali.

In questo contesto, la **European Lime Association (EuLA)** ha promosso la diffusione dei benefici della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso, con l'obiettivo di incentivare i gestori stradali a farne un uso sistematico. Per raggiungere questo obiettivo, e vista la complessità del mercato, è fondamentale che l'industria della calce presenti contenuti credibili e coerenti.

Nel 2008, un primo gruppo di lavoro ha prodotto la brochure promozionale "La calce nel conglomerato bituminoso" disponibile sul sito web di EuLA ([www.eula.be/121.html#c1285](http://www.eula.be/121.html#c1285)).

Nel 2009, EuLA ha deciso di istituire, all'interno del Comitato sull'uso della calce, una **task force sul conglomerato bituminoso (ATF)** con i seguenti obiettivi principali:

1. Stabilire una strategia europea a lungo termine (5-10 anni) per la promozione dell'uso della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso,
2. Razionalizzare e coordinare gli orientamenti nazionali e locali,
3. Riunire le risorse del settore per favorire o avviare la ricerca scientifica,
4. Sviluppare azioni e mezzi promozionali.

ATF ha iniziato il suo lavoro su base europea raccogliendo dati, nazione per nazione, sulla diffusione della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso, essenzialmente HMA. La Tabella 1 riassume lo stato dell'arte.

ATF è stata inoltre incaricata di raccogliere i dati presenti in letteratura sulla modifica di miscele HMA per mezzo di calce idrata. Ciò al fine di possedere una maggiore consapevolezza degli effetti della calce idrata. Infine, l'identificazione delle lacune conoscitive presenti avrebbe stimolato nuove attività di ricerca.

Tutti i membri di ATF hanno condiviso le informazioni possedute sull'argomento. I lavori presenti in letteratura sono stati quindi raccolti e studiati al fine di redigere la prima versione di questo rapporto, steso da D. Lesueur e attentamente revisionato da J. Petit, D. Puiatti e H.-J. Ritter.

Una seconda versione è stata poi redatta sulla base del riesame iniziale, cui hanno contribuito tutti i membri di ATF. La presente, terza, versione, prende in conto tutti i contributi.

**Ringraziamenti:** l'autore ringrazia tutti i membri di ATF per il loro contributo e per i commenti espressi nella preparazione del presente rapporto.

Per qualsiasi informazione su questo rapporto o sulla task force ATF, è possibile scrivere all'indirizzo: [secretariat@ima-europe.eu](mailto:secretariat@ima-europe.eu)

**La task force ATF** che ha contribuito alla stesura del rapporto era così composta:

- **chairman:** Daniel Puiatti (Lhoist Europe),
- **segretario:** Bert D'Hooghe (IMA-Europe/EuLA),
- **esperti tecnici:** Didier Lesueur (Lhoist R&D), Jöelle Petit (Carmeuse Benelux), Hans-Josef Ritter (Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.),
- **membri attivi ATF:** Gorka Argaiz (Calcinor), Hans-Günther Brendl (Schaefer Kalk), Larry Byrne (Clogrennane Lime), Angelo Canziani (Unicalce), Joe Connolly (Clogrennane Lime), Christophe Denayer (Carmeuse), Steve Foster (Singleton Birch), Christoph Kunesch (Wopfinger Baumit), Emma Lopez (Ancade), Alan Lowe (Roadstone), Siegmund Luger (Schaefer Kalk), Stefan Neumann (Wopfinger Baumit), Rafal Pozyczka (Lhoist Poland), Martin Sarobe (Calcinor), Tom Zaremba (Lhoist North America).

Nazione	Uso	Inizio	[HMA additivato con calce] / [HMA totale] (stima in %)	% calce aggiunta a miscele HMA	Forma aggiunta	Danno prevenuto	Tipo miscele
Austria	volontario	2003	1	1,5-3,5	pura	ST, RU	AC, SMA, PA
Belgio	da obbligatorio a volontario	anni '80	< 1	1,5	filler misto	ST	SMA, PA
Danimarca	volontario	metà anni '90	< 1	1-1,5	pura	ST	AC
Finlandia	volontario	?	< 1	1-2	pura o filler misto	ST, AG, altro	AC, SMA, CMA
Francia	volontario	? (> 1945)	1	1-1,5	pura o filler misto	ST, AG, altro	AC, CMA, PA, BBTM
Germania	volontario	2000	< 1	1-3	pura o filler misto	ST, AG	AC, SMA
Irlanda	volontario	2001	< 1	2	pura	ST, RU	PA
Italia	volontario	metà anni '90	< 1	1-2	filler misto	ST	SMA, PA
Paesi Bassi	obbligatorio	metà anni '90	7	2	filler misto	ST, AG, DU	PA
Polonia	volontario	1998	< 1	1-3	filler misto	ST	AC
Portogallo	volontario	inizio anni 2000	< 1	1-2	pura	ST	PA
Regno Unito	volontario	primi anni 2000	1	1-2	pura	ST	AC
Repubblica Ceca	sperimentale	1996	< 1	1,5	pura	ST, RU	AC, PA
Romania	sperimentale	2007	< 1	2	filler misto	ST, RU	AC, SMA
Slovacchia	sperimentale	2009	< 1	2	pura o filler misto	ST	
Spagna	volontario	2004	< 1	1-2	pura	ST	SMA
Svezia	volontario / obbligatorio	1998	< 1	1	pura	ST, AG	AC
Svizzera	preferito	2006	1	1,5	pura	ST, AG, DU	PA, AC, SMA
Ungheria	sperimentale	2009	< 1	2	da definire	ST, RU	AC

Tabella 1. Uso corrente di calce idrata in miscele di conglomerato bituminoso in Europa. I dati sono stati raccolti dalla Task Force ATF. La percentuale di HMA additivato con calce idrata nella produzione totale HMA è una stima approssimata utilizzata per quantificare il livello di "calce-consapevolezza" in ogni nazione. Campitura arancione: più del 5% della produzione HMA è modificata con calce idrata; campitura grigia: circa l'1%. ST – stripping (sgranamento); RU – rutting (ormaiamento); AG – aging (invecchiamento); AC – conglomerato bituminoso; SMA – splittmastixasphalt; PA – conglomerato bituminoso poroso; CMA – conglomerato bituminoso a freddo; BBTM – strato di conglomerato bituminoso molto sottile.



# Contenuto

Prefazione .....	4
Contenuto .....	6
Riassunto .....	8
Introduzione .....	10



## 1. La calce idrata come additivo nelle miscele di conglomerato bituminoso .....12

1.1. La calce idrata: proprietà.....	12
1.2. La calce idrata come filler.....	13
1.2.1. Vuoti Rigden .....	13
1.2.2. La prova palla-anello .....	14
1.2.3. Altre proprietà.....	15

## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso ..17

2.1. Resistenza al danno da umidità e al gelo.....	17
2.2. Resistenza alle aggressioni chimiche.....	28
2.3. Caratteristiche meccaniche .....	32
2.3.1. Mastici .....	32
2.3.2. Modulo .....	34
2.3.3. Resistenza .....	36
2.3.4. Resistenza all'ormaiamento .....	37
2.3.5. Fessurazione a fatica .....	39
2.3.6. Fessurazione termica .....	41
2.4. La calce idrata con altri additivi .....	43
2.4.1. Calce idrata e polimeri.....	43
2.4.2. Calce idrata e acidi polifosforici .....	44

## 3. Meccanismi di modifica delle miscele bituminose .....45

3.1. Effetto sull'aggregato .....	45
3.1.1. Modifica della superficie.....	45
3.1.2. Flocculazione dell'argilla .....	46
3.2. Effetto sul bitume .....	47
3.2.1. Effetto chimico sul bitume .....	47
3.2.2. Effetto fisico sul bitume .....	49



**4. Impiego su scala reale di calce idrata  
in miscele di conglomerato bituminoso.....52**

4.1. Metodi di aggiunta della calce idrata .....	52
4.1.1. Calce idrata .....	53
4.1.2. Calce idrata come filler misto .....	53
4.1.3. Altri metodi di aggiunta .....	54
4.2. Esempi di incrementata durabilità negli USA .....	54
4.3. Esempi di incrementata durabilità in Europa .....	56
4.4. Dosaggio di calce idrata .....	56

<b>Conclusioni</b> .....	59
<b>Indice delle figure</b> .....	61
<b>Indice delle tabelle</b> .....	63
<b>Allegato 1</b> (fonti bibliografiche) .....	65
<b>Allegato 2</b> (fonti bibliografiche per funzi) .....	67
<b>Bibliografia</b> .....	73



# Riassunto

Da anni la calce idrata è conosciuta come additivo per le miscele di conglomerato bituminoso. Negli anni '70 si è registrato un forte interesse negli Stati Uniti, dovuto anche ad una generale diminuzione della qualità del bitume causata dalla crisi petrolifera del 1973: in quegli anni infatti gli ammaloramenti dovuti a umidità e gelo sono stati tra le cause più importanti di degrado delle pavimentazioni. La calce idrata è risultata il migliore additivo, perciò in alcuni Stati ne è prescritto l'uso. Si stima che il 10% delle miscele confezionate negli Stati Uniti contengano calce idrata.

Il largo uso degli ultimi 40 anni negli Stati Uniti ha dimostrato che la calce idrata è più di un semplice additivo contro i danni dell'umidità. Come illustrato in questo rapporto, la calce idrata è nota anche come rallentatore del processo di invecchiamento chimico del bitume. Inoltre, rispetto ad un tradizionale filler minerale rende il conglomerato bituminoso più rigido ad alte temperature. Ciò influisce sulle caratteristiche meccaniche delle miscele: le caratteristiche di resistenza e il modulo sono modificati mediante aggiunta di calce idrata per oltre la metà delle miscele, mentre in circa il 75% delle miscele migliora la resistenza all'ormaiamento. In tutti i casi, la maggior parte degli studi esamina contenuti di calce idrata del 1-1,5%; gli effetti citati sono generalmente più evidenti per elevati contenuti di calce idrata. Infine, i pochi studi pubblicati sulla resistenza a fatica evidenziano che nel 77% dei casi la calce idrata migliora la resistenza a fatica delle miscele di conglomerato bituminoso.

Coerentemente con la sperimentata assenza di effetti sulla rigidità a basse temperature, in letteratura non si registrano effetti sulla resistenza alla fessurazione termica.

I benefici dell'aggiunta di calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso sono dovuti alle forti interazioni tra i componenti principali, cioè aggregati e bitume, e alla combinazione di quattro effetti, due sugli aggregati e due sul bitume. Per ciò che concerne gli aggregati, la calce idrata modifica le caratteristiche dello scheletro litico, sul quale di formano ioni calcio e precipitati che ne aumentano la rugosità favorendo l'adesione del bitume. La calce idrata è inoltre efficace nel trattamento delle particelle argillose presenti sulla superficie degli aggregati, impedendone gli effetti negativi sulle miscele. Per quanto riguarda il bitume, la calce idrata reagisce chimicamente con gli acidi del bitume,



rallenta la cinetica di indurimento per invecchiamento e neutralizza l'effetto dei "cattivi" promotori di adesione presenti nel bitume, migliorando la resistenza all'umidità della miscela. Inoltre, l'elevata porosità della calce idrata mostra il suo effetto di irrigidimento al di sopra della temperatura ambiente. Le condizioni in cui si osservano gli ultimi effetti rendono più visibili tali conseguenze nei climi caldi, ove le pavimentazioni flessibili sono maggiormente soggette all'ormaiamento.



Di seguito sono descritti i metodi impiegati per aggiungere la calce idrata, cioè nel miscelatore a tamburo, come filler, secca all'aggregato umido, come latte di calce, con o senza "maturazione". Allo stato attuale non esistono prove che dimostrino quale sia il metodo più efficace, e tutti i metodi consentono di ottenere benefici. Fermo restando i limiti prestazionali dell'impianto, la calce idrata all'interno di una miscela può essere facilmente quantificata.

Gli effetti descritti influenzano la durabilità delle miscele, a tal proposito l'esperienza su scala reale maturata nel Nord degli Stati Uniti permette di stimare che l'1-1,5% di calce idrata rispetto all'aggregato asciutto incrementi la vita utile delle miscele bituminose di 2-10 anni, ovvero del 20-50%.

L'esperienza europea non è ancora consolidata come negli Stati Uniti, ma sono ampiamente riferiti i riscontri positivi dell'aggiunta di calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso. Ad esempio, il concessionario autostradale francese Sanef prescrive l'uso di calce idrata negli strati di usura della sua rete, perché ha verificato che il trattamento garantisce una durabilità del 20-25% superiore a quella delle miscele ordinarie. Osservazioni simili hanno indotto i Paesi Bassi a prescrivere la calce idrata nelle miscele porose, che oggi coprono il 70% delle strade del paese. In conseguenza di ciò, l'uso di calce idrata nelle pavimentazioni flessibili è crescente in molti Stati europei, in particolare Austria, Francia, Paesi Bassi, Regno Unito e Svizzera.

Mentre sono chiaramente dimostrati i benefici dell'aggiunta di calce idrata in miscele di conglomerato bituminoso rispetto a vari materiali (aggregati, bitume, miscele bituminose), l'esperienza europea si mantiene inferiore rispetto a quella statunitense. Di conseguenza, gli effetti di questa tecnica valutati secondo standard europei non sono ancora riportati in letteratura. Tra i più interessanti si annoverano l'indice ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio), che rappresenta il rapporto tra le misure di resistenza a trazione indiretta di un provino prima e dopo il condizionamento in acqua, e la resistenza a fatica.

Inoltre, le specifiche della calce idrata nelle norme europee per gli aggregati non sono del tutto appropriate. In primo luogo, alcune prove come la palla-anello non possono essere eseguite sulla calce idrata, sebbene siano prescritte per i filler minerali. La calce idrata è considerata come un filler nelle norme in materia di miscele bituminose, perciò è fondamentale risolvere questo aspetto. Inoltre le classi granulometriche di filler presenti nelle norme in materia di aggregati non coprono tutti i prodotti attualmente utilizzati.

Infine, restano da capire alcuni aspetti teorici relativi al trattamento, in particolare la termosuscettibilità dell'effetto di indurimento e la modifica delle caratteristiche superficiali degli aggregati.



# Introduzione

Da più di un secolo la calce idrata è aggiunta nelle miscele di conglomerato bituminoso: negli Stati Uniti, alla fine del XIX secolo, la società National Vulcanite Company già faceva uso, nelle città di Washington DC e Buffalo, di una miscela bituminosa proprietaria chiamata Vulcanite contenente calce idrata (0,3% in peso di calce spenta all'aria [1]). Agli inizi del XX secolo negli USA vennero utilizzate altre miscele proprietarie, come Warrenite [2] e Amiesite [2, 3, 4]; Richardson menziona l'uso di grassello di calce con catrame di carbone in Inghilterra [5].

Qualche decennio più tardi la calce idrata è stata ancora indicata come un possibile filler nelle miscele bituminose negli USA [6] e nel contempo, in Francia, Duriez e Arrambide hanno descritto e raccomandato l'uso di calce idrata per migliorare l'adesione bitume-aggregato [7]. Questi hanno citato l'uso della calce idrata come filler per il tarmacadam, la miscela aperta a base di catrame di carbone utilizzata negli anni '50 soprattutto per gli aeroporti in Inghilterra, Francia e Germania.

Tuttavia, negli anni '70 negli Stati Uniti si è registrato un rinnovato interesse per la calce idrata, anche in conseguenza di un generale decadimento della qualità del bitume correlato alla crisi petrolifera del 1973: i danni da umidità e gelo divennero tra le più importanti cause di ammaloramento delle pavimentazioni [8, 9]. Gli additivi aggiunti nelle miscele bituminose per limitare i danni dell'umidità sono stati accuratamente testati sia in laboratorio sia su strada, e la calce idrata è risultata essere il più efficace [8]. Di conseguenza, il suo uso è ora prescritto in molti Stati e si stima che il 10% delle miscele prodotte negli USA contengano calce idrata [10].

A seguito dell'ampio uso negli ultimi 30 anni negli USA, la calce idrata calce è risultata più efficace di un semplice additivo contro i danni dell'umidità [11, 12, 13, 14]. Come verrà descritto nel presente rapporto, rallenta il processo di invecchiamento chimico del bitume e aumenta la rigidità del conglomerato bituminoso, aumentandone la resistenza all'ormaiamento; migliora inoltre la resistenza alla fessurazione. Di conseguenza, e come sarà altresì dettagliato in seguito, le agenzie statali stimano che la calce idrata incrementi la durabilità del conglomerato bituminoso per autostrade da 2 a 10 anni, ovvero del 20-50%.

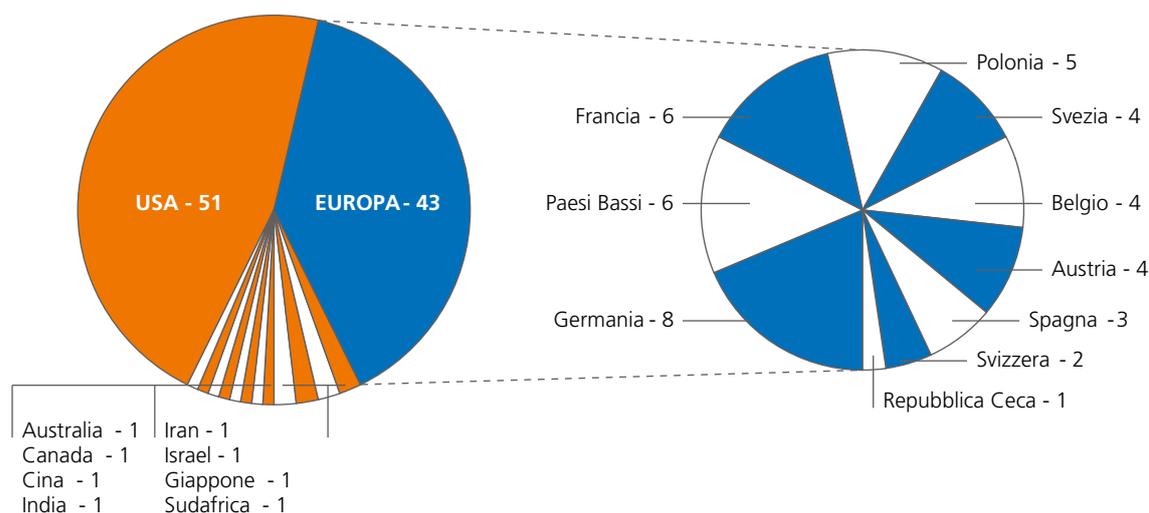


Figura 1. Nazionalità del primo autore dei 110 documenti esaminati.

L'esperienza europea non è ancora sviluppata come negli USA, ma gli effetti della calce idrata sulla durabilità del conglomerato bituminoso sono ampiamente riportati. Ad esempio, la concessionaria autostradale Sanef, che gestisce 1740 km di autostrade nel nord della Francia, ne prescrive l'uso negli strati di usura della sua rete [15]. Sanef ha infatti verificato un incremento della durabilità delle pavimentazioni del 20-25%. Esperienze simili hanno indotto i Paesi Bassi a specificarne l'uso nelle miscele aperte di conglomerato bituminoso [16, 17], che oggi coprono il 70% delle strade del paese [18]. In conseguenza di ciò, l'uso di calce idrata nelle pavimentazioni flessibili è crescente in molti Stati europei, in particolare Austria, Francia, Paesi Bassi, Regno Unito e Svizzera.

In questo contesto, il presente rapporto si pone l'obiettivo di esaminare lo stato dell'arte sulla durabilità del conglomerato bituminoso additivato con calce idrata. Numerose fonti sono state consultate per stendere il rapporto, costituendo un database bibliografico di 110 documenti (per i dettagli consultare gli Allegati 1 e 2) la cui origine geografica e il cui anno di pubblicazione sono rispettivamente riportati in Figura 1 e Figura 2.

Ciò conferma che, anche se una gran parte della letteratura proviene dagli USA, la calce idrata nelle miscele bituminose suscita un forte interesse nei principali Stati europei. Pubblicazioni di altre Nazioni come Argentina, Brasile, Cina, India, Iran, Giappone, Corea, Arabia Saudita e Turchia dimostrano che la calce idrata può essere impiegata con successo anche con altri materiali. La maggior parte dei riferimenti bibliografici è piuttosto recente (Figura 2): cioè evidenzia che la ricerca è tuttora attiva a livello mondiale.

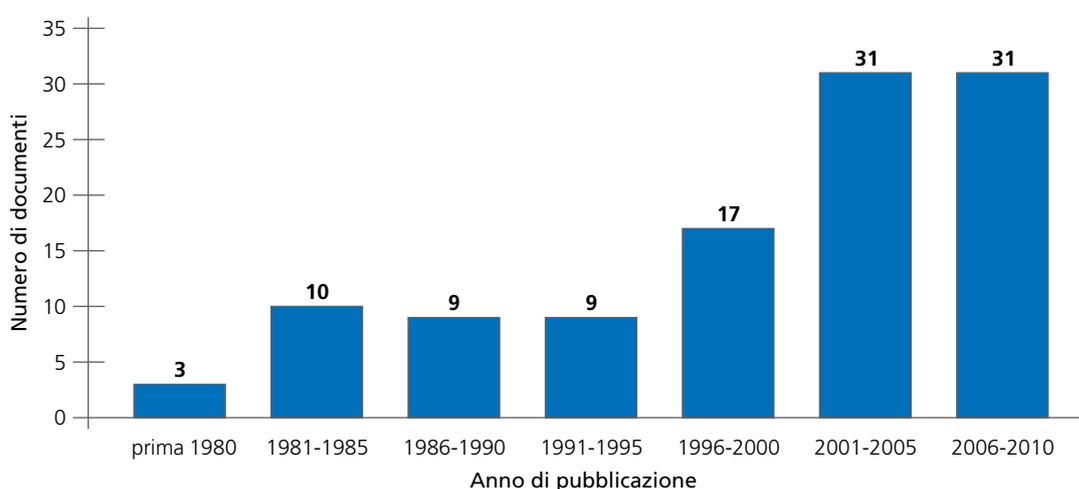


Figura 2. Anno di pubblicazione dei documenti esaminati.



## La struttura del rapporto

Nel **primo** capitolo viene presentata la calce idrata, evidenziandone le principali proprietà che ne consentono l'uso nelle miscele bituminose

Nel **secondo** capitolo sono riportati i risultati sperimentali che evidenziano gli effetti dell'aggiunta di calce idrata nelle miscele bituminose. Vengono descritte le procedure di laboratorio più frequentemente adottate per valutare le proprietà delle miscele, compresa la resistenza all'umidità, la velocità di invecchiamento e le caratteristiche meccaniche (modulo, ormaimento, fatica e fessurazione termica).

Il **terzo** capitolo illustra la maturata consapevolezza scientifica sui meccanismi di miglioramento delle miscele di conglomerato bituminoso da parte della calce idrata.

Infine, il **quarto** capitolo presenta lo stato dell'arte, non solo avvalorando le prove di laboratorio sulla durabilità, ma anche illustrando l'utilizzo della calce idrata negli impianti di produzione delle miscele.

# 1. La calce idrata come additivo nelle miscele di conglomerato bituminoso

## 1.1. La calce idrata: proprietà

La calce idrata è composta principalmente da idrossido di calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Si ottiene idratando la calce viva (essenzialmente ossido di calcio  $\text{CaO}$ ) tramite apparati meccanici chiamati idratatori. La calce viva è il prodotto della cottura dei calcari più puri (rocce composte da carbonato di calcio  $\text{CaCO}_3$ ) a circa  $900\text{ }^\circ\text{C}$  in appositi forni [4].

Lo stesso procedimento può essere eseguito sulla dolomite, composta da  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ , al fine di ottenere la calce dolomitica o dolomite calcinata ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$ ) e poi la calce dolomitica idrata o la dolomite calcinata idrata ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO} \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$  se è solo parzialmente idratata [4]).

La norma europea EN 459-1 specifica i requisiti della calce idrata e della calce viva da costruzione, compresa la dolomitica [19]. Le principali caratteristiche dei vari tipi di prodotti idrati sono riassunte in Tabella 2. Le calci aeree calciniche sono classificate:

### CL XX S

ove **CL** sta per calce calcinica e **XX** identifica la purezza in termini di percentuale in peso dei composti  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ . La lettera **S**, che sta per "spenta", identifica i prodotti idrati in polvere. Ciò consente di distinguere anche la calce viva (Q) e la calce idrata in forma di grassello (S PL) o il latte di calce (S ML).

Tipo di calce da costruzione	CaO + MgO [% in peso]	Calce [% in peso]
CL 90 S	$\geq 90$	$\geq 80$
CL 80 S	$\geq 80$	$\geq 65$
CL 70 S	$\geq 70$	$\geq 55$

Tabella 2. Requisiti chimici della calce secondo la EN 459-1:2010.

Il prodotto più frequentemente utilizzato per l'aggiunta nelle miscele bituminose è la calce idrata, anche se la calce dolomitica idrata è menzionata ed è stato dimostrato che ha effetti simili [20, 21, 22]. La calce viva, al contrario, si è rivelata dannosa se utilizzata come sostituto della calce idrata [20]. Tuttavia, in alcune applicazioni molto specifiche, si fa uso dell'una o dell'altra in presenza di aggregato poroso (basalto, scorie, ...) al fine di evitare che l'acqua dell'aggregato emulsioni il bitume durante il trasporto della miscela [23]. In questo caso, l'acqua presente nella porosità aperta dell'aggregato idrata la calce viva, formando di fatto miscele con calce idrata. Pertanto, la presente relazione si concentrerà sulla calce idrata calcinica, anche se i risultati possono essere estesi anche alla calce dolomitica idrata.

La purezza della calce idrata può essere valutata secondo la EN 459-2 [24]. Il metodo consiste sostanzialmente in una titolazione acido-base, il cui principio è utilizzato per quantificare la calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso, come dettagliato nel Capitolo 4.

La calce idrata generalmente si presenta sotto forma di polvere bianca secca (Figura 3) con una massa volumica delle particelle di circa  $2,2\text{ Mg/m}^3$  [4]. A causa dell'elevata porosità delle particelle (dell'ordine del 50%), la massa volumica apparente misurata secondo la EN 459-2 è tipicamente compresa nell'intervallo  $0,35\text{-}0,8\text{ Mg/m}^3$ .

Come verrà dettagliato nel Capitolo 4, la calce idrata può essere utilizzata tal quale in un impianto di conglomerato bituminoso disponendo di un silo dedicato. Tuttavia, alcuni impianti non possiedono un silo per la calce idrata e quindi la utilizzano insieme al filler, in una miscela con il 10-75% di calce idrata; in genere il filler minerale è un calcare puro.



Figura 3. Calce idrata (da Lhoist).

## 1.2. La calce idrata come filler

A causa della sua origine minerale e della sua forma in polvere, nel settore delle pavimentazioni la calce idrata è generalmente considerata un filler minerale. Le norme europee in merito alle miscele HMA (serie EN 13108 da 1 a 7) stabiliscono che la calce idrata debba essere considerata un filler; la nota 1 del paragrafo 4.3.4 chiarisce che “il termine filler comprende materiali come cemento e calce idrata” [25].

In questo senso, la calce idrata può essere valutata attraverso le specifiche sugli aggregati per miscele di conglomerato bituminoso come dettagliato nella norma EN 13043 [26]. Più precisamente, nella parte relativa ai filler, la norma ammette anche la miscelazione con altri filler.

La norma considera soprattutto le proprietà del filler in relazione al suo effetto di irrigidimento sul bitume. In particolare, sono misurati la porosità del filler costipato secco (vuoti Rigden) e valutate le categorie per l'intervallo palla-anello.

### 1.2.1. Vuoti Rigden

I vuoti di un filler secco (EN 1097-4 [27]) sono rappresentati dalla misura della densità di un provino del filler costipato e dalla densità delle particelle del filler. Il rapporto tra le due grandezze rappresenta la frazione di volume dei vuoti contenuti nel filler. La prova è stata proposta nel 1947 da P. J. Rigden del British Road Research Laboratory [28] e il risultato è quindi noto anche come “Vuoti Rigden”.

I filler minerali di solito hanno una percentuale di vuoti compresa tra il 28 e il 45% [29, 30, 31, 32, 33, 34]; l'intervallo 30-34%

è frequente per la maggior parte dei filler calcarei, come rappresentato in Figura 4. La calce idrata ha un valore di vuoti Rigden di gran lunga superiore, compreso tra 60 e 70%, essendo 65% il valore medio [29, 31].

Per ciò che concerne i filler misti, i vuoti Rigden aumentano all'aumentare del contenuto di calce idrata, con valori tipici compresi nell'intervallo 45-50% per il 25% in peso di calce idrata nella miscela ([29, 31, 35] – Figura 4). Si noti che anche le ceneri volanti contribuiscono ad aumentare i vuoti Rigden [35].

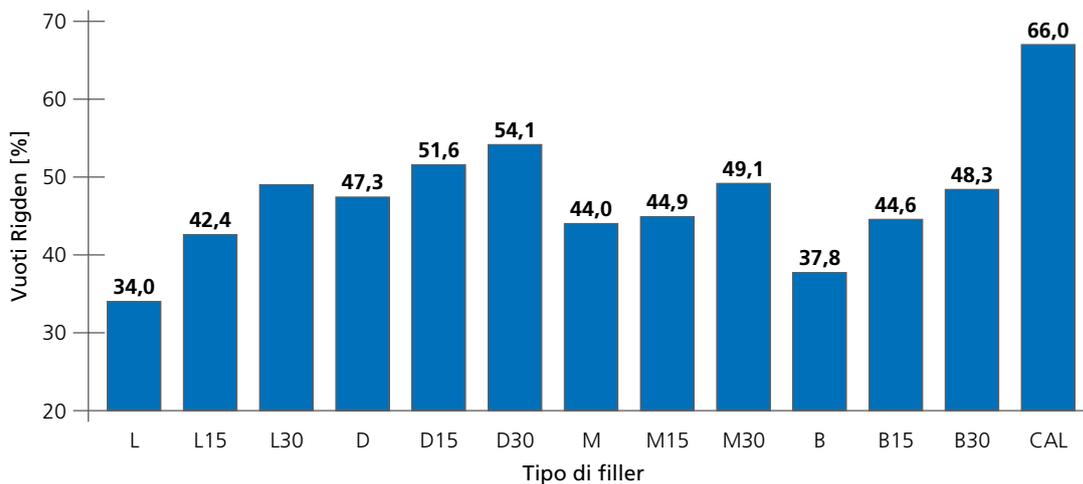


Figura 4. Vuoti Rigden di alcuni filler e filler misti. L – calcare; D – dolomite; M – melafiro; B – basalto; CAL – calce idrata; X15 – filler X con il 15% in peso di calce idrata; X30 – filler X con il 30% in peso di calce idrata [31].

### 1.2.2. La prova palla-anello

La prova palla-anello (EN 13179-1 [36]) consiste nella misura dell'incremento della temperatura di rammollimento di un bitume 70/100 dopo un'aggiunta del 37,5% in volume di un dato filler.

I filler minerali tipicamente restituiscono un delta palla-anello compreso tra 8 e 25 °C, con 15 °C valore tipico ([29, 31] – Figura 5).

Come illustrato in diversi studi [31, 37], la prova non può essere eseguita sulla calce idrata. È difatti comprovato che l'irrigidimento per effetto della calce idrata è così pronunciato che una miscela con il 37,5% in volume di calce idrata non è sufficientemente fluida per confezionare il provino.

Solo una riduzione della quantità specificata nello standard europeo consentirebbe di quantificare l'effetto di irrigidimento [37, 38, 39], come illustrato in Figura 6. Ad esempio, gli studi tedeschi utilizzano in genere un indice di stabilità che consiste

nell'individuare il rapporto filler/bitume che aumenti di 20 °C il valore palla-anello di un bitume con penetrazione 200 [38, 39]. Per la calce idrata, i valori tipici sono compresi nell'intervallo 0,7-1,0, mentre sono 1,5-2,5 per i filler minerali [29, 37, 38, 39].

Di conseguenza, quando la calce idrata è utilizzata come filler, è stato sperimentato che il 15 e il 30% in peso causano rispettivamente un incremento del valore di palla anello da 2 a 10 °C e da 8 a 20 °C (Figura 5).

Si noti che la frazione di volume prevista nella prova non è rappresentativa del contenuto tipico in una miscela di conglomerato bituminoso, che come dettagliato in una sezione successiva, è pari al 1-1,5% in peso rispetto agli aggregati asciutti. Facendo riferimento ad un contenuto di legante pari al 5% in peso rispetto agli aggregati asciutti, ciò equivale al 20-30% in peso o al 10-15% in volume di calce idrata nel bitume.

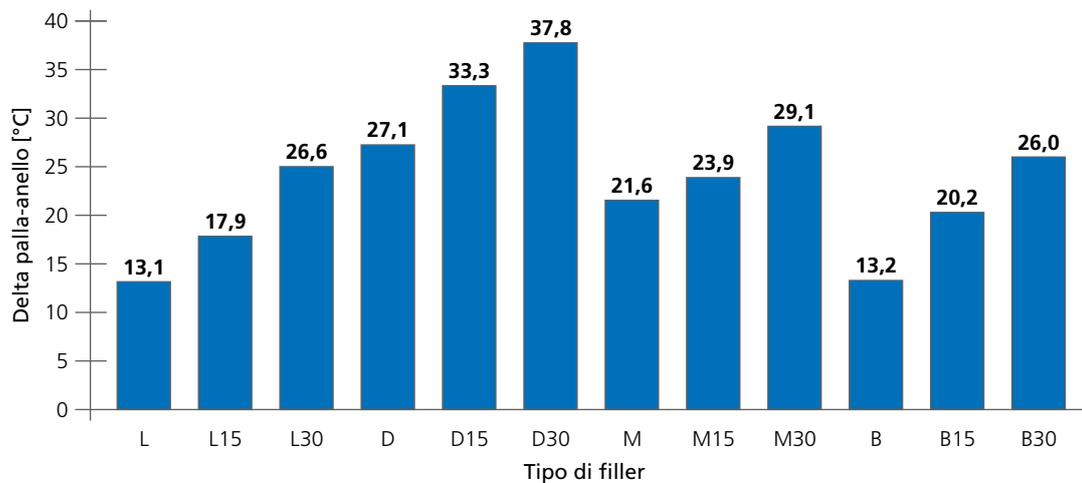


Figura 5. Delta palla-anello di alcuni filler e filler misti. L – calcare; D – dolomite; M – melafiro; B – basalto; X15 – filler X con il 15% in peso di calce idrata; X30 – filler X con il 30% in peso di calce idrata [31].

