

J 2=&\$&< &2F!@:#@O!C/=/@=&!)F!#!:/#BSP&:BC!@A#BB/\$+/!)\$!E)F2#B!)\$FN/@=&!)\$9:#F=:2@=2:/F!
C2/!=&!E#:)&2F! <#=/:)#BF'!F2:9#@/!@&#=\$+F'!#SC!@A#\$+)\$+!B)+A=#SC!P/#A/!:@&!)\$&F!_ `R!7=F!
#NN:&#@A/F!#:/!<#)\$B4!3#F/C!&!)\$C2@=)E/!F2N/:E)F/C!B/#:\$)\$+!PA)@A!:/O2):/F!<#\$4!B#3/B/C!
/Q#<NB/F!9&:!
<&C/B!:=:#)\$)\$+!_G'R!TA)F!:/F2B=F!)\$!#!=</S@&!)\$F2<)\$+!#SC!B#3&:S)\$=-/)\$F)E/!)<#+/!
#@O2)F)=&!)\$N:&@/FFR!JB=A&2+A!F2N/:E)F/C!:=:#\$F9/!:B/#:\$)\$+!_I`!_H!P#F!/QN/@=/C!&!)F&BE/!=A)F!
)FF2/'!)=-/\$CF! =&! 3/! &E/:(9)=)\$+! P)=A! E/:4! B)<)/C! B#3/B/C! /Q#<NB/F! W)R/R'! 2\$C/:! 9/PSFA&=!
&!)\$C)=&!)\$FXX! 8 /#\$PA)B/'! =A/:(/!)F!B)=B/!: /F/#:@A!#3&2!#NN:&N:#=#/C!<#)\$!#C#N)=&!)\$9&:!:@:#@O!
C/=/@=&!)\$R!TA/:/9&:/'! =A)F!P&:O!#<F!&!)\$N:&N&F/!#\$/!99)@/)\$=:9:#</P&:O!#SC!#NN:&#@A!9&:!9/PS
FA&=!:@:#@O!C/=/@=&!)\$!PA)@A!F!3/\$/9)@)#!&!)\$N:#@=#B!)\$FN/@=&!)\$2\$C/:!@&!)\$<NB/Q!@):@2<F=#\$@/F!
P)=A!P/#OB4!F2N/:E)F/C!)\$9&: <#=&!)\$R! !

TA)F!P&:O!N:&N&F/F!#)\$!#NN:&#@A!3#F/C!&!)\$! =A/!)<N:&E/C!U: &=&4N)@#B!V/=P&:O!WU: &=&V/=X!9&:!
@:#@O!C/=/@=&!)\$2\$C/:!9/PSFA&=!)\$&!)\$C)=&!)\$F'!@&!)\$F)F)=)\$+!&!)\$!@:#FFSC&<#)\$!9/#=2:/!/\$@&C/:!#SC!#!
B)\$/#:#!@B#FF)9)/:R!TA/!U: &=&4N)@#B!V/=P&:O!F!)<N:&E/C!P)=A! /<3/CC)\$+!\$&: <#B)Z#)=&!)\$!#SC!#!
B)\$/#:#!@B#FF)9)/:R!TA/!9/#=2:/! /<3/CC)\$+!)F!#@A)/E/C!34!C&<#)\$!#C#N)=&!)\$! =A:&2+A!N:/S=:#)\$/C!
C/NSB/#:\$)\$+! <&C/BF!3#F/C!&!)\$!7<#+/V/=R!Y)99/:/)\$!C//N!\$/2:#B!\$/=P&:O!WYV VX!3#@O3&\$/F!
#:/!@&!)\$<N#:/C!)\$! =A/!/QN/):</\$=R!TA/!3)\$#4!@B#FF)9)@#)=&!)\$F!#@A)/E/C!3#F/C!&!)\$!:=:#\$FC2@=&!)\$!
=A:&2+A!#B)\$/#:#!@B#FF)9)/:!2F)\$+!>2@B)C/#\$!C)F=#\$@/F!3/=P//)\$! =A/!O2/:4!)/<#)\$C!N: &=&4N/F!)\$!
=A/!F2NN&:=\$/=\$!#SC! =A/!N/:9&: <#\$@/!@#13/!92:=A/!)<N:&E/C! =A:&2+A!9)\$/\$=2)\$+R! !