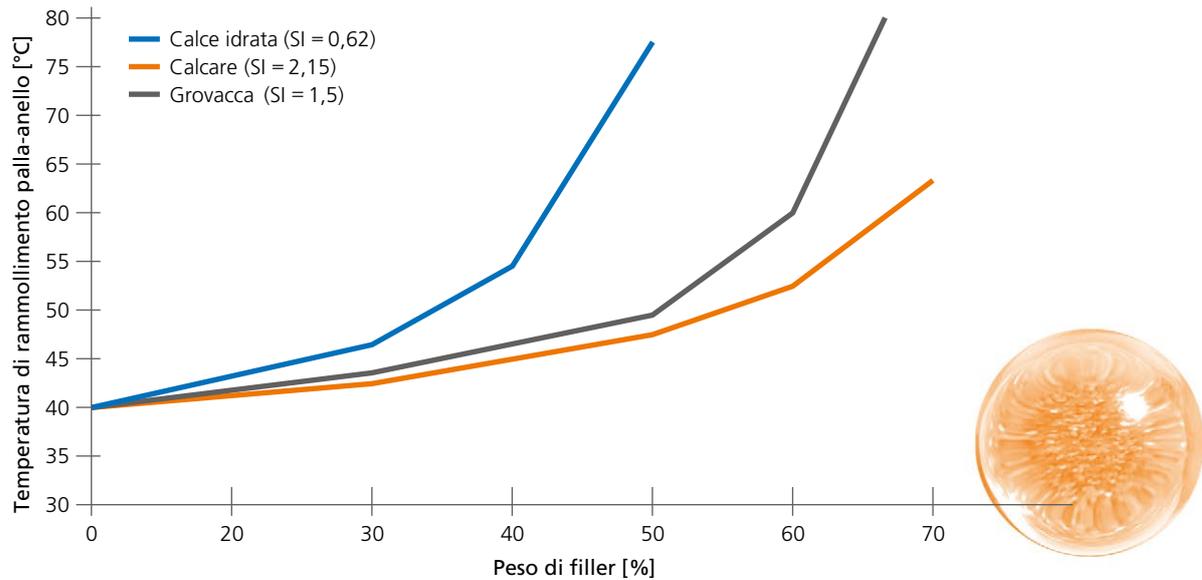


Figura 6. Temperatura di rammollimento palla-anello di un bitume con penetrazione 200 in funzione del contenuto di filler (% in peso), calce idrata, calcare e grovaccia [37].

### 1.2.3. Altre proprietà

Altre proprietà utilizzate nel settore delle pavimentazioni flessibili per specificare le caratteristiche dei filler minerali sono elencate in Tabella 3. Di particolare interesse è il numero di bitume (EN 13179-2 [40]), che consiste nel misurare il volume di acqua in ml che deve essere aggiunto a 100 g di filler per ottenere una

consistenza di riferimento che ha una penetrazione compresa tra 5 e 7 mm. Il test è eseguito soprattutto nei Paesi Bassi (dove è conosciuto anche come numero di Van der Baan) e restituisce, similmente al valore dei vuoti Rigden, informazioni sull'effetto di irrigidimento del filler.

Proprietà	Norma o metodo	Unità di misura	Calce idrata	Filler minerale	Riferimento bibliografico
Massa volumica delle particelle	EN 1097-7	Mg/m <sup>3</sup>	2,2	2,6-2,9	[29, 31]
Vuoti nel filler costipato	EN 1097-4	%	60-70	28-45	[29, 31, 34]
Delta palla-anello	EN 13179-1	°C	non misurabile	8-25	[29, 31]
Numero di bitume	EN 13179-2	–	70-120	40-50	[31, 35]
Massa volumica in kerosene	EN 1097-3	Mg/m <sup>3</sup>	0,3	0,5-0,9	[26]
Superficie specifica Blaine	EN 196-6	cm <sup>2</sup> /g	> 10000	7000	
Superficie specifica	adsorbimento di azoto con metodo BET	cm <sup>2</sup> /g	150000-200000	14000-95000	[4, 34]
Valore del blu di metilene	EN 933-9	g/kg	< 1	0-20	[34]

Tabella 3. Proprietà chimico-fisiche della calce idrata e di altri filler minerali.

La massa volumica in kerosene è talvolta impiegata per caratterizzare i filler (EN 1097-3 [41]): questa misura la cosiddetta densità apparente di 10 g di filler in 25 ml di kerosene, ottenuta misurando l'altezza del filler sedimentato nel kerosene dopo 6 ore. È stato dimostrato da P. J. Rigden [28], sebbene misurato con il benzene, che questo parametro è meno efficace dei vuoti Rigden per prevedere l'effetto di irrigidimento dei filler minerali nei leganti bituminosi.

Il valore del blu di metilene (EN 933-9 – [42]) non è significativo per la calce idrata, perché la prova è finalizzata a misurare la quantità di sostanze argillose e organiche nell'aggregato. Se anche un calcare argilloso fosse impiegato per produrre la calce, le argille sarebbero chimicamente modificate nel processo di cottura e non sarebbero perciò presenti nel prodotto finale. Nonostante ciò, l'industria del bitume utilizza molto il test al fine di caratterizzare i filler, compresa la calce idrata. Il valore è normalmente inferiore a 1 g per kg di calce idrata.

Sebbene il metodo Blaine (EN 196-6 – [43]) sia destinato ai cementi, talvolta è usato per caratterizzare la calce idrata. Questo non è del tutto appropriato, poiché l'elevata porosità della calce idrata rende impossibile eseguire il test secondo il livello richiesto di porosità, che a sua volta influisce fortemente sulla ripetibilità della prova. I valori ottenibili sono generalmente superiori a 10000 cm<sup>2</sup>/g (1 m<sup>2</sup>/g). La superficie specifica, misurabile per adsorbimento di azoto con il metodo Brunauer-Emmett-Teller (BET), è dell'ordine di 15-20 m<sup>2</sup>/g [4]. Per la maggior parte dei filler è compresa nell'intervallo 1-5 m<sup>2</sup>/g, ma sono possibili anche valori prossimi a 10 m<sup>2</sup>/g [34]. Tuttavia, nessuna norma specifica il modo in cui il metodo BET debba essere applicato sia sui filler minerali sia sulla calce idrata.

La Tabella 3 riassume i valori tipici di alcune proprietà della calce idrata e dei filler minerali di frantumazione e la classificazione di aggregati minerali. La stessa tabella presenta solo valori medi delle proprietà descritte, variabili a seconda della provenienza dei materiali. Si noti che i filler provenienti da altre fonti, quali le ceneri volanti, possono avere proprietà molto diverse rispetto a quelle elencate e non devono essere riconosciuti come tali.



## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso

Come descritto nell'introduzione, il rinnovato interesse per la calce idrata, che si è manifestato negli USA nel corso degli anni '70, si è concentrato sui suoi effetti positivi rispetto al danno causato dall'umidità e alla resistenza al gelo. Tuttavia, si è scoperto che la calce idrata migliora anche altre proprietà del conglomerato bituminoso. La calce idrata è quindi considerata come un additivo multifunzionale che migliora la durabilità dei materiali bituminosi, anche se ciò non può essere dimostrato sperimentalmente in laboratorio vista la variabilità e la complessità dei meccanismi di rottura delle pavimentazioni.

Le prove disponibili consentono di valutare la resistenza dei materiali stradali rispetto all'azione di agenti nocivi quali l'acqua, i cicli di gelo-disgelo, la temperatura e l'esposizione ai raggi UV (invecchiamento) e/o il traffico.

Il presente capitolo esamina i risultati riportati in letteratura sull'effetto della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso per quanto riguarda:

- la resistenza ai danni causati dall'umidità e dal gelo,
- la resistenza all'invecchiamento chimico,
- le proprietà meccaniche, in particolare il modulo, la resistenza, la resistenza all'ormaiamento e alla fatica e la fessurazione termica.

Sebbene queste prove consentano un confronto tra materiali, soprattutto per quelli noti su scala reale, difficilmente forniscono informazioni sulla durabilità in condizioni di esercizio. Fatta eccezione per la fessurazione per fatica e l'ormaiamento, che possono essere integrati nei metodi di dimensionamento delle pavimentazioni per prevederne la vita utile, proprietà quali la resistenza ai danni dell'umidità e all'invecchiamento sono difficilmente correlabili alla durabilità in esercizio. Il presente capitolo esaminerà solo le prove di laboratorio e il Capitolo 4 riguarderà il comportamento dei materiali su strada.

### 2.1. Resistenza al danno da umidità e al gelo

I danni per sensibilità all'acqua e gli effetti dei cicli di gelo-disgelo sono ammaloramenti frequenti del conglomerato bituminoso. Generalmente si verifica una progressiva perdita di aggregato come illustrato in Figura 7. In presenza di umidità l'interfaccia bitume-aggregato è danneggiata al punto che gli aggregati non sono più legati al bitume (stripping). Il fenomeno è generalmente definito spogliamento dell'aggregato o perdita di aggregato quando interessa solo la superficie [44]. Il pumping è un altro ammaloramento causato dalla presenza di acqua, ma negli strati inferiori, che perdono materiale fino espulso dall'acqua in pressione che risale in superficie per effetto dei carichi di traffico [9]. Se non trattati, questi danni possono evolvere nella formazione di buche. Il gelo e i cicli di gelo e disgelo tendono ad accentuare questi effetti: una stagione invernale molto rigida può di per sé causare la formazione di buche.



Figura 7. Spogliamento dell'aggregato causato dall'umidità [45].

Secondo un sondaggio statunitense condotto nei primi anni '90 [8], gli ammaloramenti per infiltrazione di acqua si verificano in genere a danno di miscele non trattate dopo 3-4 anni di esercizio, in alcuni casi anche al primo anno.

Come già detto, negli anni è stato verificato che la calce idrata diminuisce la sensibilità all'acqua delle miscele di conglomerato bituminoso. M. Duriez in collaborazione con il Laboratoire central des ponts et chaussées, (LCPC) e J. Arrambide hanno ampiamente diffuso l'argomento negli anni in cui la tecnologia era emergente in Europa [7, 46]. Tale caratteristica giustifica il rinnovato interesse 40 anni fa negli Stati Uniti [8]. Secondo alcune agenzie statunitensi, è tuttora il motivo per cui prescrivere l'uso della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso [10], così come verrà dettagliato in seguito.

Sono disponibili numerosi metodi di prova per valutare la resistenza al gelo e all'umidità delle miscele di conglomerato bituminoso; i più frequentemente utilizzati in letteratura sono elencati in Tabella 4. Il loro potere predittivo è dibattuto e non si è ancora raggiunta una comune convinzione su quale sia il migliore per evitare i danni da umidità in esercizio [47]. In particolare, la diffusione dell'acqua nella miscela [47] non è monitorata su strada, mentre potrebbe giustificare la completa saturazione delle miscele danneggiate [9]. Al contrario, le prove di laboratorio correntemente in uso consentono di raggiungere al più l'80% di saturazione. Nel 1991 il test Lottman (AASHTO T-283 – Tabella 4) è risultato uno dei più efficaci tra quelli in uso negli Stati Uniti (Figura 8).

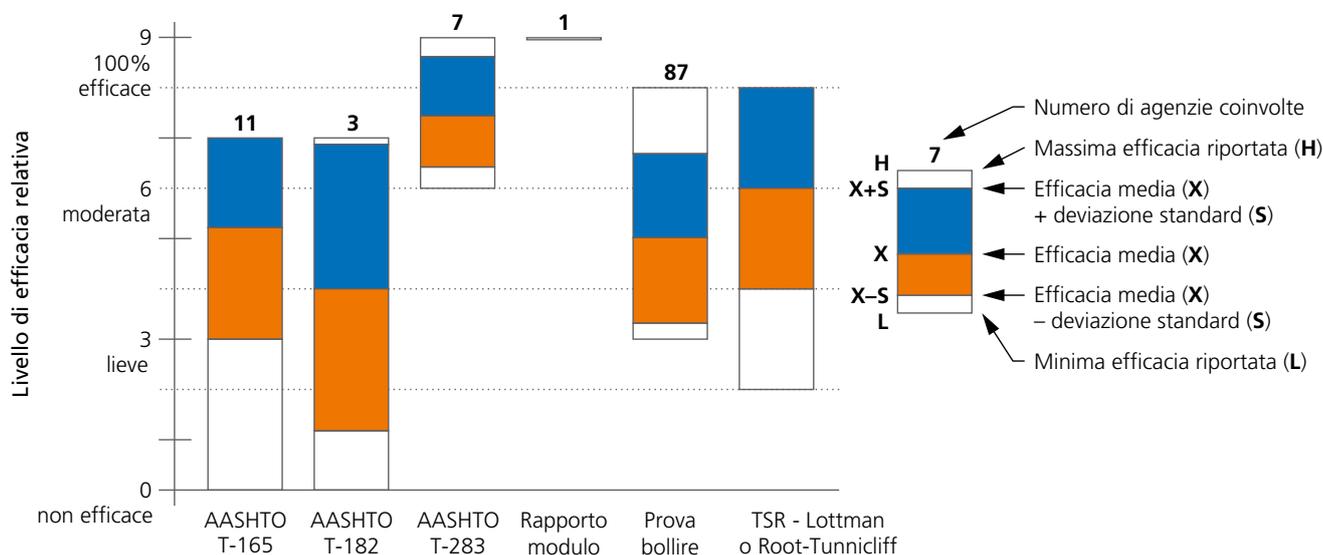


Figura 8. Metodi di prova per prevedere danni da umidità, esperienze USA [8].

In tutti i casi, indipendentemente dal metodo di prova, i dati confermano che lo 0,5-2% in peso di calce idrata rispetto agli aggregati asciutti migliora la resistenza all'umidità e al gelo delle miscele di conglomerato bituminoso. Almeno l'1% in peso è necessario per ottenere benefici [48]; alcuni esempi sono elencati nelle tabelle 5, 7, 8 e 9.

La Figura 9 confronta diversi additivi per calce idrata (aggiunta secondo due metodi) testata secondo vari metodi e con aggregati di diversa provenienza. I dati provengono da uno studio condotto da P. Hao e Y. Hachiya con il National Institute for Land and Infrastructure Management del Ministero giapponese

del Territorio, delle Infrastrutture e dei Trasporti [49]. Alcuni test sono più severi di altri per evidenziare i benefici della calce idrata. In particolare, tutti gli additivi (ad eccezione del cemento Portland) presentano identici risultati rispetto alla stabilità Marshall residua (Figura 9). Tuttavia, il Test Lottman è più severo e dimostra chiaramente che la calce idrata garantisce migliori prestazioni (Figura 9). Allo stesso modo, anche il dispositivo Hamburg Wheel Tracking (HWTD) dimostra che la calce idrata è più efficace di altri additivi al fine di aumentare la resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso (Figura 9 – consultare anche la sezione 2.3.4).

Gli effetti di questa tecnica dipendono dal metodo di prova e dai materiali utilizzati (Tabella 5). Il Prof. Sebaaly (Università del Nevada a Reno) ha confrontato gli effetti di vari antistrip liquidi e della calce idrata [13]; anche altri studi consentono un confronto [49, 50]. Tutti evidenziano che l'efficacia della calce idrata è in generale uguale o superiore a quella degli antistrip liquidi in commercio. In alcuni casi si osserva che un antistrip liquido può essere più efficace (Tabelle 7 e 9 – Figura 9). Ne consegue che diverse procedure di gelo e disgelo, come la prova Lottman ripetuta – Figura 10 o il Texas pedestal – Tabella 8, e il dispositivo Hamburg Wheel Tracking (HWTD) (Tabella 5) sono i principali metodi per evidenziare gli effetti della calce idrata [13, 51].

Su strada, l'esperienza è abbastanza consolidata. Numerosi studi evidenziano che sono stati rilevati su scala reale i buoni risultati conseguiti in laboratorio. Ad esempio, G. W. Maupin Jr. in collaborazione con il Virginia Transportation Research Council ha riportato lo stato di 12 sezioni di prova confrontando gli effetti della calce idrata con quelli di altri additivi antistrip liquidi [52]. Dopo 3-4 anni di esercizio, le 3 sezioni trattate con calce idrata mostrano una perdita di adesione bitume-aggregati minore rispetto a quelle trattate con additivi chimici [52].

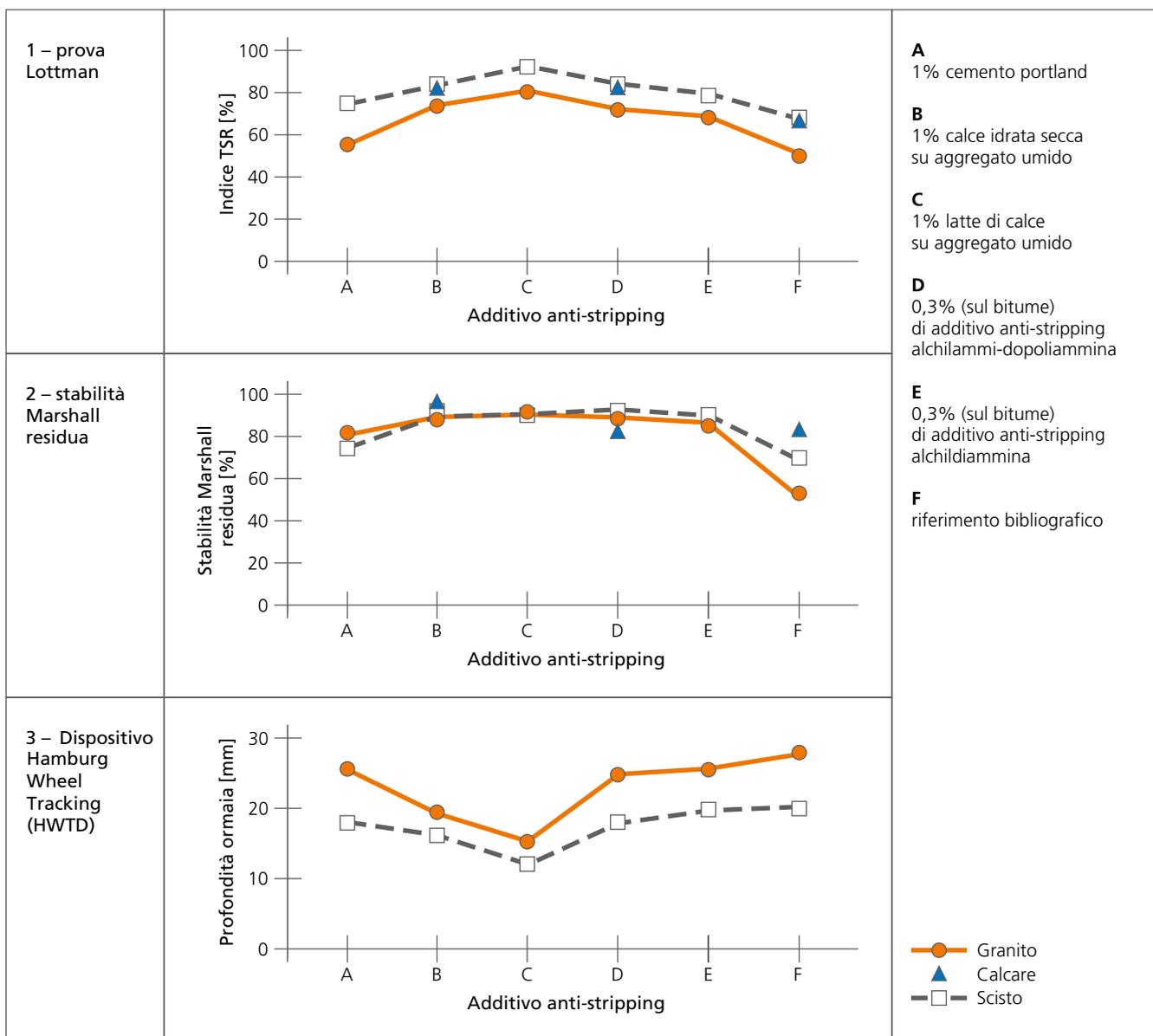


Figura 9. Resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso 0/20 confezionate con aggregati di diversa provenienza e 4,8% di bitume 70/100 e vari additivi anti-stripping. 1 – prova Lottman; 2 – stabilità Marshall residua; 3 – HWTD a 60 °C [49].

## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso

Metodo di prova	Norma	Provino	Procedura	Condizionamento	Risultato
HWTD	EN 12697-22 – metodo B in acqua	parallelepipedo 260 mm * 300 mm * spessore finale	provino immerso, ruota a contatto	provino immerso a 50 °C	profondità dell'ormai in mm
ITSR	EN 12697-12 – metodo A	cilindrico Φ 100 mm (o 150 o 160 per aggregato grosso)	resistenza a trazione indiretta (ITS) a 25 °C e 50 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sottovuoto a 7 kPa per 30 min</li> <li>• 70 ore in acqua a 40 °C</li> <li>• 2 ore a 25 °C</li> </ul>	rapporto % ITS dopo / prima condizionamento
Duriez	EN 12697-12 – metodo B	cilindrico Φ 100 mm (o 80-120-150-160 per aggregato grosso)	resistenza a compressione a 18 °C e 55 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sottovuoto a 47 kPa per 120 min</li> <li>• 7 giorni in acqua a 18 °C</li> </ul>	rapporto % ITS dopo / prima condizionamento
Cantabro	EN 12697-17	cilindrico Φ 101,6 mm * 63,5 mm generalmente miscela porosa	perdita in peso dopo 300 giri in macchina Los Angeles (senza sfere di acciaio)	di solito come ASTM D1075	rapporto perdita in peso dopo / prima condizionamento
Metodo SATS	UK Specification for Highway Works – Clause 953	cilindrico Φ 100 mm * 60 mm (8% vuoti)	ITS a 20 °C secondo Nottingham Asphalt Tester	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sottovuoto a 55 kPa per 30 min</li> <li>• 65 ore a 85 °C e 2,1 MPa in acqua</li> <li>• 24 ore a 30 °C e 2,1 MPa</li> </ul>	resistenza trazione indiretta rapporto % dopo / prima condizionamento
Lottman	AASHTO T283 Tex 531-C	cilindrico Φ 101,6 mm * 63,5 mm costipato (6,7-7,5% vuoti)	ITS a 25°C e 50,8 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• saturazione pori 70-80%</li> <li>• 16 ore a -17,8 °C</li> <li>• 24 ore in acqua a 60 °C</li> <li>• 2 ore in acqua a 25 °C</li> </ul>	ITSR dopo / prima condizionamento
Lottman ripetuta	–	cilindrico Φ 101,6 mm * 63,5 mm costipato (6,7-7,5% vuoti)	ITS a 25 °C e 50,8 mm/min	condizionamento Lottman con 1-20 cicli consecutivi di gelo-disgelo	ITSR / numero di cicli di gelo-disgelo
Gelo-disgelo Texas pedestal		mattonella cilindrica Φ 41,3 mm * 19 mm di 0,4-0,8 sabbia ricoperta da bitume costipata staticamente da 27,58 kN per 20 min	visivo (fessurazione)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mattonella immersa in acqua distillata</li> <li>• 15 ore a -12 °C</li> <li>• 45 min in acqua a 24 °C</li> <li>• 9 ore a 49 °C ripetizioni</li> </ul>	numero di cicli di gelo-disgelo a rottura
Resistenza a trazione indiretta residua (Root-Tunnicliff test)	ASTM D4867	cilindrico Φ 101,6 mm * 63,5 mm, costipato, 6-8% vuoti	ITS a 25°C e 50,8 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• saturazione 55-80%</li> <li>• 24 ore in acqua a 60 °C</li> <li>• 1 ora a 25 °C</li> </ul>	rapporto ITS dopo / prima condizionamento

Tabella 4. Metodi di prova comuni per valutare l'incremento di resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso (segue nella pagina successiva).

Metodo di prova	Norma	Provino	Procedura	Condizionamento	Risultato
Immersione / compressione	ASTM D1075 AASHTO T165	cilindrico Φ 101,6 mm * 101,6 mm, costipato staticamente su entrambe le basi (3000 psi per 2 min)	resistenza a compressione a 25 °C e 5 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 giorni in acqua a 48,9 °C</li> <li>• 1 giorno in acqua a 60 °C</li> </ul>	rapporto resistenza a compressione dopo / prima condizionamento
Marshall residua		cilindrico Φ 101,6 mm * 76,2 mm, costipato dinamicamente (50 o 75 colpi)	stabilità Marshall a 60 °C e 50,8 mm/min	24 ore in acqua a 60 °C	rapporto stabilità dopo / prima condizionamento
Texas Boil Test	ASTM D3625 Tex 530-C	(300 g + bitume) di miscela o (100 g + bitume) di aggregati 4,8/9,8	visivo (ricoprimento aggregati con bitume)	di solito come ASTM D1075	% bitume residuo dopo bollitura

Tabella 4. Metodi di prova comuni per valutare l'incremento di resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso (segue dalla pagina precedente).



## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso

Materiale	Calce idrata [% su aggregato asciutto] e metodo di aggiunta	Indicatore	Senza calce idrata	Con calce idrata	Additivo anti-stripping	In presenza di additivo	Riferimento bibliografico
4 miscele Colorado, diversi aggregati 5,1% AC-20 e 6,5% vuoti	1%	profondità ormaie a 45 °C dopo 20000 passaggi (miscele portate a rottura)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mix 1: (17 mm)</li> <li>• mix 2: (&gt; 20 mm)</li> <li>• mix 3: (&gt; 20 mm)</li> <li>• mix 4: 8,7 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mix 1: 1,4 mm</li> <li>• mix 2: 2,3 mm</li> <li>• mix 3: 2,5 mm</li> <li>• mix 4: 2,3 mm</li> </ul>	0,5% del miglior additivo anti-stripping nel bitume	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mix 1: 2,2 mm M</li> <li>• mix 2: 8,1 mm</li> <li>• mix 3: (13,7 mm)</li> <li>• mix 4: 6,2 mm</li> </ul>	[56, 11]
Miscela Louisiana calcare siliceo 0/19 3,6-4% bitume e 3,6% vuoti	1,5% latte di calce (LS) o nel bitume (LM) – sostituzione di filler	profondità ormaie a 50 °C dopo 20000 passaggi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PG64-22: 10,1 mm</li> <li>• PG70-22: 3,7 mm</li> <li>• PG76-22: 3,5 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PG64-22: 9,5 mm (LS) 8,9 mm (LM)</li> <li>• PG70-22: 2,6 mm (LS) 2,9 mm (LM)</li> <li>• PG76-22: 1,9 mm (LS) 1,8 mm (LM)</li> </ul>			[57]
Mix C granito 5% PG67-22	2%	profondità ormaie a 50° C dopo 8000 passaggi	12 mm	4 mm	0,5% del additivo chimico nel bitume	4 mm	[58]
6 miscele Texas aggregato 4,6-5,5% AC-20 7% vuoti		velocità di creep / velocità di stripping (cicli a 40 °C per 1 mm di ormaia) NS = no stripping osservato	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mix 1: 4856/459</li> <li>• mix 2: 2979/640</li> <li>• mix 3: 1926/446</li> <li>• mix 4: 9815/NS</li> <li>• mix 5: 2082/279</li> <li>• mix 6: 907/163</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mix 1: 8871/NS</li> <li>• mix 2: 9919/NS</li> <li>• mix 3: 7026/NS</li> <li>• mix 4: 10465/NS</li> <li>• mix 5: 5252/NS</li> <li>• mix 6: 3427/NS</li> </ul>	additivo anti-stripping liquido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mix 1: 5469/777</li> <li>• mix 2: 4780/1050</li> <li>• mix 3: 3626/1402</li> <li>• mix 4: 5770/NS</li> <li>• mix 5: 1511/491</li> <li>• mix 6: 3471/744</li> </ul>	[59, 14]
Superpave 0/16 5,4-5,8% calcare e ghiaia frantumata PG64-22 3,6-4,5% vuoti	1% calce secca su aggregato umido (B2) o latte di calce (B3) – senza sostituzione di filler	punto di stripping a 50 °C		B2: 4300 B3: 2200	1% calcare (senza sostituzione di filler)	1,800	[60]
Conglomerato bituminoso 0/11 e bitume 50/70	1.5% come filler (Ka25)	profondità ormaie a 50 °C dopo 20000 cicli	10,9	5,2			[37]
Conglomerato bituminoso 0/16 e bitume 50/70	1.5% come filler (Ka25)	profondità ormaie a 50 °C dopo 20000 cicli	4,6	3,1			[37]

Tabella 5. Aumento della resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso additivate con calce idrata; misure con dispositivo Hamburg Wheel Tracking (EN 12697-22 – small size – metodo B in acqua). In 2.3.4 è disponibile una descrizione dei risultati.

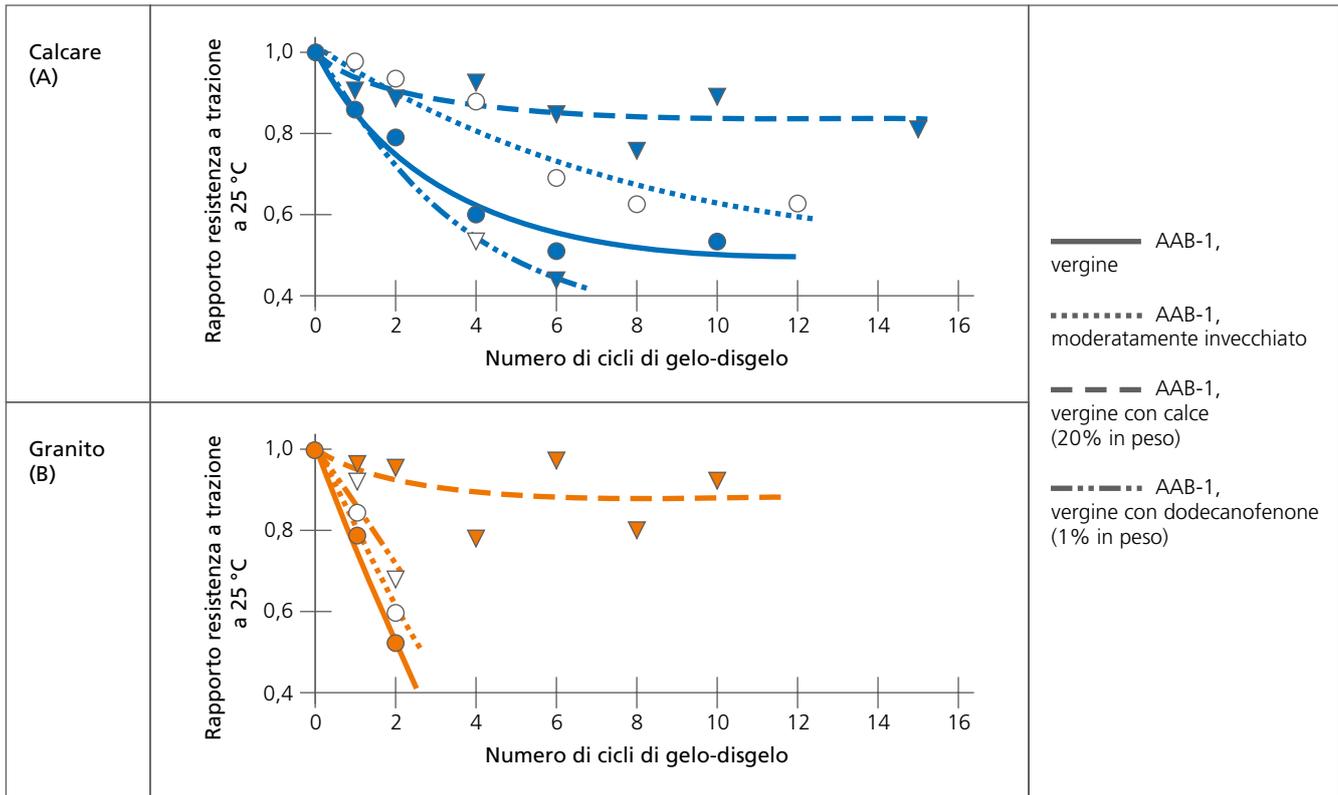


Figura 10. Prove di gelo-disgelo su miscele di conglomerato bituminoso confezionate con calcare (A) o granito (B) e bitume AAB-1. Sono stati testati bitumi vergini e invecchiati, con calce (20% in peso di legante, 5,5 % in volume) e dodecanofenone 1% in peso di legante [65].

In Wyoming, Montana, New Mexico e Georgia 15 sezioni sperimentali della Federal Highway Administration trattate con calce idrata sono in condizioni da buone a eccellenti dopo più cinque anni di esercizio [53]. L'esperienza maturata dal Nevada DOT conferma i buoni risultati di tale tecnica dopo 5-10 anni di servizio. Quattro sezioni trattate non hanno manifestato alcuna riduzione del Present Serviceability Index (PSI), ad eccezione di un caso, ove sono state evidenziate moderate (2) o severe (2) riduzioni di PSI [54].

In Polonia, una sezione con calce idrata non presenta danni da traffico dopo 4 anni [55].

I più convincenti risultati su strada provengono dall'indagine condotta nel 1991 sugli additivi impiegati per prevenire danni causati dall'umidità [8]. Le agenzie statali del nord USA affermarono che la calce idrata era l'additivo più efficace fino ad allora usato (Figura 11). Inoltre, nessuna agenzia riportò la parziale efficacia della calce idrata, aspetto evidenziato in alcuni circostanze per tutti gli altri additivi.

Nell'indagine del 2003, le stesse agenzie hanno riferito che la prevenzione dei danni da umidità è il primo motivo d'uso della calce idrata (Tabella 6 – [10]).

## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso

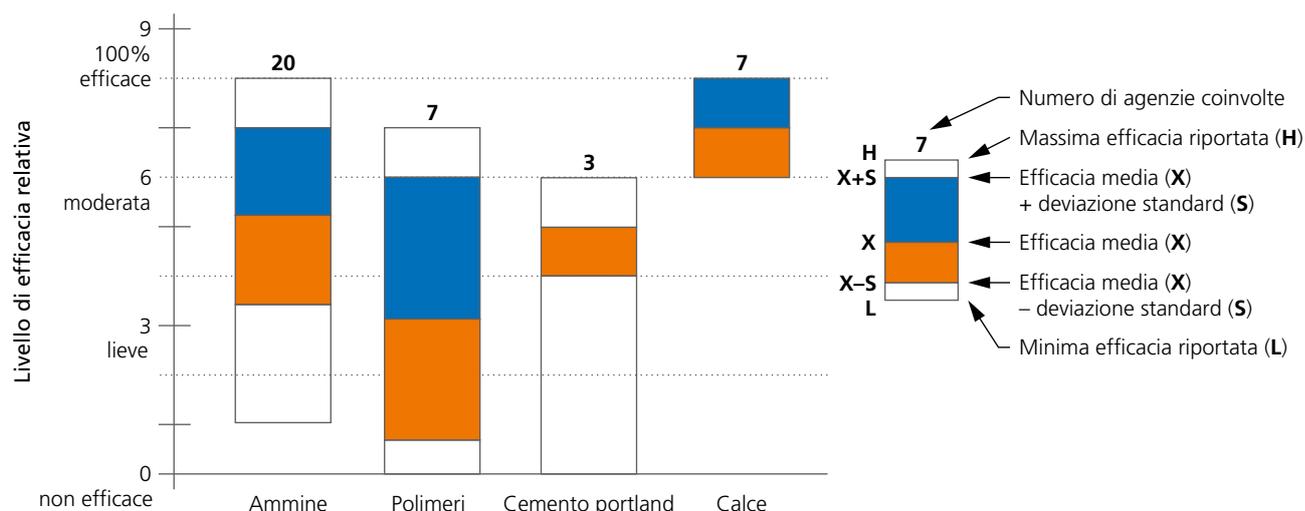


Figura 11. Efficacia di alcuni additivi per prevenire il danno da umidità, fonte agenzie del nord USA [8].

Agenzia / Stato USA	Resistenza allo stripping	Resistenza all'invecchiamento	Rigidezza del bitume	Fessurazione	Altre proprietà del fimo
Arizona	1	3	2	3	2
California	1	2	3	3	3
Colorado	1	3	3	3	1 (quando adeguato)
Federal Highway Administration (FHWA)	1	2	3	2	3
Georgia	1	3	3	3	3
Mississippi	1	1	2	—	3
Nevada	1	3	3	2	1
Oregon	1	2	3	3	3
South Carolina	1	2	2	2	2
Texas	1	3	2	3	2
Utah	1	2	2	2	2

Tabella 6. Motivi per l'uso della calce idrata, fonte agenzie del nord USA. Livello di importanza: 1 – molto importante; 2 – moderatamente importante; 3 – poco importante [10].

## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso

Materiale	Calce idrata [% su aggregato asciutto] e metodo di aggiunta	Indicatore	Senza calce idrata	Con calce idrata	Additivo anti-stripping	Con additivo	Riferimento bibliografico
Mix C granito 5% PG67-22	2%	resistenza senza / con condizionamento / resistenza residua a 25 °C	1 / 0,4 / 40%	1,2 / 1,1 / 92%	0,5% additivo chimico nel bitume	1,1 / 1,1 / 100%	[58]
Superpave 0/16 5,4-5,8% calcare e ghiaia frantumata PG64-22 3,6-4,5% vuoti	1% calce secca su aggregato umido (B2) o latte di calce (B3) – senza sostituzione di filler	resistenza residua a 25 °C	69%	B2: 77% B3: 74%	1% calcare (senza sostituzione di filler)	77%	[60]
Mix Nevada con ghiaia, bitume AR-4000	1-2% secca su aggregato umido	resistenza residua a 25 °C	36%	1%: 84% 2%: 70%	0,5, 1 and 2% del miglior additivo liquido	0,5%: 41% 1%: 66% 2%: 79%	[61, 14]
Mix California con calcare, AR-4000	1-2% secca su aggregato umido	resistenza residua a 25 °C	37%	1%: 93% 2%: 81%	0,5, 1 and 2% del miglior additivo liquido	0,5%: 47% 1%: 58% 2%: 76%	[61, 14]
Miscele Nevada DOT con 0/25 felsite / basalto, bitume modificato, AC-20	1,5% calce secca (DL) su aggregato umido o latte di calce (LS) con (W) o senza (N) 48 ore di "maturazione"	resistenza residua a 25 °C	39,8%	DLN: 108,7% DLW: 97,2% LSN: 100,0% LSW: 108,0%			[62]
Miscele Nevada DOT con 0/25 felsite / basalto, bitume modificato, PG64-34	1,5% calce secca (DL) su aggregato umido o latte di calce (LS) con (W) o senza (N) 48 ore di "maturazione"	resistenza residua a 25 °C	68,4%	DLN: 89,3% DLW: 96,5% LSN: 84,3% LSW: 92,8%			[62]
Miscele Nevada DOT con 0/25 quarzite / calcare, bitume modificato, AC-30	1,5% calce secca (DL) su aggregato umido o latte di calce (LS) con (W) o senza (N) 48 ore di "maturazione"	resistenza residua a 25 °C	35,3%	DLN: 104,8% DLW: 109,7% LSN: 103,1% LSW: 105,2%			[62]

Tabella 7. Miglioramento della resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso additivato con calce idrata; risultati ottenuti con Lottman test.

## 2. Effetti della calce idrata sulle caratteristiche delle miscele di conglomerato bituminoso

Materiale	Calce idrata [% su aggregato asciutto] e metodo di aggiunta	Indicatore	Senza calce idrata	Con calce idrata	Additivo anti-stripping	Con additivo	Riferimento bibliografico
2 miscele con bitume B50 e Olexobit O45 (1)	1,5%	resistenza residua dopo 18 cicli di gelo-disgelo	B50: 68% O45: 76%	B50: 81% O45: 89%	0,4% additivo liquido (ammina grassa)	B50: 74% O45: 81%	[63]
Superpave 0/16 5,4-5,8% calcare e ghiaia frantumata PG64-22 3,6-4,5% vuoti (1)	1% calce secca su aggregato umido (B2) o latte di calce (B3) – senza sostituzione di filler	resistenza residua dopo 6 cicli	11%	B2: 49% B3: 40%	1% calcare (senza sostituzione di filler)	11%	[60]
Mix Idaho 0/16 con 5,3% ghiaia frantumata, PG58-28 (1)	1% calce secca su aggregato umido con 48 ore di "maturazione"	modulo resiliente a 25 °C (ksi) dopo 0-21 cicli gelo-disgelo		0: 264 3: 268 6: 272 9: 266 12: 243 15: 184 21: 172	0,5% additivo liquido	0: 233 3: 255 6: 228 9: 161 12: 176 15: 106 21: 86	[64]
Mix Wyoming 0/19 5,5% calcare, bitume AAB-1, 7% vuoti (1)	1% calce nel legante	resistenza a trazione indiretta (kPa) dopo 0-15 cicli gelo-disgelo	0: 591 1: 505 2: 464 4: 352 6: 298 10: 310 12: rottura	0: 524 1: 473 2: 471 4: 480 6: 446 10: 466 15: 423			[65]
Mix Wyoming 0/19 5,5% granito, bitume AAB-1, 7% vuoti (1)	1% calce nel legante	resistenza a trazione indiretta (kPa) dopo 0-10 cicli gelo-disgelo	0: 573 1: 459 2: 296 4: rottura	0: 484 1: 468 2: 464 4: 385 6: 477 8: 396 10: 448			[65]
Mix Texas con 62% ghiaia, 15% e 23% sabbia lavata e non, 5% bitume AC-20 (2)	1.5% calce secca su aggregato umido o latte di calce (LS) con o senza "maturazione", vari trattamenti	numero di cicli gelo-disgelo a rottura	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt; 137 se tutto aggregato trattato</li> <li>• 113 se LS solo su ghiaia</li> <li>• 25 se LS solo su sabbia</li> <li>• 23 se LS solo su sabbia lavata</li> </ul>			[2, 66]
Ghiaietto di fiume, bitume E o A (2)	latte di calce	numero di cicli gelo-disgelo a rottura	E: 4 A: 4	E: 22 A: > 25	21 additivi liquidi in uso (ammine, amido-ammine, imidazoli, piridina e organosilani)	E: 3-10 A: 2-10	[2, 67]

Tabella 8. Miglioramento della resistenza ai cicli di gelo-disgelo di miscele di conglomerato bituminoso additivato con calce idrata; risultati ottenuti con: (1) – Lottman prova ripetuta; (2) – gelo-disgelo Texas pedestal.

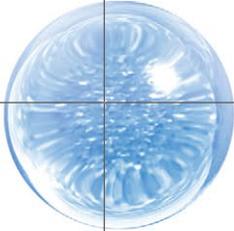
Materiale	Calce idrata [% su aggregato asciutto] e metodo di aggiunta	Indicatore	Senza calce idrata	Con calce idrata	Additivo anti-stripping	Con additivo	Riferimento bibliografico
Conglomerato bituminoso poroso B40/50 o PMB <sup>(3)</sup>	1%	resistenza a compressione residua	B40/50: 62% PMB: 88%	B40/50: 78% PMB: 78%			[68]
Miscela porfido 0/16, 6,4% filler, 1,9-2,5% vuoti <sup>(4)</sup>	1,6% come filler (Ka <sub>25</sub> )	perdita peso dopo 300 giri	greggio arabo: 1,3	greggio arabo: 1,0			[69]
Miscela ghiaia 0/11, 5,7% filler, 1,9-2,5% vuoti <sup>(4)</sup>	1,4% come filler (Ka <sub>25</sub> )	perdita peso dopo 300 giri	greggio venezuelano: 1,6	greggio venezuelano: 1,5			[69]
Conglomerato bituminoso poroso B40/50 o PMB <sup>(4)</sup>	1%	perdita peso	B40/50: 1,02 PMB: 0,99	B40/50: 0,93 PMB: 0,94			[68]
Miscela porfido 0/16, 6,4% filler, 1,9-2,5% vuoti <sup>(5)</sup>	1,6% come filler (Ka <sub>25</sub> )	stabilità residua	greggio arabo: 89% greggio venezuelano: 97%	greggio arabo: 91% greggio venezuelano: 102%			[69]
Miscela ghiaia 0/11, 5,47% filler, 1,9-2,5% vuoti <sup>(5)</sup>	1,4% come filler (Ka <sub>25</sub> )	stabilità residua	greggio arabo: 97% greggio venezuelano: 111%	greggio arabo: 97% greggio venezuelano: 120%			[69]
Miscela Lettonia granito 5% PG67-22 <sup>(6)</sup>	2%	% superficie coperta	5%	90%	0,5% antistrip liquido	95%	[58]
Miscela 0/16 con granito, bitume D50 <sup>(6)</sup>	1,5%	% superficie coperta	90%	100%	0,4% antistrip liquido (ammina grassa)	100%	[63]
Sabbia di fiume <sup>(6)</sup>	calce calcica (c) / calce dolomitica (d)	% superficie coperta	10%	c: 68% d: 72%			[2]
Calcare <sup>(6)</sup>	calce calcica (c) / calce dolomitica (d)	% superficie coperta	60%	c: 72% d: 80%			[2]

Tabella 9. Miglioramento della resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso additivato con calce idrata; risultati ottenuti con vari metodi: (3) – Duriez; (4) – Cantabro; (5) – Marshall residua; (6) – Texas Boil test.

## 2.2. Resistenza alle aggressioni chimiche

Fin dalle prime esperienze, si è osservato che la calce idrata rallenta il processo di invecchiamento chimico del bitume. Il primo rilievo del fenomeno risale alla fine del 1960 nello Utah, quando C. V. Chachas con lo Utah State Department Highways osservò che i provini di bitume ricoperti da conglomerato bituminoso additivato con calce idrata erano meno rigidi del materiale di riferimento [70, 71]. Da allora, alcune ricerche di laboratorio (Tabella 10) hanno confermato questo effetto, osservato anche su strada (Tabella 11).

Il rilievo su strada dell'effetto di anti-invecchiamento rimane complicato a causa della difficoltà di recuperare il legante invecchiato. Essendo l'invecchiamento più forte sulla parte superiore dello strato superficiale, i primi centimetri (se non millimetri) devono essere estratti per quantificare il fenomeno. Tuttavia, in alcuni casi viene esaminato l'intero strato superficiale, a volte spesso diversi centimetri, diluendo gli effetti dell'invecchiamento superficiale con quelli del bitume presente in profondità, che è poco invecchiato.

Visti risultati in Tabella 10, l'effetto della calce idrata sull'invecchiamento del bitume può essere descritto come segue:

- I bitumi modificati con calce idrata evidenziano una ridotta predisposizione all'invecchiamento [11, 12, 72, 73, 74, 75, 76]. Ciò comporta un più lento aumento della viscosità, come illustrato in Figura 12.
- La velocità di formazione del carbonile rallenta nei bitumi modificati con calce idrata [72, 74, 75]. Tuttavia, questo effetto è stato riscontrato solo a temperature di invecchiamento pari o superiori a 88 °C, ma non a basse temperature (60 °C – [76]).
- La formazione di solfuri, solfosfidi e chetoni non sembra essere significativamente modificata dall'impiego di calce idrata [22, 76].
- In tutti i casi, la presenza di bitumi modificati con calce idrata rallenta la formazione di asfalteni [22, 69, 72, 74, 75].
- I bitumi che sono stati a contatto con calce idrata, poi rimossa, mostrano ancora l'effetto di ridotto invecchiamento [22, 72].
- Gli effetti sono visibili solo in presenza di calce idrata e non di filler calcareo [22, 77].

Nel Capitolo 3 sono discussi alcuni risultati in termini di interazione bitume-calce idrata.

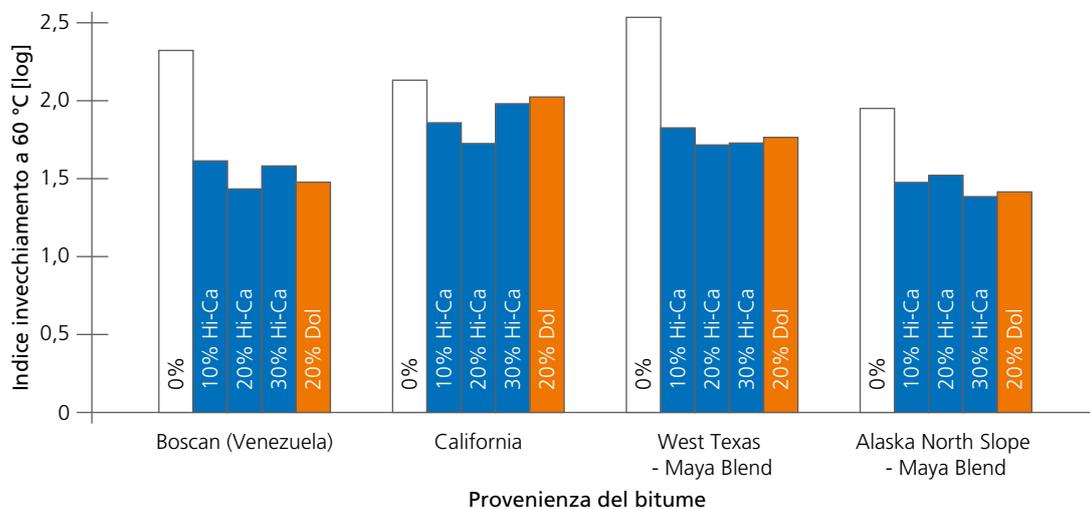


Figura 12. Indice di invecchiamento a 60 °C (viscosità dopo l'invecchiamento rapportata alla viscosità vergine) di vari bitumi modificati con calce idrata calcinica (Hi-Ca) e calce idrata dolomitica (Dol). L'invecchiamento è stato ottenuto con il Thin Film Accelerated Aging Test (TFAAT) corrispondente a 3 giorni a 113 °C in presenza di ventilazione [22].

Ricercatore, anno	Metodo invecchiamento	Bitume testato	Calce idrata [% su peso bitume]	Principali conclusioni	Riferimento bibliografico
Plancher, 1976	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rolling Thin Film Oven (RTFOT – EN12607-1 75 min a 163 °C)</li> <li>Rolling MicroFilm Circulating Oven RMF-C (48 ore a 98,9 °C)</li> </ul>	4 AC10, differenti provenienze	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>la calce idrata riduce l'irridimento per invecchiamento (meno rigidità, minore contenuto di asfalteni, ridotti prodotti di ossidazione come carbonili)</li> <li>l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[72]
Edler, 1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>climatometro: varie condizioni</li> <li>RTFOT 163 °C, 75 min</li> <li>RTFOT + pressione oxygen bomb</li> <li>RTFOT + TFOT 163 °C, 5 ore</li> <li>visosità, FTIR, GPC</li> </ul>	60/70 e 80/100	6 o 12% in peso	<ul style="list-style-type: none"> <li>la maggiore riduzione di invecchiamento è stata osservata attraverso la viscosità indipendentemente dal contenuto di calce</li> <li>dopo l'invecchiamento minore rapporto di C=O (1710 cm<sup>-1</sup>) / C=C (1600 cm<sup>-1</sup>) per i bitumi modificati con calce</li> <li>effetto più evidente con climatometro, quasi non percepito con RTFOT</li> <li>ridotto effetto su peso molare</li> </ul>	[78]
Petersen, 1987	Thin Film accelerated aging test (TFAAT) 113 °C per 3 giorni	<ul style="list-style-type: none"> <li>AC10 California Coastal</li> <li>AC10 Boscan</li> <li>AC10 North Slope / Maya</li> <li>AC10 West Texas / Maya</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>calce idrata calcinica 10, 20, 30%</li> <li>calce idrata dolomitica 20%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>test equivale a 11-13 anni su strada</li> <li>10% calce idrata neutralizza gran parte degli acidi del bitume</li> <li>con calce idrata ridotti irrigidimento, contenuto di asfalteni e prodotti di ossidazione, velocità di formazione di carbonili; stabile velocità di formazione di solfuri, solfossidi e chetoni</li> <li>l'effetto dipende dal bitume</li> <li>il filler calcareo non ha effetti su invecchiamento</li> </ul>	[22, 12]
Johansson, 1995	1 + 2 settimane in Pressure Aging Vessel (PAV) a 60 °C e 2,1 MPa pressione aria	8 SHRP bitumi	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>ridotto invecchiamento eccetto per bitume AAG</li> <li>effetti su carbonili o solfossidi solo per bitume AAK</li> </ul>	[76, 71]
Oliver, 1995	ARRB durabilità test (RTFOT + Thin Film 20 micron ageing a 100 °C)	85/100	6-26	miglioramento della durabilità	[79]
Johansson, 1996	144 ore TFOT EN 12607-2 + PAV 60 °C + 80 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>AAA-1</li> <li>AAD-1</li> </ul>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>la calce idrata inibisce attività catalitica dei composti del vanadio</li> <li>non osservate interazioni tra composti vanadio e calce idrata</li> <li>l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[80, 71]

Tabella 10. Risultati sperimentali che mostrano l'effetto della calce idrata sull'invecchiamento del bitume (continua nella pagina successiva).

Ricercatore, anno	Metodo invecchiamento	Bitume testato	Calce idrata [% su peso bitume]	Principali conclusioni	Riferimento bibliografico
Wisneski, 1996	POV a 88, 93 e 99 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AAA-1</li> <li>• AAF-1</li> </ul>	1-20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• effetto anti aging con calce sia viva che idrata, migliore con idrata</li> <li>• rallentata formazione asfalteni e carbonili               <ul style="list-style-type: none"> <li>• ridotto irrigidimento</li> </ul> </li> <li>• l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[75]
Lesueur e Little, 1999	TFOT + PAV 100 °C per 20 ore	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AAD</li> <li>• AAM</li> </ul>	12,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ridotto irrigidimento per bitume AAD</li> <li>• incremento viscosità per bitume AAM dopo aggiunta di calce idrata dovuto a interazione chimica</li> </ul>	[81]
Hopman, 1999	RTFOT (2,5 e 7 ore)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Venezuela 70/100</li> <li>• Middle East 70/100</li> </ul>	12,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la calce idrata riduce irrigidimento da invecchiamento (penetrazione, palla-anello, asfalteni)</li> <li>• l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[69]
Verhasselt, 2001	RTFOT (standard e 7 ore)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Venezuela 35/50</li> <li>• Middle East 35/50</li> </ul>	12,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la calce idrata riduce irrigidimento da invecchiamento (penetrazione, palla-anello, asfalteni)</li> <li>• l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[73]
Huang, 2002	PAV 60°C 100-2000 ore	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AAD-1</li> <li>• ABD-1</li> </ul>	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la calce idrata riduce irrigidimento da invecchiamento (viscosità, asfalteni)</li> <li>• l'effetto dipende dal bitume</li> <li>• il filler calcareo non ha effetti su invecchiamento</li> </ul>	[65]
Verhasselt e Puiatti, 2004	RCAT 235 min a 163°C o 17, 65 e 140 ore a 90°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Venezuela 35/50, 50/70 e 70/100</li> <li>• Middle East 35/50</li> </ul>	12,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la calce idrata riduce irrigidimento da invecchiamento (penetrazione, palla-anello, asfalteni)</li> <li>• assorbanza ridotta a 1700 cm<sup>-1</sup></li> <li>• l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[74]
Miro, 2005	LTOA miscela 4,5% bitume e 27% vuoti a 80 °C	80/100	17-44	la calce idrata riduce irrigidimento da invecchiamento (penetrazione, palla-anello, viscosità)	[82]

Tabella 10. Risultati sperimentali che mostrano l'effetto della calce idrata sull'invecchiamento del bitume (continua dalla pagina precedente).

Ricercatore, anno, nazione	Tipo di miscela	Anni	Calce idrata [% su peso bitume]	Principali conclusioni	Riferimento bibliografico
Chachas, 1971, USA (Utah)	miscele esistenti di 1-6 anni e 5 miscele nuove	0-6	1% (tranne due casi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• primo riferimento sull'effetto anti-aging della calce</li> <li>• minore viscosità del bitume trattato con calce rispetto a quello non trattato</li> <li>• l'effetto dipende dal bitume</li> </ul>	[70]
Decoene, 1983, Belgio	2-4 cm conglomerato bituminoso poroso, bitume modificato o no, alcuni con calce idrata	fino a 10		le sezioni trattate con calce idrata sono in buone condizioni	[83, 11]
Bruce, 1987, USA (Montana)	un tipo di aggregato, bitume 120/150	3	1,5% in tamburo	penetrazione del bitume trattato con calce idrata 11% superiore alla media	[84]
Oliver, 1995, Australia	chip seal con bitume 85/100	7,7-10,6	1,5-15,3% nel bitume	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nessun effetto significativo</li> <li>• probabile carbonatazione della calce</li> </ul>	[79]
Jones, 1997, USA (Utah)		8		viscosità ridotta del 50%	[11]
Huang, 2002, USA (Montana)	come Bruce, 1987	5	1,5% in tamburo	non apprezzabili differenze tra materiali trattati e non	[65]
Schneider, 2002, Schellenberg, 2004, Germany	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SMA 0/8 S</li> <li>• AB 0/11</li> </ul>	2	1,4% come filler misto	delta palla-anello 1,5-7 °C per miscele trattate con calce idrata	[29, 85]
Sewing, 2006, Switzerland	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HMT 22</li> <li>• SMA 11</li> <li>• AB 11 N</li> </ul>	2-4	2%	delta palla-anello 1-1,7 °C per miscele trattate con calce idrata, ad eccezione di una	[86, 87]
Bianchetto, 2008, Argentina	miscela 0/19	0	1%	ridotto indice di invecchiamento per miscele additivate e poste in opera a 135 °C o 160 °C	[88]

Tabella 11. Risultati su strada che mostrano l'effetto della calce idrata sull'invecchiamento del bitume.

## 2.3. Caratteristiche meccaniche

È stato osservato che la calce idrata migliora le caratteristiche meccaniche delle miscele di conglomerato bituminoso. Difatti, i dati presenti nel capitolo precedente, basati su prove condotte prima e dopo il condizionamento, evidenziano che le miscele additivate con calce idrata tendono ad avere maggiori caratteristiche di resistenza e modulo rispetto alle miscele non modificate.

I risultati non sono sorprendenti, visto l'effetto di irrigidimento verificato secondo gli standard europei (Capitolo 1). Nonostante ciò, questo paragrafo si apre con una rassegna sulla reologia dei

mastici, miscele di bitume e filler, che mostra il comportamento peculiare della calce idrata, in parte già evidenziato dal delta palla-anello. Sono pertanto esaminati i dati pubblicati su diverse proprietà meccaniche delle miscele di conglomerato bituminoso trattate con calce idrata, in particolare modulo, resistenza, resistenza all'ormaiamento, fatica e fessurazione termico.

Nel Capitolo 3 saranno esaminati i meccanismi dell'effetto di irrigidimento.

### 2.3.1. Mastici

Per meglio comprendere le proprietà delle miscele di conglomerato bituminoso, molti ricercatori hanno utilizzato come modello i mastici, cioè miscele di bitume e filler. L'approccio è motivato dal fatto che non il bitume tal quale ma il mastice è chiamato a garantire il legame tra lo scheletro litico e l'aggregato grosso.

Nello studio dei mastici è evidente un mastice confezionato con calce idrata ha un comportamento diverso da quello di un mastice contenente un filler minerale. Ad esempio, la prova palla-anello descritta nel Capitolo 1 evidenzia che, rispetto ai filler minerali tradizionali, la calce idrata che ha un effetto di irrigidimento superiore.

Diversi studi hanno confermato che proprietà come la viscosità (o parimenti il modulo complesso) aumentano quando la calce idrata è impiegata in sostituzione del filler minerale [89, 90, 91]; tali effetti necessitano di tempo per esplicarsi come illustrato nel Capitolo 3 (Figura 27). La maggior parte dei bitumi manifesta un effetto di maggiore irrigidimento se trattati con calce idrata piuttosto che con i tradizionali filler minerali. Con riferimento ad una miscela tipica di conglomerato bituminoso contenente il 5% di filler minerale e il 5% di bitume, la sostituzione di 1-2% di filler con 1-2% di calce idrata dovrebbe equivalere ad usare un bitume con temperatura di rammollimento palla-anello maggiore di circa 2,5-8 °C. Nelle attuali norme europee, il delta palla-anello tra i categorie prossime è di circa 5 °C [92].

Pertanto, la sostituzione del 2% con calce idrata equivale ad un bitume più duro (cioè, un 35/50 con calce idrata sarebbe simile ad un 20/30 senza calce idrata).

Ciò può essere quantificato attraverso la viscosità intrinseca  $[\eta]$  definita come:

$$[\eta] = \lim_{\phi \rightarrow 0} \left( \frac{\eta(\phi) - \eta_0}{\eta_0} \right)$$

dove:

$\eta(\phi)$  è la viscosità del mastice confezionato con una frazione di volume  $\phi$  di filler

$\eta_0$  è la viscosità del bitume tal quale

La viscosità intrinseca  $[\eta]$  consente una buona stima dell'effetto viscosizzante, per qualsiasi valore della frazione di filler, attraverso la seguente equazione proposta da W. Heukelom e P. W. O. Wijga del laboratorio Shell Koninklijke di Amsterdam [93], come confermato da altri autori [81, 94]:

$$\eta = \eta_0 \left( 1 - \frac{[\eta] \phi}{2} \right)^{-2}$$

Utilizzando questo parametro, che quantifica l'effetto di irrigidimento di un filler, si dimostra che la calce idrata ( $[\eta] \sim 3-10$ ) garantisce un effetto di irrigidimento circa doppio rispetto a quello di altri filler minerali ( $[\eta] \sim 2,5-5$ ) (Tabella 12 – [95]).

Tipo di filler	$[\eta]$
Calcare	3,8
Calcare	2,6-3,9 (25 °C) 3,0-3,7 (70 °C)
Calcare	2,5 (65 °C) 2,4 (135 °C)
Calcare dolomitico	4,9 (25 °C) 4,4 (70 °C)
Calce idrata	3,2-10
Calce	7
Arenaria	2,8 (25 °C) 4,0 (70 °C)
Filler siliceo	2,4 (65 °C) 2,4 (135 °C)
Granito	2,7-4,2 (25 °C) 3,5-4,1 (70 °C)
Ceneri volanti	10,2 (25 °C) 14,1 (70 °C)
Polvere di ardesia	4,2
Argilla fine	3,2
Caolina	6,7
Nero di carbonio	2,6 (65 °C) 3,9 (135 °C)
Asbesto	16,5
Fibre polimeriche	26-34
Fibre minerali	26

Rispetto a questo aspetto, la temperatura è una variabile fondamentale, tant'è che i risultati esposti valgono solo a temperature elevate. Gli studi dimostrano altresì che a basse temperature gli effetti di irrigidimento della calce idrata sono simili a quelli di altri filler minerali [33, 96]. La transizione tra la regione a bassa temperatura e la regione ad alta temperatura si verifica in prossimità della temperatura ambiente, come osservato per tre diversi bitumi da J. P. Wortelboer et al., in uno studio condotto da ESHA (Groningen, Paesi Bassi) e LCPC (Figura 13 [97]). Altri dati confermano che l'effetto di irrigidimento della calce idrata dipende dalla temperatura, con un comportamento simile a quello di un filler minerale al di sotto della temperatura ambiente, ma più efficace al di sopra [12, 81, 98, 99, 100].

Nel Capitolo 3 vengono discussi tali effetti.



Tabella 12. Viscosità intrinseca  $[\eta]$  di alcuni filler [95].

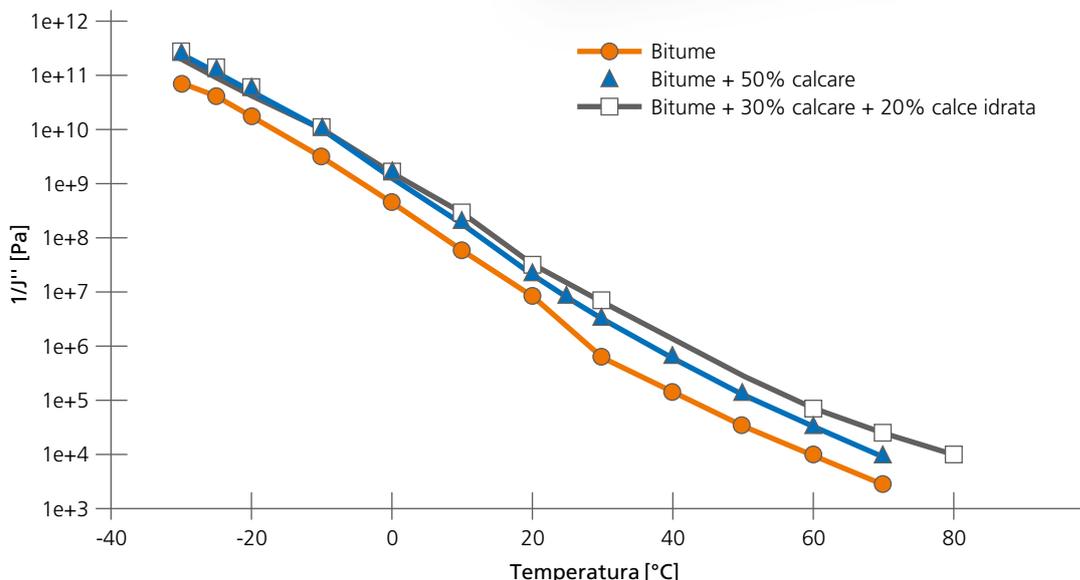


Figura 13. Dipendenza dalla temperatura dell'effetto di irrigidimento: reciproco del modulo di compliance immaginario ( $1/J''$ ) a 10 rad/s rispetto alla temperatura per un bitume 70/100 e per lo stesso bitume con il 50% in peso di filler calcareo o filler calcareo contenente il 40% in peso di calce idrata [97].

### 2.3.2. Modulo

Il modulo è una caratteristica fondamentale dei materiali [101]: rappresenta il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione risultante (o viceversa se la prova è a controllo di deformazione). Il modulo è altresì chiamato modulo di Young o modulo di trazione se misurato in trazione; se riferito a sollecitazioni di taglio, è chiamato modulo di Coulomb o modulo di taglio. Altri moduli possono essere misurati al variare delle condizioni di carico.

Il conglomerato bituminoso ha un comportamento viscoelastico, perciò ha proprietà meccaniche che dipendono dalla temperatura e dalla durata del carico [102]. Ne consegue che anche il modulo dipende dalla temperatura e dalla durata (o frequenza) del carico, ed è generalmente espresso da un numero complesso: il modulo complesso.

Per quanto riguarda la formulazione della miscela, il modulo è noto avere un valore massimo in corrispondenza del tenore di bitume ottimale, aumentare con il modulo del legante e diminuire con il contenuto di vuoti d'aria [102].

Il modulo è di fondamentale importanza nella progettazione della pavimentazione, perché governa la distribuzione delle tensioni negli strati. Data una combinazione di carico e spessore, maggiore è il modulo, minore sono le tensioni nello strato.

Anche se il modulo è una proprietà intrinseca, per cui dovrebbe essere indipendente dalla configurazione di prova, piccole differenze sono generalmente osservate quando il modulo viene misurato in compressione, flessione, trazione diretta o indiretta. Anche la geometria del provino, ad esempio la forma e le dimensioni, e il tipo di prova, cioè a controllo di carico o deformazione, l'ampiezza, l'andamento sinusoidale influiscono sui risultati. Pertanto, si raccomanda di indicare sempre le condizioni di prova riferite al modulo di una miscela. La norma europea EN 12697-26 regola tale variabilità [103].