TA/!#NN:&#@A!)F!E#B)C#=/C!&!)\$!#N23B)@!)<#+/!F/=!_M`!9&:#!2=&<#=&!)\$3:)C+!/!@:#@O!C/=/@=&!)\$R!J!
C/C)@#=/C!?VV!#:@A)/@=2:/!9&:!=A)F!C#=#F/=#!@#)\$#@A)/E/!#)\$#@@2:#@4!&9! [arIb \ !&!)\$! =A/! =F/!F/=!
3#F/C!&!)\$F2N/:E)F/C!B/#:\$)\$+!_M`R!TA/!/QN/):</\$=C/ <&!)\$F=:#=/F! =A#!=A/!C&<#)\$!#C#N)=&!)\$9:&<!
=A/!7<#+/V/=!)F!#\$/!99/=@)E/!P#4!9&:!:@:#@O!9/#=2:/! /<3/CC)\$+!#B=A&2+A! =A/!/:!#:\$!&!)\$FN/(@)9)@!
@:#@OS:/B#=/C! =#FOF!)\$! =A/! 7<#+/V/=R! TA/! N:/S=:#)\$/C! %&&+B/V/=! #SC! ; P)<ST:#\$F9&: </:!
3#@O3&\$/F!N/:9&: <#F! =A/!3/F!=P&!/ <3/CC)\$+!92\$@=&!)\$F'!#@A)/E)\$+!#! <#)\$!#@@2:#@4!&9!&E/!:
[H \ !#9=/:!)\$/\$=2)\$)\$+9&:!GSP#4!MSFA&=!:@:#@O!C/(\$=9)@#)=&!)\$!&!)\$! =A/! =F/!F/=!)\$PA)@A!F!@B&F/! =&!)\$ =A/!
F2N/:E)F/C!B/#:\$)\$+!N/:9&: <#\$@/R! !

12:=A/ :< &:/'! =A/!N:&N&F/C!#NN:&#@A!@#\$!3/!2=)B)Z/C!9&:!:@:#@O!C/=/@=&!)\$!3#F/C!&!)\$! =A/!FNB)=!)<#+/!
N#=@A/F! =&!)\$C)@#=#/! =A/!@:#@O!B&@#)=&!)\$!#:/#!'FO/B/ =&!)\$!#SC!C)/@=&!)\$R!TA/!:/#B!3:)C+!/!)\$FN/@=&!)\$!
)<#+/F!_ `!#:/!<NB&4/C!)\$! =A/!/QN/):</\$=#!#SC! =A/!/F2B=IC/ <&!)\$F=:#=/F! =A/!/Q@/BB!\$!#@#N#3)B)=4!
&9!9#F=!)<NB/ </\$=#)=&!)\$9&:!:@:#@O!C/=/@=&!)\$!P)=A!P/#OB4!F2N/:E)F/C!)\$9&: <#=&!)\$2\$C/:!N:#@=#B!
F@/\$#:)&FR! TA/! #NN:&#@A!)F! N:&<F)\$+! =&! 3/! C/E/B&N/C! 9&:! <2B=)SC/9/=@)C/=/@=&!)\$2F)\$+!
/)\$F/ <3B/!B/#:\$)\$+!#SC!:/+)&!)\$N:&N&F#BR! !

TA/! <&F! =F=:#)+A=9&:P#C! =#FO!)\$! @:#@O!)\$FN/@=&!)\$F! @:#@O!)C/(\$=9)@#)=&!)\$R/R'!C/=/: <)\$)\$+!
PA/ =A/!/:!#!@:#@O!/Q)F=F!)\$!#)\$!<#+/R!7=!)F!#!3)\$#4!@B#FF)9)@#)=&!)\$! =#FO!#SC!@#)\$!#B&F!3/!/Q=/C/C!&!

9&:!9/PSFA&=!@:#@O!C/=/@=)&\$R!TA/!&\$B4!:/B#=/C!&\$!/!)F!#\$!#=#:~)32=/S3#F/C!#NN:&#@A!N:&N&F/C!34!
5 2!/=!#BR!_ a`!9&:!9/PSFA&=!C#<#+/!@b#FF)9)@#-)&\$!A:&2+A!</=#SB/#:\$)\$+R! (&P/E/:'!A/!#NN:&#@A!
)F!F=)BB!3#F/C!&\$!/N)F&C

H!

!

!

1)+R! !U:&N&F/C!#NN:&#@A!#\$C!#:@A)=-/@=2:/!9&:!@:#@O!C/=/@=&#!

TA/!7<#+/V/!)F!2=)B)Z/C!#F!A/!F&2:@/!C&<#)\$R!TA/!9/#=2:/!/<3/CC)\$+!)F!#@A)/E/C!34!C&<#)\$!
#C#N=)&#!2F)\$+!=A/!N:/S=#)\$/C!Y,!3#@O3&\$&F/3#F/C!&#!A/!7<#+/V/!)#A/!:=A#\$/N)F&C)@!
=:#)\$+!)\$!A/!&:)+)\$#B!U:&=&V/=R!TA/!/9&:/!A/!#NN:&#@A!C&/F!\$&=!/O2):/#!@&BB/@=&#!&9!C/9/@=
)<#+/F!)\$!#CE#\$/!&!=:#)\$!#!F2N/:E)F/C!<&C/B!&:#!</=#B/#:\$/:R!TA/!U:&=&V/!)F!)<N:&E/C!
P)=A/!/<3/CC)\$+!\$&<#B)Z#=&#!#\$C!#B)\$/#:#!@B#FF)9)/:R!TA/!</#\$!E/@=&#!&9!F2NN&=:/<3/CC)\$+F!
)F!@&<N2=/C!#F!A/!N:&=&=4N/!9&:!/#@A!@B#FFR!!