Alcuni studi hanno esaminato l'influenza della calce idrata sul modulo del conglomerato bituminoso. Probabilmente il più approfondito è quello condotto da M. W. Witczak e J. Bari presso l'Arizona State University [104, 105]: questi hanno misurato il modulo dinamico in tensione-compressione tra  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a frequenze comprese tra 0,1 e 25 Hz, per 17 combinazioni percentuali di calce in sei diverse miscele di conglomerato bituminoso costipate in pressa giratoria con il 7% vuoti d'aria e rese provini cilindrici di 101,6 mm di diametro e 152,4 mm di altezza. Le miscele sono state confezionate con il 4,2-5,2% di quattro diversi bitumi e 0, 1, 1,5, 2, 2,5 o 3% di calce idrata come filler. Un tipico risultato della sperimentazione è rappresentato nella master curve di Figura 14.

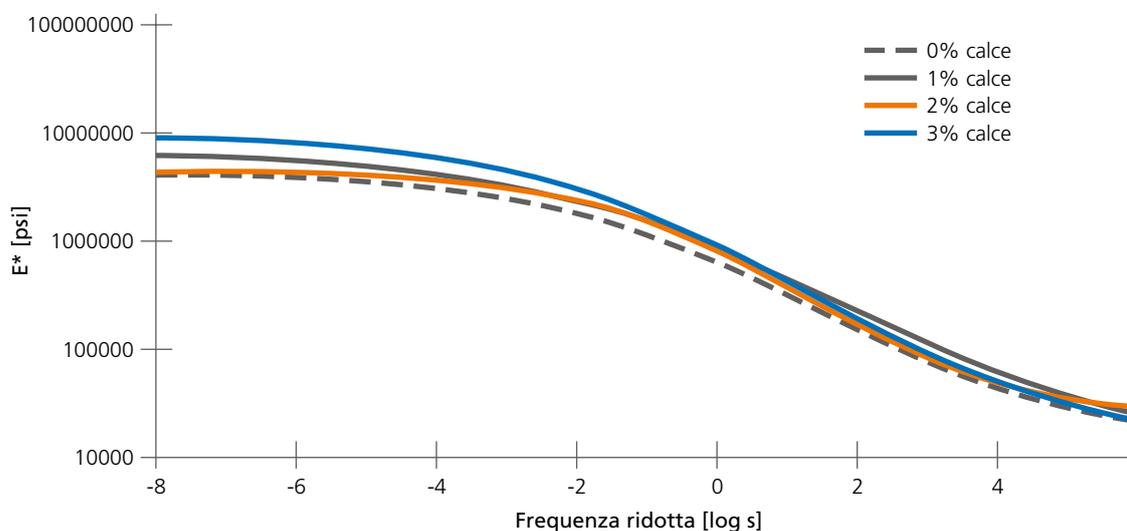


Figura 14. Master curve a  $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  per miscela 0/18 (4,3% filler) e 4,6% bitume PG 64-22 [104].

I risultati evidenziano come la calce idrata incrementi il modulo delle miscele di conglomerato bituminoso di un valore compreso tra l'8% e il 65%, variabile in funzione del tipo di miscela, del contenuto di calce idrata, della temperatura e della frequenza di carico, con un valor medio pari al 25%. Gli incrementi osservati sono stati del 25, 23, 8, 66 e 24% rispettivamente per 1, 1,5, 2, 2,5 e 3% di calce idrata. Tale variabilità è dovuta al fatto che nessuna miscela è stata studiata con la serie completa di contenuto di calce idrata: i dati sono stati infatti ottenuti rispettivamente con 4, 1, 2, 1 e 3 miscele. Le variazioni sono quindi associate a bitumi di origine diversa e contenuti variabili di filler (2,6-6,1%), che danno luogo a un diverso irrigidimento del mastice. Nessun effetto termico simile a quelli descritti in merito ai mastici è stato riportato (sezione 2.3.1).

Per quanto riguarda l'effetto della calce idrata sul modulo, i dati pubblicati non sono esaustivi. Come già accennato, Witczak

ha rilevato il massimo irrigidimento con il 2,5% calce idrata, ma non tutte le concentrazioni sono state testate. Nello studio condotto da F. Thiago S. Aragao et al. con l'Università del Nebraska, variando la concentrazione da 0,5, 1, 1,5, 2 a 3%, 1,5% è risultato il tenore ottimo [106]; purtroppo nello studio non è stato incluso alcun materiale di riferimento senza calce idrata. In un altro studio, M. Ghouse Baig e H. I. Al-Abdul Wahhab della King Fahd University (Arabia Saudita) hanno osservato che, rispetto a tenori variabili da 1, 2, 3, 4 a 5,5%, 4% è il valore ottimo [107].

In conclusione si può affermare che non sempre la calce idrata aumenta il modulo delle miscele di conglomerato bituminoso: solo 42 delle 71 (59%) miscele esaminate hanno un modulo maggiore. Se presente, l'effetto è dell'ordine del 25% per l'1,5% di calce idrata. Il tenore ottimo dipende dalla miscela: i dati pubblicati forniscono valori compresi tra 1,5 e 4%.

Ricercatore, anno	Condizioni prova	Numero di miscele con calce idrata	Contenuto di calce idrata	Metodo di aggiunta	Numero di miscele con modulo significativamente maggiore rispetto al valore di riferimento	Riferimento bibliografico
Waite, 1986	25 °C	5		B, D, LS	2	[11]
Stroup-Gardiner e Epps, 1987	-28,9 / -1,1 / 25 / 40 °C	10	1,5%	B, D, LS	4	[20]
Pickering, 1992	25 °C	4	1-2%		4	[61,30]
Epps, 1992	25 °C	8	1-2%		8	[11]
Nevada DOT, 1998	25 °C	4			4	[11]
Ghouse Baig e Al-Abdul Wahhab, 1998	25 °C	5	1 / 2 / 3 / 4 / 5,5%		4	[107]
Mohammad, 2000	5 / 25 / 40 °C	4	1,5%	LS	2	[108]
Sebaaly, 2003	25 °C	3	-		1	[54,13]
McCann e Sebaaly, 2003	25 °C	12	1,5%	D, DM, LS, LSM	1	[62]
Berthelot, 2005	20 °C	1	1%		1	[109]
Jaskula e Judycki, 2005	20 °C	2	1,5%		1	[63]
Huang, 2008	-10 / 4,4 / 21,1 / 37,8 / 54,4 °C	1	1%		1	[110]
Mohammad, 2008	-10 / 4,4 / 21,1 / 37,8 / 54,4 °C	6	1,5%	B, LS	4	[57]
Khattak, 2008	25 °C	2	0,9%	B	1	[99]
Vural Kok e Yilmaz, 2008		4	2%		4	[111]

Tabella 13. Valori del modulo in letteratura. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo del modulo. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione".

I dati pubblicati evidenziano per poco più della metà delle miscele un aumento del modulo a seguito di trattamento con calce idrata, senza alcuna chiara correlazione. Probabilmente il fenomeno può essere spiegato:

- Dalla termosuscettibilità dell'effetto di irrigidimento (Figura 13): infatti, l'ordinaria concentrazione di 1-1,5% di calce idrata conferisce un irrigidimento di poco superiore a quello di un comune filler minerale a temperatura ambiente, condizione in cui è generalmente misurato il modulo. Sebbene solo due studi [20, 110] ipotizzino che l'effetto si osservi anche sulle miscele di conglomerato bituminoso, la tendenza mostra che maggiore è contenuto di calce idrata più elevato è il modulo.



### 2.3.3. Resistenza

La resistenza è una caratteristica meccanica dei materiali [101]: è il valore massimo di tensione da applicare per provocarne la rottura. Per le miscele di conglomerato bituminoso, la resistenza di solito è misurata in compressione o per trazione indiretta, in una cella climatica a temperatura controllata.

In generale, il modulo e la resistenza dipendono dalla temperatura e dalle condizioni di carico, anche se la prima è una proprietà intrinseca, mentre la seconda non lo è in quanto fortemente influenzata dalla forma e dalla dimensione del provino [101]. Tuttavia, è molto più facile per misurare la resistenza piuttosto che il modulo, come sperimentato nell'ingegneria dei materiali. Di solito il rapporto tra il modulo e la resistenza è costante per una data classe di materiali e metodo di applicazione del carico (compressione, flessione, ...).

Visto il valore pressoché costante di tale rapporto, le variazioni della miscela influenzano nello stesso modo la resistenza e il modulo. Pertanto, la resistenza ha un picco per un tenore ottimo di bitume, aumenta con il modulo del legante e diminuisce con il contenuto di vuoti [102].

- Dalla lenta interazione calce-bitume registrata su alcuni bitumi [81], come discusso nel Capitolo 3.

Infine, un altro studio condotto da M. Stroup-Gardiner e J. A. Epps con l'Università del Nevada ha confrontato vari metodi di aggiunta della calce idrata su campioni di laboratorio e su strada [53]. Il modulo potrebbe essere influenzato dal metodo di aggiunta della calce idrata, in particolare quando è stato utilizzato un miscelatore a tamburo, anche se la correlazione sembra essere della specifica sperimentazione. Inoltre, il modulo dei provini su strada è risultato superiore a quello dei provini confezionati in laboratorio.

La resistenza, calcolata prima e dopo il condizionamento in acqua, è utilizzata in numerosi studi per valutare la sensibilità all'acqua (paragrafo 2.1). Ne consegue che i dati sulla resistenza di un provino asciutto consentono di valutare l'effetto del trattamento con calce idrata. La Tabella 14 riassume i dati riportati in letteratura.

In conclusione, la calce idrata non sempre aumenta la resistenza delle miscele di conglomerato bituminoso: solo 63 delle 113 (56%) miscele riportate in Tabella 14 hanno una resistenza maggiore. I dati pubblicati non mostrano alcuna evidente correlazione in merito. L'incidenza è simile a quella osservata per il modulo e le ragioni sono probabilmente le stesse: basso contenuto di calce idrata, valore della temperatura nell'intervallo di scarso irrigidimento (Figura 13) e cinetica del fenomeno, come discusso nel Capitolo 3.



Ricercatore, anno	Numero di miscele con calce idrata	Contenuto di calce idrata	Metodo di aggiunta	Numero di miscele con resistenza significativamente maggiore rispetto al valore di riferimento	Riferimento bibliografico
Kennedy, 1983 (miscele di laboratorio)	16	1,5%	B, D, LS, LSM	1	[66]
Kennedy, 1983 (miscele di impianto)	12	1,5%	D, LSM	4	[66]
Stroup-Gardiner e Epps, 1987	10	1,5%	B, D, LS	5	[20]
Jimenez, 1990	1	1,5%		0	[112]
Hicks, 1991	5		B, D, LS, LSM	1	[8,11]
Pickering, 1992	4	1-2%		4	[61,13]
Mohammad, 2000	8	1,5%	LS	5	[108]
Sebaaly, 2003	6		D,LS	6	[113,13]
McCann e Sebaaly, 2003	12	1,5%	D, DM, LS, LSM	4	[62]
Huang, 2005	2	1%	B	0	[65]
Jaskula e Judycki, 2005	2	1,5%	–	0	[63]
Ameri e Aboutalebi, 2008	10	3%	–	10	[114]
Kim, 2008	2	1%	D,LS	2	[60]
Mohammad, 2008	12	1,5%	B, LS	10	[57]
Maldonado e Fee, 2008	1	2%	–	1	[58]
Gorkem e Sengoz, 2009	6	1 / 1,5 / 2%	–	6	[115]
Vural Kok e Yilmaz, 2008	4	2%	–	4	[111]

Tabella 14. Valori della resistenza in letteratura. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo della resistenza. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione".

### 2.3.4. Resistenza all'ormaiamento

L'ormaiamento, osservato fin dalle prime applicazioni del conglomerato bituminoso, è divenuto un ammaloramento importante dopo il secondo conflitto mondiale, a seguito del rapido incremento del traffico pesante [116]. Si verifica quando il carico da traffico genera tensioni superiori al limite plastico della miscela, causandone deformazioni permanenti (Figura 15). Il fenomeno, accelerato dal passaggio di carichi a bassa velocità e dalle alte temperature [117], è tuttavia complesso, a causa del comportamento viscoelastoplastico del materiale.

Per ciò che concerne la formulazione della miscela, è favorito da diversi fattori come l'elevato contenuto di bitume, l'elevato contenuto di sabbia, la forma tondeggiante dell'aggregato (ad esempio non di frantumazione) o l'alta deformabilità del legante [116]. Ne consegue che i fattori che favoriscono l'irrigidimento delle miscele dovrebbero anche aumentare la resistenza all'ormaiamento, che si verifica soprattutto a temperature di rammollimento del bitume, tipicamente 40-60 °C.



Figura 15. Ormaiamento di una pavimentazione flessibile [45].

Secondo le osservazioni condotte negli USA a partire dai primi anni '90 [8], l'ormaiamento si verifica in media dopo cinque anni di esercizio sulle miscele non trattate; in alcuni casi il fenomeno si manifesta dopo solo un anno.

Diversi metodi di prova sono disponibili per valutare la resistenza all'ormaiamento delle miscele. La maggior parte sono simulatori di traffico, altri sono prove condotte a temperatura elevata (generalmente 40-60 °C) per valutare la deformazione permanente cumulata sotto carichi ripetuti. Una norma europea presenta varie configurazioni di prova per testare miscele bituminose

[118]; l'Asphalt Pavement Analyzer (APA) rientra nella categoria dei simulatori di traffico; alcune prove sono svolte con misure di creep (a volte ripetuta) o compressione dinamica.

Dati ottenuti dal dispositivo Hamburg Wheel Tracking (HWT) sono stati illustrati nella sezione dedicata alla sensibilità all'acqua (Tabella 5): non sono del tutto significativi per la resistenza all'ormaiamento perché la prova misura l'ormaia solo nella prima parte, mentre nella seconda parte, dopo il punto di flessione, si tiene conto dello stripping (Figura 16 – [13]).

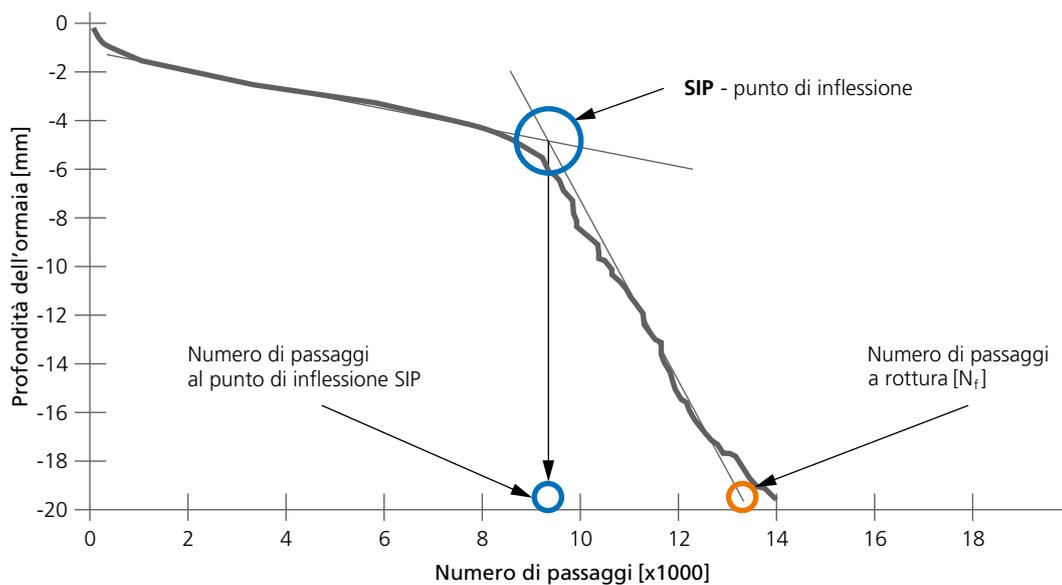


Figura 16. Risultati della prova HWT [13].

Pertanto, è difficile stabilire se i benefici derivanti dall'aggiunta di calce idrata siano correlabili a una maggiore resistenza all'ormaiamento, all'umidità o a entrambe. Nella sezione precedente la prova HWT è stata infatti descritta in relazione alla sensibilità all'acqua sulla resistenza all'umidità, dove ha efficacemente evidenziato i benefici dell'aggiunta di calce idrata (paragrafo 2.1).

Escludendo i risultati ottenuti con il dispositivo HWT, i dati pubblicati sull'ormaiamento di miscele addivate con calce idrata sono molto meno numerosi (Tabella 15). La Figura 17 rappresenta l'effetto della calce idrata sulla resistenza all'ormaiamento di una miscela bituminosa.

In conclusione, la calce idrata aumenta la resistenza all'ormaiamento nella maggior parte dei casi. Delle 20 miscele esaminate in Tabella 15, il 75% ha una resistenza all'ormaiamento più alta (15): i dati pubblicati suggeriscono chiaramente che la calce idrata di solito migliora la resistenza all'ormaiamento. Rispetto ai valori del modulo e della resistenza, l'effetto di irrigidimento è generalmente più pronunciato a temperature elevate (condizioni di prova per l'ormaiamento) piuttosto che a basse temperature. Gli effetti più significativi sono stati rilevati per contenuti di calce idrata superiore a 1,5%.

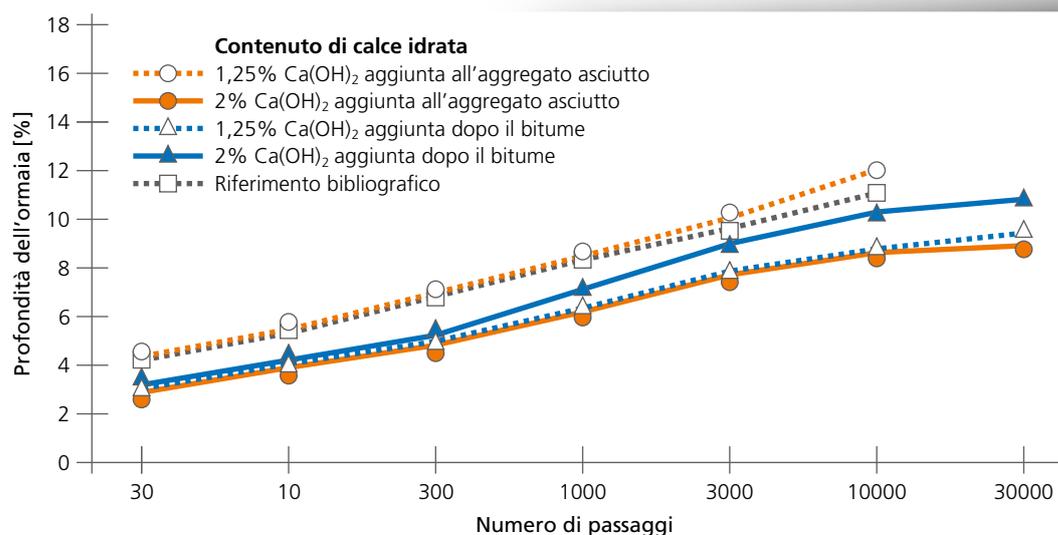


Figura 17. Effetto della calce idrata sulla resistenza all'ormaiamento di una miscela BBSG 0/14: profondità dell'ormaia rispetto al numero di cicli nel rut tester francese a 60 °C. 1,25 o 2% di calce idrata aggiunta all'aggregato asciutto o dopo il bitume [73].

Ricercatore, anno	Metodo di prova	Numero di miscele con calce idrata	Contenuto di calce idrata	Metodo di aggiunta	Numero di miscele con resistenza all'ormaiamento significativamente maggiore rispetto al valore di riferimento	Riferimento bibliografico
Little, 1994		3			3	[12]
Hiérnaux, 1995	francese, 60 °C	1	1%		1	[23]
Kim, 1995		1			1	[11]
Collins, 1997	APA	8			5	[119, 11]
Ghouse Baig e Al-Abdul Wahhab, 1998	45 e 60 °C	2	2-5,5%		1	[107]
LCPC, 1999	francese, 60 °C	4	1-2%	D, B	3	[73]
Pilat, 2000	creep, 40 °C	1	20% del filler	MF	1	[100]
Little e Petersen, 2005	APA, 45 °C	2	1%	D	2	[13]
Sewing, 2006	compressione dinamica, 55 °C	2	2%	D	2	[86]

Tabella 15. Valori della resistenza all'ormaiamento in letteratura. Il dispositivo Hamburg Wheel Tracking Device è descritto in Tabella 5. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo della resistenza all'ormaiamento. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione"; MF – filler misto.

### 2.3.5. Fessurazione a fatica

La fessurazione a fatica delle pavimentazioni flessibili è un fenomeno di più recente approfondimento, riconosciuto come possibile meccanismo di rottura già negli anni '50 da M. Duriez (LCPC), è stato poi dimostrato negli USA dalle prove AASHO 1957-1961 [120].

Le fessure per fatica si verificano quando i carichi di traffico ripetuti progressivamente danneggiano le miscele di conglomerato bituminoso, causando fessure che si propagano in superficie a partire dal fondo dello strato (Figura 18). La fessurazione per fatica è perciò favorita da bassi spessori dello strato o dalla cattiva adesione tra gli strati: in entrambi i casi si generano elevate tensioni flessionali nella parte inferiore degli strati bituminosi [121].



Figura 18. Fessurazione a fatica in una miscela di conglomerato bituminoso [45].

Da un punto di vista della formulazione della miscela, è noto che la resistenza a fatica aumenta con il contenuto di bitume o con l'uso di leganti ad alte prestazioni [102]. Al variare del metodo di prova, la resistenza a fatica di un legante può aumentare (prova a controllo di deformazione) o diminuire (prova a controllo di sollecitazione).

La fessurazione per fatica è il principale criterio di rottura per il dimensionamento delle pavimentazioni. Più precisamente, gli strati legati a bitume sono progettati per essere di spessore tale da consentire l'esercizio fino alla fine della vita utile, compresa tra 10 e 40 anni [122].

La vita utile è generalmente valutata in laboratorio sottoponendo un provino a carichi ripetuti di intensità costante; la prova può essere condotta a tensione o deformazione controllata. Nel primo caso, la rottura è contraddistinta dalla rottura fisica del provino, nel secondo caso è per convenzione individuata dal punto in cui il modulo del provino si riduce del 50% rispetto al valore iniziale. Il numero di cicli a rottura varia in funzione dell'intensità di carico. In Figura 19 sono rappresentate tipiche curve di fatica. La norma EN 12697-24 disciplina le prove di resistenza a fatica delle miscele di conglomerato bituminoso [123].

Non molti studi sono stati pubblicati sull'effetto della calce idrata sulla resistenza a fatica di miscele bituminose: alcuni esempi sono elencati in Tabella 16.

Fatta eccezione per lo studio di L. N. Mohammad della Louisiana State University [108], tutti asseriscono che la calce idrata migliora la resistenza a fatica: ciò è confermato in 17 delle 22 miscele esaminate (77%). Tutti gli studi, condotti con prove non europee, hanno limitato la numerosità delle applicazioni del carico ben al di sotto di 1 milione di cicli, pertanto non è opportuno estrapolare da questi dati la vita utile di una pavimentazione, i cui carichi ripetuti sono compresi tra 1 e 100 milioni.

In conclusione, pochi studi presentano l'effetto della calce idrata sulla resistenza a fatica delle miscele bituminose. Nel 77% dei casi la calce idrata aumenta la durata a fatica, ma i dati sono limitati a uno scarso numero di cicli condotti con procedure non europee e sono quindi non pienamente conclusivi.

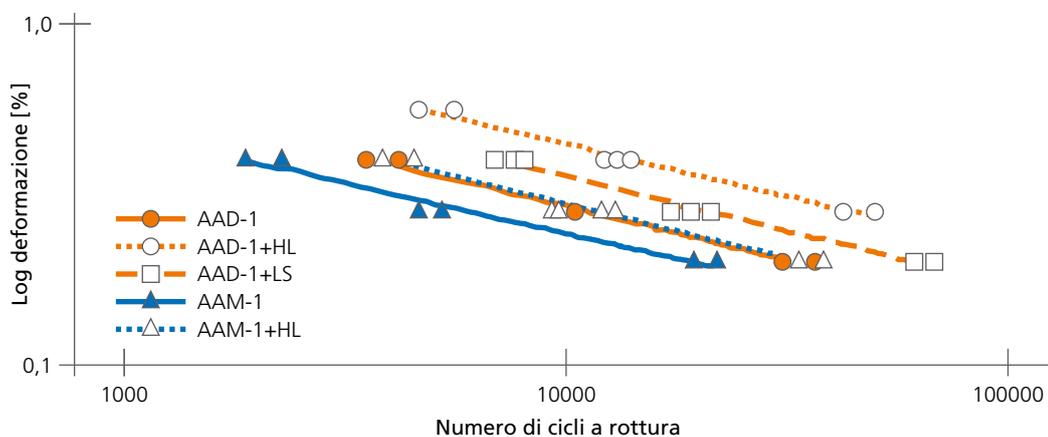


Figura 19. Effetto della calce idrata sulla fatica di miscele testate a torsione. Numero di cicli a rottura vs deformazioni per miscele con 10% di calce idrata (HL) o filler calcareo (LS) confezionate con bitume AAD-1 e AAM-1 [90].

Ricercatore, anno	Condizioni di prova	Numero di miscele con calce idrata	Contenuto di calce idrata	Metodo di aggiunta	Numero di miscele con resistenza a fatica significativamente maggiore rispetto al valore di riferimento	Riferimento bibliografico
Rhagava Chari e Jacob, 1984	30 °C, 1 Hz	5	3 / 5 / 7 / 9 / 11%		5	[124]
Kim, 1995		1			1	[119,11]
M. Ghouse Baig e H. I. Al-Abdul Wahhab, 1998	45 °C	5	1 / 2 / 3 / 4 / 5,5%		5	[124]
Mohammad, 2000	25 °C	8	1,5%	LS	3	[108]
Little e Petersen, 2005		3	1%	D	3	[13]

Tabella 16. Valori della resistenza a fatica in letteratura. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo della resistenza a fatica. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione"; MF – filler misto.

### 2.3.6. Fessurazione termica

La fessurazione termica è particolarmente frequente nei climi rigidi. In queste regioni, le basse temperature conducono ad uno strato vetroso il bitume, che perciò diventa fragile. Il ritiro termico si manifesta in conseguenza del raffreddamento, causando sollecitazioni in alcuni casi superiori alla resistenza del materiale, che si fessura (Figura 20).

Tuttavia, il cracking termico non si limita alle regioni fredde: ampie escursioni termiche giornaliere possono anche causare fessurazioni top-down. Ciò è stato osservato nel sud della Francia [125] e altrove [126].

Per ciò che concerne il mix design, la resistenza al cracking termico, come la resistenza a fatica, cresce con il contenuto di bitume o l'uso di leganti ad alte prestazioni [127]. Un legante soft migliora tale resistenza, da ciò l'impiego nelle regioni nordiche.

Il fenomeno è generalmente studiato in laboratorio sottoponendo un provino confinato a un ciclo di raffreddamento (thermal stress restrained specimen test – TSRST). I provini non possono deformarsi, in modo che le sollecitazioni termiche ne causino la rottura. Tipiche curve sperimentali sono mostrate in Figura 20.

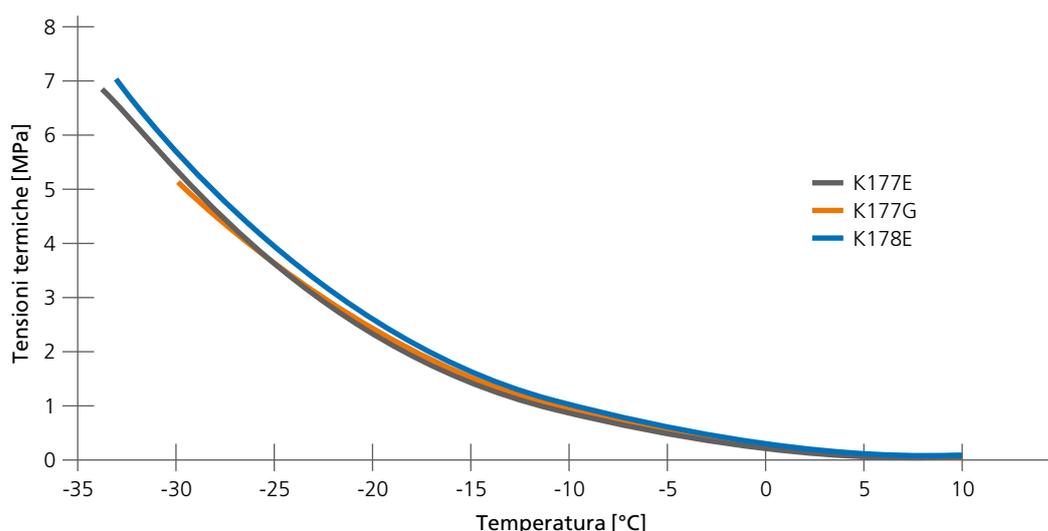


Figura 20. TSRST (tensioni termiche vs temperatura) per conglomerato bituminoso 0/22 con 4,5% bitume modificato con polimeri e 2,5% di calce idrata. Le curve sono relative ad uno stesso materiale [128].

Conglomerato bituminoso	Temperatura iniziale [°C]	Gradiente [K/h]	Massima tensione termica [N/mm <sup>2</sup> ]	Temperatura di rottura [°C]
SMA 0/8 con 7,3% bitume 50/70, 1,6% calce idrata (nella forma Ka <sub>25</sub> filler misto)	20	-10	4.279 4.339	-24.3 -24.6
SMA 0/8 con 7,3% bitume 50/70	20	-10	4.296 4.238	-24.1 -24.5
AC 0/11 con 6,2% bitume 70/100, con 1,4% calce idrata (nella forma Ka <sub>25</sub> filler misto)	20	-10	4.761 4.573	-26.6 -26.2
AC 0/11 con 6,2% bitume 70/100	20	-10	4.558 4.523	-26.3 -26.0

Tabella 17. TSRST (tensioni termiche vs temperatura) di due miscele di conglomerato bituminoso con e senza calce idrata [29].

I dati in Tabella 17 mostrano che la fessurazione termica non è modificata dall'aggiunta di calce idrata. I risultati esposti da M. McCann (US Forest Service) e da P. E. Sebaaly (Università del Nevada) confermano che né la temperatura di rottura né le tensioni termiche sono influenzate dalla calce idrata [62].

L. N. Mohammad dell'Università della Louisiana ha pubblicato alcuni dati sull'energia di fessurazione di alcune miscele modificate, affermandone la diminuzione dopo l'aggiunta di calce idrata [57]. Questi risultati non contraddicono quanto

affermato sul TSRST, perché misurati a 25 °C, e pertanto non relativi alla medesima caratteristica.

I risultati sono invece coerenti con i dati sui mastici: a parità di concentrazione volumetrica (Figura 21 – [81]), la calce idrata indurisce i mastici bituminosi nella stessa misura di un filler minerale. Pertanto, non dovrebbe influenzare la fessurazione a basse temperature in modo diverso rispetto i filler minerali, come confermato dai pochi studi pubblicati in merito.

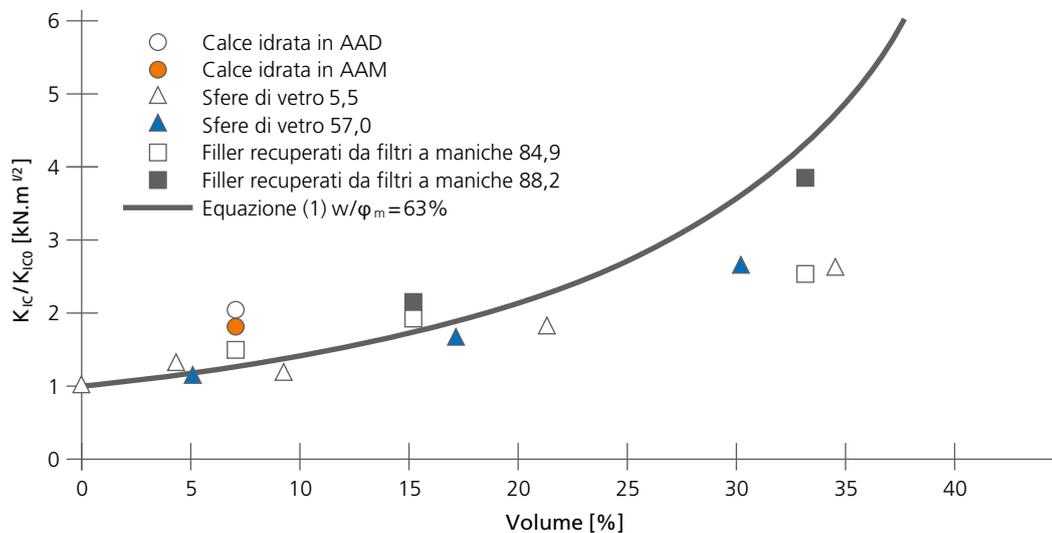


Figura 21. Rigidezza del mastice rapportata a quella del bitume tal quale vs volume di filler per mastici confezionati con due bitumi e calce idrata. Dati comparati con risultati di letteratura sui filler minerali recuperati da filtri a maniche (dimensioni in micron) o sfere di vetro (dimensioni in micron). L'equazione (1) coincide con quella espressa in 2.3.1 per la viscosità  $[\eta] = 2\phi_m = 3,17$  (from [81]).

## 2.4. La calce idrata con altri additivi

### 2.4.1. Calce idrata e polimeri

Diversi studi dimostrano che la calce idrata e i polimeri possono esplicare un'azione sinergica: i polimeri sono impiegati per modificare le proprietà meccaniche delle miscele [95, 129], mentre la calce idrata consente di ottenere miscele con buone proprietà meccaniche riducendo il contenuto di polimeri, più costosi della calce idrata.

Al variare del mix design, si possono individuare combinazioni equivalenti di calce idrata e polimeri.

Ad esempio, B. Brûlé in collaborazione con la Entreprise Jean Lefebvre (ora Eurovia) ha dimostrato che un conglomerato

poroso con il 7% di bitume modificato con il copolimero etilene vinil acetato (EVA) ha le stesse prestazioni nella prova Cantabro di una miscela con l'1% di calce idrata e solo il 3% di EVA [68]. Una miscela di questo tipo è stata stesa sull'autostrada A4 a Reims (Francia) nel 1992 ed è rimasta in esercizio fino al 2009, un risultato eccellente per questo materiale.

P. Cramer in collaborazione con la Basalt AG ha dimostrato che una miscela 0/8 SMA confezionata con bitume modificato con polimeri (PmB 45 A) ha le stesse prestazioni nella prova HWTD di una confezionata con l'1,4% di calce idrata e un bitume 30/45 (Figura 22 – [37]).

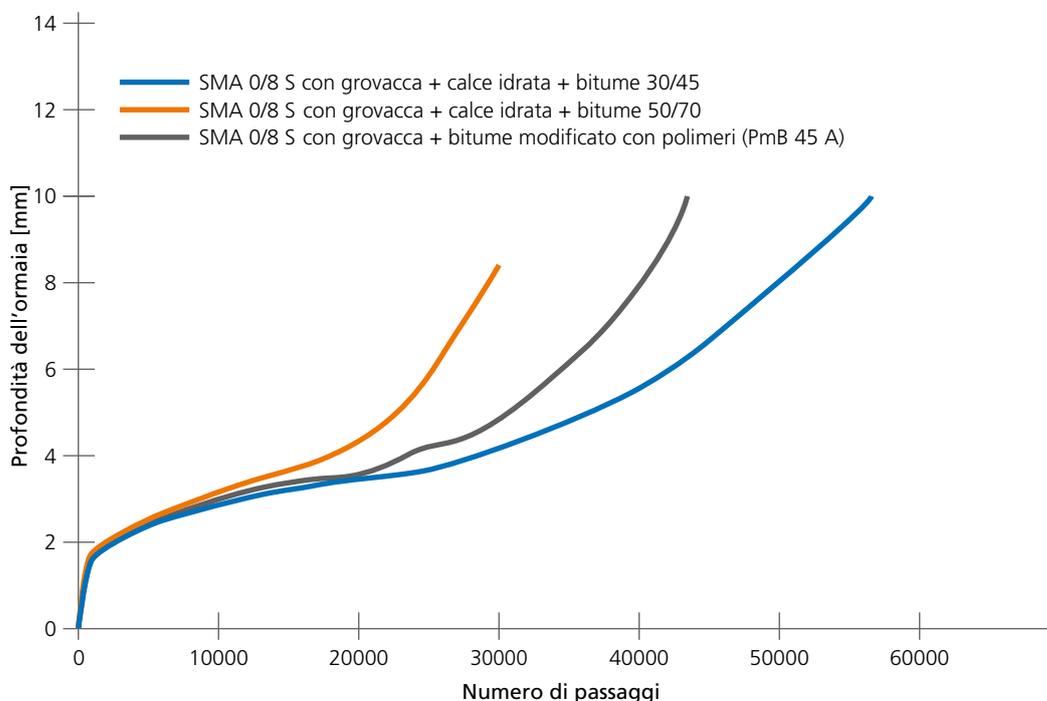


Figura 22. Curve di ormaio ottenute con HWTD per diverse miscele 0/8 SMA con grovaccia e diversi bitumi: modificato con polimeri (PmB 45 A), bitume 30/45 o 50/70 con 1,4% di calce idrata come filler misto. Adeguate quantità di bitume e calce garantiscono le prestazioni ottenute con bitumi modificati [37].

C. Gorkem e B. Sengoz con la Dokuz Eylul University di Izmir (Turchia) hanno dimostrato che, in termini di resistenza a trazione e resistenza a trazione residua, miscele 0/19 di conglomerato bituminoso confezionate con due aggregati sono equivalenti se confezionate con il 2-3% di bitume modificato con un copolimero a blocchi di butadiene-stirene (SBS), con il 3-4% di bitume modificato con EVA o con il 2% di calce idrata [115].

B. Vural Kok e M. Yilmaz con la Firat University di Elazig (Turchia) hanno dimostrato che, in termini di modulo, resistenza a trazione indiretta o Lottman test, una miscela 0/19 di conglomerato bituminoso con il 4% di bitume modificato con il 2% di SBS era equivalente a una con il 2% di calce idrata [111].

M. Iwanski e M. Pobocho con la Kielce University of Technology (Polonia) hanno testato varie combinazioni di calce idrata (10-50% in peso del filler) – SBS (2-8% in peso del bitume) per miscele di conglomerato bituminoso [130]. Rispetto ai

danni da umidità (immersione / compressione e prova Lottman) e alle proprietà meccaniche (creep e Marshall), è risultata ottima la combinazione 30% calce idrata nel filler e 4% SBS.

L'esperienza austriaca, basata sul metodo Marshall e validata da prove di ormaiamento (30000 cicli a 60 °C), mostra che un bitume 70/100 con il 3,5% di calce idrata può sostituire un legante PmB 30-50 o 60-90 [131]. I primi test sono stati eseguiti su miscele chiuse di usura e base. Allo stato attuale, molti tratti stradali sono stati realizzati con il 2,5-3,5% di calce idrata nelle miscele, e a distanza di 6 anni i risultati sono abbastanza soddisfacenti [132].

Infine, è importante ricordare che la calce idrata è stata utilizzata con grande successo in miscele modificate con polverino di gomma, soprattutto nelle prime applicazioni porose in Europa, come descritto nella sezione 4.3.

### 2.4.2. Calce idrata e acidi polifosforici

Nel nord degli USA, alcuni leganti bituminosi sono comunemente modificati con acidi polifosforici (PPA). La tecnica, che rende più rigido il legante [95, 133], si sta diffondendo in tutto il mondo. Essendo il PPA un acido, sono sorte alcune discussioni sulla compatibilità con la calce idrata, basica. I dati finora pubblicati non mostrano alcun effetto antagonista.

Ad esempio, uno studio condotto da T. Arnold con la FHWA ha dimostrato che la modifica combinata PPA-1% di calce idrata non mostra alcuna sensibilità all'umidità nelle prove HWTD [134].

Ciò concorda con i risultati sull'interazione PPA-calce idrata ottenuti su strada e in laboratorio rispettivamente dal National Center for Asphalt Technology di Auburn (Alabama) [135] e dall'Università di San Paolo [136].



## 3. Meccanismi di modifica delle miscele bituminose

I meccanismi di modifica del bitume da parte della calce idrata tuttora sono oggetto di ipotesi: in letteratura più frequentemente se ne riportano gli effetti, alcuni sull'adesione legante-aggregato, altri sull'invecchiamento, altri sulle proprietà meccaniche.

Pertanto, sembra ragionevole concludere che la calce idrata agisca a diversi livelli:

- Modifica la superficie dell'aggregato. Negli USA viene aggiunta direttamente sull'aggregato umido, in alcuni casi dopo "maturazione" (Tabella 20). Ciò dimostra che l'interazione con la superficie dell'aggregato è un aspetto fondamentale.

- Reagisce anche con il bitume attraverso reazioni chimiche con le frazioni acide presenti nel bitume. Questo fenomeno è riportato come l'effetto chimico sul bitume.
- Infine la struttura porosa della calce idrata interagisce fisicamente con il bitume, a differenza degli altri filler (Capitolo 1). Il fenomeno verrà indicato come l'effetto fisico sul bitume.

Per tutti questi motivi le interazioni tra la calce idrata e gli altri componenti delle miscele di conglomerato bituminoso sono abbastanza forti, al punto da giustificare il miglioramento di alcune proprietà come la sensibilità all'acqua, la resistenza e altre proprietà meccaniche.

### 3.1. Effetto sull'aggregato

#### 3.1.1. Modifica della superficie

Nel settore delle pavimentazioni flessibili è noto che, rispetto agli aggregati calcarei, gli aggregati silicei hanno peggiori proprietà adesive al bitume [8, 137]: i tensioattivi anionici e cationici presenti nel bitume si legano fortemente con gli ioni calcio quando solo tensioattivi cationici sono legati fortemente con atomi di silicio [138]. Di conseguenza, i tensioattivi anionici sono facilmente spostabili dall'acqua sugli aggregati silicei.

Pertanto, la calce idrata consente la precipitazione di ioni calcio sulla superficie dell'aggregato, che è più compatibile con il bitume. Questo effetto è stato già riconosciuto da I. Ishai e J. Craus in collaborazione con il Technion-Israel Institute of Technology nel 1977 (Figura 23 – [139, 140]). Di conseguenza, un trattamento che esaurisca la calce idrata in superficie di per sé migliora l'adesione bitume-aggregato [141].

Il carbonato di calcio può precipitare in presenza di acqua (in fase di produzione o a seguito di esposizione alla pioggia) e quindi creare una maggiore scabrezza di superficie, che favorisce l'adesione aggregato-bitume [142].

Questo effetto può essere così importante che parte della calce idrata non viene recuperata dopo l'estrazione del bitume come descritto nella sezione 4.4. Nel caso di filler basaltico, circa il 40% della calce idrata non è stato recuperato probabilmente a causa di tali reazioni, mentre più del 90% della calce idrata è stato recuperato in presenza di filler calcareo (Figura 30).

Ancora, l'effetto di modifica della superficie non è l'unico meccanismo: in presenza di aggregati calcarei sarebbe inesistente. Tuttavia, la calce idrata è nota per migliorare l'adesione anche degli aggregati calcarei (Figura 9 – [57, 77]) attraverso altri meccanismi, in particolare quelli che agiscono sul bitume come descritto di seguito.

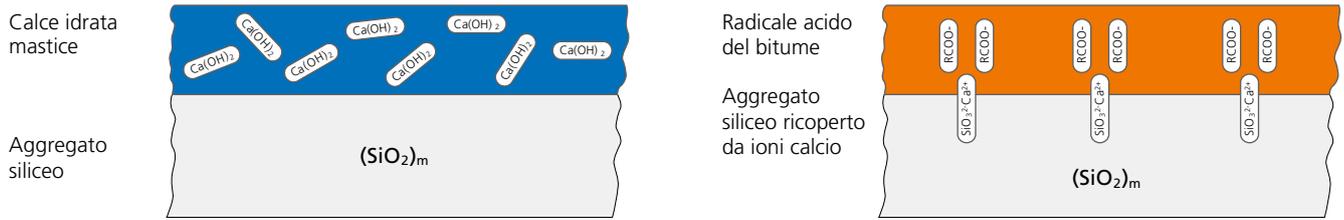
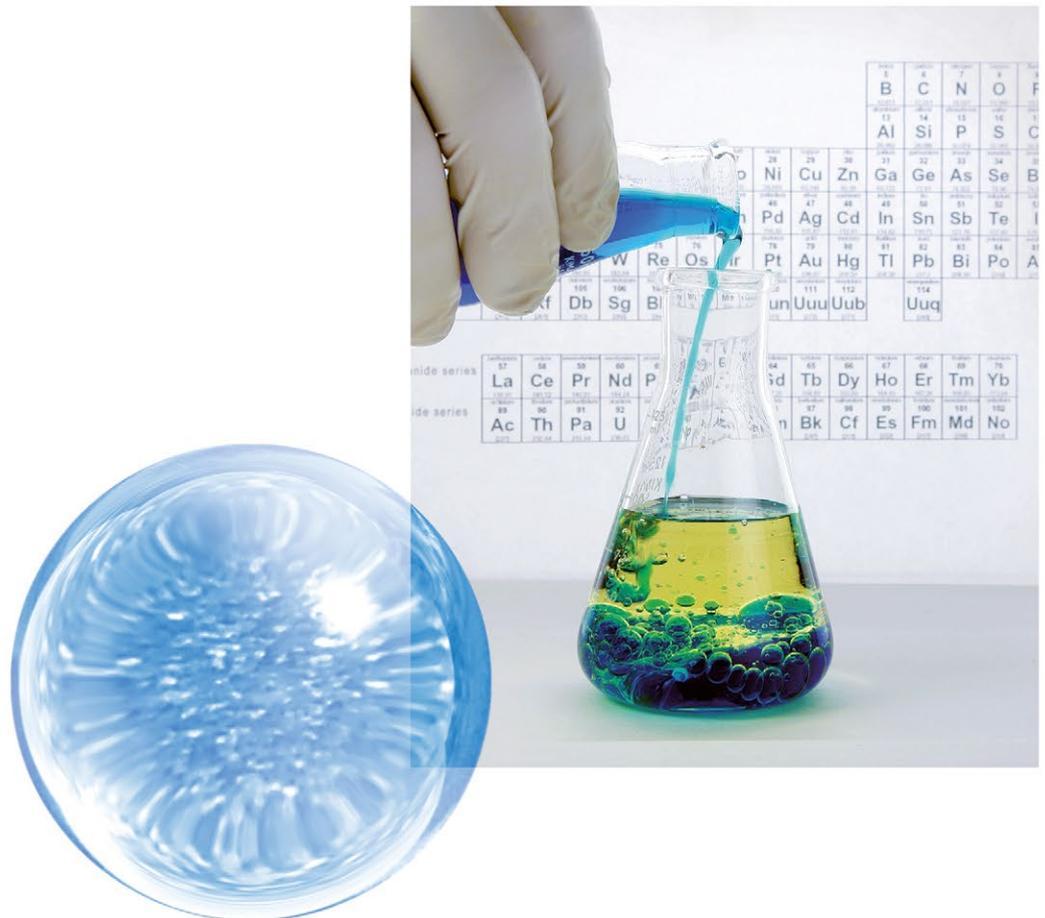


Figura 23. Effetto della calce sulla superficie degli aggregati come ipotizzato da I. Ishai e J. Craus [139].

### 3.1.2. Flocculazione dell'argilla

In caso di aggregati contaminati da argilla, la calce idrata è nota per i suoi effetti di miglioramento della resistenza all'umidità. Per questa ragione è utilizzata in Stati come California, Colorado, Nevada e Utah: l'argilla è presente in piccole inclusioni nella roccia ed è liberata a seguito di frantumazione. In questo caso, la calce idrata svolge la stessa funzione osservata nel trattamento delle terre [143]: floccula le particelle argillose, prevenendo così la formazione di uno strato scorrevole tra il bitume e l'aggregato.

Uno studio condotto da H.-J. Eulitz in collaborazione con l'Institut für Materialsprüfung Dr. Schellenberg di Rottweil (Germania) ha confermato l'efficacia della calce idrata [38, 39].



## 3.2. Effetto sul bitume

### 3.2.1. Effetto chimico sul bitume

Già nel 1976, è stata osservata da Plancher del Western Research Institute (WY, USA) l'interazione chimica tra la calce idrata e il bitume [72]. Utilizzando bitumi di varia composizione chimica, sono state preparate 1:1:600 soluzioni in peso di bitume, calce idrata e benzene lasciati a reagire per 24 ore. Dopo la centrifugazione e l'estrazione con solventi, i bitumi trattati sono stati analizzati mediante spettroscopia infrarossa. Circa il 4-6% in peso di ciascun bitume era stato adsorbito nelle particelle di calce idrata [72].

Più di recente, P. C. Hopman con il Netherlands Pavement Consulting ha dimostrato che la calce idrata è più efficace del filler calcareo in relazione alle interazioni filler-bitume. In media, l'adsorbimento di bitumi del Medio Oriente e del Venezuela da parte di alcuni solventi (n-eptano, Tetraidrofurano – THF, toluene e cloruro di metilene) sul filler calcareo attivo (contenente il 25% in peso di calce idrata) era rispettivamente 1,4 e 2,1 volte superiore rispetto al normale filler calcareo [69]. Confrontando curve di cromatografia ad alta prestazione a permeazione di gel (GPC-HP) con toluene relative a bitumi trattati sia con filler calcareo sia con filler attivo (Figura 24), risulta che la calce idrata ha adsorbito alcune molecole pesanti dei bitumi. L'effetto è meno pronunciato con THF piuttosto che con toluene [69].

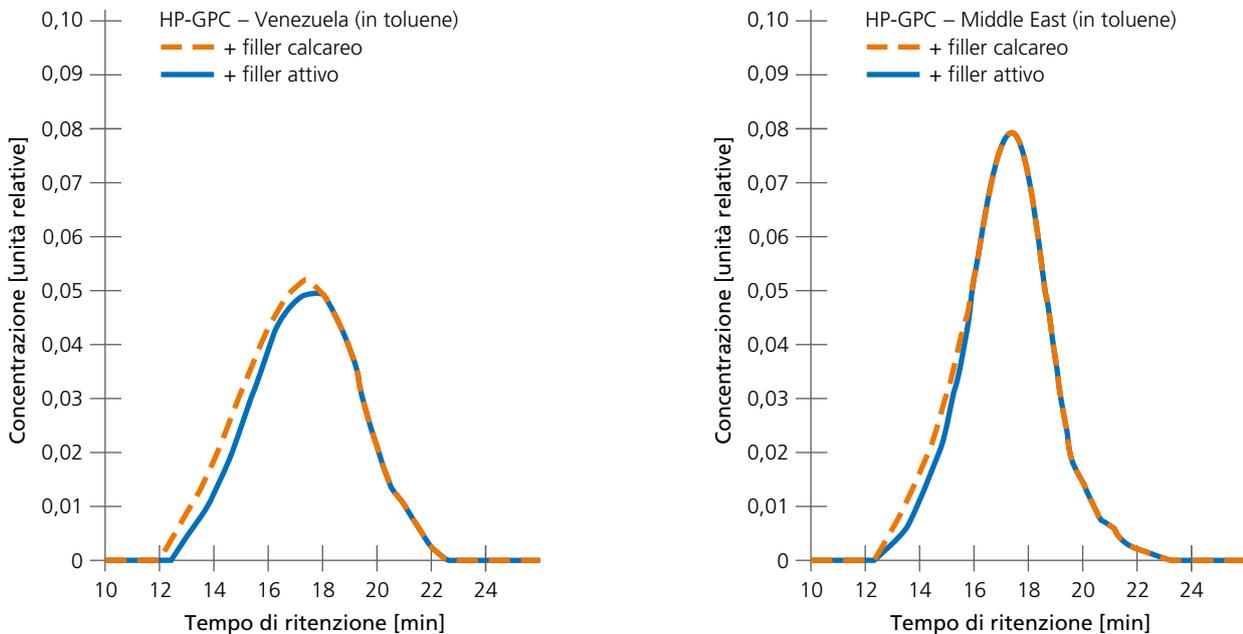


Figura 24. Cromatogramma ad alta prestazione a permeazione di gel (GPC-HP) con toluene per due bitumi del Venezuela e del Middle East, con filler calcareo o con filler calcareo attivo (modificato con il 25% in peso di calce idrata) [69].

In letteratura sono presenti dettagli sui tipi di bitume adsorbiti sulla superficie di calce idrata. Come riportato in Tabella 18, i materiali trattati con calce presentati da H. Plancher del Western Research Institute (WRI) a Laramie (Wyoming, USA – [72]) hanno mostrato concentrazioni inferiori di acidi carbossilici, anidridi

bicarbossiliche e 2-chinoloni, che sono tipicamente presenti nelle componenti più pesanti di bitume, gli asfaltini [95]; i chetoni si mantengono tuttavia più numerosi e i solfossidi sono variati significativamente.

Miscele	Concentrazione [moli/l]				
	Chetoni	Acidi carbossilici	Anidridi dicarbossiliche	Composti 2-quinolone	Solfossidi
B-2959 senza / con calce	0,015 0,039	tracce (1)	0,0014 (1)	0,003 (1)	0,015 0,013
B-3036 senza / con calce	0,021 0,039	tracce (1)	0,001 (1)	0,001 (1)	0,022 0,019
B-3051 senza / con calce	0,017 0,039	0,014 (1)	0,003 0,001	0,009 0,004	0,010 0,008
B-3602 senza / con calce	0,045 0,1	0,06 (2) 0,014 (2)	(1) 0,007	0,011 0,006	0,015 0,015

Tabella 18. Concentrazione di gruppi funzionali in quattro bitumi AC-10 prima e dopo il trattamento con calce idrata (1) – sotto la soglia di sensibilità; (2) – presente come sali carbossilati [72].

La calce idrata reagisce con gli acidi, le anidridi e i 2-chinoloni del bitume: questa conclusione è stata raggiunta dallo stesso gruppo anche in uno studio più recente [22]. 150 g di diversi bitumi sono stati lasciati reagire sotto mescolamento per 6 ore a 150 °C con varie quantità di calce idrata o calce idrata dolomitica, estraibili con solventi. La spettroscopia infrarossa è stata usata per analizzare i materiali con e senza calce, prima e dopo invecchiamento TFAAT (i risultati sono riportati in Figura 12). I dati in Tabella 19 mostrano che la presenza di calce idrata riduce la quantità di chetoni, anidridi e soprattutto di acidi carbossilici responsabili dell'invecchiamento.

Pertanto, le reazioni acido-base tra la calce idrata e gli acidi naturalmente presenti nel bitume sono dimostrate in letteratura, come riportato da D. N. Little al Texas Transportation Institute (College Station, Texas) e da J. C. Petersen al WRI [12]. Inoltre, altri dati confermano l'importanza delle reazioni acido-base sugli effetti anti-invecchiamento:

- L. Johansson in collaborazione con lo Swedish Royal Institute of Technology (KTH) ha osservato che l'effetto anti-invecchiamento non è presente con  $Mg(OH)_2$ , una base più debole rispetto a  $Ca(OH)_2$  [80].
- M. Wisneski presso la Texas A&M University ha osservato che la calce viva ha lo stesso effetto anti-invecchiamento della calce idrata [75].

Trattamento		Invecchiamento	Concentrazione [moli/l]				
Tipo	%		Chetoni	Anidridi	Acidi carbossilici	Composti 2-quinolone	Solfossidi
Senza calcio	0	no	0	0	0,015	0,017	0,02
	0	sì	0,28	0,007	0,015	0,017	0,35
Elevato contenuto di calcio	10	no	0,03	0	0,005	0,016	0,03
	10	sì	0,24	0,005	0,004	0,016	0,32
Elevato contenuto di calcio	20	no	0,03	0	0,003	0,014	0,03
	20	sì	0,22	0,006	< 0,002	0,017	0,34
Elevato contenuto di calcio	30	no	0,03	0	< 0,002	0,013	0,03
	30	sì	0,21	0,006	< 0,002	0,014	0,32
Calce dolomitica	20	no	0,03	0	0,006	0,013	0,03
	20	sì	0,22	0,006	0,005	0,014	0,34

Tabella 19. Concentrazione di gruppi funzionali in un bitume Boscàn prima e dopo invecchiamento TFAAT in presenza di calce idrata o calce idrata dolomitica [22].

Probabilmente le reazioni acido-base non sono sufficienti a giustificare tutte le interazioni chimiche. J. C. Petersen del WRI ha ipotizzato che la calce idrata agisca come un inibitore dei catalizzatori naturalmente presenti nell'ossidazione bitume [22, 72]. Questo è stato in parte confermato da L. Johansson (KTH), che ha dimostrato che l'effetto catalitico di composti del vanadio sull'invecchiamento del bitume viene limitato dalla calce idrata, anche se non sono state evidenziate specifiche interazioni vanadio-calce idrata che giustifichino le osservazioni [80]. In ogni caso, va sottolineato che l'intensità delle interazioni calce-bitume dipende dalla composizione del bitume e pertanto dall'origine del greggio [22, 72, 74, 81].

Le interazioni chimiche calce-bitume hanno due effetti:

- In primo luogo, le molecole polari neutralizzate dalla calce idrata restano fortemente adsorbite sulle particelle di calce idrata [12, 22, 72]. Ciò impedisce che causino l'invecchia-

mento chimico del bitume. Il fenomeno è responsabile di una cinetica di invecchiamento più lenta, come dettagliato in precedenza.

- In secondo luogo, le molecole polari neutralizzate non possono muoversi all'interfaccia bitume-aggregati, diversamente dai restanti tensioattivi non acidi [137, 142]. Questi sono tipicamente a base di ammina [144] e non sono facilmente spostati dall'acqua, a differenza dei tensioattivi anionici [137, 138]. L'effetto è confermato dall'osservazione che la calce idrata nel bitume migliora la resistenza all'umidità delle corrispondenti miscele di conglomerato bituminoso [20, 53, 65].

In conclusione, le interazioni chimiche tra la calce idrata e le frazioni acide del bitume contribuiscono al miglioramento sia della resistenza all'invecchiamento e sia dell'adesione aggregato-bitume.

### 3.2.2. Effetto fisico sul bitume

Come illustrato in precedenza, la calce idrata secca ha una maggiore porosità (vuoti Rigden) rispetto ai filler minerali, con valori tipici 60-70% rispetto a 30-34% (Figura 4). La differenza è dovuta alla maggiore porosità delle particelle (Figura 25).

Nei filler minerali, la porosità è essenzialmente dovuta ai vuoti tra le particelle, mentre nella calce idrata, la porosità interna contribuisce all'elevato valore complessivo.

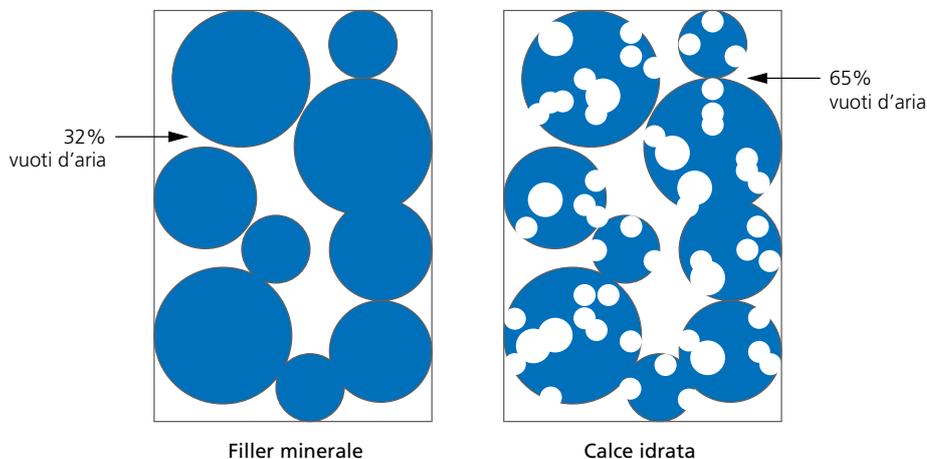


Figura 25. La porosità della calce idrata secca (a destra) è maggiore di quella di un filler minerale (a sinistra) a causa della porosità interna, trascurabile nei filler minerali.

I vuoti Rigden sono correlabili con il potere di irrigidimento misurato con la prova palla-anello, come illustrato in Figura 26 con i dati elaborati da S. Vansteenkiste e A. Verstraeten al

Belgian Road Research Center (BRR) [30] e con i dati forniti da W. Grabowski della Poznan University of Technology discussi nel Capitolo 1 ([31] – Figura 4 e Figura 5).

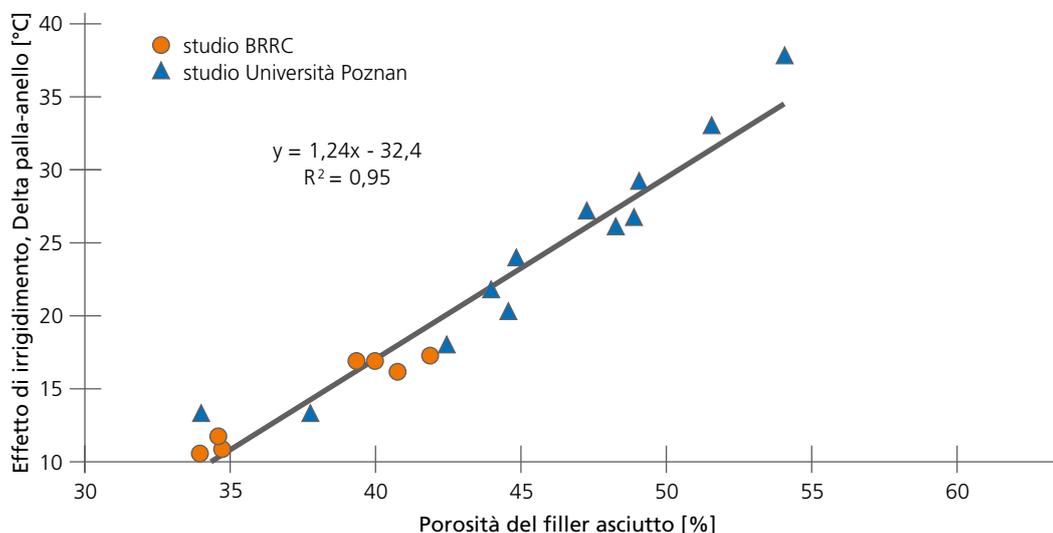


Figura 26. Correlazione tra l'irrigidimento e la porosità di filler minerali (vuoti Rigden). Dati esposti in uno studio della Poznan University of Technology [30] (descritti in Figura 4 e in Figura 5) e in uno studio del Belgian Road Research Center [31].

Pertanto, l'effetto di irrigidimento della calce idrata a temperature elevate può essere spiegato, almeno in parte, dalla maggior porosità descritta dai vuoti Rigden. L'effetto non è immediato: è stato osservato che diverse ore a 138 °C sono necessarie affinché un bitume (AAM) modificato con calce idrata sviluppi

un forte effetto di irrigidimento, mentre a parità di temperatura per altri bitumi (AAD) l'effetto è immediato (Figura 27 – [81]). La cinetica di questo processo potrebbe giustificare il motivo per cui il fenomeno non è sempre osservato (Capitolo 2).

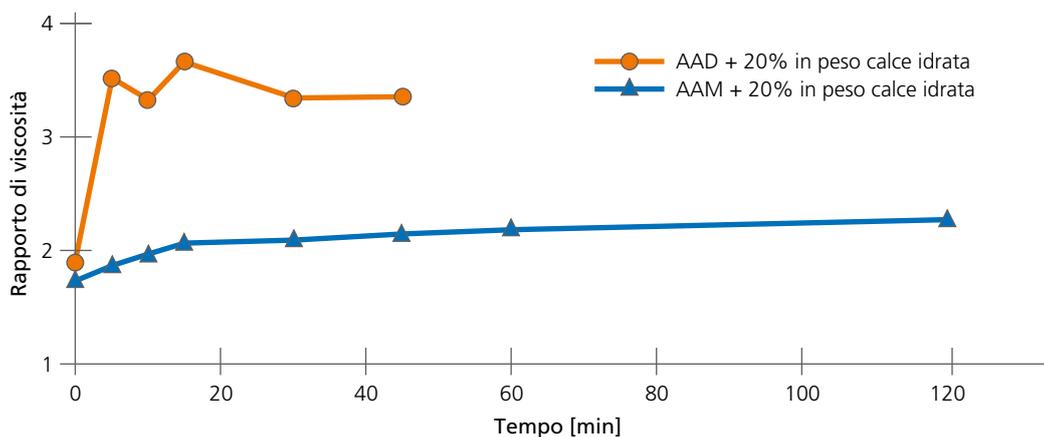


Figura 27. Andamento della viscosità a 138 °C di due bitumi modificati con il 20% di calce idrata. La viscosità si stabilizza velocemente per il bitume AAD, mentre aumenta per 120 minuti nel caso di bitume AAM. Il bitume tal quale non mostra sensibili variazioni di viscosità [81].

Deve essere considerato anche il contributo di altri fattori: numerosi documenti menzionano l'assorbimento di alcuni componenti del bitume sulla superficie delle particelle di calce idrata [12, 81]. Ciò aumenterebbe la frazione volumetrica effettiva delle particelle e quindi le proprietà meccaniche del mastice. Tuttavia, l'importanza di questi effetti sarebbe fortemente dipendente dalla dimensione delle particelle e resta difficile di prevedere l'effetto finale non conoscendo lo spessore dello strato adsorbito.

Si può pertanto concludere che l'effetto fisico della calce idrata sia correlato alla porosità, che genera un effetto di irrigidimento superiore a quello dei filler minerali, come descritto dalla prova dei vuoti Rigden. Resta tuttavia da quantificare il contributo all'effetto irrigidimento proveniente da un eventuale strato adsorbito di bitume sulle particelle di calce idrata.

Infine, come descritto nella sezione 2.3.1, l'elevato effetto di irrigidimento osservato ad alte temperature scompare al di sotto della temperatura ambiente (Figura 13). Nessuna interpretazione è stata finora proposta; il fenomeno potrebbe essere una conseguenza del contrasto meccanico tra le particelle di calce idrata adsorbite di bitume e la matrice bituminosa. A temperature elevate, le particelle di calce idrata che hanno adsorbito il bitume possono considerarsi come sfere rigide nella matrice bituminosa, la cui frazione di volume è perciò maggiore. La frazione di volume che influenza l'effetto di irrigidimento è quindi quella delle particelle di calce idrata adsorbite di bitume (BFHLP). Al di sotto della temperatura ambiente, il BFHLP torna ad avere le caratteristiche iniziali e diminuisce il contrasto meccanico tra la matrice e le inclusioni: il sistema tende a comportarsi in funzione della reale frazione volumetrica piuttosto che del BFHLP.



## 4. Impiego su scala reale di calce idrata in miscele di conglomerato bituminoso

### 4.1. Metodi di aggiunta della calce idrata

Esistono diversi metodi per aggiungere la calce idrata durante il processo di confezionamento di un conglomerato bituminoso. Il contenuto di calce idrata è generalmente compreso tra l'1% e il 2,5% dell'aggregato secco, più spesso tra l'1 e l'1,5%

(Tabella 20). La maggior parte dei metodi di formulazione delle miscele considerano la calce idrata come un filler minerale, perciò il contenuto di filler è ridotto in misura pari all'aggiunta di calce idrata.