TA/!:=#\$FC2@=)E/!)\$9/:/\$@/!)F!3#F/C!&#!A/!N:&=&=4N/F!#\$C!>2@B)C/#\$!C)F=#\$/!W>OR!IX!A:&2+A#!
B)\$/#:#!@B#FF)9)/:#!W>OR!HXR!(/:/'! **8# \$! 9&:!**3)\$#:4!@B#FF)9)@#-)&\$R! **9, z, !**:/N:/F/\$=F!>2@B)C/#\$!
C)F=#\$/F!3/=P//\$#!F2NN&=:/Q#<NB/!#\$C!/#@A!N:&=&=4N/R! ; **z:**!#\$C! **< z,**!#:/!N#:#</=:F!#\$C!
3)#F'!:/FN/@=)E/B4R!!

9# 9->?@A) # 8B @DAC)E

CF

M!

!

TA!/QN/)</\$=!F#=#F!P)=A!GSP#4! SFA&=#\$C!GSP#4!MSFA&=#B#FF)9)@#-)&\$FR!TA/!)<#+/!F)Z/!)F!
GGHfGGHR!TA/!g/FV/= d!)F!2=)B)Z/C!9&:!9/#=2:!/ / <3/CC)\$+R!7-F!N#:#</=:F!#:/!N:/S=#)\$/C!&\$!
7<#+/V/=R! 8 /#\$PA)B/!' =A/! A#:C@&C/C! </#\$! **N# ~~POST~~PORTU** #C! =A/! F=#C#:#C!
C/E)#-)&\$! **# ~~PS~~PS\$PS\$SU** C/;)E/C!F=#)F=)@#BB4!9:&<! =A/!7<#+/V/=!'#:/!#C&N=/C!9&:!
)<#+/!#:#\$F9&:<#=#&\$R!TA/!:/F2B=F!P)=A&2=!9)\$/S=2\$)\$+!#:/!FA&P\$!)\$!1)+R!IR!JF!@\$!3/!F//'\$!=A/!
</#\$!#@2:#@4!&9!GSP#4! SFA&=#B#FF)9)@#-)&\$)F!#:#2\$C!dL \ '!#\$C!GSP#4!MSFA&=#B#FF)9)@#-)/#@A!&E/!
[L \ !#@2:#@4!P)=A!#\$!)\$=/:02#:#B/!:#\$+!/W7 i gX!&9!H \ R!TA/!/QN/)</\$=!C/ <&\$F=#/F!A#=#A/!
#NN:#&@A!3#F/C!&\$!@:#FFSC&<#)\$!:#\$F9/!:B/#:\$)\$+!9:&<!7<#+/V/=!)F!#E#)B#3B/!9&:!9/P&SFA&=#!
@:#@O!)C/\$=9)@#-)&\$R!JF!GSP#4!MSFA&=#B#FF)9)@#-)&\$!N/!9&:<F!<2@A!3/=/:!=A#\$!GSP#4! SFA&=#!)=
)F!#C&N=/C!9&:92:=A/!:#3B#=#&\$!F=2C)/FR! !!

!

1)+R!G!GSP#4! SFA&=#\$C!GSP#4!MSFA&=#B#FF)9)@#-)&\$!N/!9&:<#\$@/!

TA!/QN/)</\$=!2F/F!C)99/!/\$=!N:/S=#)\$/C! YVV!3#@O3&\$/F!3#F/C!&\$!7<#+/V/=!9&:!9/#=2:!/ /<3/CC)\$+R!Y2/!&!?DYJ!</<&:4!B<)=#)&\$!A/!)<#+/!F)Z/!)F!:/C2@/C!&!dHf dHR!TA/!:/F2B=F!
#:/!FA&P\$!)\$!1)+RHR!JF!@\$!3/!F//'\$!C)99/!/\$=! /<3/CC)\$+!92\$@=#&\$!A#E/!#F)+\$)9)@#=#!)<N#=#!&\$!
N/!9&:< x < x < x <r/!/" < x < x < x =A/ /QN/)</\$=!

a!

!

C#=#F/=!_ `R!TA/!)<#+/!)F!9):F=!FNB)=!)\$&!N#=@A/F'!#F!

d!

!

F2@A!#F!F=#)\$F!#\$C!<#:OFR!TA/:/9&:/!=A/!\$/Q=!F=/N!&9!=A/!P&:O!)F!=-&!C/E/B&N!=A/!#NN:&#@A!&!=A/!
B/E/B!&9!<2B=)SC/9/@=!C/=/@=)&\$!#\$C!/\$A#\$@/!)=F!:&32F=\$/FFR!!

[!

!

_d! (R!12!YR! 8 /\$+'! .R! ,)!#\$C! "R! . #\$\$+'!k6:)C+/@:#@O!F/ <#\$\$=)@!F/+< /\$=#=)&\$!3#F/C!&\$!
)<N:&E/C!C//NB#3E!h1!'J Mar Sci Eng'!E&BR!['!\$&R!a'!GLG '!C&)]! LRII [Ln* <F/[LaLab R!