Nazione / Stato	Contenuto di calce idrata [%]	Metodi di aggiunta					
		Calce idrata pura	Filler misto	Secca su aggregato asciutto	Secca su aggregato umido	Latte di calce	"Maturazione"
<b>Europa</b>							
Austria	1,5-3,5	X					
Francia	1-1,5	X	X				
Paesi Bassi	2		X				
Regno Unito	1-2	X					
Svizzera	1,5	X					
<b>USA</b>							
Arizona	1				X		
California	0,7-1,2					X	required
Colorado	1				X	X	optional
Florida		X				X	
Georgia	1	X		X			
Mississippi	1				X		
Montana	1,4	X					
Nevada	1-2,5				X		required
New Mexico					X		
Oregon	1				X		optional
South Carolina	1				X		
South Dakota					X		
Texas	1-1,5	X			X	X	
Utah	1-1,5					X	optional
Wyoming	1-1,5				X		

Tabella 20. Metodi di aggiunta della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso. Dati USA disponibili in [145]. Dati Europei completi in Tabella 1. Nella presente tabella sono riportati valori di Nazioni in cui l'uso della calce idrata è prossimo o maggiore a 1% (stima percentuale di HMA modificate con calce idrata rispetto alla produzione totale).

Negli USA la National Lime Association ha pubblicato una rassegna sui metodi attualmente impiegati per aggiungere la calce idrata alle miscele [145]. Ai metodi statunitensi, va aggiunto il metodo del filler misto in uso in Europa (Tabella 20). Molti studi hanno confrontato le diverse tecniche di aggiunta, con conclusioni divergenti in merito alla soluzione migliore [20,

#### 4.1.1. Calce idrata

La calce idrata può essere aggiunta in impianto da uno specifico silos collegato direttamente al miscelatore (Figura 28).

Nel caso di impianto discontinuo con mescolatore, il metodo più comune consiste nel disporre della calce pesata nel medesimo dispositivo che pesa il filler minerale: il silo della calce idrata è collegato al mescolatore per mezzo di un trasportatore a coclea.

Nel caso di un impianto continuo, il metodo più comune consiste nel disporre di una bilancia a piatto da cui distribuire la calce idrata attraverso un alimentatore rotativo a palette. La calce idrata è poi immessa nel tamburo attraverso una coclea. Il punto di ingresso si trova in genere a 1 m dal punto di iniezione del legante [145]. Il metodo è in uso in Europa (Austria, Francia, Germania, Regno Unito) e in USA (Florida, Georgia, Montana e Texas) (Tabella 20).

Inizialmente questa tecnologia ha portato ad uno scarso inglobamento della calce idrata nelle miscele, in quanto persa come polvere all'interno dell'impianto [2]. Il problema può essere risolto con una corretta modifica del sistema di alimentazione, ad esempio utilizzando diaframmi toroidali nel punto di immissione [2].

#### 4.1.2. Calce idrata come filler misto

La calce idrata può essere aggiunta utilizzando lo stesso silo impiegato per il filler minerale. In questo caso, la calce idrata è miscelata con il filler prima di confluire nell'impianto. La maggior parte delle aziende utilizzano il filler misto, un prodotto standardizzato in Europa secondo categorie elencate nelle specifiche per aggregati di miscele di conglomerato bituminoso (EN 13043 – [26]) e riportate in Tabella 21.

La maggior parte dei paesi europei ha esperienza di filler misto. Il contenuto di calce nel misto filler deve essere calcolato in modo che il contenuto finale di calce idrata sia 1-1,5%, come accade in tutti i paesi. I Paesi Bassi prescrivono la forma di  $Ka_{25}$  con il 25% di calce idrata in tutti i conglomerati bituminosi porosi [16]. In Germania si utilizza prevalentemente  $Ka_{25}$ , ma non solo [151]. In entrambi i paesi, la quantità di filler utilizzato nella maggior parte delle miscele di usura è elevata (5-10%) a causa

57, 60, 146, 147, 148, 149]. Tutti i metodi sono risultati essere validi per trarre benefici dall'aggiunta di calce idrata [145, 150].

Pertanto, i principali fattori che influenzano la scelta del metodo sono correlati alle scelte del gestore dell'impianto e alle specifiche locali.

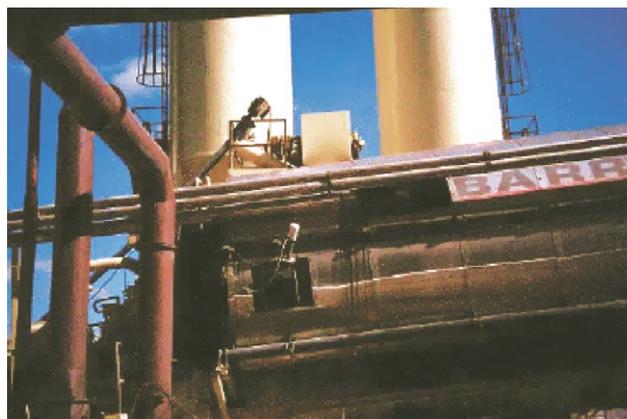


Figura 28. Impianto di conglomerato in Georgia (USA) con due silos: uno per il filler minerale e uno per la calce idrata [145].

Va ricordato che la calce idrata ha una densità apparente inferiore al filler minerale: occorre un silo di capacità minima 70 m<sup>3</sup> per scaricare un autocarro pieno. Il silo, dotato anche di un piccolo filtro a manica in sommità, ha un sistema di aerazione con deumidificazione e un sistema di aspirazione dell'aria tipicamente a 1 m dal cono del silo [145].

Categoria $K_a$	Contenuto di calce spenta [% in peso]
$Ka_{25}$	$\geq 25$
$Ka_{20}$	$\geq 20$
$Ka_{10}$	$\geq 10$
$Ka_{\text{declared}}$	$< 10$
$Ka_{NR}$	non richiesto

Tabella 21. Classi di filler misto ai sensi della EN 13043 [26].

dell'uso di sabbia lavata. In Francia sono invece utilizzati filler misti con una maggiore quantità di calce idrata. La tendenza è di fornire un filler misto con fino al 75% di calce idrata, date le ridotte quantità di filler (tipicamente 2%) come conseguenza dell'uso di sabbia non lavata.

### 4.1.3. Altri metodi di aggiunta

Esistono altri metodi per aggiungere la calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso, attualmente non utilizzati in Europa, ma ben sviluppati negli Stati Uniti (Tabella 20). La maggior parte di questi metodi fa uso di un mescolatore forzato per calce e aggregato (Figura 29). La calce può anche essere spruzzata direttamente sull'aggregato sul nastro trasportatore, ma è una soluzione che comporta la perdita di materiale in polvere [2].



Figura 29. Mescolatore forzato di calce idrata e aggregato secco in South Carolina (USA) [145].

Il metodo più comune consiste nell'aggiungere la calce idrata secca (da cui la necessità di un silo dedicato) all'aggregato umido utilizzando un miscelatore forzato (Tabella 20). Ciononostante, in alcuni impianti in Georgia si preferisce trattare l'aggregato secco (Tabella 20). California e Utah prescrivono l'uso del latte di calce anziché della calce idrata secca; questo metodo è utilizzato anche in Colorado, Florida e Texas (Tabella 20).

Infine, alcuni Stati specificano anche un periodo di "maturazione", in genere di 24-48 ore. L'aggregato può quindi essere trattato e stoccato per la "maturazione" direttamente in cava e poi utilizzato presso l'impianto di conglomerato bituminoso [145].

La "maturazione" è finalizzata ad un miglior trattamento degli aggregati con inclusioni argillose. Il controllo di qualità è semplificato: il contenuto di calce idrata può essere misurato direttamente sul materiale stoccato.

Il periodo di "maturazione" non deve essere esteso per troppo tempo, a causa del rischio di ri-carbonatazione della calce idrata. Di conseguenza, alcuni Stati ne specificano la durata massima, che ad esempio in Nevada è pari a 45 giorni [145]. Tuttavia, è stato dimostrato che la ri-carbonatazione anche dopo 6 mesi di stoccaggio è presente solo nei primi 8 cm di materiale [13].

## 4.2. Esempi di incrementata durabilità negli USA

L'esperienza acquisita negli Stati Uniti sulla durabilità della pavimentazioni è ben documentata. Come accennato in precedenza, l'indagine della National Lime Association del 2003 ha fornito dati inequivocabili sulla durabilità di miscele di conglomerato bituminoso trattate con calce idrata [10]. Lo studio è stato condotto inviando un questionario a tutti i gestori con esperienza in merito. I risultati completi sono riportati

in Tabella 22. Da questi dati, si può notare che per tutti i tipi di strade la vita utile è aumentata da 2 a 10 anni in presenza di calce idrata. Dato che la vita utile delle pavimentazioni non trattate è compresa tra 5 e 20 anni, l'incremento relativo è del 20-50%. La Georgia, ma solo per le strade a basso traffico, non ha registrato alcuna differenza.

## 4. Impiego su scala reale di calce idrata in miscele di conglomerato bituminoso

Agenzia	Con trattamento con calce			Senza trattamento con calce		
	10%	Medio	90%	10%	Medio	90%
<b>Interstatali</b>						
Arizona	13	15	17	10	12	14
California	8	10	12	6	8	10
Colorado	8	10	12	6	8	10
Georgia	7	10	15		ND	
Mississippi	7	10	15		ND	
Nevada <sup>(1)</sup>	7	8	9	3	4	7
Oregon	10	15	20	8	12	15
South Carolina	10	12	15		ND	
Texas	8	12	15	7	10	12
Utah	15	20	25	7	10	15
<b>Statali e highways</b>						
Arizona	18	20	22	15	17	20
California	8	10	12	6	8	10
Colorado <sup>(1)</sup>	8	10	12		8	
FHWA	15	20	25		ND	
Georgia	8	10	14		ND	
Mississippi	12	15	17		ND	
Nevada	10	12	14	6	8	10
Oregon	15	17	20	8	12	15
South Carolina	8	10	12		ND	
Texas	10	12	15	8	10	12
Utah	15	20	25	7	10	15
<b>Strade a basso traffico</b>						
Arizona	20	25	30	15	20	25
California		ND			ND	
Colorado <sup>(1)</sup>	10	12	15	8	10	12
FHWA	15	20	25		ND	
Georgia	8	10	15	8	10	15
Mississippi	12	15	17		ND	
Nevada	18	20	22	12	15	18
Oregon	15	20	25	7	10	15
South Carolina	10	15	20		ND	
Texas	8	12	15	7	10	15
Utah	7	10	15	3	5	7

Tabella 22. Vita utile attesa in USA per miscele di conglomerato bituminoso trattate e non con calce idrata. (1) – durabilità della pavimentazione; ND – non disponibile [10].

### 4.3. Esempi di incrementata durabilità in Europa

Purtroppo l'esperienza europea non è completamente documentata come negli USA, sebbene si possa confermare che la calce idrata aumenta la vita utile di una pavimentazione flessibile del 20-25%.

Ciò è stato confermato dal gestore autostradale francese Sanef [15]. Ad esempio, una delle prime applicazioni di questa tecnica è stata nel 1984 con l'autostrada A1 Parigi-Lille. Il tronco fa parte della rete Sanef, ed è uno dei più trafficati in Francia, con 35000 veicoli al giorno di cui il 27% mezzi pesanti. 10 km di conglomerato bituminoso poroso confezionato con calce idrata e polverino di gomma sono stati stesi tra Ressons e Compiègnes (direzione Lille-Parigi) [152, 153] e sono rimasti in esercizio per più di 16 anni. Una più recente applicazione di conglomerato bituminoso poroso modificato con polimeri e calce idrata ha avuto una vita utile di 17 anni lungo l'autostrada A4 a Reims. A conferma di quanto scritto, l'esperienza dimostra che il conglomerato bituminoso poroso non modificato ha una vita utile di soli 12 anni.

Anche l'esperienza danese riporta in merito incrementi di durabilità dell'ordine del 20% [23].

I Paesi Bassi prescrivono l'impiego di calce idrata nelle miscele porose [16, 154], confezionate esclusivamente con bitume 70/100 non modificato, che ricoprono il 70% della rete autostradale [18]. Le miscele attuali hanno vita utile attesa di 11 anni

[18]. Sebbene nessuna fonte consenta una valutazione diretta dell'aumento di durabilità, l'assenza di calce idrata è riconosciuta come uno dei principali motivi di rottura prematura [18].

La Federation Internationale de l'Automobile (FIA) prescrive miscele trattate con calce idrata negli strati di usura dei circuiti di gara (Tabella 23).

In conclusione, i risultati osservati in Europa concordano con quanto pubblicato negli USA: su strada la calce idrata aumenta la durabilità delle miscele di conglomerato bituminoso almeno del 20%.

Nazione	Circuito	Anno di realizzazione	Legante
Brasile	Rio de Janeiro	1999	PMB
Portogallo	Estoril	2001	PMB
Italia	Fiorano	2002	PMB
Bahrain	Manama	2003/2004	PMB
Cina	Shanghai	2004	PMB
Spagna	Barcelona	2004	PMB
Turchia	Istanbul	2005	B50/70+TE

Tabella 23. Circuiti automobilistici realizzati con pavimentazioni flessibili modificate con calce idrata. L'ultima colonna indica il tipo di legante utilizzato: PMB – bitume modificato con polimeri; TE – Trinidad Epure.

### 4.4. Dosaggio di calce idrata

Due metodi descrivono in letteratura la procedura per quantificare il contenuto di calce idrata in una miscela di conglomerato bituminoso: il primo è tedesco, il secondo statunitense.

Il metodo tedesco [155, 156] è molto semplice e deriva dai metodi di caratterizzazione della calce illustrati nella EN 459-2 [24]: il metodo tedesco distingue tre prove:

- Purezza della calce idrata.
- Contenuto di calce idrata in un filler misto.
- Contenuto di calce idrata in un filler recuperato da una miscela bituminosa.

Questo consiste in una titolazione con acido cloridrico di una sospensione del prodotto da testare. L'acido deve essere più debole (0,5 M) in presenza di filler misti o recuperati, per essere compatibile con una basicità inferiore. Il filler viene estratto da

una miscela bituminosa utilizzando un solvente del bitume, come descritto nella EN 12697-1 (di solito trielina o tetracloroetilene – [157]). La sospensione da titolare viene quindi ottenuta miscelando 1 g di filler a 150 ml di acqua, 10 ml di isobutanolo e 5 ml di una soluzione di tensioattivo (1 g dodecilsolfato di sodio e 1 g di polietilenglicole – dodecylether in 100 ml di acqua).

La soluzione di tensioattivo è richiesta solo nelle prove di filler recuperato, per lavare il filler dal bitume rimanente o dal solvente impiegato per l'estrazione. L'indicatore impiegato è la fenoltaleina (0,5 g in 50 ml di etanolo, portato a 100 ml da acqua). La velocità di titolazione inizialmente è 12 ml/min, poi diminuisce a 4 ml/min in prossimità del punto di transizione. Il metodo è efficace con tutti i tipi di filler, compresi quelli calcarei [155].

La ripetibilità (% in peso di calce idrata nel filler) era 0,52% e la riproducibilità era 0,91% con un valore medio di 27,3%.

Sezione	Contenuto nominale di calce idrata [% in peso]	Contenuto di calce idrata misurato nel filler [% in peso]
1	0	0,9
2	0	0,7
3	25	29,2
4	25	26,0

Tabella 24. Validazione del metodo tedesco [155].

Il metodo è stato validato su campioni prelevati a 1,5 anni dalla costruzione (Tabella 24). Le miscele 0/8 S SMA sono state confezionate sia con un normale filler che con un filler misto contenente 25% in peso di calce idrata. I risultati sono riportati in Tabella 24 [155].

Si noti inoltre che uno studio con metodi diversi ha dimostrato che il metodo di titolazione era equivalente al metodo dello zucchero, di riferimento nella EN 459-2. Dal confronto di miscele confezionate con aggregati diversi è emerso che una parte della calce idrata non era completamente recuperata, a causa della reazione calce idrata-aggregati (Figura 30). Tali reazioni erano più importanti per l'aggregato basaltico (circa il 60% di recupero), che per quello morenico (circa 80%) e per il filler calcareo (circa il 90%).

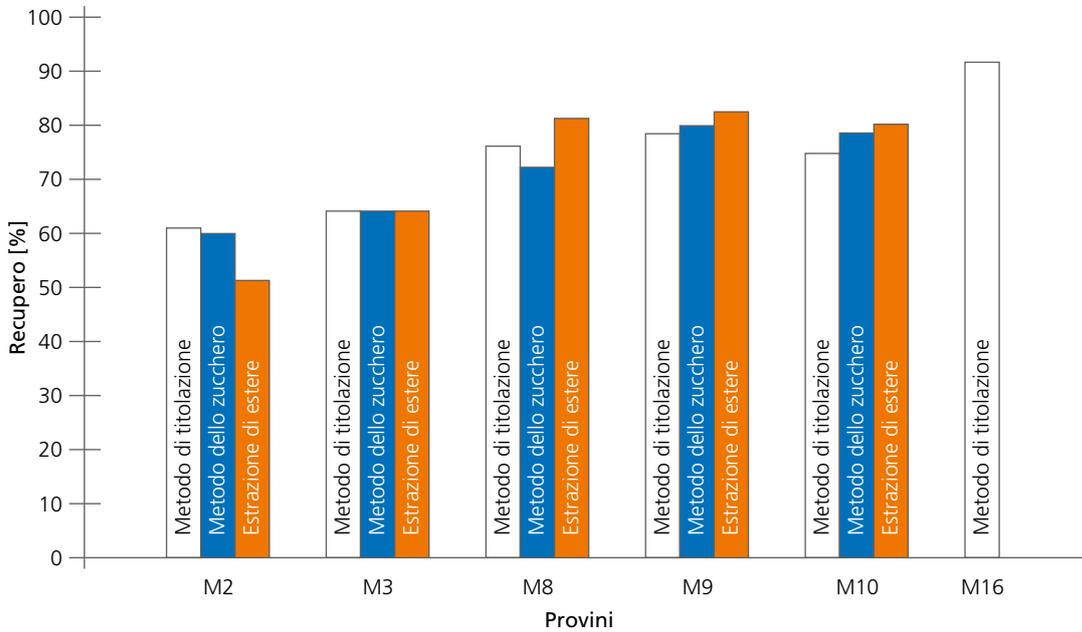


Figura 30. Percentuale di recupero (contenuto di calce idrata rapportato al contenuto di calce idrata nominale) ottenuta da tre diversi procedimenti chimici: "Metodo di titolazione" si riferisce alla titolazione diretta del metodo tedesco [156] sopra descritto; "Metodo dello zucchero" si riferisce alla titolazione con lo zucchero; "Estrazione di estere" si riferisce all'estrazione con ethyl-acetoacetato [155]. Le miscele bituminose erano confezionate con diversi filler misti e calce idrata: M2 e M3 – con filler basaltico (rispettivamente 5 e 20% calce idrata); M8 and M9 – con filler morenico (rispettivamente 5 e 20% calce idrata); M10 – con 67% filler morenico and 33% filler calcareo (25% calce idrata); M16 – con filler calcareo (20% calce idrata).

Il metodo statunitense è stato sviluppato dalla Federal Highway Administration (FHWA – [158, 159]). Esso consiste nella spettroscopia di assorbimento infrarosso (FTIR) del filler e nella quantificazione del contenuto di calce idrata in relazione al picco a  $3640\text{ cm}^{-1}$  corrispondente all'idrossido di calcio (Figura 31). Il carbonato di calcio ha il picco a  $1390\text{ cm}^{-1}$ , inequivocabilmente distinto dalla calce idrata (Figura 31).

L'analisi può essere facilmente condotta con 15-20 g di polvere recuperata dalla perforazione, con una punta di carburo di tungsteno di 9,5 mm di diametro, di uno strato in conglomerato bituminoso [158, 159].

È interessante notare che alcune misurazioni effettuate in Nevada su materiali di 10 anni non hanno evidenziato alcuna ri-carbonatazione o lisciviazione [158, 159].

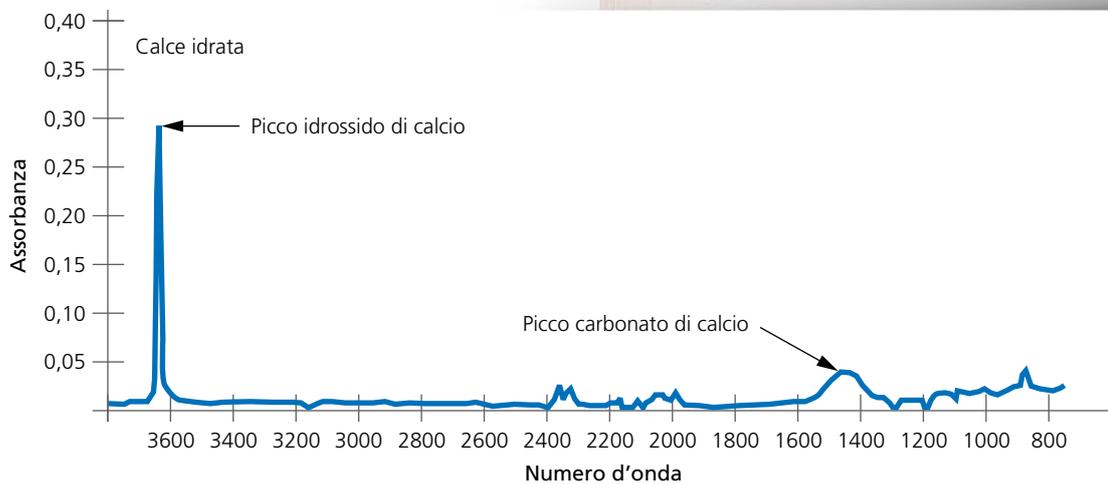
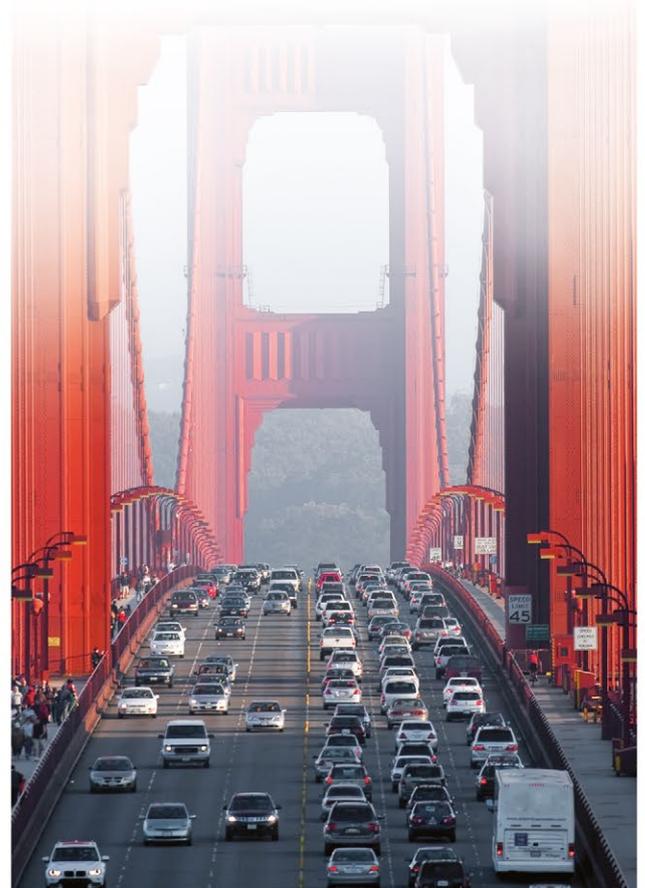


Figura 31. Spettro FTIR della calce idrata [158].





# Conclusioni

La calce idrata è conosciuta come un additivo per le miscele di conglomerato bituminoso. Nel corso del 1970 negli Stati Uniti si è registrato un forte interesse in merito, in parte come conseguenza di un generale calo della qualità del bitume a causa della crisi petrolifera del 1973: in quegli anni infatti gli ammaloramenti dovuti a umidità e gelo sono stati tra le cause più importanti di degrado delle pavimentazioni. L'efficacia della calce idrata è comprovata al punto che sia prescritta in molti Stati USA e si stima che sia presente nel 10% delle miscele di conglomerato bituminoso prodotte negli USA.

I suoi effetti sono stati esaminati attraverso 110 documenti pubblicati nei cinque continenti. Sebbene da tempo la calce idrata sia utilizzata con successo nelle miscele di conglomerato bituminoso, è tuttora attiva la ricerca su strada, come dimostrato dall'elevato numero di pubblicazioni recenti.

La revisione della letteratura conferma che è molto efficace per ridurre la sensibilità all'acqua e aumentare la resistenza al gelo delle miscele. Tutti i metodi di prova disponibili ne confermano gli effetti benefici. I metodi di prova più severi, come cicli di gelo-disgelo o la prova con dispositivo Hamburg Wheel Tracking, hanno permesso di distinguere gli effetti della calce idrata da quelli di altri materiali, come gli additivi antistrip liquidi.

Il largo uso degli ultimi 40 anni negli Stati Uniti ha dimostrato che la calce idrata è più di un semplice additivo contro i danni dell'umidità. Come illustrato in questo rapporto, la calce idrata è nota anche come rallentatore del processo di invecchiamento chimico del bitume. L'effetto globale consiste nel rallentare il processo di indurimento del bitume esposto ad alte temperature in presenza di ventilazione. La calce idrata riduce la formazione di asfalteni, il componente viscosizzante del bitume.

La calce idrata irrigidisce il mastice più di un normale filler minerale, un effetto che è ben descritto in letteratura, ma osservato solo al di sopra della temperatura ambiente. Il fenomeno condiziona le proprietà meccaniche della miscela di conglomerato bituminoso. In metà dei casi, è stato sperimentato che la resistenza e il modulo, generalmente misurati a temperature prossime a quella ambiente, sono stati modificati a seguito dell'aggiunta di calce idrata. Nel 75% dei casi è stato verificato un miglioramento della resistenza all'ormaiamento, di solito misurata a temperatura compresa nell'intervallo 45-60 °C. In tutti i casi, la maggior parte degli studi si concentrano su contenuti di calce idrata del 1-1,5% e questi effetti sono generalmente più pronunciati per elevati contenuti di calce idrata.

Infine, nel 77% dei casi la calce idrata ha migliorato la resistenza a fatica delle miscele di conglomerato bituminoso; tuttavia i pochi studi non sono stati condotti utilizzando protocolli di prova europei. I dati pubblicati sarebbero più incisivi se le miscele fossero state sottoposte ad un numero di cicli a rottura superiore a un milione e a temperature inferiori a 20 °C.

Coerentemente con l'osservazione che la calce idrata non presenta effetti di irrigidimento di a basse temperature, nessun miglioramento è riportato in letteratura sulla resistenza alla fessurazione termica.

La Figura 32 riporta sinteticamente l'efficacia della calce idrata rispetto agli ammaloramenti riportati in letteratura.

L'efficacia della calce idrata dipende dalle forti interazioni tra i principali componenti, aggregato e bitume, e dalla combinazione di quattro effetti, due sull'aggregato e due sul bitume. La calce idrata modifica le proprietà superficiali dei granuli, consentendo lo sviluppo di composti (ioni calcio) e rugosità superficiale (precipitati) che favoriscono l'adesione del bitume. La calce idrata floccula le particelle argillose presenti sulla superficie degli aggregati, inibendo il loro effetto dannoso sulle miscele. Per quanto riguarda il bitume, la calce idrata reagisce chimicamente con gli acidi del bitume, rallenta la cinetica di indurimento per invecchiamento e neutralizza l'effetto dei "cattivi" promotori di adesione presenti nel bitume, migliorando la resistenza all'umidità della miscela. Infine, l'elevata porosità della calce idrata giustifica l'effetto di irrigidimento al di sopra della temperatura ambiente. La termosuscettibilità e la cinetica del fenomeno potrebbero giustificare sia il motivo per cui il fenomeno non è sempre osservato sia il motivo per cui la calce è più efficace ad alte temperature, condizioni in cui l'ormaiamento è il danno prevalente.

I metodi di aggiunta della calce idrata, ad esempio nel tamburo, come filler misto, secca all'aggregato umido, come latte di calce, con o senza "maturazione" sono dettagliatamente descritti. Allo stato attuale non esistono prove che dimostrino quale sia il metodo più efficace, e tutti i metodi consentono di ottenere benefici. Fermo restando i limiti prestazionali dell'impianto, la calce idrata all'interno di una miscela può essere facilmente quantificata.

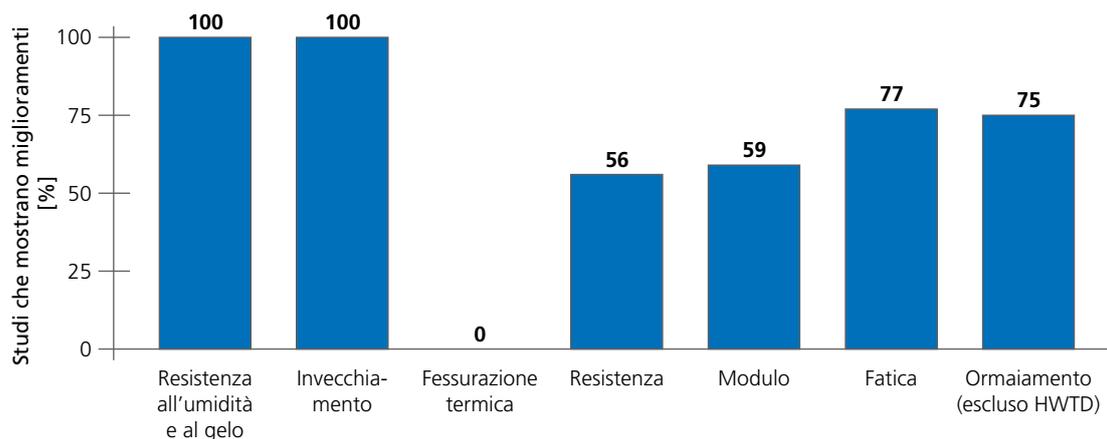


Figura 32. Caratteristiche di conglomerati bituminosi migliorate dall'aggiunta di calce idrata. La percentuale è relativa agli studi pubblicati. I risultati HWTD sono esclusi dai dati di ormaiamento in quanto più coerenti con il danno da umidità.

L'uso di calce idrata ha una forte influenza sulla durabilità miscele di conglomerato bituminoso: sulla base dell'esperienza maturata su strada, agenzie del nord USA stimano che il contenuto usuale di 1-1,5 % (rispetto all'aggregato secco) di calce idrata nella miscela aumenti la vita utile delle pavimentazioni di 2-10 anni, cioè del 20-50%.

L'esperienza europea non è ancora sviluppata come negli USA, ma i benefici sono stati ampiamente segnalati. A titolo di esempio, il gestore autostradale francese Sanef attualmente prescrive l'uso di calce idrata negli strati di usura della sua rete, perché ha verificato incrementi della vita utile del 20-25%. Osservazioni simili hanno indotto i Paesi Bassi a prescrivere la calce idrata nelle miscele porose, che oggi coprono il 70% delle strade del paese. In conseguenza di ciò, l'uso di calce idrata nelle pavimentazioni flessibili è crescente in molti Stati europei, in particolare Austria, Francia, Paesi Bassi, Regno Unito e Svizzera.

Mentre sono chiaramente dimostrati i benefici dell'aggiunta di calce idrata in miscele di conglomerato bituminoso rispetto a vari materiali (aggregati, bitume, miscele bituminose), l'esperienza europea si mantiene inferiore rispetto a quella statunitense. Di

conseguenza, gli effetti di questa tecnica valutati secondo standard europei non sono ancora riportati in letteratura. Tra i più interessanti si annoverano l'indice ITSR e la resistenza a fatica.

Inoltre, le specifiche della calce idrata nelle norme europee per gli aggregati non sono del tutto appropriate. In primo luogo, alcune prove come la palla-anello non possono essere eseguite sulla calce idrata, sebbene siano prescritte per i filler minerali. La calce idrata è considerata come un filler nelle norme in materia di miscele bituminose, perciò è fondamentale risolvere questo aspetto. Inoltre le classi granulometriche di filler presenti nelle norme in materia di aggregati non coprono tutti i prodotti attualmente utilizzati.

Infine, alcuni aspetti teorici restano da comprendere: gli effetti chimici della calce idrata sul bitume sono ben descritti, mentre quelli fisici sono appena trattati. Di conseguenza, deve ancora essere formulata una spiegazione per la termosuscettibilità dell'effetto di irrigidimento della calce idrata. Gli effetti sulle proprietà superficiali degli aggregati, in particolare la presenza di precipitati, non sono dettagliati in letteratura e potrebbero essere i prossimi obiettivi della ricerca.



# Indice delle figure

Numero	Didascalia	Pagina
Figura 1.	Nazionalità del primo autore dei 110 documenti esaminati.	10
Figura 2.	Anno di pubblicazione dei documenti esaminati.	11
Figura 3.	Calce idrata (da Lhoist).	12
Figura 4.	Vuoti Rigden di alcuni filler e filler misti. L – calcare; D – dolomite; M – melafiro; B – basalto; CAL – calce idrata; X15 – filler X con il 15% in peso di calce idrata; X30 – filler X con il 30% in peso di calce idrata [31].	13
Figura 5.	Delta palla-anello di alcuni filler e filler misti. L – calcare; D – dolomite; M – melafiro; B – basalto; X15 – filler X con il 15% in peso di calce idrata; X30 – filler X con il 30% in peso di calce idrata [31].	14
Figura 6.	Temperatura di rammollimento palla-anello di un bitume con penetrazione 200 in funzione del contenuto di filler (% in peso), calce idrata, calcare e grovacca [37].	15
Figura 7.	Spogliamento dell'aggregato causato dall'umidità [45].	17
Figura 8.	Metodi di prova per prevedere danni da umidità, esperienze USA [8].	18
Figura 9.	Resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso 0/20 confezionate con aggregati di diversa provenienza e 4,8% di bitume 70/100 e vari additivi anti-stripping. 1 – prova Lottman; 2 – stabilità Marshall residua; 3 – HWTD a 60 °C [49].	19
Figura 10.	Prove di gelo-disgelo su miscele di conglomerato bituminoso confezionate con calcare (A) o granito (B) e bitume AAB-1. Sono stati testati bitumi vergini e invecchiati, con calce (20% in peso di legante, 5,5 % in volume) e dodecanofenone 1% in peso di legante [65].	23
Figura 11.	Efficacia di alcuni additivi per prevenire il danno da umidità, fonte agenzie del nord USA [8].	24
Figura 12.	Indice di invecchiamento a 60 °C (viscosità dopo l'invecchiamento rapportata alla viscosità vergine) di vari bitumi modificati con calce idrata calcinica (Hi-Ca) e calce idrata dolomitica (Dol). L'invecchiamento è stato ottenuto con il Thin Film Accelerated Aging Test (TFAAT) corrispondente a 3 giorni a 113 °C in presenza di ventilazione [22].	28
Figura 13.	Dipendenza dalla temperatura dell'effetto di irrigidimento: reciproco del modulo di compliance immaginario ( $1/J''$ ) a 10 rad/s rispetto alla temperatura per un bitume 70/100 e per lo stesso bitume con il 50% in peso di filler calcareo o filler calcareo contenente il 40% in peso di calce idrata [97].	33
Figura 14.	Master curve a 21,1 °C per miscele 0/18 (4,3% filler) e 4,6% bitume PG 64-22 [104].	34
Figura 15.	Ormaiamento di una pavimentazione flessibile [45].	37
Figura 16.	Risultati della prova HWTD [13].	38
Figura 17.	Effetto della calce idrata sulla resistenza all'ormaiamento di una miscela BBSG 0/14: profondità dell'ormaiamento rispetto al numero di cicli nel rut tester francese a 60 °C. 1,25 o 2% di calce idrata aggiunta all'aggregato asciutto o dopo il bitume [73].	39
Figura 18.	Fessurazione a fatica in una miscela di conglomerato bituminoso [45].	40
Figura 19.	Effetto della calce idrata sulla fatica di miscele testate a torsione. Numero di cicli a rottura vs deformazioni per miscele con 10% di calce idrata (HL) o filler calcareo (LS) confezionate con bitume AAD-1 e AAM-1 [90].	40
Figura 20.	TSRST (tensioni termiche vs temperatura) per conglomerato bituminoso 0/22 con 4,5% bitume modificato con polimeri e 2,5% di calce idrata. Le curve sono relative ad uno stesso materiale [128].	41
Figura 21.	Rigidezza del mastice rapportata a quella del bitume tal quale vs volume di filler per mastici confezionati con due bitumi e calce idrata. Dati comparati con risultati di letteratura sui filler minerali recuperati da filtri a maniche (dimensioni in micron) o sfere di vetro (dimensioni in micron). L'equazione (1) coincide con quella espressa in 2.3.1 per la viscosità $[\eta] = 2/\phi_m = 3.17$ (from [81]).	42
Figura 22.	Curve di ormaiamento ottenute con HWTD per diverse miscele 0/8 SMA con grovacca e diversi bitumi: modificato con polimeri (PmB 45 A), bitume 30/45 o 50/70 con 1,4% di calce idrata come filler misto. Adeguate quantità di bitume e calce garantiscono le prestazioni ottenute con bitumi modificati [37].	43
Figura 23.	Effetto della calce sulla superficie degli aggregati come ipotizzato da I. Ishai e J. Craus [139].	46

Numero	Didascalia	Pagina
Figura 24.	Cromatogramma ad alta prestazione a permeazione di gel (GPC-HP) con toluene per due bitumi del Venezuela e del Middle East, con filler calcareo o con filler calcareo attivo (modificato con il 25% in peso di calce idrata) [69].	47
Figura 25.	La porosità della calce idrata secca (a destra) è maggiore di quella di un filler minerale (a sinistra) a causa della porosità interna, trascurabile nei filler minerali.	49
Figura 26.	Correlazione tra l'irrigidimento e la porosità di filler minerali (vuoti Rigden). Dati esposti in uno studio della Poznan University of Technology [30] (descritti in Figura 4 e in Figura 5) e in uno studio del Belgian Road Research Center [31].	50
Figura 27.	Andamento della viscosità a 138 °C di due bitumi modificati con il 20% di calce idrata. La viscosità si stabilizza velocemente per il bitume AAD, mentre aumenta per 120 minuti nel caso di bitume AAM. Il bitume tal quale non mostra sensibili variazioni di viscosità [81].	50
Figura 28.	Impianto di conglomerato in Georgia (USA) con due silo: uno per il filler minerale e uno per la calce idrata [145].	53
Figura 29.	Mescolatore forzato di calce idrata e aggregato secco in South Carolina (USA) [145].	54
Figura 30.	Percentuale di recupero (contenuto di calce idrata rapportato al contenuto di calce idrata nominale) ottenuta da tre diversi procedimenti chimici: "Metodo di titolazione" si riferisce alla titolazione diretta del metodo tedesco [156] sopra descritto; "Metodo dello zucchero" si riferisce alla titolazione con lo zucchero; "Estrazione di estere" si riferisce all'estrazione con ethyl-acetoacetato [155]. Le miscele bituminose erano confezionate con diversi filler misti e calce idrata: M2 e M3 – con filler basaltico (rispettivamente 5 e 20% calce idrata); M8 and M9 – con filler morenico (rispettivamente 5 e 20% calce idrata); M10 – con 67% filler morenico and 33% filler calcareo (25% calce idrata); M16 – con filler calcareo (20% calce idrata).	57
Figura 31.	Spettro FTIR della calce idrata [158].	58
Figura 32.	Caratteristiche di conglomerati bituminosi migliorate dall'aggiunta di calce idrata. La percentuale è relativa agli studi pubblicati. I risultati HWTD sono esclusi dai dati di ormaiamento in quanto più coerenti con il danno da umidità.	60





# Indice delle tabelle

Numero	Didascalia	Pagina
Tab. 1.	Uso corrente di calce idrata in miscele di conglomerato bituminoso in Europa. I dati sono stati raccolti dalla Task Force ATF. La percentuale di HMA additivato con calce idrata nella produzione totale HMA è una stima approssimata utilizzata per quantificare il livello di "calce-consapevolezza" in ogni nazione. Campitura arancione: più del 5% della produzione HMA è modificata con calce idrata; campitura grigia: circa l'1%. ST – stripping (sgranamento); RU – rutting (ormaiamento); AG – aging (invecchiamento); AC – conglomerato bituminoso; SMA – splittmastixasphalt; PA – conglomerato bituminoso poroso; CMA – conglomerato bituminoso a freddo; BBTM – strato di conglomerato bituminoso molto sottile.	4
Tab. 2.	Requisiti chimici della calce secondo la EN 459-1:2010.	12
Tab. 3.	Proprietà chimico-fisiche della calce idrata e di altri filler minerali.	15
Tab. 4.	Metodi di prova comuni per valutare l'incremento di resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso.	20-21
Tab. 5.	Aumento della resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso additivate con calce idrata; misure con dispositivo Hamburg Wheel Tracking (EN 12697-22 – small size – metodo B in acqua). In 2.3.4 è disponibile una descrizione dei risultati.	22
Tab. 6.	Motivi per l'uso della calce idrata, fonte agenzie del nord USA. Livello di importanza: 1 – molto importante; 2 – moderatamente importante; 3 – poco importante [10].	24
Tab. 7.	Miglioramento della resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso additivato con calce idrata; risultati ottenuti con Lottman test.	25
Tab. 8.	Miglioramento della resistenza ai cicli di gelo-disgelo di miscele di conglomerato bituminoso additivato con calce idrata; risultati ottenuti con: (1) – Lottman prova ripetuta; (2) – gelo-disgelo Texas pedestal.	26
Tab. 9.	Miglioramento della resistenza all'umidità di miscele di conglomerato bituminoso additivato con calce idrata; risultati ottenuti con vari metodi: (3) – Duriez; (4) – Cantabro; (5) – Marshall residua; (6) – Texas Boil test.	27
Tab. 10.	Risultati sperimentali che mostrano l'effetto della calce idrata sull'invecchiamento del bitume.	29-30
Tab. 11.	Risultati su strada che mostrano l'effetto della calce idrata sull'invecchiamento del bitume.	31
Tab. 12.	Viscosità intrinseca [ $\eta$ ] di alcuni filler [95].	33
Tab. 13.	Valori del modulo in letteratura. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo del modulo. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione".	35
Tab. 14.	Valori della resistenza in letteratura. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo della resistenza. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione".	37
Tab. 15.	Valori della resistenza all'ormaiamento in letteratura. Il dispositivo Hamburg Wheel Tracking Device è descritto in Tabella 5. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo della resistenza all'ormaiamento. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione"; MF – filler misto.	39
Tab. 16.	Valori della resistenza a fatica in letteratura. Per ciascuna pubblicazione, sono riportati il numero totale di miscele con calce idrata, il contenuto di calce idrata e il numero di miscele che presentano un incremento significativo della resistenza a fatica. Il metodo di aggiunta è: B – nel legante; D – calce secca nell'aggregato umido; LS – latte di calce; M – "maturazione"; MF – filler misto.	41
Tab. 17.	TSRST (tensioni termiche vs temperatura) di due miscele di conglomerato bituminoso con e senza calce idrata [29].	42
Tab. 18.	Concentrazione di gruppi funzionali in quattro bitumi AC-10 prima e dopo il trattamento con calce idrata (1) – sotto la soglia di sensibilità; (2) – presente come sali carbossilati [72].	48

Numero	Didascalia	Pagina
Tab. 19.	Concentrazione di gruppi funzionali in un bitume Boscàn prima e dopo invecchiamento TFAAT in presenza di calce idrata o calce idrata dolomitica [22].	48
Tab. 20.	Metodi di aggiunta della calce idrata nelle miscele di conglomerato bituminoso. Dati USA disponibili in [145]. Dati Europei completi in Tabella 1. Nella presente tabella sono riportati valori di Nazioni in cui l'uso della calce idrata è prossimo o maggiore a 1% (stima percentuale di HMA modificate con calce idrata rispetto alla produzione totale).	52
Tab. 21.	Classi di filler misto ai sensi della EN 13043 [26].	53
Tab. 22.	Vita utile attesa in USA per miscele di conglomerato bituminoso trattate e non con calce idrata. (1) – durabilità della pavimentazione; ND – non disponibile [10].	55
Tab. 23.	Circuiti automobilistici realizzati con pavimentazioni flessibili modificate con calce idrata. L'ultima colonna indica il tipo di legante utilizzato: PMB – bitume modificato con polimeri; TE – Trinidad Epure.	56
Tab. 24.	Validazione del metodo tedesco [155].	57





## Allegato 1 (fonti bibliografiche)

Il rapporto prende in considerazione alcuni studi internazionali. Nell'allegato 2 è riportata la lista completa dei riferimenti bibliografici.

Questi documenti sono stati individuate in vari modi. In primo luogo, è stata condotta una ricerca attraverso banche dati di contenuto tecnico come Hcaplus, ITRD, Compendex, Civileng, NTIS e Dissabs. La ricerca è stata completata su internet attraverso il motore di ricerca [www.google.com](http://www.google.com). Anche i membri della task force ATF hanno contribuito alla raccolta delle fonti. Infine sono stati aggiunti i documenti importanti presenti nelle bibliografie delle fonti individuate, ma presenti nel database bibliografico in costruzione.

Per la stesura del presente rapporto sono state consultate 110 fonti bibliografiche sull'uso della calce idrata nei materiali bituminosi. La nazionalità del primo autore (Figura 1) and l'anno di pubblicazione (Figura 2) sono stati esaminati nell'introduzione. La Figura 33 illustra il tipo di documenti esaminati, soprattutto articoli scientifici.

Spesso la calce idrata è confrontata con altri filler minerali o additive promotori di adesione (soprattutto liquidi antistrip) (Figura 34). Altri materiali di confronto sono: zolfo utilizzato come filler, piombo diamiditiocarbamate (LDADC – un antiossidante), hedmanite (fibre naturali di lana di roccia), dodecafenone (un composto attivatore di adesione), fibre di cocco, l'acido polifosforico (PPA) e polimeri.

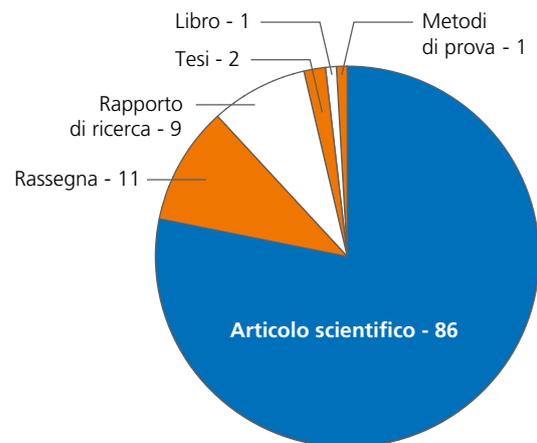


Figura 33. Tipo di documenti in bibliografia (totale 110).

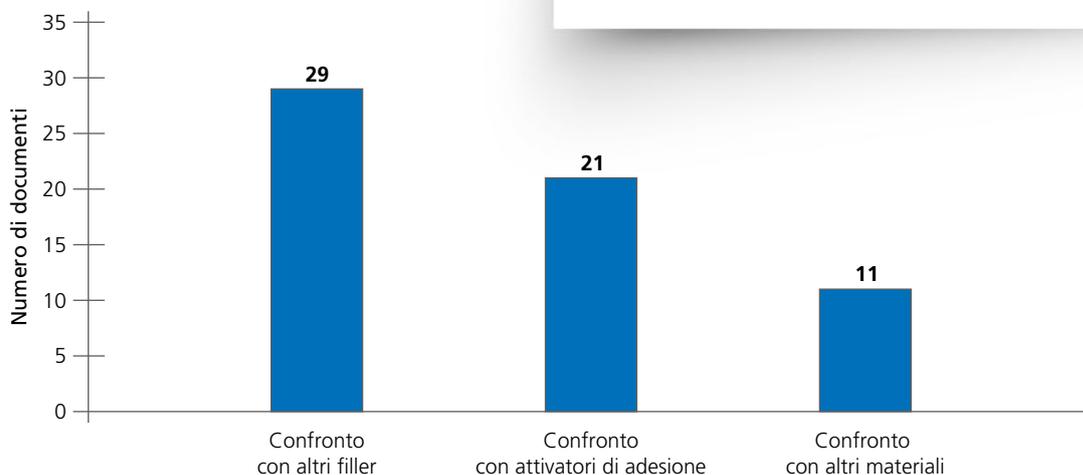


Figura 34. Materiali di confronto della calce idrata

Le caratteristiche esaminate sono riportate in Figura 35. Il totale è maggiore di 110 dal momento che alcune pubblicazioni esaminano più di un argomento. La sensibilità all'acqua, sia umidità che gelo, è il tema più frequente, a conferma della riconosciuta efficacia della calce idrata. Le proprietà meccaniche (escluse la fessurazione e l'ormaiamento) sono ben studiate, dal momento

che spesso rappresentano i parametri di dimensionamento di una pavimentazione bituminosa. Nella categoria "altro" sono comprese le prove sui filler e sui mastici, e i metodi per la quantificazione della calce nelle miscele.

Nell'allegato 2 la bibliografia è suddivisa per funzionalità.

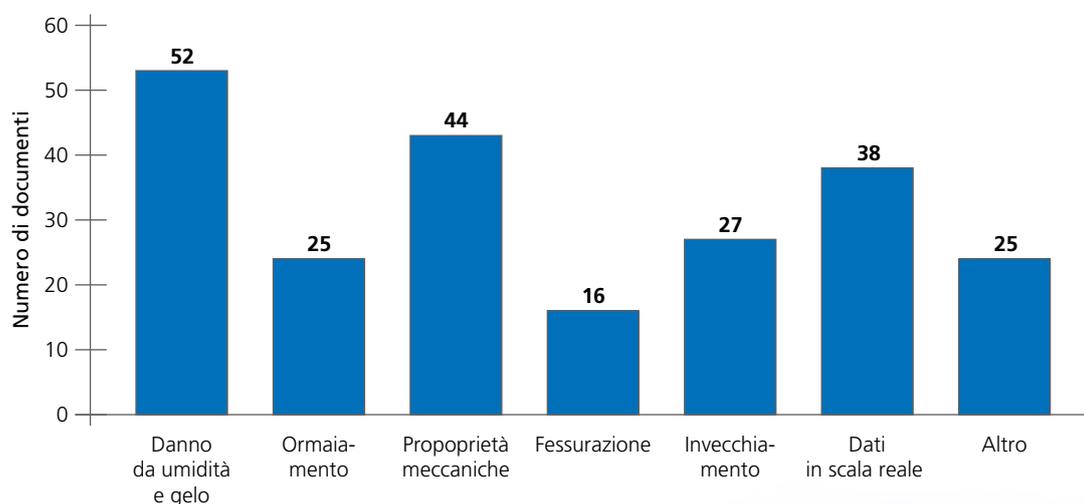


Figura 35. Ambiti di valutazione della calce idrata





## Allegato 2 (fonti bibliografiche per funzi)

Di seguito si dettaglia il contenuto dei riferimenti bibliografici per migliorare la consultazione del documento. Di ciascuna fonte sono indicati i **temi** affrontati, indicate come:

- **Md** – danni da umidità e/o gelo incluso HWTD,
- **Ag** – invecchiamento,
- **Me** – proprietà meccaniche inclusa stabilità Marshall, modulo, resistenza (solo se la prova è finalizzata alla misura della caratteristica di resistenza non è parte di una prova di sensibilità all'acqua con e senza condizionamento), ... escluse resistenza a ormaimento e fessurazione,

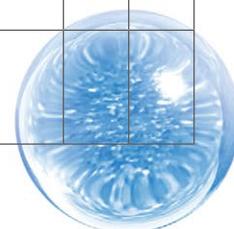
- **Ru** – ormaimento incluso HWTD,
- **Fr** – fessurazione inclusa resistenza a fatica,
- **Ot** – altri come prove sui mastici, contenuto di calce, prove sui filler, ...
- **Fi** – risultati su scala reale.

L'analisi della bibliografia per temi è disponibile nell'Allegato 1 (Figura 35).

I **più importanti riferimenti bibliografici** sono in grassetto.

Bibliografia	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
M. I. Al-Jarallah and K. W. Lee, "Evaluation of hydrated lime as an antistripping additive for asphalt mixtures", J. Eng. Sci. King Saud Univ. 13(1), pp.65-83, 1987	X						
M. Ameri and M. Aboutalebi Esfahani, "Evaluation and performance of hydrated lime and limestone powder in porous asphalt", Road Materials Pavement Design 9(4), pp.651-664, 2008	X		X				
T. S. Arnold, M. Rozario-Ranasinghe and J. Youtcheff, "Determination of lime in hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1962, pp.113-120, 2006						X	
T. S. Arnold, J. Rozario and J. Youtcheff, "New lime test for hot mix asphalt unveiled", Public Roads 70(5), March/April 2007						X	
T. Aschenbrenner and N. Far, Influence of Compaction temperature and Anti-Stripping Treatment on the Results from the Hamburg Wheel-Tracking Device, Report CDOT/DTD/R-94-9, Denver (Colorado, USA): Colorado Department of Transportation, 1994	X			X			
J. Bari and M. W. Witczak, "Evaluation of the Effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of Hot-Mix Asphalt: Use with the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", Transportation Research Record 1929, pp.10-19, 2005			X				
G. Baumgardner, J.-V. Martin, R. B. Powell and P. Turner, "Polyphosphoric acid and styrene-butadiene-styrene block copolymer modified asphalt: Evaluation of paved section at the NCAT test track built in 2000 and 2003", Proc. 4 <sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-029, 2008							X
C. Berthelot, A. Anthony and C. Raducanu, "Mechanistic characterization of anti-stripping additives in Saskatchewan asphalt mixes", Proc. Annual Conf. Transportation Association Canada, Calgary, Sept. 2005			X				
H. D. Bianchetto y A. I. Asurmendi, "Influencia de la temperatura de fabricación y del contenido de cal en el envejecimiento de mezclas bituminosas: Un caso real", Carreteras 16, pp.54-64, 2008		X					
R. Blab und B. Hofko, Eignung von mit Kalkhydrat und polymermodifiziertem Bindemittel hergestelltem Asphaltmischgut für hoch belastete Verkehrsflächen, Report for Project 0727E, Wien (Austria): Technische Universität Wien, 2008			X		X		
J. Blazek, G. Sebor, D. Maxa, M. Ajib and H. Paniagua, "Effect of hydrated lime addition on properties of asphalt", Petroleum and Coal, 42(1), pp.41-45, 2000	X						
A. L. Bock, D. Hartmann, J. Budny, L. P. Specht e J. A. P. Ceratti, "Estudio laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico", Teoria e Prática na Engenharia Civil 14, pp.59-69, 2009	X		X				
G. Bordonado, « Une expérience d'enrobés drainants sur l'autoroute A1 », Revue Générale des Routes et Aéroports 625, pp.47-50, décembre 1985							X
B. Bruce, "Asphalt as a variable – Big Timber test sections", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.688-710, 1987				X	X		X
B. Brulé, F. Le Bourlot et B. Simaillaud, « Enrobés drainants : Optimisation de la composition des liants et des mastics », Proc. 5 <sup>th</sup> Eurobitume Congress, Stockholm, paper 3.20, pp.591-595, June 1993	X		X			X	

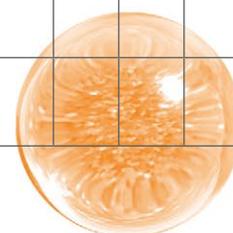
Bibliografia	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
M. Buchta und C. Kunesch, "Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat - Ergebnisse aus der Praxis", Gestrata Journal 111, pp.7-12, 2005 ( <a href="http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_111.pdf">http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_111.pdf</a> )							X
J. W. Button, "Maximizing the Beneficial Effects of Lime in Asphalt Paving Mixtures", ASTM STP 899 pp.134-146, 1984	X						X
C. V. Chachas, W. J. Liddle, D. E. Peterson and M. L. Wiley, Use of hydrated lime in bituminous mixtures to decrease hardening of the asphalt cement, Report PB 213 170, Salt Lake City (Utah, USA): Utah State Highway Department, 1971		X					X
P. Cramer, G. Herz und M. Radenberg, "Kalhydrat: Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels", Asphalt 6, pp.17-25, 2001	X			X			
Y. Decoene, "Enrobés bitumineux perméables, expériences récentes belges", La Technique Routière 2, pp.20-40, 1983							X
A. C. Edler, M. M. Hattingh, V. P. Servas and C. P. Marais, "Use of aging tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 54, pp.118-139, 1985		X					
H.-J. Eulitz, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und S.-O. Schmidt, "Verbesserung von Asphalt-eigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat", Report 2/98/B005, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 1998	X	X					X
J. Gallego Medina, "Efectos del hidrato de cal como aditivo de mezclas bituminosas", Carreteras 123, pp.68-80, 2002	X	X		X			
M. Ghouse Baig and H. I. Al-Abdul Wahhab, "Mechanistic evaluation of hedmanite and lime modified asphalt concrete mixtures", J. Materials in Civil Engineering 10(3), pp.153-160, 1998	X		X	X	X		
C. Gorkem and B. Sengoz, "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", Construction Building Materials 23, pp.2227-2236, 2009	X		X				
W. Grabowski, J. Wilanowicz and T. Sobol, "Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime", Proc. 6 <sup>th</sup> International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino (Italy), paper 78, July 2009						X	
D. I. Hanson, R. E. Graves and E. R. Brown, "Laboratory evaluation of the addition of lime treated sand to hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1469, pp.34-42, 1994	X						
P. Hao and Y. Hachiya, "Moisture susceptibility of asphalt mixture and effectiveness of anti-stripping additives", Proc. Japan Soc. Civil Engineers 61(746), pp.265-273, 2003	X	X		X			
R. G. Hicks, Moisture Damage in Asphalt Concrete, NCHRP Synthesis of Highway Practice 175, Washington (District of Columbus, USA): Transportation Research Board, 1991	X						X
R. G. Hicks and T. V. Scholz, Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt, 3 vol., Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 ( <a href="http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_I.pdf">http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_I.pdf</a> , <a href="http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_II.pdf">http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_II.pdf</a> , <a href="http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_III.pdf">http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_III.pdf</a> )						X	X
P. C. Hopman, Hydroxide in Filler, Netherlands Pavement Consulting Report n°97316, Utrecht (The Netherlands): Netherlands Pavement Consulting, 1998	X	X				X	
P. C. Hopman, A. Vanelstraete, A. Verhasselt and D. Walter, "Effects of hydrated lime on the behaviour of mastics and on their construction ageing", Proc. 5 <sup>th</sup> Int. Conf. on Durable and Safe Road Pavements, Kielce, vol. 1, pp.59-68, May 1999	X	X				X	
J. F. Huang, S. P. Wu, L. Pan and Y. Xiao, "Effects of hydrated lime on the dynamic properties of gneiss asphalt mixtures", Proc. 2 <sup>nd</sup> Int. Conf. on Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM), Huangshan (China), pp.1057-1060, 2008			X				
S.-C. Huang, J. C. Petersen, R. E. Robertson and J. F. Branthaver, "Effect of hydrated lime on long-term oxidative aging characteristics of asphalt", Transportation Research Report 1810, pp.17-24, 2002		X					
S.-C. Huang, R. E. Robertson, J. F. Branthaver and J. C. Petersen, "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage", J. Materials in Civil Engineering 17(6), pp.711-718, 2005	X						



Bibliografia	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
I. Ishai and J. Craus, "Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228-258, 1977	X		X				
R. P. Izzo and M. Tahmoressi, "Use of the Hamburg wheel-tracking device for evaluating moisture susceptibility of hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1681, pp.76-85, 1999	X			X			
M. Iwański and M. Pabocha, "Water and frost resistance of gap-graded asphalt modified with the SBS polymer and hydrated lime", Foundations of Civil and Environmental Engineering 11, pp.29-39, 2008 ( <a href="http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2008.11/full/fcee_2008-11_029-039_water_and_frost_resistance_of_gap-graded.pdf">http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2008.11/full/fcee_2008-11_029-039_water_and_frost_resistance_of_gap-graded.pdf</a> )	X		X				
P. Jaskuła and J. Judycki, "Evaluation of effectiveness of hydrated lime additive in protecting asphalt concrete against water and frost", Proc. 6 <sup>th</sup> Int. Conf. on Environmental Engineering, Vilnius, May 2005	X		X	X			X
P. Jaskuła, "The effectiveness of hydrated lime as asphalt concrete additive", Foundations of Civil and Environmental Engineering 10, pp.99-109, 2007 ( <a href="http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2007.10/full/fcee_2007-10_099-109_the_effectiveness_of_hydrated_lime.pdf">http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2007.10/full/fcee_2007-10_099-109_the_effectiveness_of_hydrated_lime.pdf</a> )	X		X	X			X
R. A. Jimenez, "Methods and treatments to control debonding", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 59, pp.94-137, 1990	X						X
L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "A study of rheological properties of lime treated paving asphalts aged at 60°C in a pressure aging vessel", Fuel Science Technology Int. 13(10), pp.1317-1343, 1995		X				X	
L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "The influence of metal-containing compounds on enhancement and inhibition of asphalt oxidation", Fuel Science Technology Int. 14(8), pp.1143-1159, 1996		X					
L. S. Johansson and U. Isacson, "Effect of filler on low temperature physical hardening of bitumen", Construction Building Materials 12 pp.463-470, 1998						X	
L. S. Johansson, Bitumen ageing and hydrated lime, Ph. D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden); 1998		X				X	
P. S. Kandhal and I. J. Rickards, "Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories", J. Association Asphalt Paving Technologists 70, pp.301-349, 2001							X
T. W. Kennedy, F. L. Roberts and K. W. Lee, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 51, pp.327-341, 1982	X						
T. W. Kennedy, N. Turnham, J. A. Epps, C. W. Smoot, F. M. Young, J. W. Button and C. D. Zeigler, "Evaluation of methods for field applications of lime to asphalt concrete mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 52, pp.508-534, 1983	X						X
T. W. Kennedy, Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures, National Lime Association Bulletin 325, 1984	X						X
T. W. Kennedy and W. V. Ping, "An evaluation of effectiveness of antistripping additives in protecting asphalt mixtures from moisture damage", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 60, pp.230-263, 1991	X						X
M. J. Khattak and V. Kyatham, "Viscoelastic behavior of hydrated lime-modified asphalt matrix and hot-mix asphalt under moisture damage conditions", Transportation Research Record 2057, pp.64-74, 2008			X		X		
O. K. Kim, C. A. Bell and R. G. Hicks, "The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures", ASTM Special Technical Publication 899, Philadelphia (Pennsylvania, USA): American Society for Testing and Materials, pp.51-72, 1985	X			X	X		
Y.-R. Kim, D. N. Little, I. Song, "Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental characteristics", Transportation Research Record 1832, pp.1-8, 2003			X		X		
Y.-R. Kim and D. N. Little, "Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics", J. Materials in Civil Engineering 16(2), pp.122-132, 2004						X	
Y.-R. Kim, J. Sudo Lutif, A. Bhasin and D. N. Little, "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing", J. Materials Civil Engineering 20(10), pp.659-667, 2008	X			X		X	

Bibliografia	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
C. Kunesch und S. Neumann, "Kalkhydrat – Mischgut für das hochrangige Strassennetz", <i>Gestrata Journal</i> 126, pp.20-24, 2009 ( <a href="http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_126.pdf">http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_126.pdf</a> )							X
R. Lackner, M. Spiegl, R. Blab and J. Eberhardsteiner, "Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? Arguments from multiscale analysis", <i>J. Materials in Civil Engineering</i> 17(5), pp.485-491, 2005						X	
D. Lesueur and D. N. Little, "Effect of hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen", <i>Transportation Research Record</i> 1661, pp.93-105, 1999		X			X	X	
D. N. Little and J. A. Epps, <i>The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt</i> , Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2001 ( <a href="http://www.lime.org/Abenefit.pdf">http://www.lime.org/Abenefit.pdf</a> )	X	X	X	X	X	X	X
D. N. Little and J. C. Petersen, "Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited", <i>J. Materials in Civil Engineering</i> 17(2), pp.207-218, 2005		X		X	X	X	
R. Maldonado and D. Fee, "Bitumen modification with polyphosphoric acid", <i>Proc. 4<sup>th</sup> Eurasphalt &amp; Eurobitume Congress</i> , paper 401-020, 2008	X			X			
G. W. Maupin Jr, <i>Effectiveness of Antistripping Additives in the Field</i> , Report VTRC 96-R5, Charlottesville (Virginia, USA): Virginia Transportation Research Council, 1995 ( <a href="http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/96-r5.pdf">http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/96-r5.pdf</a> )	X						X
M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluation of Moisture Sensitivity and Performance of Lime in Hot-Mix Asphalt: Resilient Modulus, Tensile Strength, and Simple Shear Tests", <i>Transportation Research Record</i> 1832 pp.9-16, 2003	X		X				
M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluating the performance of lime in hot-mix asphalt mixtures", <i>Proc. American Soc Civil Engineers Meeting on Airfield and Highway Pavements</i> , pp.614-624, 2006	X		X		X		
R. Miro Recasens, A. Martinez, F. Perez Jimenez and H. Bianchetto, "Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures", <i>Transportation Research Record</i> 1901, pp.10-17, 2005		X	X				
L. N. Mohammad, C. Abadie, R. Gokmen and A. J. Puppala, "Mechanistic evaluation of hydrated lime in hot-mix asphalt mixtures", <i>Transportation Research Record</i> 1723, pp.26-36, 2000	X		X	X	X		
L. N. Mohammad, S. Saadeh, M. Kabir and A. Othman, "Mechanistic properties of hot-mix asphalt mixtures containing hydrated lime", <i>Transportation Research Record</i> 2051, pp.49-63, 2008	X		X	X	X		
F. Mücke und F. Stolz, "Möglichkeit zur verbesserung von Asphalteeigenschaften", <i>Asphalt</i> , Heft 7, 2004							X
National Lime Association, <i>How to Add Hydrated Lime to Asphalt – An Overview of Current Methods</i> , Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 ( <a href="http://www.lime.org/howtoadd.pdf">http://www.lime.org/howtoadd.pdf</a> )							X
J. W. H. Oliver, "Results of road trials of two asphalt antioxidants", <i>Transportation Research Record</i> 1488, pp.96-102, 1995		X					X
J. C. Petersen, H. Plancher and P. M. Harnsberger, "Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties", <i>Proc. Association Asphalt Paving Technologists</i> 56, pp.632-653, 1987		X					
K. Pickering, P. E. Sebaaly, M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Evaluation of new generation of antistripping additives", <i>Transportation Research Record</i> 1342, pp.26-34, 1992	X		X				
J. Pilat, P. Radziszewski and M. Kalabinska, "The analysis of visco-elastic properties of mineral-asphalt mixes with lime and rubber powder", <i>Proc. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt &amp; Eurobitume Congress</i> , vol.1, paper 0036, pp.648-654, 2000			X				X
H. Plancher, E. L. Green and J. C. Petersen, "Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime – a mechanistic study", <i>Proc. Association Asphalt Paving Technologists</i> 45, pp.1-24, 1976		X					
S. Raghava Chari and K. A. Jacob, "Influence of lime and stone dust fillers on fatigue properties of bituminous concrete mixes", <i>Highway Research Bulletin</i> 23, pp.19-32, 1984					X		
C. Raynaud, "L'ajout de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux", <i>BTP Matériaux</i> n°22, pp.42-43, oct. 2009							X

Bibliografia	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
W. Ricardo De Grande, A. Paula Furlan, A. Carlos Gigante, L. M. Gutierrez Klinsky and G. T. Pessa Fabbri, "Efeitos da cal hidratada e do acido polifosforico na suscetibilidade termica de misturas asfalticas densas", Proc. 23 <sup>rd</sup> Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes Congress, paper AC381, 2009			X				
F. T. Sacramento Aragao, Y.-R. Kim and J. Lee, Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska, Report to NDOR Research Project Number P579, Lincoln (Nebraska, USA): University of Nebraska Lincoln, 2008 ( <a href="http://www.nlc.state.ne.us/epubs/R6000/B276-2008.pdf">http://www.nlc.state.ne.us/epubs/R6000/B276-2008.pdf</a> )			X	X	X		
A. Sainton, « Les aspects techniques des enrobés drainants au bitume caoutchouc Flexochape – Procédé Drainochape », Revue Générale des Routes et Aérodrômes 618, pp.67-70, avril 1985							X
A. Sainton, D. Puiatti et D. Walter, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Revue Générale des Routes et Aérodrômes 770, pp.3-10, 1999	X	X	X	X		X	X
A. Sampedro Rodriguez y J. Gallego Medina, "De cal y carreteras...", Carreteras 135, pp.6-22, 2004	X	X	X	X		X	
K. Schellenberg und H.-J. Eulitz, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat", Bitumen 1, pp.2-8, 1999	X	X				X	
K. Schellenberg und M. Schneider, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuche", Strasse und Autobahn 3, pp.136-141, 2004	X	X	X			X	X
H.-M. Schiffner, "Test method for determining hydrated lime in asphalt", Cement-Lime-Gypsum International 56(6), pp.76-82, 2003						X	
M. Schneider, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und H.-M. Schiffner, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuch/Mischtechnik", Report 2/02/B012, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 2002	X		X		X	X	X
P. E. Sebaaly, E. Hitti and D. Weitzel, "Effectiveness of lime in hot-mix asphalt pavements", Transportation Research Record 1832, pp.34-41, 2003	X						X
P. E. Sebaaly, D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2006 ( <a href="http://www.lime.org/BENEFITSHYDRATEDLIME2006.pdf">http://www.lime.org/BENEFITSHYDRATEDLIME2006.pdf</a> )	X	X	X	X	X	X	X
P. E. Sebaaly, Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2007 ( <a href="http://www.lime.org/MoistureDamageHotMix.pdf">http://www.lime.org/MoistureDamageHotMix.pdf</a> )	X			X	X		X
P. E. Sebaaly, D. N. Little, E. Y. Hajj and A. Bhasin, "Impact of lime and liquid antistrip agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture", Transportation Research Record 1998, pp.65-67, 2007	X		X				X
P. E. Sebaaly, E. Hajj and E. Berger, "Impact of Lime and Liquid Antistrip on Moisture Sensitivity of HMA Mixtures", Proc. Int. Conf. on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens (Greece), pp. 651-661, June 2007	X		X		X		X
D. Sewing, "Verbesserung von Asphaltbelägen mit Kalkhydrat: Neue Ergebnisse aus dem Glarnerland", Strasse und Verkehr 5, pp.19-22, May 2006		X		X			X
D. Sewing, "Aktuelle Untersuchungen zur Verbesserung von Asphalt mit Kalkhydrat", Strasse und Verkehr 3, pp.31-33, March 2008		X		X			X
M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Four variables that affect the Performance of Lime in Asphalt-Aggregate Mixtures", Transportation Research Record 1115, pp.12-22, 1987	X		X				
M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Effect of lime on asphalt concrete performance", Proc. American Soc. Civil Engineers Materials Congress, pp.921-930, August 1990	X		X				X
M. Stroup-Gardiner and D. Newcomb, "Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives", Transportation Research Record 1269, pp.56-68, 1990	X		X				
K. Stuart, Moisture Damage in Asphalt Mixtures – A State-of-the-Art Report, Report FHWA-RD-90-019, MacLean (Virginia, USA): Federal Highway Administration, 1990 ( <a href="http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013679.pdf">http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013679.pdf</a> )	X						X
Technische Prüfvorshriften für Gesteinskörnungen im Strassenbau, Teil 3.9, Bestimmung des Calciumhydroxidgehaltes in Mischfüllern, Ausgabe 2008						X	
Transportation Research Board, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar - San Diego February 2003, Miscellaneous Report, Washington (District of Columbia, USA): Transportation Research Board, 2003	X						X



Bibliografia	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
D. G. Tunnicliff, "Binding effect of mineral filler", Proc Association Asphalt Paving Technologists 36 pp.114-154, 1967						X	
J. T. Van der Zwan, T. Goeman, H. J. A. J. Gruis, J. H. Swart and R. H. Oldenburger, "Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: State of the art review", Transportation Research Record 1265, pp.95-110, 1990							X
S. Vansteenkiste and A. Vanelstraete, "Properties of fillers : relationship with laboratory performance in hot mix asphalt", J. Association Asphalt Paving Technologists 77, pp.361-398, 2008						X	
A. Verhasselt, F. Verhelst, A. Sainton, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Proc. 19 <sup>ème</sup> Congrès Belge de la Route, Genval, Sept. 2001		X					
A. Verhasselt and D. Puiatti, "Effect of hydrated lime on ageing behaviour of bituminous mastics", Proc. 3 <sup>rd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, vol.1, paper 108, pp.746-756, 2004		X				X	
J. L. M. Voskuilen and J. M. M. Molenaar, "Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate", Proc. 1 <sup>st</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.078, 1996						X	
J. L. M. Voskuilen and P. N. W. Verhoef, "Causes of premature ravelling failure in porous asphalt", Proc. RILEM symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, pp.191-197, 2003							X
B. Vural Kok and M. Yilmaz, "The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", Construction Building Materials 23, pp.1999-2006, 2009	X		X				
M. L. Wisneski, J. L. Chaffin, R. R. Davison, J. A. Bullin and C. J. Glover, "Use of lime in recycling asphalt", Transportation Research Record 1535, pp.117-123, 1996		X					
M. W. Witzcak and J. Bari, Development of a Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures, Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University, 2004 ( <a href="http://www.lime.org/Publications/MstrCurve.pdf">http://www.lime.org/Publications/MstrCurve.pdf</a> )			X				
J. P. Wortelboer, H. J. Hoppen, G. Ramond and M. Pastor, "Rheological properties of bitumen/filler mixtures", Proc. 1 <sup>st</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.079, 1996						X	





# Bibliografia

- [1] E. Love, Pavements and roads; their construction and maintenance, New York (New York, USA): Engineering Building Record, 1890
- [2] T. W. Kennedy, Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures, National Lime Association Bulletin 325, 1984
- [3] D. McNichols, Paving the Way: Asphalt in America, Lanham (Maryland, USA): National Asphalt Pavement Association, 2005
- [4] R. S. Boynton, Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 2<sup>nd</sup> ed., New York (New York, USA): Wiley-Interscience, 1980
- [5] C. Richardson, The Modern Asphalt Pavement, 2<sup>nd</sup> ed., New York: Wiley; 1910
- [6] Asphalt Institute, The Asphalt Handbook, Lexington (Kentucky, USA): Asphalt Institute, 1947
- [7] M. Duriez et J. Arrambide, Liantes Hydrocarbonés, Paris (France): Dunod, 1954
- [8] R. G. Hicks, Moisture Damage in Asphalt Concrete, NCHRP Synthesis of Highway Practice 175, Washington (District of Columbia, USA): Transportation Research Board, 1991
- [9] P. S. Kandhal and I. J. Rickards, "Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories", J. Association Asphalt Paving Technologists 70, pp.301-349, 2001
- [10] R. G. Hicks and T. V. Scholz, Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt, 3 vol., Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 ([http://www.lime.org/LCCA/LCCA\\_Vol\\_I.pdf](http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_I.pdf), [http://www.lime.org/LCCA/LCCA\\_Vol\\_II.pdf](http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_II.pdf), [http://www.lime.org/LCCA/LCCA\\_Vol\\_III.pdf](http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_III.pdf))
- [11] D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2001 (<http://www.lime.org/ABenefit.pdf>)
- [12] P. E. Sebaaly, D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2006 (<http://www.lime.org/BENEFITSHYDRATEDLIME2006.pdf>)
- [13] D. N. Little and J. C. Petersen, "Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited, J. Materials in Civil Engineering 17(2), pp.207-218, 2005
- [14] P. E. Sebaaly, Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2007 (<http://www.lime.org/MoistureDamageHotMix.pdf>)
- [15] C. Raynaud, "L'ajout de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux", BTP Matériaux n°22, pp.42-43, oct. 2009
- [16] CROW, Deelhoofdstuk 31.2 Asfaltverhardingen, Ede (The Netherlands): CROW, 2007
- [17] J. L. M. Voskuilen and P. N. W. Verhoef, "Causes of premature ravelling failure in porous asphalt", Proc. RILEM symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, pp.191-197, 2003
- [18] E. T. Hagos, A. A. A. Molenaar and M. F. C. Van de Ven, "Chemical characterization of laboratory and field bitumen aging in Porous Asphalt Concrete", Proc. 7<sup>th</sup> Int. RILEM Symposium Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Rhodes, Greece, May 2009
- [19] European Committee for Standardization, EN 459-1: Building Lime. Part. 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2001
- [20] M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Four variables that affect the Performance of Lime in Asphalt-Aggregate Mixtures", Transportation Research Record 1115, pp.12-22, 1987
- [21] M. Stroup-Gardiner and D. Newcomb, "Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives", Transportation Research Record 1269, pp.56-68, 1990
- [22] J. C. Petersen, H. Plancher and P. M. Harnsberger, "Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.632-653, 1987
- [23] A. Sainton, D. Puiatti et D. Walter, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Revue Générale des Routes et Aérodrômes 770, pp.3-10, 1999
- [24] European Committee for Standardization, EN 459-2: Building Lime. Part. 2: Test Methods, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2001
- [25] European Committee for Standardization, EN 13108-1 through 7: Bituminous Mixtures – Material Specifications, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2006
- [26] European Committee for Standardization, EN 13043: Aggregates for Bituminous Mixtures and Surface Treatments for Roads, Airfields and other Trafficked Areas, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2002
- [27] European Committee for Standardization, EN 1097-4: Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 4: Determination of the Voids of Dry Compacted Filler, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 1999
- [28] P. J. Rigden, "The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler binder systems in relation to filler characteristics", J. Soc. Chem. Industry 66, pp.299-309, 1947
- [29] M. Schneider, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und H.-M. Schifflner, "Verbesserung von Asphalteeigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuch/Mischtechnik", Report 2/02/B012, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 2002
- [30] S. Vansteenkiste and A. Vanelstraete, "Properties of fillers: relationship with laboratory performance in hot mix asphalt", J. Association Asphalt Paving Technologists 77, pp. 361-398, 2008

- [31] W. Grabowski, J. Wilanowicz and T. Sobol, "Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime", Proc. 6<sup>th</sup> International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino (Italy), paper 78, July 2009
- [32] A. Sampedro Rodriguez y J. Gallego Medina, "De cal y carreteras...", Carreteras 135, pp.6-22, 2004
- [33] R. Lackner, M. Spiegl, R. Blab and J. Eberhardsteiner, "Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? Arguments from multi-scale analysis", J. Materials in Civil Engineering 17(5), pp.485-491, 2005
- [34] D. Lesueur, S. Guédon-Dubied, A. Le Roux, L. Odie, C. Leroux, C. Such, J. J. Potti and J. F. Castilla, "Characterization of the reactivity of road aggregates with respect to bituminous emulsions 1: Petrographic analysis", Bull. Labo. Ponts et Chaussées 246-247, 5-18, 2003 (available in both English and French from <http://www.lcpc.fr/fr/sources/callistee/iframe.php>)
- [35] J. L. M. Voskuilen and J. M. M. Molenaar, "Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate", Proc. 1<sup>st</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.078, 1996
- [36] European Committee for Standardization, EN 13179-1: Tests for Filler Aggregate Used in Bituminous Mixtures -Part 1: Delta Ring and Ball Test, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2000
- [37] P. Cramer, G. Herz und M. Radenberg, "Kalkhydrat: Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels", Asphalt 6, pp.17-25, 2001
- [38] K. Schellenberg und H.-J. Eulitz, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat", Bitumen 1, pp.2-8, 1999
- [39] H.-J. Eulitz, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und S.-O. Schmidt, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat", Report 2/98/B005, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 1998
- [40] European Committee for Standardization, EN 13179-2: Tests for Filler Aggregate Used in Bituminous Mixtures - Part 2: Bitumen Number, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2000
- [41] European Committee for Standardization, EN 1097-3: Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 1998
- [42] European Committee for Standardization, EN 933-9: Tests for geometrical properties of aggregates. Part 9: Assessment of fines. Methylene Blue Test, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2009
- [43] European Committee for Standardization, EN 196-6: Methods of Testing Cement. Part 6: Determination of Fineness, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2010
- [44] S. Caro, E. Masad, A. Bhasin and D. N. Little, "Moisture susceptibility of asphalt mixtures. Part 1: Mechanisms", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.81-98, 2008 and "Moisture susceptibility of asphalt mixtures. Part 2: Characterisation and modelling", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.99-114, 2008
- [45] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Catalogue des Dégradations de Surface des Chaussées, Méthode d'Essai n°52, Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1998
- [46] M. Duriez et J. Arrambide, Nouveau Traité de Matériaux de Construction, Tome 3, 2<sup>nd</sup> Ed., Paris (France): Dunod; 1962
- [47] N. Kringos, A. Scarpas, C. Kasbergen and P. Selvadurai, "Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes. Part 1: Governing processes and formulations", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.115-128, 2008 and N. Kringos, A. Scarpas, A. Copeland and J. Youtcheff, "Modelling of combined physicalmechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes. Part 2: Moisture susceptibility parameters", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.129-151, 2008
- [48] D. I. Hanson, R. E. Graves and E. R. Brown, "Laboratory evaluation of the addition of lime treated sand to hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1469, pp. 34-42, 1994
- [49] P. Hao and Y. Hachiya, "Moisture susceptibility of asphalt mixture and effectiveness of anti-stripping additives", Proc. Japan Soc. Civil Engineers 61(746), pp.265-273, 2003
- [50] T. W. Kennedy and W. V. Ping, "An evaluation of effectiveness of antistripping additives in protecting asphalt mixtures from moisture damage", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 60, pp.230-263, 1991
- [51] T. W. Kennedy, F. L. Roberts and K. W. Lee, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 51, pp.327-341, 1982
- [52] G. W. Maupin Jr, Effectiveness of Antistripping Additives in the Field, Report VTRC 96-R5, Charlottesville (Virginia, USA): Virginia Transportation Research Council, 1995 ([http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online\\_reports/pdf/96-r5.pdf](http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/96-r5.pdf))
- [53] M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Effect of lime on asphalt concrete performance", Proc. American Soc. Civil Engineers Materials Congress, pp.921-930, August 1990
- [54] P. E. Sebaaly, E. Hitti and D. Weitzel, "Effectiveness of lime in hot-mix asphalt pavements", Transportation Research Record 1832, pp.34-41, 2003
- [55] P. Jaskula, "The effectiveness of hydrated lime as asphalt concrete additive", Foundations of Civil and Environmental Engineering 10, pp.99-109, 2007 ([http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2007.10/full/fcee\\_2007-10\\_099-109\\_the\\_effectiveness\\_of\\_hydrated\\_lime.pdf](http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2007.10/full/fcee_2007-10_099-109_the_effectiveness_of_hydrated_lime.pdf))
- [56] T. Aschenbrener and N. Far, Influence of Compaction temperature and Anti-Stripping Treatment on the Results from the Hamburg Wheel-Tracking Device, Report CDOT/ DTD/R-94-9, Denver (Colorado, USA): Colorado Department of Transportation, 1994
- [57] L. N. Mohammad, S. Saadeh, M. Kabir and A. Othman, "Mechanistic properties of hot mix asphalt mixtures containing hydrated lime", Transportation Research Record 2051, pp. 49-63, 2008

- [58] R. Maldonado and D. Fee, "Bitumen modification with polyphosphoric acid", Proc. 4<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-020, 2008
- [59] R. P. Izzo and M. Tahmoressi, "Use of the Hamburg wheel-tracking device for evaluating moisture susceptibility of hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1681, pp. 76-85, 1999
- [60] Y.-R. Kim, J. Sudo Lutif, A. Bhasin and D. N. Little, "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing", J. Materials Civil Engineering 20(10), pp.659-667, 2008
- [61] K. Pickering, P. E. Sebaaly, M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Evaluation of New generation of antistripping additives", Transportation Research Record 1342, pp.26-34, 1992
- [62] M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluating the performance of lime in hot-mix asphalt mixtures", Proc. American Soc Civil Engineers Meeting on Airfield and Highway Pavements, pp.614-624, 2006
- [63] P. Jaskula and J. Judycki, "Evaluation of effectiveness of hydrated lime additive in protecting asphalt concrete against water and frost", Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Environmental Engineering, Vilnius, May 2005
- [64] P. E. Sebaaly, D. N. Little, E. Y. Hajj and A. Bhasin, "Impact of lime and liquid antistripping agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture", Transportation Research Record 1998, pp.65-67, 2007
- [65] S. C. Huang, R. E. Robertson, J. F. Branthaver and J. C. Petersen, "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage", J. Materials in Civil Engineering 17(6), pp.711-718, 2005
- [66] T. W. Kennedy, N. Turnham, J. A. Epps, C. W. Smoot, F. M. Young, J. W. Button and C. D. Zeigler, "Evaluation of methods for field applications of lime to asphalt concrete mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 52, pp.508-534, 1983
- [67] T. W. Kennedy, F. L. Roberts and K. W. Lee, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 51, pp.327-341, 1982
- [68] B. Brûlé, F. Le Bourlot et B. Simaillaud, « Enrobés drainants: Optimisation de la composition des liants et des mastics », Proc. 5<sup>th</sup> Eurobitume Congress, Stockholm, paper 3.20, pp.591-595, June 1993
- [69] P. C. Hopman, Hydroxide in Filler, Netherlands Pavement Consulting Report n°97316, Utrecht (The Netherlands): Netherlands Pavement Consulting, 1998
- [70] C. V. Chachas, W. J. Liddle, D. E. Peterson and M. L. Wiley, Use of hydrated lime in bituminous mixtures to decrease hardening of the asphalt cement, Report PB 213 170, Salt Lake City(Utah, USA): Utah State Highway Department, 1971
- [71] L. Johansson, Bitumen ageing and hydrated lime, Ph.D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden); 1998
- [72] H. Plancher, E. L. Green and J. C. Petersen, "Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime – a mechanistic study", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 45, pp.1-24, 1976
- [73] A. Verhasselt, F. Verhelst, A. Sainton, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Proc. 19<sup>ème</sup> Congrès Belge de la Route, Genval, Sept. 2001
- [74] A. Verhasselt and D. Puiatti, "Effect of hydrated lime on ageing behaviour of bituminous mastics", Proc. 3<sup>rd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, vol.1, paper 108, pp.746-756, 2004
- [75] M. L. Wisneski, J. L. Chaffin, R. R. Davison, J. A. Bullin and C. J. Glover, "Use of lime in recycling asphalt", Transportation Research Record 1535, pp.117-123, 1996
- [76] L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "A study of rheological properties of lime treated paving asphalts aged at 60°C in a pressure aging vessel", Fuel Science Technology Int. 13(10), pp.1317-1343, 1995
- [77] S.-C. Huang, J. C. Petersen, R. E. Robertson and J. F. Branthaver, "Effect of hydrated lime on long-term oxidative aging characteristics of asphalt", Transportation Research Report 1810, pp.17-24, 2002
- [78] A. C. Edler, M. M. Hattingh, V. P. Servas and C. P. Marais, "Use of aging tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 54, pp.118-139, 1985
- [79] J. W. H. Oliver, "Results of road trials of two asphalt antioxidants", Transportation Research Record 1488, pp.96-102, 1995
- [80] L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "The influence of metal-containing compounds on enhancement and inhibition of asphalt oxidation", Fuel Science Technology Int. 14(8), pp.1143-1159, 1996
- [81] D. Lesueur and D. N. Little, "Effect of hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen", Transportation Research Record 1661, pp.93-105, 1999
- [82] R. Miro Recasens, A. Martinez, F. Perez Jimenez and H. Bianchetto, "Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures", Transportation Research Record 1901, pp.10-17, 2005
- [83] Y. Decoene, "Enrobés bitumineux perméables, expériences récentes belges", La Technique Routière 2, pp.20-40, 1983
- [84] B. Bruce, "Asphalt as a variable – Big Timber test sections", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.688-710, 1987
- [85] K. Schellenberg und M. Schneider, "Verbesserung von Asphalteeigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Paxisversuche", Strasse und Autobahn 3, pp.136-141, 2004
- [86] D. Sewing, "Verbesserung von Asphaltbelägen mit Kalkhydrat: Neue Ergebnisse aus dem Glarnerland", Strasse und Verkehr 5, pp.19-22, May 2006
- [87] D. Sewing, "Aktuelle Untersuchungen zur Verbesserung von Asphalt mit Kalkhydrat", Strasse und Verkehr 3, pp.31-33, March 2008
- [88] H. D. Bianchetto y A. I. Asurmendi, "Influencia de la temperatura de fabricación y del contenido de cal en el envejecimiento de mezclas bituminosas: Un caso real", Carreteras 16, pp.54-64, 2008
- [89] D. G. Tunnicliff, "Binding effect of mineral filler", Proc Association Asphalt Paving Technologists 36 pp.114-154, 1967

- [90] Y.-R. Kim, D. N. Little, I. Song, "Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental characteristics", *Transportation Research Record* 1832, pp.1-8, 2003
- [91] Y.-R. Kim and D. N. Little, "Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics", *J. Materials in Civil Engineering* 16(2), pp.122-132, 2004
- [92] European Committee for Standardization, EN 12591: Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2009
- [93] W. Heukelom and P. W. O. Wijga, "Viscosity of dispersions as governed by concentration and rate of shear", *Proc. Association Asphalt Paving Technologists* 40, pp.418-435, 1971
- [94] D. Lesueur, D. L. Dekker and J.-P. Planche, "Comparison of carbon black from pyrolyzed tires to other fillers as asphalt rheology modifiers", *Transportation Research Record* 1515, pp.47-55, 1995
- [95] D. Lesueur, "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification", *Advances Colloid Interface Science* 145, pp.42-82, 2009
- [96] L. S. Johansson and U. Isacson, "Effect of filler on low temperature physical hardening of bitumen", *Construction Building Materials* 12 pp.463-470, 1998
- [97] J. P. Wortelboer, H. J. Hoppen, G. Ramond and M. Pastor, "Rheological properties of bitumen/filler mixtures", *Proc. 1<sup>st</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress*, paper 4.079, 1996
- [98] P. C. Hopman, A. Vanelstraete, A. Verhasselt and D. Walter, "Effects of hydrated lime on the behaviour of mastics and on their construction ageing", *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Durable and Safe Road Pavements*, Kielce, vol. 1, pp.59-68, May 1999
- [99] M. J. Khattak and V. Kyatham, "Viscoelastic behavior of hydrated lime-modified asphalt matrix and hot-mix asphalt under moisture damage conditions", *Transportation Research Record* 2057, pp.64-74, 2008
- [100] J. Piłat, P. Radziszewski and M. Kalabińska, "The analysis of visco-elastic properties of mineral-asphalt mixes with lime and rubber powder", *Proc. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress*, vol.1, paper 0036, pp.648-654, 2000
- [101] S. Timoshenko, *Strength of Materials*, 2 vol., 3<sup>rd</sup> edition, Malabar (Florida, USA): Krieger Publishing Company, 1976
- [102] L. Francken Ed., *Bituminous Binders and Mixes*, RILEM report 17, London (UK): E & FN Spon, 1998
- [103] European Committee for Standardization, EN 12697-26: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 26: Stiffness, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2004
- [104] M. W. Witczak and J. Bari, *Development of a Master Curve (E\*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures*, Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University, 2004 (<http://www.lime.org/Publications/MstrCurve.pdf>)
- [105] J. Bari and M. W. Witczak, "Evaluation of the Effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of Hot-Mix Asphalt: Use with the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", *Transportation Research Record* 1929, pp.10-19, 2005
- [106] F. T. Sacramento Aragao, Y.-R. Kim and J. Lee, *Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska*, Report to NDOR Research Project Number P579, Lincoln (Nebraska, USA): University of Nebraska Lincoln, 2008 (<http://www.nlc.state.ne.us/epubs/R6000/B276-2008.pdf>)
- [107] M. Ghouse Baig and H. I. Al-Abdul Wahhab, "Mechanistic evaluation of hedmanite and lime modified asphalt concrete mixtures", *J. Materials in Civil Engineering* 10(3), pp.153-160, 1998
- [108] L. N. Mohammad, C. Abadie, R. Gokmen and A. J. Puppala, "Mechanistic evaluation of hydrated lime in hot-mix asphalt mixtures", *Transportation Research Record* 1723, pp.26-36, 2000
- [109] C. Berthelot, A. Anthony and C. Raducanu, "Mechanistic characterization of antistripping additives in Saskatchewan asphalt mixes", *Proc. Annual Conf. Transportation Association Canada*, Calgary, Sept. 2005
- [110] J. F. Huang, S. P. Wu, L. Pan and Y. Xiao, "Effects of hydrated lime on the dynamic properties of gneiss asphalt mixtures", *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM)*, Huangshan (China), pp.1057-1060, 2008
- [111] B. Vural Kok and M. Yilmaz, "The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", *Construction Building Materials* 23, pp.1999-2006, 2009
- [112] R. A. Jimenez, "Methods and treatments to control debonding", *Proc. Association Asphalt Paving Technologists* 59, pp.94-137, 1990
- [113] P.E. Sebaaly, E. Hajj and E. Berger, "Impact of Lime and Liquid Antistrip on Moisture Sensitivity of HMA Mixtures", *Proc. Int. Conf. on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials*, Athens (Greece), pp. 651-661, June 2007
- [114] M. Ameri and M. Aboutalebi Esfahani, "Evaluation and performance of hydrated lime and limestone powder in porous asphalt", *Road Materials Pavement Design* 9(4), pp.651-664, 2008
- [115] C. Gorkem and B. Sengoz, "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", *Construction Building Materials* 23, pp.2227-2236, 2009
- [116] J. B. Sousa, J. Craus and C. L. Monismith, *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*, SHRP Report A/IR 91-104, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1991 (<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-318.pdf>)
- [117] M. Ould-Henia, M. Rodriguez et A.-G. Dumont, *Élaboration d'une Méthode Prédictive de l'Orniérage des Revêtements Bitumineux*, Lausanne (Switzerland): Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004 (<http://infoscience.epfl.ch/record/116262/files/1081-1998-074-Rap-final.pdf>)
- [118] European Committee for Standardization, EN 12697-22: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 22: Wheel Tracking, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2003

- [119] O. K. Kim, C. A. Bell and R. G. Hicks, "The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures", ASTM Special Technical Publication 899, Philadelphia (Pennsylvania, USA): American Society for Testing and Materials, pp.51-72, 1985
- [120] American Association of State Highway Officials, AASHO Road Test Report 5, Highway Research Board Special Report 61E, Publication 954, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1962
- [121] LCPC-SETRA, French Design Manuel for Pavement Structures, Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1997
- [122] FEHRL-ELLPAG, Making Best Use of Long-Life Pavements in Europe – Phase 1: A Guide to the Use of Long-Life Fully-Flexible Pavements, Brussels (Belgium): Forum of European National Highway Research Laboratories, 2004
- [123] European Committee for Standardization, EN 12697-24: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 24: Resistance to Fatigue, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2004
- [124] S. Raghava Chari and K. A. Jacob, "Influence of lime and stone dust fillers on fatigue properties of bituminous concrete mixes", Highway Research Bulletin 23, pp.19-32, 1984
- [125] Groupe National Bitume, Etude de la Fissuration par le Haut des Bétons Bitumineux, Rapport de Recherche CR22, Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1999
- [126] B. Ferne, "Long-life pavements: a European study by ELLPAG", Int. J. Pavement Engineering 7, pp.91-100, 2006
- [127] University of California at Berkeley, Oregon State University and Austin Research Engineers, Accelerated Performance-Related Tests for Asphalt Aggregate Mixes and Their Use in Mix Design and Analysis Systems, SHRP Report A-417, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1994 (<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-417.pdf>)
- [128] R. Blab und B. Hofko, Eignung von mit Kalkhydrat und polymermodifiziertem Bindemittel hergestelltem Asphaltmischgut für hoch belastete Verkehrsflächen, Report for Project 0727E, Wien (Austria): Technische Universität Wien, 2008
- [129] PIARC (World Road Association), Use of Modified Bituminous Binders, Special Bitumens and Bitumens with Additives in Road Pavements, Routes/Roads 303, 1999 (also available from Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) [130]
- [131] M. Buchta und C. Kunesch, "Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat - Ergebnisse aus der Praxis", Gestrata Journal 111, pp.7-12, 2005 ([http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal\\_111.pdf](http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_111.pdf))
- [132] C. Kunesch und S. Neumann, "Kalkhydrat – Mischgut für das hochrangige Strassennetz", Gestrata Journal 126, pp.20-24, 2009 ([http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal\\_126.pdf](http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_126.pdf))
- [133] G. Orange, D. Dupuis, J.-V. Martin, F. Farcas, C. Such and B. Marcant, "Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: properties–microstructure relationship", Proc. 3<sup>rd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, vol.1, pp.733-745, 2004
- [134] T. S. Arnold, S. P. Needham and J. Youtcheff, "The Use of Phosphoric Acid as a Modifier for Hot Mix Asphalt", Proc. 88<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, paper 09-1564, 2009
- [135] G. Baumgardner, J.-V. Martin, R. B. Powell and P. Turner, "Polyphosphoric acid and styrene-butadiene-styrene block copolymer modified asphalt: Evaluation of paved section at the NCAT test track built in 2000 and 2003", Proc. 4<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-029, 2008
- [136] W. Ricardo De Grande, A. Paula Furlan, A. Carlos Gigante, L. M. Gutierrez Klinsky and G. T. Pessa Fabbri, "Efeitos da cal hidratada e do acido polifosforico na suscetibilidade termica de misturas asfalticas densas", Proc. 23<sup>rd</sup> Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes Congress, paper AC381, 2009
- [137] K. Stuart, Moisture Damage in Asphalt Mixtures – A State-of-the-Art Report, Report FHWA-RD-90-019, MacLean (Virginia, USA): Federal Highway Administration, 1990 (<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013679.pdf>)
- [138] C. W. Curtis, K. Ensley and J. Epps, Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions including Adhesion and Absorption, SHRP Report A-341, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1993 (<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-341.pdf>)
- [139] I. Ishai and J. Craus, "Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228–258, 1977
- [140] J. Gallego Medina, "Efectos del hidrato de cal como aditivo de mezclas bituminosas", Carreteras 123, pp.68-80, 2002
- [141] J. Blazek, G. Sebor, D. Maxa, M. Ajib and H. Paniagua, "Effect of hydrated lime addition on properties of asphalt", Petroleum and Coal, 42(1), pp.41-45, 2000
- [142] U. Bagampadde, U. Isacson and B. M. Kiggundu, "Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixes", Road Mater Pavement Design 5, pp.7–43, 2004
- [143] D. N. Little, Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Dubuque (Iowa, USA): Kendall/Hunt Publishing Company, 1995
- [144] F. Durrieu, « Influence des produits polaires des bitumes routiers sur leurs propriétés interfaciales ». Bull Liaison Lab Ponts Chaussées, Spécial V, pp.37-43, 1977
- [145] National Lime Association, How to Add Hydrated Lime to Asphalt – An Overview of Current Methods, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 (<http://www.lime.org/howtoadd.pdf>)
- [146] J. W. Button, "Maximizing the Beneficial Effects of Lime in Asphalt Paving Mixtures", ASTM STP 899 pp.134-146, 1984
- [147] M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluation of Moisture Sensitivity and Performance of Lime in Hot-Mix Asphalt: Resilient Modulus, Tensile Strength, and Simple Shear Tests", Transportation Research Record 1832 pp.9-16, 2003
- [148] A. L. Bock, D. Hartmann, J. Budny, L. P. Specht e J. A. P. Ceratti, "Estudio laboratoria sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfaltico", Teoria e Pratica na Engenharia Civil 14, pp.59-69, 2009

- [149] M. I. Al-Jarallah and K. W. Lee, "Evaluation of hydrated lime as an antistripping additive for asphalt mixtures", J. Eng. Sci. King Saud Univ. 13(1) pp.65-83, 1987
- [150] Transportation Research Board, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar - San Diego February 2003, Miscellaneous Report, Washington (District of Columbia, USA): Transportation Research Board, 2003
- [151] F. Mücke und F. Stolz, "Möglichkeit zur verbesserung von Asphalteigenschaften", Asphalt, Heft 7, 2004
- [152] G. Bordonado, « Une expérience d'enrobés drainants sur l'autoroute A1 », Revue Générale des Routes et Aéroports 625, pp.47-50, décembre 1985
- [153] A. Sainton, « Les aspects techniques des enrobés drainants au bitume caoutchouc Flexochape – Procédé Drainochape », Revue Générale des Routes et Aéroports 618, pp.67-70, avril 1985
- [154] J. T. Van der Zwan, T. Goeman, H. J. A. J. Gruis, J. H. Swart and R. H. Oldenburger, "Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: State of the art review", Transportation Research Record 1265, pp.95-110, 1990
- [155] H.-M. Schiffner, "Test method for determining hydrated lime in asphalt", Cement-Lime-Gypsum International 56(6), pp.76-82, 2003
- [156] Technische Prüfvorshriften für Gesteinskörnungen im Strassenbau, Teil 3.9, Bestimmung des Calciumhydroxid-gehaltes in Mischfüllern, Ausgabe 2008
- [157] European Committee for Standardization, EN 12697-1: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 1: Soluble Binder Content, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2005
- [158] T. S. Arnold, J. Rozario and J. Youtcheff, "New lime test for hot mix asphalt unveiled", Public Roads 70(5), March/April 2007
- [159] T. S. Arnold, M. Rozario-Ranasinghe and J. Youtcheff, "Determination of lime in hot mix asphalt", Transportation Research Record 1962, pp.113-120, 2006







CAGEMA – Associazione dell'Industria Italiana  
della Calce, del Gesso e delle Malte  
00185 Roma, Via G. Amendola, 46  
Telefono 06.54210198, Fax 06.5921533  
info@cagema.it



EuLA – European Lime Association  
Rue des Deux Eglises 26, B-1000 Brussels, Belgium  
Tel. +32 2 210 44 10, Fax +32 2 210 44 29  
info@eula.eu, www.eula.eu

